

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO MEDIANTE LA
IMPLEMENTACIÓN DE LAS CAJAS TANGENT FLOW EN UN POZO
REPRESENTATIVO DEL CAMPO PALAGUA QUE PRESENTA BLOQUEO POR
GAS**

**MARÍA ANGÉLICA MANCERA SÁNCHEZ
JAVIER CAMILO PIZA BARRIGA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C
2020**

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO MEDIANTE LA
IMPLEMENTACIÓN DE LAS CAJAS TANGENT FLOW EN UN POZO
REPRESENTATIVO DEL CAMPO PALAGUA QUE PRESENTA BLOQUEO POR
GAS**

**MARÍA ANGÉLICA MANCERA SÁNCHEZ
JAVIER CAMILO PIZA BARRIGA**

**Proyecto integral de para optar el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Director
VIVIANA ANDRANGO
Ingeniero de Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C
2020**

Nota de aceptación:

Ing. Adriangela Romero

Ing. Édinson Jiménez

Bogotá D.C., julio de 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD AMÉRICA

Presidente de la universidad y Rector del claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectoría Académica y de Investigaciones

Dra. MARIA CLAUDIA APONTE GONZALEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano General de la Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa de Ingeniería de Petróleos

Dr. JUAN CARLOS RODRIGUEZ

Las directivas de la Fundación Universidad de América y el cuerpo docente no son responsables por los criterios evaluados e ideas expuestas en el presente documento ya que estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Desde lo más profundo de mi corazón, dedico este trabajo de grado a Dios y a la memoria de los angelitos que desde el cielo cuidan de mí, mis abuelitos: María Albertina y Juan Pablo Sánchez; también a la memoria de mi amigo Leo Higuera, en donde quiera que esté.

Gracias a mi papá, Raúl Mancera Jr, por su incondicionalidad en cada etapa, a mi mamá, Yolanda Sánchez, por su amor infinito y a mi hermana Paula Mancera (que tanta falta me hace), por su ejemplo de perseverancia en busca de sus sueños y por motivarme siempre. A mis abuelitos, Nohemy Guzmán y Raúl Mancera, por darme los mejores consejos para la vida; este logro es de ustedes, familia.

Por último, gracias a Apolo y a mi mejor amigo, confidente, novio y compañero, Camilo Piza por haber compartido este reto conmigo, por su esfuerzo, por demostrarme su amor y por dar lo mejor de él siempre.

MARIA ANGÉLICA MANCERA SÁNCHEZ

DEDICATORIA

Durante la vida tenemos que enfrentarnos a diferentes retos, los resultados obtenidos durante estos son semillas que recogemos de nuestro trabajo, gracias a la vida por darme los mejores guías para prepararme ante cada uno de estos.

Javier y Lucy son la pareja incondicional de padres que siempre han estado detrás de mí, con el fin de criar a un ser de bien para la sociedad, inculcándome los mejores valores y fomentando mis habilidades a través de su amor y apoyo.

Diana y Ale son los mejores ejemplos que he podido tener como hermanas, de quienes aprendo por medio de la confianza y de la seguridad que me brindan, gracias por su apoyo y comprensión.

Angélica y Apolo dos seres los cuales tienen la habilidad de sacar lo mejor de mí y ayudarme a cumplir mis metas, creciendo juntos y apoyándonos ante los nuevos desafíos.

Gracias a la vida por darme tantas oportunidades, permitirme ver las cosas buenas de ella misma y disfrutar cada momento al máximo.

JAVIER CAMILO PIZA BARRIGA

AGRADECIMIENTOS

PARKO SERVICES S.A, por brindar el soporte técnico y apoyo de su personal durante el desarrollo del trabajo.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, por sus directivas, docentes y funcionarios que hicieron parte de nuestra formación como profesionales íntegras en ingeniería de petróleo y brindaron las herramientas necesarias para la correcta elaboración del respectivo trabajo de grado.

Ing. **VIVIANA ANDRANGO**, directora, por compartir su amplio conocimiento y experiencia en la industria petrolera, por invertir su tiempo en el desarrollo del proyecto, por toda su dedicación y paciencia.

Ing. **CARLOS ZAMBRANO** por su disposición y apoyo desde el principio del proyecto.

Ing. **WILMAR GOMEZ** por compartir sus conocimientos del programa TWM pues fueron base fundamental para el proyecto.

Ings. **ADRIANA HENAO**, **YATNIELAH PIRELA** y **JORGE TOVAR**, orientadores de trabajo de grado, por la paciencia, por su excelente disposición y entrega en nuestro proyecto de grado.

Ings. **OSCAR OSWALDO GONZALEZ** y **MARIA ALEJANDRA DUARTE** por su guía para el desarrollo del objetivo financiero.

Ing. **PEDRO MELO**, **EDWIN MARTÍN PUENTES** y **ANTONIO CORREA** por orientarnos desde su conocimiento y experiencia con una excelente disposición.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	25
1. MARCO TEORICO	28
1.1 SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO	28
1.1.1 Equipos de superficie	29
1.1.2 Equipo de fondo	29
1.1.2.1 Sarta de varillas	29
1.1.2.2 Bomba de subsuelo	29
1.1.3 Principio de funcionamiento	30
1.2 REGISTRO DINAMOMÉTRICO	31
1.2.1 Software TWM	31
1.2.1.1 Toma de nivel	31
1.2.2 Cartas dinamométricas	32
1.2.2.1 Comportamiento ideal de las cartas dinamométricas	33
1.2.2.2 Fenómenos de las cartas dinamométricas	33
1.2.3 Fenómeno de escurrimiento	35
1.3 CAJA TANGENT FLOW	36
1.3.1 Diseño de las cajas Tangent Flow	37
1.3.1.1 Optimización del ángulo de flujo y posicionamiento de la bola	37
1.3.1.2 Optimización de parámetros de diseño	38
1.3.1.3 Optimización de las bridas y cilindros de extrusión	38
1.3.1.4 Análisis de elementos finitos	38
1.3.2 Comparación caja Tangent Flow y caja API convencional	38
2. METODOLOGÍA	40
2.1 PRIMERA ETAPA: COMPORTAMIENTO DEL POZO P-250 DESDE EL AÑO 2017 A JULIO 2019	41
2.2 SEGUNDA ETAPA: IMPLEMENTACIÓN DE LA CAJA TANGENT FLOW	41
2.2.1 Condiciones de implementación de las cajas Tangent Flow	41
2.2.2 Implementación de cajas Tangent Flow	41
2.2.2.1 Estado mecánico del pozo después de la implementación de las cajas Tangent Flow	42
2.3 TERCERA Y CUARTA ETAPA: EVALUACIÓN DE LAS PRUEBAS DE PRODUCCIÓN Y CARTAS DINAMOMÉTRICAS DEL POZO ESTUDIO ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS CAJAS TANGENT FLOW (ESCENARIO 1) Y DESPUES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS CAJAS TANGENT FLOW (ESCENARIO 2)	44
2.3.1 Interpretación del software TWM	46
2.3.1.1 Selección de la prueba a analizar	47
2.3.1.2 Tabulación e interpretación de datos por stroke	52
2.3.2 Comportamiento general de las pruebas de producción	57

2.4 QUINTA ETAPA: COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ESCENARIO 1 Y EN EL ESCENARIO 2	57
2.4.1 Comparación cualitativa de cartas de superficie Overlay	58
2.4.2 Comparación cualitativa de las cartas dinamométricas de fondo	58
2.4.3 Comparación de los promedios obtenidos por stroke	58
2.4.4 Comparación de las pruebas de producción	58
2.5 SEXTA ETAPA: EVALUACIÓN FINANCIERA	59
2.5.1 Análisis de inversión (CAPEX)	59
2.5.2 Análisis de los costos de operación (OPEX)	60
2.5.3 Análisis de ingresos	60
2.5.4 Valor Presente Neto (VPN)	60
2.5.5 Beneficio Anual Uniforme Equivalente (BAUE)	62
2.5.6 Tasa Interna de Retorno (TIR)	62
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
3.1 COMPORTAMIENTO DEL POZO DESDE ENERO 2017 HASTA JULIO DE 2019	64
3.2 COMPORTAMIENTO DEL POZO P-250 POR BLOQUEO POR GAS SIN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA CAJA TANGENT FLOW (ESCENARIO 1)	67
3.2.1 Prueba mes 1	68
3.2.1.1 Prueba de nivel	68
3.2.1.2 Prueba de válvulas	69
3.2.1.3 Prueba dinamométrica	70
3.2.1.4 Tabulación e interpretación de datos por stroke	74
3.2.2 Pruebas Mes 2	75
3.2.2.1 Prueba de nivel	75
3.2.2.2 Test de válvulas	76
3.2.2.3 Prueba dinamométrica	77
3.2.2.4 Tabulación e interpretación de datos por stroke	79
3.2.3 Prueba mes 3	81
3.2.3.1 Prueba de nivel	81
3.2.3.2 Test de válvulas	82
3.2.3.3 Prueba dinamométrica	83
3.2.3.4 Tabulación e interpretación de datos por stroke	85
3.2.4 Comportamiento general Escenario 1	86
3.3 COMPORTAMIENTO DEL POZO P-250 POR BLOQUEO POR GAS POSTERIOR A LA IMPLEMENTACIÓN DE LA CAJA TANGENT FLOW (ESCENARIO 2)	92
3.3.1 Prueba mes 4	93
3.3.1.1 Prueba de nivel	93
3.3.1.2 Prueba de válvulas	94
3.3.1.3 Prueba dinamométrica	95
3.3.1.4 Tabulación e interpretación de datos por stroke	97
3.3.2 Prueba mes 5	99
3.3.2.1 Prueba de nivel	99

3.3.2.2 Prueba de válvulas	100
3.3.2.3 Prueba dinamométrica	101
3.3.2.4 Tabulación e interpretación de datos por stroke	102
3.3.3 Prueba mes 6	104
3.3.3.1 Prueba de nivel	104
3.3.3.2 Prueba de válvulas	105
3.3.3.3 Prueba dinamométrica	106
3.3.3.4 Tabulación e interpretación de datos por stroke	108
3.3.4 Comportamiento general Escenario 2	109
3.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS	115
3.4.1 Comparación de la carta superficial	116
3.4.2 Comparación de la carta de fondo	117
3.4.3 Tabulación y comparación de datos obtenidos	118
3.4.4 Comparativa resultados pruebas de producción	123
3.5 EVALUACIÓN FINANCIERA	127
3.5.1 Valor Presente Neto	127
3.5.1.1 Alternativa optimista	127
3.5.1.2 Alternativa pesimista	129
3.5.1.3 Alternativa intermedia	131
3.5.2 Beneficio Anual Uniforme Equivalente (BAUE)	134
3.5.3 Tasa interna de retorno (TIR)	134
4. CONCLUSIONES	137
5. RECOMENDACIONES	139
BIBLIOGRAFÍA	140

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación eficiencia de llenado y NLSB	46
Tabla 2. Data TWM mejor aproximación Mes 1	74
Tabla 3. Data TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 1	75
Tabla 4. Datos TWM mejor aproximación mes 2	80
Tabla 5. Data TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 2	81
Tabla 6. Datos TWM mejor aproximación mes 3	86
Tabla 7. Datos TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 3	86
Tabla 8. Resultados Escenario 1	87
Tabla 9. Datos TWM mejor aproximación mes 4	98
Tabla 10. Datos TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 4	99
Tabla 11. Datos TWM mejor aproximación mes 5	103
Tabla 12. Datos TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 5	104
Tabla 13. Datos TWM mejor aproximación mes 6	109
Tabla 14. Datos TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 6	109
Tabla 15. Pruebas de producción Escenario 2	110
Tabla 16. Resultados promedio TWM comparativa	119
Tabla 17. Promedio pruebas de producción Escenario 1 y 2	123
Tabla 18. Proyección flujo efectivo Opción 1 alternativa optimista	128
Tabla 19. Proyección de flujo de efectivo caja Opción 2 alternativa optimista	129
Tabla 20. Proyección de flujo efectivo Opción 1 alternativa pesimista	130
Tabla 21. Proyección de flujo de efectivo Opción 2 alternativa pesimista	131
Tabla 22. Proyección de flujo efectivo Opción 1 alternativa intermedi	132
Tabla 23. Proyección de flujo de efectivo Opción 2 alternativa intermedio	133
Tabla 24. Cálculos VPN	134
Tabla 25. Cálculos BAUE	134
Tabla 26. TIR para cada alternativa y escenario	135
Tabla 27. Resumen indicadores financieros	135

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Pruebas de producción, cartas dinamométricas y fechas Escenario 1 (Tercera etapa)	44
Cuadro 2. Fechas Escenario 2, pruebas de producción y carta dinamométricas (cuarta etapa)	45
Cuadro 3. Datos pruebas de producción	46
Cuadro 4. Variables para tabular	54
Cuadro 5. Datos por stroke tabulados	57

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Caudal Vs Tiempo (2017- Julio 2019)	64
Gráfico 2. Eficiencia de llenado, GOR Vs Tiempo (2017- Julio 2019)	65
Gráfico 3. Eficiencia de llenado, Gas Vs Tiempo	66
Gráfico 4. Eficiencia de llenado, SPM Vs Tiempo (2017- Julio 2019)	67
Gráfico 5. BOPD, BFPD, BSW Vs Tiempo (Escenario 1)	88
Gráfico 6. GOR, %Llenado Vs Tiempo (Escenario 1)	89
Gráfico 7. NFSB Total, eficiencia de llenado Vs Tiempo (Escenario 1)	90
Gráfico 8. Eficiencia de llenado, SPM Vs Tiempo (Escenario 1)	91
Gráfico 9. Eficiencia de llenado, gas Vs Tiempo (Escenario 1)	92
Gráfico 10. Caudal, BSW Vs Tiempo Escenario 2	111
Gráfico 11. Eficiencia de llenado, GOR Vs Tiempo (Escenario 2)	112
Gráfico 12. NFSB, eficiencia de llenado Vs Tiempo (Escenario 2)	113
Gráfico 13. Eficiencia de llenado, SPM Vs Tiempo Escenario 2	114
Gráfico 14. Eficiencia de llenado, Gas Vs Tiempo Escenario 2	115
Gráfico 15. Nivel de fluido carga Vs Tiempo Escenario 1 y 2	120
Gráfico 16. Carrera del pistón, GOR Vs tiempo Escenario 1 y 2	121
Gráfico 17. BFPD, carrera del pistón Vs Tiempo	122
Gráfico 18. BFPD, BOPD y BSW Vs Tiempo	123
Gráfico 19. Eficiencia de llenado, GOR vs Tiempo	124
Gráfico 20. NFSB y Eficiencia de llenado vs Tiempo	125
Gráfico 21. Eficiencia de llenado y SPM vs Tiempo	126
Gráfico 22. Eficiencia de llenado, Gas Vs Tiempo (Escenario 1 y 2)	126
Gráfico 23. Proyección flujo neto de efectivo Opción 1 alternativa optimista	128
Gráfico 24. Proyección de flujo neto de efectivo Opción 2 alternativa optimista	129
Gráfico 25. Proyección de flujo neto Opción 1 alternativa pesimista	130
Gráfico 26. Proyección de flujo neto de efectivo Opción 2 alternativa pesimista	131
Gráfico 27. Proyección de flujo neto de efectivo Opción 1 alternativa intermedia	132
Gráfico 28. Proyección de flujo neto de efectivo Opción 2 alternativa intermedio	133

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Sistema bombeo mecánico	28
Imagen 2. Funcionamiento del bombeo mecánico	30
Imagen 3. Registro de niveles de pozo TWM- Echometer	32
Imagen 4. Carta dinamométrica de superficie, caso ideal	33
Imagen 5. Fenómenos cartas dinamométricas	34
Imagen 6. Interferencia de gas en la bomba de fondo	35
Imagen 7. Fenómeno de escurrimiento	36
Imagen 8. Caja Tangent Flow	37
Imagen 9. Comparación Caja API y Caja Tangent Flow	39
Imagen 10. Instalación cajas Tangent Flow	42
Imagen 11. Tubería cajas Tangent Flow	42
Imagen 12. Estado mecánico posterior a instalación cajas Tangent Flow	43
Imagen 13. Resumen BHP. Echometer	48
Imagen 14. Cargas en la válvula de fondo	49
Imagen 15. Overlay	50
Imagen 16. Dyna card	51
Imagen 17. Llenado del barril de fondo y sus dimensiones	52
Imagen 18. Distancias del barril de fondo	52
Imagen 19. Mejor aproximación software TWM	53
Imagen 20. Factores de fricción sin ajustar	53
Imagen 21. Factores de fricción ajustados	54
Imagen 22. Sección fuerza de las varillas	54
Imagen 23. Carta dinamométrica de fondo	58
Imagen 24. Wellbore Escenario 1	68
Imagen 25. Toma de nivel Mes 1	69
Imagen 26. Test de Válvulas Mes 1	70
Imagen 27. Test dinamométrico, sección Overlay Mes 1	71
Imagen 28. Test dinamométrico Dyna cards Mes1	72
Imagen 29. Carta dinamométrica de fondo mes 1	73
Imagen 30. Área de la CEP mes 1	73
Imagen 31. Toma de nivel mes 2	76
Imagen 32. Test de válvulas mes 2	77
Imagen 33. Test dinamométrico sección Overlay mes 2	78
Imagen 34. Test dinamométrico sección Dyna cards mes 2	79
Imagen 35. Toma de nivel mes 3	82
Imagen 36. Test de válvulas mes 3	83
Imagen 37. Test dinamométrico sección Overlay mes 3	84
Imagen 38. Test dinamométrico sección Dyna cards mes 3	85
Imagen 39. Wellbore Escenario 2	93
Imagen 40. Toma de nivel mes 4	94
Imagen 41. Test de válvulas mes 4	95

Imagen 42. Overlay mes 4	96
Imagen 43. Test dinamométrico mes 4	97
Imagen 44. Toma de nivel mes 5	100
Imagen 45. Test de válvulas mes 5	101
Imagen 46. Test dinamométrico mes 5	102
Imagen 47. Toma de nivel mes 6	105
Imagen 48. Test de válvulas mes 6	106
Imagen 49. Test dinamométrico mes 6	107
Imagen 50. Test dinamométrico mes 6	108
Imagen 51. Carta superficial Escenario 1	116
Imagen 52. Carta de superficie Escenario 2	117
Imagen 53. Carta de fondo Escenario 1	117
Imagen 54. Carta de fondo Escenario 2	118

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Promedio aritmético	55
Ecuación 2. Área del pistón	55
Ecuación 3. Caudal real	55
Ecuación 4. Porcentaje CEP real	56
Ecuación 5. CNEP	56
Ecuación 6. CNEP inicial	56
Ecuación 7. CNEP final	56
Ecuación 8. Fluido no desplazado	57
Ecuación 9. Tasa de Interés de Oportunidad	61
Ecuación 10. Valor Presente Neto	61
Ecuación 11. Formula BAUE	62
Ecuación 12. Tasa Interna de Retorno	63

ABREVIATURAS

Ap	Área del pistón
API	American Petroleum Institute
Bbl/D	Barriles diarios
BFPD	Barriles de líquido por día
BHP	Bottom Hole Pressure
BOPD	Barriles de crudo por día
BSW	Basic Sediment & Water
BAUE	Beneficio Anual Uniforme Equivalente
CAPEX	Capita Expenditures
CBS	Carrera barra pulida de superficie
CEP	Carrera efectiva del pistón
CEP twm	Carrera efectiva del pistón aproximada por TWM
CHP	Casing Head Pressure
CMP	Carrera máxima del pistón
CNEP	Carrera no efectiva del pistón
CNEPf	Carrera no efectiva del pistón final
CNEPi	Carrera no efectiva del pistón inicial
D	Diámetro
FND	Fluido no desplazado
ft	Pies
Ft	Flujos netos efectivos
FTND	Fluido total no desplazado
i	Tasa de Interés
IO	Inversión inicial previa
in	Pulgadas
GOR	Gas Oil Relation
k	Tasa de descuento
Lbf	Libra fuerza
MCFD	Miles de pies cúbicos
MPRL	Minimun Polish Rod Load
MPUMPL	Minimun Pump Load
N	Carrera del pistón
n	Número de periodos de duración del proyecto
NFSB	Nivel de fluido sobre la bomba
NLSB	Nivel de líquido sobre la bomba
OPEX	Operating Expenses
PIP	Pump Intake Pressure
PPRL	Peak Polish Rod Load
PPUMPL	Peak Pump Load
PSI	Libras por pulgada cuadrada
Q	Caudal de fluido
r	Radio
SPM	Strokes por minuto

THP	Tubing Head Pressure
TIO	Tasa de Interés de Oportunidad
TIR	Tasa Interna de retorno
TVD	True Vertical Depth
TWM	Total Well Managment
USD	United State Dollars
VMM	Valle Medio del Magdalena
VPN	Valor Presente Neto

GLOSARIO

ASIENTOS: es el dispositivo donde se asienta la bomba, efectuando un sello metal-metal entre esta y la tubería de producción¹.

BARRIL: cilindro de superficie interna pulida donde se desliza el pistón².

CARRERA ASCENDENTE: movimiento ascendente de la sarta de varillas desde la entrada de la bomba, válvula fija, hasta el tope fijado de la carrera del pistón³.

CARRERA DESCENDENTE: movimiento descendente de la sarta de varillas desde el punto fijado en superficie hasta la entrada de la bomba, válvula fija⁴.

CARRERA EFECTIVA DEL PISTÓN: distancia utilizada por el pistón de fondo para desplazar líquidos durante un ciclo de bombeo⁵.

CARRERA MAXIMA DEL PISTÓN: distancia recorrida por el pistón durante un ciclo de bombeo⁶.

CARTA DE SUPERFICIE: representación gráfica de las fuerzas ejercidas en la sarta de varillas con respecto a su posición durante un ciclo de bombeo mecánico, por medio del diagrama de Goodman⁷.

CARTA DINAMOMETRICA: representación gráfica de las fuerzas ejercidas en la bomba fondo con respecto a la posición durante un ciclo de llenado de la bomba, tomada con un dinamómetro, por medio del diagrama de Goodman modificado por la ecuación de onda⁸.

¹PARTIDAS, Hector. Bombeo mecánico optimización, diagnóstico y operación [en línea]. Anzoátegui-Venezuela.: 2003. [5, junio, 2020]. Disponible en: <<https://christian3306.files.wordpress.com/2010/10/bombeo-mecanico-optimizacion-diagnostico-y-operacion.pdf>>

² Ibíd.

³ BELLARBY, Jonathan, Well completion design: En: Beam pumps. Aberdeen, UK: Elsevier, 2009. p. 355.

⁴ Ibíd., p.355

⁵ OIL PRODUCTION. Bombeo mecánico. [Sitio WEB]. Buenos aires. La entidad. [27, abril, 2020]. Disponible en: <<http://oilproduction.net/files/Guia-de-Interpretacion-de-Dinamometrica-y-Calculo-de-Desplazamiento-en-Bombas-de-Profundidad.pdf>>

⁶ Ibíd., p. 1.

⁷ P&G CONSULTING. Biblioteca. [Sitio Web] Zulia: Petróleo y gas consultores, La entidad. [28, abril, 2020]. p. 18. Disponible en: <<http://pygconsultores.com.ve/wp-content/uploads/2019/01/CARTAS-DINAGRAFICAS.pdf>>

⁸ P&G CONSULTING. Biblioteca. [Sitio Web] Zulia: Petróleo y gas consultores, La entidad. [28, abril, 2020]. p. 17. Disponible en: <<http://pygconsultores.com.ve/wp-content/uploads/2019/01/CARTAS-DINAGRAFICAS.pdf>>

DINAMOMETRO: instrumento utilizado para medir la fuerza ejercida en la sarta de varillas durante el ciclo de bombeo mecánico⁹.

EFICIENCIA DE LLENADO: relación de desplazamiento entre el fluido producido y el fluido teórico de un equipo de bombeo mecánico¹⁰.

ESCURRIMIENTO: desplazamiento de fluido entre espacios ajustados en el diseño de bombas¹¹.

FUERZA BOYANTE: fuerza de flotación que tiene una masa suspendida en un fluido¹².

MOVILIDAD: facilidad con la que un fluido se mueve en el yacimiento¹³.

MOVIMIENTO RECIPROCANTE: balanceo, movimiento oscilante de un cuerpo entre dos direcciones fijas.

PISTOLA DE GAS: dispositivo utilizado para realizar la toma del registro acústico¹⁴.

PISTÓN: es el embolo de la bomba, el cual se desliza dentro del barril. El diámetro de este determina la capacidad de desplazamiento¹⁵.

SUMERGENCIA: diferencia entre la carga hidrostática entre la profundidad de la bomba y el nivel de fluido dinámico por encima de la bomba¹⁶.

⁹ Ibíd., p. 2.

¹⁰ OIL PRODUCTION. Bombeo mecánico. [Sitio WEB]. Buenos aires. La entidad. [27, abril, 2020]. Disponible en: <<http://oilproduction.net/files/Guia-de-Interpretacion-de-Dinamometrica-y-Calculo-de-Desplazamiento-en-Bombas-de-Profundidad.pdf>>

¹¹ PARTIDAS, Hector. Bombeo mecánico optimización, diagnóstico y operación. En: ESP Oil Engineering Consultants [Sitio WEB]. Anzoátegui. International training group technical assistance. [25, abril, 2020]. Archivo PDF. p. 41. Disponible en: <<https://christian3306.files.wordpress.com/2010/10/bombeo-mecanico-optimizacion-diagnostico-y-operacion.pdf>>

¹² GILES, Ranald. Empuje y flotación de mecánica de los fluidos e hidráulica, Madrid-ES: Mcgraw-Hill, 1994, p. 65. ISBN 84-481-1898-7 tercera edición.

¹³ CABRERA Nicolas et al. Análisis y Propuestas de Mejora de Proyectos de Inyección de Agua Ejecutados en Reservorios de Diversas Características. En: Espol [sitio WEB]. Quito. La entidad. [29, abril, 2020]. Archivo PDF. p. 2. Disponible en: <<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/20814/1/articulo%20tesis.pdf>>

¹⁴ UPC GLOBAL [Sitio Web] Fulshear, Texas: Pistola de gas compacta. [05,06,2020]. Disponible en: <<https://www.upcoglobal.com/es/p/echometer/pistolas-de-gas/pistola-de-gas-compacta>>

¹⁵ PARTIDAS. Op. Cit., p. 38.

¹⁶ PARTIDAS, Hector. Bombeo mecánico optimización, diagnóstico y operación. En: ESP Oil Engineering Consultants [Sitio WEB]. Anzoátegui. International training group technical assistance.

TOMA DE NIVELES: prueba realizada para identificar los niveles de fluido en el fondo del pozo, se realiza a partir de un registro acústico¹⁷.

TRANSDUCTOR DE CARGA: dispositivo electromecánico encargado de convertir la fuerza aplicada sobre el en una señal eléctrica¹⁸.

TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO: dispositivo electromecánico utilizado para transformar un movimiento mecánico o desplazamiento en una señal eléctrica medible¹⁹.

VÁLVULA FIJA: es la válvula ubicada en el fondo del barril, esta es fija y permite la entrada de fluido del pozo al equipo. Esta suele ser de un diámetro más grande para que ingrese mayor cantidad de fluido²⁰.

VÁLVULA VIAJERA: es la válvula que está ubicada en el pistón y su nombre se debe a que sigue el movimiento del pistón²¹.

VARILLA PULIDA: región de la sarta de varillas que se encuentra en superficie, donde se realizan las mediciones²².

[25- abril-2020]. Archivo PDF. p. 24. Disponible en: <<https://christian3306.files.wordpress.com/2010/10/bombeo-mecanico-optimizacion-diagnostico-y-operacion.pdf>>

¹⁷ UPC GLOBAL [Sitio Web] Fulshear, Texas: Toma de niveles de fluido y dinagramas. [05-06-2020]. Disponible en: <<https://www.upcoglobal.com/es/servicios/soluciones/toma-de-niveles-de-fluido-y-dinagramas>>

¹⁸ P&G CONSULTING. Biblioteca. [Sitio Web] Zulia: Petróleo y gas consultores, La entidad. [28, abril, 2020]. P. 10. Disponible en: <<http://pygconsultores.com.ve/wp-content/uploads/2019/01/CARTAS-DINAGRAFICAS.pdf>>

¹⁹ *Ibíd.*, p. 11.

²⁰ BROWN, Kermit, The technology of the artificial lift: En: Beam pumps. Tulsa, Oklahoma: PennWell, 1984. p. 233.

²¹ *Ibíd.*, p. 233.

²² BROWN, Kermit, The technology of the artificial lift: En: Beam pumps. Tulsa-Oklahoma: PennWell, 1984. p. 230.

RESUMEN

El presente trabajo de grado presenta el estudio correspondiente a la implementación de las cajas Tangent Flow en el pozo P-250 del Campo Palagua, ubicado en el departamento de Boyacá, el cual presentó interferencia de gas en el sistema de levantamiento artificial de bombeo mecánico bajo la configuración de cajas API, alcanzando una eficiencia de llenado inferior al 40%, clasificada como baja eficiencia dentro de los rangos estandarizados por la empresa Parko Services S.A.

Por lo tanto, en los tres meses anteriores a la implementación de las cajas Tangent Flow (Escenario 1) y durante los tres meses posteriores a la implementación de las cajas Tangent Flow (Escenario 2) fueron evaluadas las pruebas de producción (las cuales constan de las variables BFPD, BOPD, BSW, NFSB y NLSB, eficiencia de llenado, SPM y GOR) y las pruebas de nivel, de válvulas y dinamométrica, realizando así mismo la evaluación de las cartas dinamométricas representativas. Posteriormente se realizó una comparación de los dos escenarios en donde se determinó que la eficiencia de llenado de la bomba de fondo aumentó en 40% respecto al Escenario 1, alcanzando una eficiencia del 96% superando la eficiencia esperada del 75%. Por último, se desarrolló un estudio financiero mediante los indicadores económicos Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Beneficio Anual Uniforme Equivalente (BAUE) mediante la proyección con una Opción 1 donde se continúa con las cajas API y una Opción 2 donde se implementan las cajas Tangent Flow realizado a tres (3) alternativas del precio del barril (una alternativa optimista, una alternativa pesimista y una alternativa intermedia). Desde una perspectiva financiera el proyecto tiene más factibilidad en las tres alternativas al realizar el cambio por las cajas Tangent Flow. Adicionalmente, se encontró que la Opción 2, es decir, el cambio por las cajas Tangent Flow presenta un mayor Beneficio Anual Uniforme Equivalente para las tres alternativas, superior a la Opción 1 en \$30,584.6 USD (alternativa optimista), en \$ 17,389.59 USD (alternativa intermedia) y en \$ 4,194.58 USD (alternativa pesimista).

PALABRAS CLAVE: Bombeo mecánico, Campo Palagua, Interferencia por gas, Caja Tangent Flow, Eficiencia de llenado, Bomba de subsuelo.

ABSTRACT

The present project presents the study corresponding to the implementation of Tangent Flow boxes in the P-250 well of the Palagua field, located in the department of Boyacá, which presented gas interference in the sucker rod pump artificial lift system under API boxes configuration, reaching filling efficiencies of 40% classified as low efficiency within the ranges standardized by the company Parko Services S.A. Therefore, in the three months prior to the implementation of the Tangent Flow boxes (Scenario 1) and during the three months after the implementation of the Tangent Flow boxes (Scenario 2), the production tests (which consist of the variables BFPD, BOPD, BSW, NFSB and NLSB, filling efficiency, SPM and GOR) and the level, valve and dynamometric tests, also carrying out the evaluation of the representative dynamometric charts. Subsequently, a comparison of the two scenarios was made, where it was determined that the filling efficiency of the bottom pump increased by 40% compared to Scenario 1, reaching an efficiency of 96%, exceeding the expected efficiency of 75%. Finally, a financial study was developed using the economic indicators Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Equivalent Uniform Annual Profit (BAUE) through the projection with Option 1 where the API boxes and a Option 2 where Tangent Flow boxes are implemented, performed at three (3) alternatives to the price of the barrel (an optimistic alternative, a pessimistic alternative and an intermediate alternative). From a financial perspective, the project has more feasibility in the three alternatives when changing to Tangent Flow boxes. Additionally, it was found that Option 2, that is, the change for Tangent Flow boxes presents a higher Equivalent Uniform Annual Profit for the three alternatives, higher than Option 1 by \$ 30,584.6 USD (optimistic alternative), at \$ 17,389.59 USD (alternative intermediate) and at \$ 4,194.58 USD (pessimistic alternative).

KEY WORDS: Sucker rod, Palagua field, Gas interference, Tangent Flow box, Filling efficiency, Subsoil pump.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la implementación de los sistemas de levantamiento artificial (SLA) para incrementar o mantener la producción en los pozos petroleros se ha convertido en un tema de gran importancia debido a los costos de mantenimiento y operación. Es por esto por lo que las empresas están invirtiendo en la optimización de los procesos de estos equipos para reducir costos y mejorar la producción.

Asimismo, el Campo Palagua, ubicado en la jurisdicción del municipio de Puerto Boyacá, en el departamento de Boyacá, sobre el margen oriental del Río Magdalena, al suroeste de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (V.M.M), Colombia; que adicionalmente, se encuentra desde el año 2001 bajo el contrato de producción incremental (CPI) de la Unión Temporal IJP (Ismocol- Joshi- Parko), quienes buscan dar solución a uno de los problemas con los que se ve más afectada la producción de petróleo, el cual viene dado por una **eficiencia menor al 40% de la bomba de fondo del mecanismo de bombeo mecánico en un pozo representativo del Campo Palagua por interferencia de gas**. Al manejarse en la mayoría del campo el SLA de bombeo mecánico, el bloqueo por gas es uno de los problemas más comunes dentro de los que se presentan en este campo.

Este problema mencionado anteriormente, parte del principio de funcionamiento de la caja API utilizada en los pozos del Campo Palagua. Teniendo en cuenta que el transporte del crudo desde el fondo del pozo a superficie se realiza a través de un barril dentro del cual se encuentra un pistón que cuenta con dos válvulas, una fija (inferior) y una viajera (superior) y en la medida en que sea carrera ascendente o descendente, las válvulas se abren o se cierran, por lo tanto, es en esta parte del funcionamiento en donde, debido a la naturaleza turbulenta con la que ingresa el fluido al barril, liberando el gas en solución y a su vez la interferencia de gas, evitando que la válvula de bola se cierre completamente y permitiendo el desgaste a causa del golpe con el interior de la caja, generando una reducción en la producción de fluidos del pozo. Sin embargo, el ángulo con el que está diseñada la caja Tangent Flow ha demostrado que reduce el movimiento vibracional, lo cual mejora el cierre de la válvula, disminuyendo el desgaste que finalmente reduce el daño de la bomba de fondo.

El trabajo de grado se basa principalmente en el estudio “Field driven initiative to improve artificial lift efficiency and reliability with an engineered sucker rod pump ball valve insert” en donde el objetivo inicialmente era reducir la caída de presión dentro de la bomba de fondo. Sin embargo, junto a este beneficio se obtuvo también, incremento en el llenado, reducción en la acumulación de sólidos y la reducción de interferencia de gas. La caja Tangent Flow, al presentar un ángulo tangencial igual a $\pi/3$ (3.14, π), provoca un giro vórtice, que se vio reflejado en la reducción del 40% de la caída de presión y un incremento (respecto a la caja convencional) del 58%

en el flujo, con la bola manteniéndose estacionaria, reduciendo la interferencia de gas.

Para esta comparación se realizan pruebas de flujo detalladas utilizando un aparato de flujo, el cual consta de dos recorridos de flujo idénticos, un tanque de suministro debajo del aparato con una bomba sumergible. En la primera prueba se obtiene que el inserto Tangent Flow, contiene de 2-3 veces más cantidad de agua por encima de los insertos, indicando que la restricción disminuida del inserto vórtice da como resultado una caída de presión menor. Por otro lado, se obtuvo que la caída de presión promedio es significativamente menor en el inserto con vortex optimizado en ambas condiciones, sin gas (40%) y con gas (44%). Finalmente, el ruido obtenido fue menor en un 86% con el inserto Tangent Flow con vórtice optimizado.

Se estima que con la implementación de la caja Tangent Flow, se garantizará una eficiencia de llenado de la bomba por encima del 75% puesto que el ángulo de vórtice a través del cual pasará el gas será el adecuado, evitando que se genere la interferencia por gas. Es así como el objetivo general de esta investigación es **evaluar el sistema de bombeo mecánico mediante la implementación de la caja Tangent Flow en un pozo representativo del Campo Palagua que presenta bloqueo por gas** y los objetivos específicos son:

- Evaluar las pruebas de producción y las cartas dinamométricas del pozo en estudio de los tres (3) meses antes de presentarse el bloqueo por gas.
- Evaluar las pruebas de producción y las cartas dinamométricas del pozo en estudio de los tres (3) meses siguientes a la instalación de la caja Tangent Flow.
- Comparar los resultados obtenidos en las evaluaciones realizadas a las pruebas de producción y a las cartas dinamométricas, antes y después de la implementación de la caja Tangent Flow.
- Evaluar financieramente la implementación de las cajas Tangent Flow según los indicadores financieros Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

Se estará dando cumplimiento a los objetivos 1 y 2 en la sección 2.3 que lleva por título Evaluación de las pruebas de producción y cartas dinamométricas del pozo estudio antes de la implementación de las cajas Tangent Flow (Escenario 1) y después de la implementación de las cajas Tangent Flow (Escenario 2 y sus resultados se encuentran en la sección 3.2 y 3.3, respectivamente. La metodología del objetivo específico 3 se encuentra en la sección 2.4 titulada como Comparación de los datos obtenidos en el Escenario 1 y 2 cuyos resultados se muestran en la sección 3.4. Por último, el cumplimiento del objetivo específico 4 dará cumplimiento

a través de la metodología mostrada en la sección 2.5 y los resultados son mostrados en la sección 3.5.

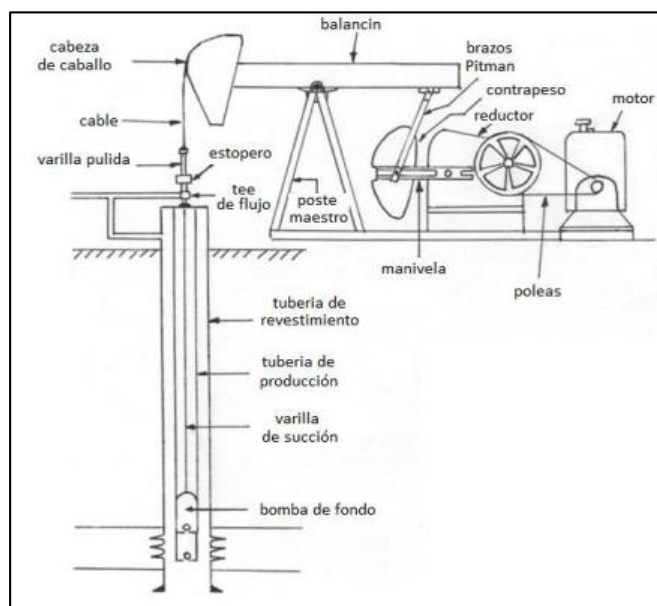
1. MARCO TEORICO

En este capítulo será descrito el sistema de bombeo mecánico, sus características principales y el principio de funcionamiento del sistema para entender la importancia de cada uno de sus equipos, haciendo énfasis en la bomba de fondo. Además, serán abordadas las cartas dinamométricas para identificar el estado del sistema de levantamiento artificial con respecto al movimiento de fluidos en el fondo del pozo. Por último, se describirá la caja Tangent Flow junto con sus características más importantes para la implementación en pozos que presentan bloqueo por gas en la bomba de fondo.

1.1 SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

El principio básico del bombeo mecánico es un procedimiento de succión y transferencia casi continua del petróleo hasta la superficie. El balancín de producción imparte el movimiento de subida y bajada de las varillas de succión que mueven el pistón de la bomba ubicada en el fondo de la tubería de producción, donde las válvulas de la bomba se abren y se cierran permitiendo el flujo de hidrocarburos a la bomba de fondo. Ver Imagen 1.

Imagen 1. Sistema bombeo mecánico



Fuente: VARGAS, Cesar. Componentes de bombeo mecánico su uso y aplicación en Chicontepec. [en línea]. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.:2012. [Consultado 27, abril, 2020]. Disponible en: < <https://cutt.ly/Efq1Ua4>>

El sistema de bombeo mecánico se divide principalmente en cinco secciones mencionadas a continuación²³:

- El motor principal, el cual se encarga de entregarle la energía necesaria al sistema.
- La unidad de transmisión de poder o reductor de velocidad.
- El equipo de bombeo en superficie, el cual transforma el movimiento rotatorio que brinda el motor a un movimiento linear oscilatorio en la sarta de varillas.
- La sarta de varillas de succión, la cual transmite el movimiento y la energía desde la superficie hasta el fondo del pozo; además incluye el conjunto de tuberías que protegen a la sarta de varillas y permiten el flujo de los hidrocarburos desde el fondo del pozo hasta la superficie.
- La unidad de bombeo en subsuelo.

1.1.1 Equipos de superficie. Son los equipos utilizados para transmitir la energía del motor o unidad motriz a la sarta de varillas. Para realizar lo anterior se debe transmitir la energía generada por la rotación del motor a un movimiento ascendente y descendente (movimiento recíproco) de las varillas y reducir la velocidad del motor a una velocidad útil para el bombeo²⁴.

1.1.2 Equipo de fondo. Permite la entrada de fluido de la formación a la sarta de producción y en conjunto, con el movimiento reciprocante (ascendente y descendente), generan el levantamiento de fluido²⁵.

1.1.2.1 Sarta de varillas. Es el conjunto de varillas ubicadas telescópicamente en el pozo, las cuales transmiten el movimiento desde la superficie hasta el fondo del pozo, permitiendo la apertura de las válvulas de fondo y soportando el peso del levantamiento del fluido.

1.1.2.2 Bomba de subsuelo. Es un equipo reciprocante de desplazamiento positivo ubicado en el fondo de los pozos, permitiendo el flujo hacia superficie. Su principio de funcionamiento se basa en diferenciales de presión sobre sus componentes.²⁶ Principalmente se dividen en dos tipos de bombas conocidas como: Bombas de tubing (TH) y bombas insertables (RH/RW). Dentro de esta última se encuentran las

²³BROWN, Kermit, The technology of the artificial lift: En: Beam pumps. Tulsa, Oklahoma: PennWell, 1984. p. 320.

²⁴CARDONA, Mónica et al. Bombeo mecánico. [Biblioteca Fundación Universidad de América]. Tesis. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.:1995. [Consultado 27, abril, 2020]. p. 41.

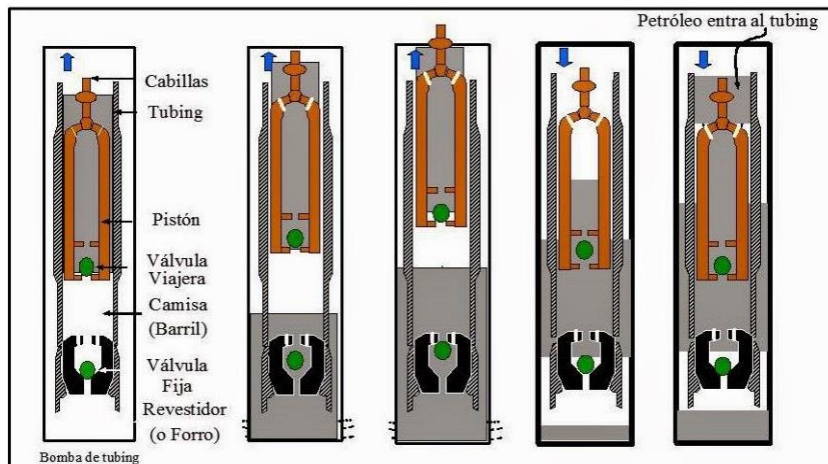
²⁵Ibíd., p. 16.

²⁶Ibíd., p. 41.

bombas de casing (RWT/RWH). La diferencia principal entre una bomba de tubing y una bomba insertable es la manera como el barril se encuentra instalado; en las bombas de tubing el barril de fondo se encuentra conectado al final de la tubería de producción y trabaja de manera integral a la misma y en las bombas tipo insertas el barril es una parte integral de la sarta de varillas del sistema de bombeo mecánico y se corre dentro de la sarta de producción. Las bombas de casing tienen en su diseño como elemento móvil el barril, el pistón se encuentra anclado al asiento.²⁷

1.1.3 Principio de funcionamiento. El ciclo de bombeo comienza durante la carrera ascendente de la sarta de varillas, el fluido ingresa al barril por medio de la válvula fija la cual se abre a medida que se ejerce el movimiento ascendente, en esta etapa del proceso la válvula viajera se encuentra cerrada. A medida que el pistón comienza a descender se cierra la válvula fija y el fluido que se encuentra en el barril sufre de un efecto de compresión cuando la presión del fluido comprimido es mayor que la presión de la columna de fluido que se encuentra sobre él; se abre la válvula viajera permitiendo el ingreso de fluido a la tubería de producción. Cuando el pistón comienza a subir, la válvula viajera se cierra nuevamente y el fluido asciende a superficie. De esta forma se inicia un nuevo ciclo debido a que la válvula fija se vuelve a abrir permitiendo el flujo de fluido que se encuentra en el pozo hacia el barril de fondo²⁸. Ver Imagen 2.

Imagen 2. Funcionamiento del bombeo mecánico



Fuente: Biblioteca ITBA. Trabajos finales especializaciones. [Sitio WEB]. Buenos Aires. [27, abril, 2020]

²⁷ BROWN, Kermit, The technology of the artificial lift: En: Beam pumps. Tulsa, Oklahoma: PennWell, 1984. p. 320.

²⁸ CARDONA, Mónica et al. Bombeo mecánico. [Biblioteca Fundación Universidad de América]. Tesis. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.:1995. [Consultado 27, abril, 2020]. p. 15.

1.2 REGISTRO DINAMOMÉTRICO

Conjunto de dispositivos y elementos que registran las cargas cíclicas soportadas por el vástago pulido con una celda de carga (dinamómetro) versus el desplazamiento de este. Realiza la medición de la carga en cada punto a través de los cuales se obtiene información que permite realizar un diagnóstico de solicitud mecánica de elementos de fondo y superficie, así como parámetros que permiten evaluar el estado de explotación del pozo. Se obtienen parámetros de medición continua y permite el control de bombeo mediante la puesta en marcha y parada del pozo. Entre los diferentes datos que pueden ser obtenidos mediante el registro dinamométrico se encuentran²⁹:

1.2.1 Software TWM. Es el software desarrollado por la empresa Echometer. Su primera versión para Windows fue desarrollada en 1995. El software permite interpretar los datos tomados por los equipos en superficie. En la actualidad es uno de los softwares más completos en la industria para la adquisición e interpretación de data del pozo.³⁰

Los resultados obtenidos por el software se derivan de la combinación de mediciones de presión superficial, cálculo de niveles de líquido acústico, dinamómetro, respuesta transitoria de potencia y presión. El sistema portátil se basa en un convertidor de precisión análoga o digital controlada por una computadora portátil basada en Windows. El analizador de pozo adquiere, guarda, muestra y maneja los datos en el lugar de pozo para entregar un análisis inmediato de la condición operativa de los pozos³¹.

1.2.1.1 Toma de nivel. El Echometer permite generar un pulso acústico el cual es enviado al fondo del pozo, por medio de una pistola de gas comprimido. Su configuración permite digitalizar los ecos provenientes del pozo y almacenar los datos en la memoria del computador para su procesamiento. El programa TWM se encarga de graficar la onda (mV) respecto al tiempo (Sec), de tal forma que la onda al entrar en contacto con un medio diferente generará un altibajo en la gráfica después de la estabilización como se puede apreciar en la Imagen 3., (recuadro rojo del medio), en la pestaña Select Liquid Level. Al duplicar el tiempo de la onda se debe visualizar otra perturbación confirmando el nivel de fluido (recuadro rojo de la derecha). El software se encarga de multiplicar la velocidad de la onda por el tiempo

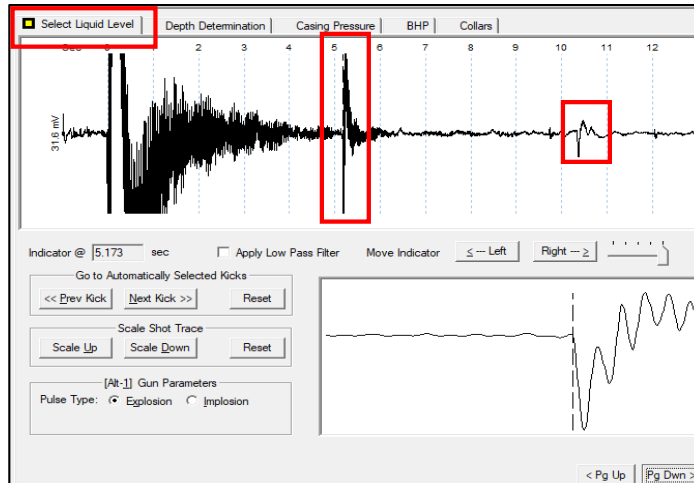
²⁹ ECHOMETER. Well analyzer. [Sitio WEB]. Wichita Falls, Texas. La entidad. [27, abril, 2020]. Disponible en: <http://echometer.com/Products/Well-Analyzer>

³⁰ HAMDON. Total Well Management System. [Sitio WEB]. Edmonton, AB. La entidad. [29, abril, 2020]. Disponible en: <https://hamdon.net/products/total-well-management-system/>

³¹ ECHOMETER. Well analyzer. [Sitio WEB]. Wichita Falls. La entidad. [29, abril, 2020]. Disponible en: <http://echometer.com/Products/Well-Analyzer>

donde se establece el contacto con el nuevo medio y de esta manera el software determina el nivel de la columna de fluido en el fondo del pozo³².

Imagen 3. Registro de niveles de pozo TWM- Echometer



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

El software, además, es capaz de medir la presión en cabeza del revestimiento cada 15 segundos para determinar si el gas está fluyendo con el líquido hacia el pozo. Esta propiedad de registrar las presiones en el pozo se ve representada en la sección Casing Pressure donde se muestran los cambios de presión (Psi) en el tiempo (Sec) durante dos minutos, 8 intervalos de 15 segundos. La data recolectada es usada para poder calcular una cantidad aproximada de la tasa de gas presente en la columna de fluido.³³

1.2.2 Cartas dinamométricas. Las cartas dinamométricas son un registro continuo de la resultante de la transformación de las cartas superficiales, las cuales se toman con un dinamómetro para poder interpretar todas las fuerzas que actúan sobre el eje de la barra lisa en cualquier instante durante una carrera completa o en un ciclo de bombeo mecánico. La curva se registra respecto a la posición de la barra lisa. Cada punto de la curva representa una fuerza resultante, la cual se compone de las siguientes fuerzas³⁴: Peso total del fluido sobre el pistón, peso total de la sarta de varillas en el fluido del pozo, factores de aceleración, fuerzas resultantes por rozamiento o fricción, fuerzas dinámicas varillas.

³²ECHOMETER. Well analyzer and TWM Software operating manual Acquisition of Acoustic Data and Quality Control. [Sitio WEB]. Wichita Falls. La entidad. [29, abril, 2020]. Disponible en: <<https://hamdon.net/wp-content/uploads/2015/04/TWM-Software-Manual.pdf>>

³³ ECHOMETER. Well analyzer and TWM Software operating manual Casing pressure tab [Sitio WEB]. Wichita Falls. La entidad. [29, abril, 2020]. Disponible en: <<https://hamdon.net/wp-content/uploads/2015/04/TWM-Software-Manual.pdf>>

³⁴ CARDONA, Mónica et al. Bombeo mecánico. [Biblioteca Fundación Universidad de América]. Tesis. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.:1995. [Consultado 27, abril, 2020]. p. 55.

1.2.2.1 Comportamiento ideal de las cartas dinamométricas. En la Imagen 4., se puede observar un caso ideal de la carta de superficie. El punto de partida “A”, en donde comienza la carrera ascendente, la válvula viajera se cierra y la carga sobre la varilla aumenta instantáneamente “A” a “B”, por la carga tomada del fluido. “B-C” representa la carga sobre las varillas es constante, se desplaza el pistón constante con la válvula viajera cerrada. “C” indica el final de la carrera de ascenso, donde la válvula viajera se abre, la válvula fija se cierra y la carga de fluido se transfiere a la tubería disminuyendo la carga del punto “C” al punto “D”. El recorrido de “D-A” representa el momento cuando el pistón desciende con la válvula viajera abierta sin representar carga del fluido para la varilla³⁵. En donde el bombeo presenta una eficiencia del 100%.

Imagen 4. Carta dinamométrica de superficie, caso ideal



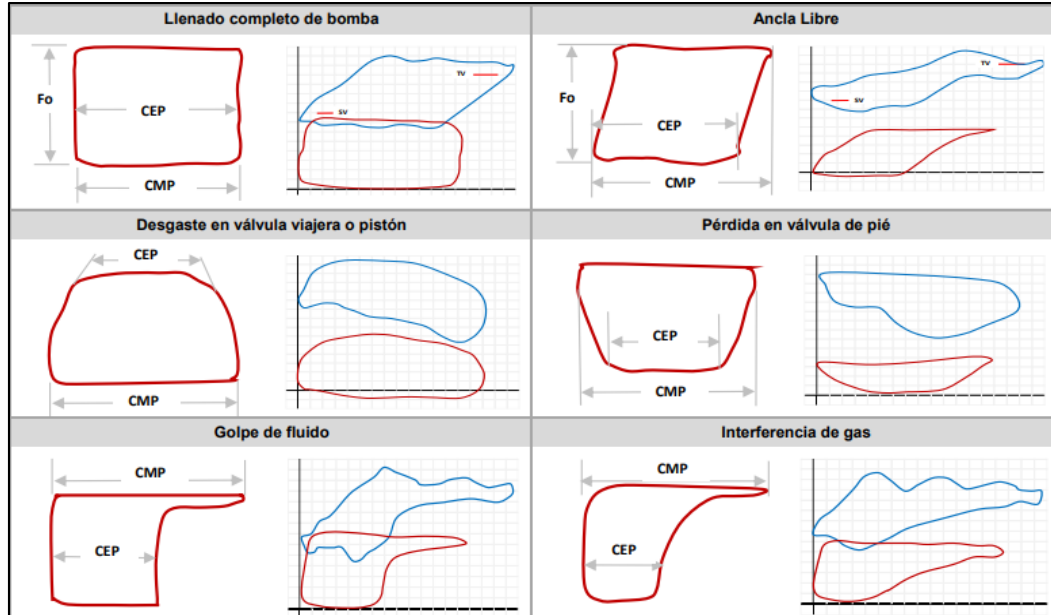
Fuente: CAMPOS, ORLANDO; PANCHI, CRISTIAN. Estudio para el cambio de sistema de levantamiento artificial a bombeo mecánico en el campo lago agrio operado por EP-Petroecuador. [en línea]. Tesis. Escuela Politécnica Nacional, Quito: 2011. [Consultado 27, abril, 2020]. Disponible en: <<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4222>>

1.2.2.2 Fenómenos de las cartas dinamométricas. Al analizar detalladamente el comportamiento de las cartas dinamométricas, se pueden identificar diferentes problemas asociados al ciclo de succión. Es importante identificar cuándo se ven afectadas para poder llegar a detectar el origen de los problemas que impiden el correcto funcionamiento del mecanismo de levantamiento artificial y darle solución a este con el fin de mantener un sistema de producción equilibrado. A partir de diversas razones se pueden presentar fenómenos como se muestran en la Imagen

³⁵ CAMPOS, Orlando et al. Estudio para el cambio de sistema de levantamiento artificial a bombeo mecánico en el campo lago agrio operado por EP-Petroecuador. [en línea]. Tesis. Escuela Politécnica Nacional, Quito: 2011. [Consultado 27, abril, 2020]. Disponible en: <<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4222>>

5., teniendo en cuenta que se encuentra indicado de color rojo la carta dinamométrica de fondo y de azul la carta dinamométrica de superficies.

Imagen 5. Fenómenos cartas dinamométricas

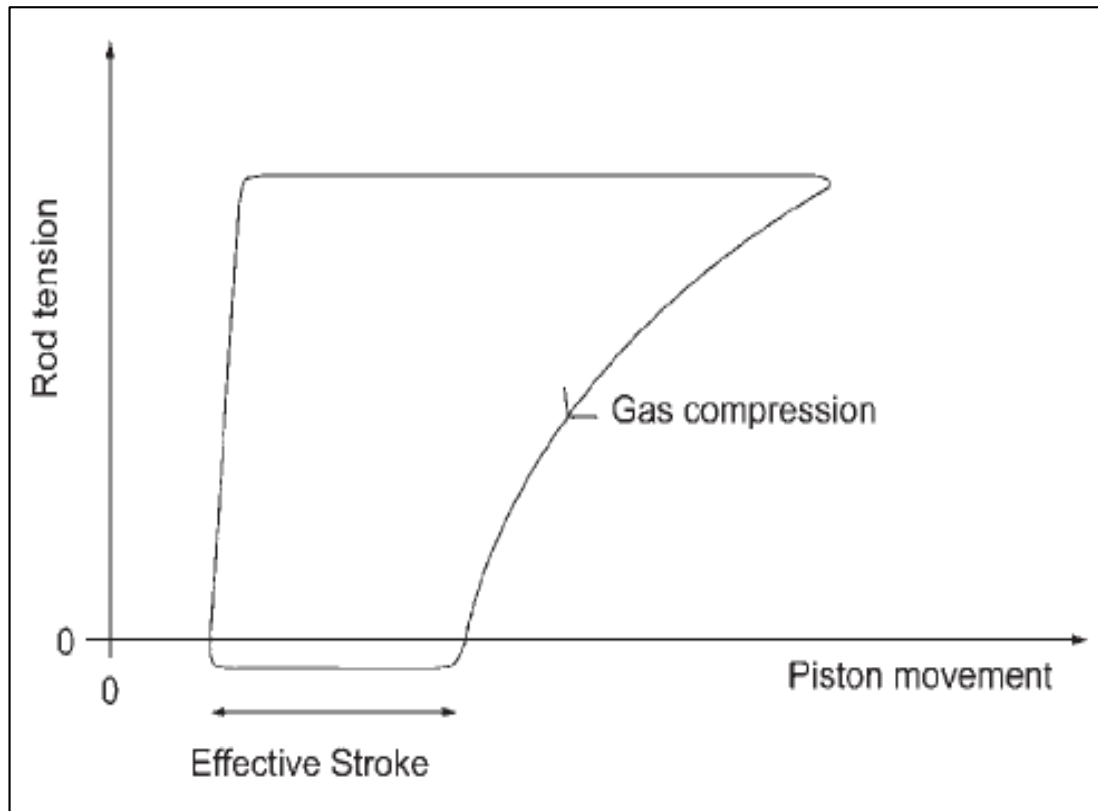


Fuente: OIL PRODUCTION. Bombeo mecánico. [Sitio WEB]. Buenos aires. La entidad. [27, abril, 2020]. Disponible en: < <https://cutt.ly/lfq4hoo> >

• **Interferencia de gas en la bomba de fondo.** La reducción de la eficiencia de llenado de la bomba puede ser producida por varios factores que afectan al sistema de bombeo mecánico. La presencia de gas es una de las más comunes debido al diferencial de presión existente entre el fondo del pozo y la bomba. El gas tiende a acumularse en el barril evitando la correcta transferencia de fluidos entre el fondo del pozo y la tubería de producción. En la Imagen 6., se puede observar el comportamiento típico de una carta dinamométrica cuando existe interferencia de gas en la bomba de fondo. Esta representa cómo la sarta de varillas en el momento de la carrera descendente tiene que vencer la presión ejercida por el gas comprimido en el interior del barril, disminuyendo la longitud de la carrera efectiva del pistón, generando una menor eficiencia de llenado de la bomba. Este comportamiento puede generar un bloqueo total del sistema de levantamiento artificial.³⁶

³⁶ BELLARBY, Jonathan, Well completion design: En: Beam pumps. Aberdeen, UK: Elsevier, 2009. p. 356.

Imagen 6. Interferencia de gas en la bomba de fondo

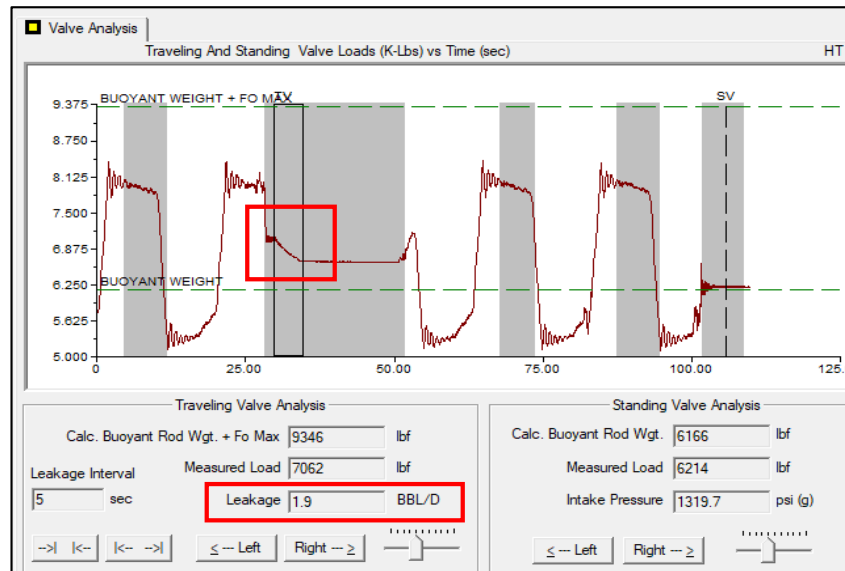


Fuente: BELLARBY, Jonathan, Well completion design: En: Beam pumps. Aberdeen, UK: Elsevier, 2009. p. 356

1.2.3 Fenómeno de escurrimiento. Recurso utilizado de la producción para la lubricación del pistón y el barril, la tasa de escurrimiento (SR) está íntimamente ligada al tamaño del pistón su valor oscila entre el 0.5% y 2% del desplazamiento total de fluido, valores menores al 0.5% pueden impedir una buena lubricación y por lo tanto un desgaste más rápido de los componentes, por otro lado, valores superiores pueden afectar la eficiencia volumétrica de la bomba.³⁷ En la Imagen 7., se puede observar el fenómeno de escurrimiento como una carga no constante, durante el test de válvulas, en la prueba a la válvula viajera.

³⁷ PARTIDAS, Hector. Bombeo mecánico optimización, diagnóstico y operación [en línea]. Anzoátegui-Venezuela.: 2003. [5, junio, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/Mfwr3wK> p. 41.

Imagen 7. Fenómeno de escurrimiento



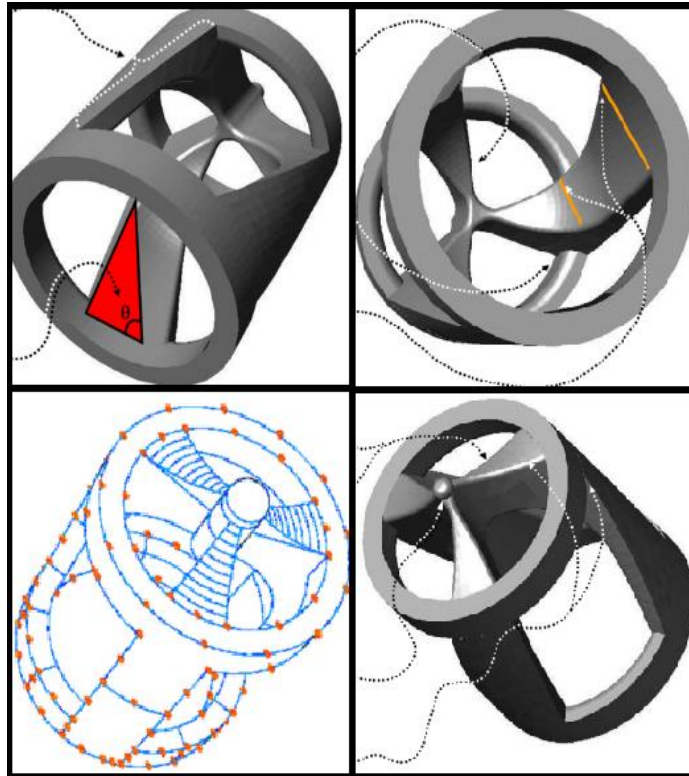
Fuente: elaboración propia con base en software TWM

1.3 CAJA TANGENT FLOW

Se describe como un inserto para una válvula de bola diseñado para reducir la interferencia por gas. Su diseño innovador proporciona a la bola una mayor estabilidad permitiéndole realizar un mejor sello por su ángulo tangente igual a π , forzando al fluido a entrar a un giro en el vórtice, reduciendo el diferencial de presión en un 40% y adicionalmente reduce el ruido en el sello de la válvula. El diseño de un inserto que promueva el mejor flujo durante el ciclo de bombeo mecánico era un desafío para la industria del petróleo, la caída de presión y la liberación de gas generan un desgaste anticipado de los equipos de fondo o el bloqueo de estos³⁸. Ver Imagen 8.

³⁸COYES, Corbin et al. Field-Driven Initiative to Improve Artificial Lift Efficiency and Reliability With an Engineered Sucker Rod Pump Ball Valve Insert. En: Tangentflow inc. [sitio WEB]. RedDeer, AB: La entidad. [29, abril, 2020]. Archivo PDF. p.1. Disponible en: <https://12916e1b-d15a-5dcc-964d-e59ffbcf5698.filesusr.com/ugd/53dce0_d1f2b8e5d4c44b19bf80eb7d00902c95.pdf>

Imagen 8. Caja Tangent Flow



Fuente: COYES, Corbin et al. Field-Driven Initiative to Improve Artificial Lift Efficiency and Reliability With an Engineered Sucker Rod Pump Ball Valve Insert. En: Tangentflow inc. [sitio WEB]. Red Deer, AB: La entidad. [29, abril, 2020]. Archivo PDF. p.6

1.3.1 Diseño de las cajas Tangent Flow. Al utilizar las cajas Tangent Flow se presentan beneficios debido al diseño que incluye la optimización del ángulo de flujo y posicionamiento de la bola, optimización de parámetros de diseño, optimización de las bridas y cilindros de extrusión y finalmente, debido a los materiales con los que fue diseñada, es proporcionada una mayor estabilidad y rigidez al inserto.

1.3.1.1 Optimización del ángulo de flujo y posicionamiento de la bola. La caja Tangent Flow posiciona la bola entre el anillo superior e inferior, donde el máximo diámetro de la bola se encuentra exactamente ubicado en el medio de los anillos, permitiendo un área transversal mayor. Optimizando la tasa de flujo volumétrico. La tangente del ángulo exterior del diseño es igual a Pi y del ángulo interior es cercano a cero. Esto permite optimizar la tasa de flujo y minimizar las pérdidas por fricción, reduciendo la liberación del gas³⁹.

³⁹Ibid., p. 6.

1.3.1.2 Optimización de parámetros de diseño. Para distribuir la fuerza de impacto de cierre de la bola, se formó una cuna en forma esfera donde la bola se detendrá y distribuirá su fuerza de forma equitativa. La base de los tres rieles fue ensanchada para proporcionar una mejor distribución de la fuerza recibida a lo largo del área de impacto; ambas mejoras minimizan el desgaste de las bridas, rieles, bola y cuerpo de la caja Tangent Flow. Los bordes internos de las paredes de la caja fueron suavizados, reduciendo las fuerzas de fricción durante la caída de presión, para prevenir una fractura en el cuerpo de la caja⁴⁰.

1.3.1.3 Optimización de las bridas y cilindros de extrusión. La parte superior de la caja Tangent Flow es protuberante para distribuir las fuerzas a través de las paredes y el anillo superior. Estas paredes se conectan en la parte superior por medio de un pequeño cilindro el cual aumenta el área transversal de flujo, permitiendo un mayor flujo volumétrico. De la misma forma el cilindro distribuye la fuerza por el anillo superior y las paredes del mismo para reducir una falla de la superficie.⁴¹

1.3.1.4 Análisis de elementos finitos. Por medio de este análisis se identificó que las tres bridas brindan una mayor estabilidad y rigidez al inserto Tangent Flow a comparación del inserto convencional, la aleación de cobalto y cromo son los materiales ideales para brindar la resistencia necesaria ante pozos con alto contenido de H₂S, sólidos y ambientes corrosivos.⁴²

1.3.2 Comparación caja Tangent Flow y caja API convencional. El estudio de laboratorio detallado por el instituto tecnológico de Alberta del sur (SAIT), donde se compara el comportamiento de la caja Tangent Flow y la caja API bajo las mismas condiciones de flujo, evidencia la reducción del diferencial de presión al utilizar el nuevo diseño con y sin la presencia de gas en el sistema. Adicionalmente se evidencio la disminución del ruido producido por la caja Tangent Flow a comparación de la caja API con lecturas superiores a los 90 dB, nivel que genera desgaste estructural de las cajas.⁴³ Ver Imagen 9.

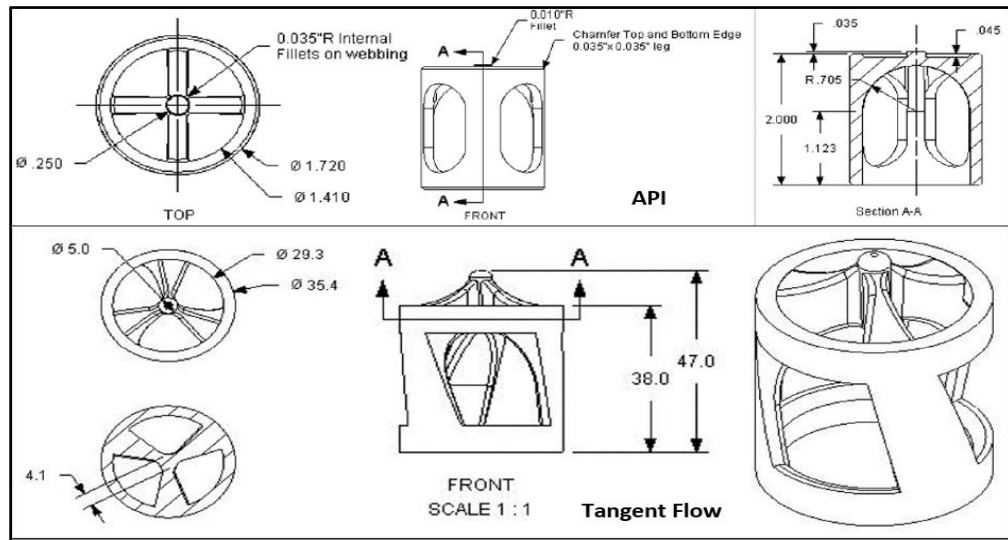
⁴⁰ *Ibíd.*, p. 6.

⁴¹ *Ibíd.*, p. 7.

⁴² *Ibíd.*, p. 8.

⁴³ *Ibíd.*, p. 7.

Imagen 9. Comparación Caja API y Caja Tangent Flow

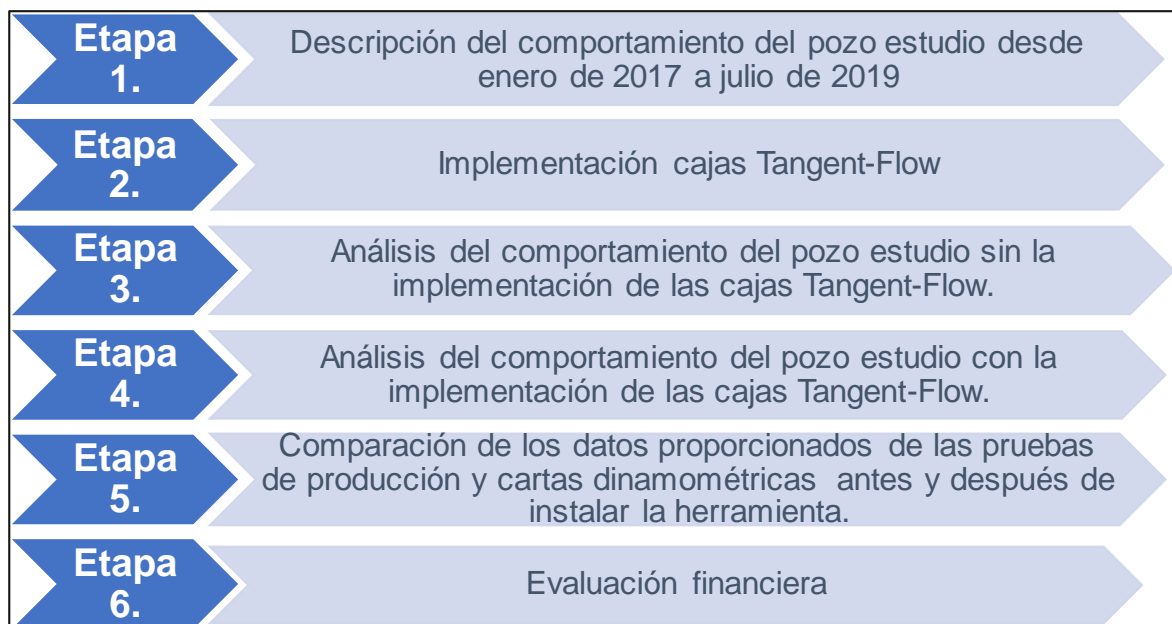


Fuente: COYES, Corbin et al. Field-Driven Initiative to Improve Artificial Lift Efficiency and Reliability With an Engineered Sucker Rod Pump Ball Valve Insert. En: Tangentflow inc. [Sitio WEB]. Red Deer, AB: La entidad. [29, abril, 2020]. Archivo PDF. p.6

2. METODOLOGÍA

A lo largo de este capítulo se dispone a plantear la metodología detallada para el adecuado desarrollo del proyecto y del cumplimiento de sus objetivos. Teniendo en cuenta que el proyecto gira en torno a un solo pozo estudio que presentó bloqueo por gas. Partiendo de las pruebas de producción y las cartas dinamométricas proporcionadas por la compañía de los tres meses previos a la implementación de las cajas Tangent Flow (Escenario 1) y de los tres meses posteriores a la implementación de las cajas Tangent Flow (Escenario 2) con las cuales se realizará el análisis de estas teniendo en cuenta las variables a analizar (BFPD, BOPD, BSW, Nivel de fluido sobre la bomba líquido y total, relación gas-petróleo, eficiencia de llenado, SPM, cargas máximas sobre la varilla) y adicionalmente, se determina la carrera real del pistón mediante la cual se establece el fluido no desplazado a causa de la interferencia de gas. Posteriormente, se realizará una comparación entre el Escenario 1 y el Escenario 2; El Escenario 1 hace referencia a los meses 1 (agosto 2019), 2 (septiembre 2019) y 3 (octubre 2019) y el Escenario 2 hace referencia a los meses 4 (noviembre 2019), 5 (diciembre 2019) y 6 (enero 2020). Finalmente, se desea realizar una evaluación financiera mediante los indicadores Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) para determinar la viabilidad de la implementación de las cajas Tangent Flow. En el Diagrama 1., se muestran las etapas a través de las cuales se desarrolla el proyecto.

Diagrama 1. Etapas metodología



Fuente: elaboración propia

2.1 PRIMERA ETAPA: COMPORTAMIENTO DEL POZO P-250 DESDE EL AÑO 2017 A JULIO 2019

Mediante la información proporcionada por la empresa, se procede a realizar la descripción del comportamiento del pozo desde el año 2017 hasta julio de 2019 con el fin de conocer las intervenciones realizadas al pozo a lo largo de su vida productiva teniendo en cuenta los barriles de fluido y de petróleo por día (BFPD y BOPD), porcentaje agua- sedimentos (%BSW), niveles de fluido total y líquido (NFSB Total y NFSB Líquido), eficiencia de llenado de la bomba de fondo (% llenado), strokes por minuto (SPM), el gas producido y la relación gas petróleo (GOR) por petición de la empresa, para conocer cómo ha sido dicho comportamiento en los últimos años. Finalmente, su comportamiento será mostrado a través de diferentes gráficas.

2.2 SEGUNDA ETAPA: IMPLEMENTACIÓN DE LA CAJA TANGENT FLOW

El día primero de noviembre de 2019 la unión temporal IJP realiza la instalación de las cajas Tangent Flow en el Pozo P-250 del Campo Palagua debido a que el gas producido ha generado fenómenos como la interferencia de gas que generan desgaste de los equipos de fondo y caídas de presión permitiendo que el gas en solución se libere, teniendo en cuenta que en los últimos años la relación gas-petróleo ha alcanzado valores superiores a 1000 Scf/bbl. Adicionalmente, el fenómeno ha provocado bloqueos de gas en el pozo provocando que se deje de aportar fluido superficie. Para esta etapa se muestra el estado mecánico posterior a la implementación de las cajas Tangent Flow.

2.2.1 Condiciones de implementación de las cajas Tangent Flow. Las aplicaciones de campo necesarias para un exitoso funcionamiento de la caja Tangent Flow que se debe tener en cuenta son el rango de instalación de la caja en la bomba de varilla de bombeo entre 1640 ft y 11482 ft, la variedad de los diámetros disponibles en las cajas Tangent Flowse (1.25-, 1.5-, 1.75-, 2.0- y 2.25- in.) diseñados para encajar en múltiples bombas, haciéndolas extremadamente versátiles y disponibles. Finalmente, para reemplazar las cajas API por las cajas Tangent Flow no es necesario realizar el cambio del ensamblaje completo de la bomba, lo que las hace aplicables al 90% de las bombas utilizadas en la industria⁴⁴.

2.2.2 Implementación de cajas Tangent Flow. Antes de que IJP proceda a realizar el proceso de instalación del nuevo equipo, se realiza una inspección de la formación donde se obtiene que el 10% de los perforados se encuentran tapados, equivalentes a 6 ft; el 90% restante se encontraba libre de taponamiento (53 ft). Se realiza el proceso de limpieza por medio de circulación directa de agua de formación

⁴⁴ COYES, Corbin et al. Field-Driven Initiative to Improve Artificial Lift Efficiency and Reliability With an Engineered Sucker Rod Pump Ball Valve Insert. En: Tangentflow inc. [sitio WEB]. RedDeer, AB: La entidad. [29, abril, 2020]. Archivo PDF. p.1. Disponible en: < <https://cutt.ly/wfq4Fr3> >

con 120 SPM y 600 psi. Este procedimiento se realiza desde los 4,177 ft hasta el fondo del pozo, 4,279 ft. Se evidencia el retorno de arena fina y gruesa. En total el pozo absorbe 455 bbls de agua. A continuación, se presenta evidencia de la instalación de la caja a partir de fotografías proporcionadas por la empresa; la caja de la válvula viajera con diámetro de 1-1/2" y la caja de la válvula fija de 1-3/4". Ver Imagen 10.

Imagen 10. Instalación cajas Tangent Flow



Fuente: unión temporal IJP

En la Imagen 11., se puede observar la tubería a la cual fueron colocadas las cajas a manera de insertos.

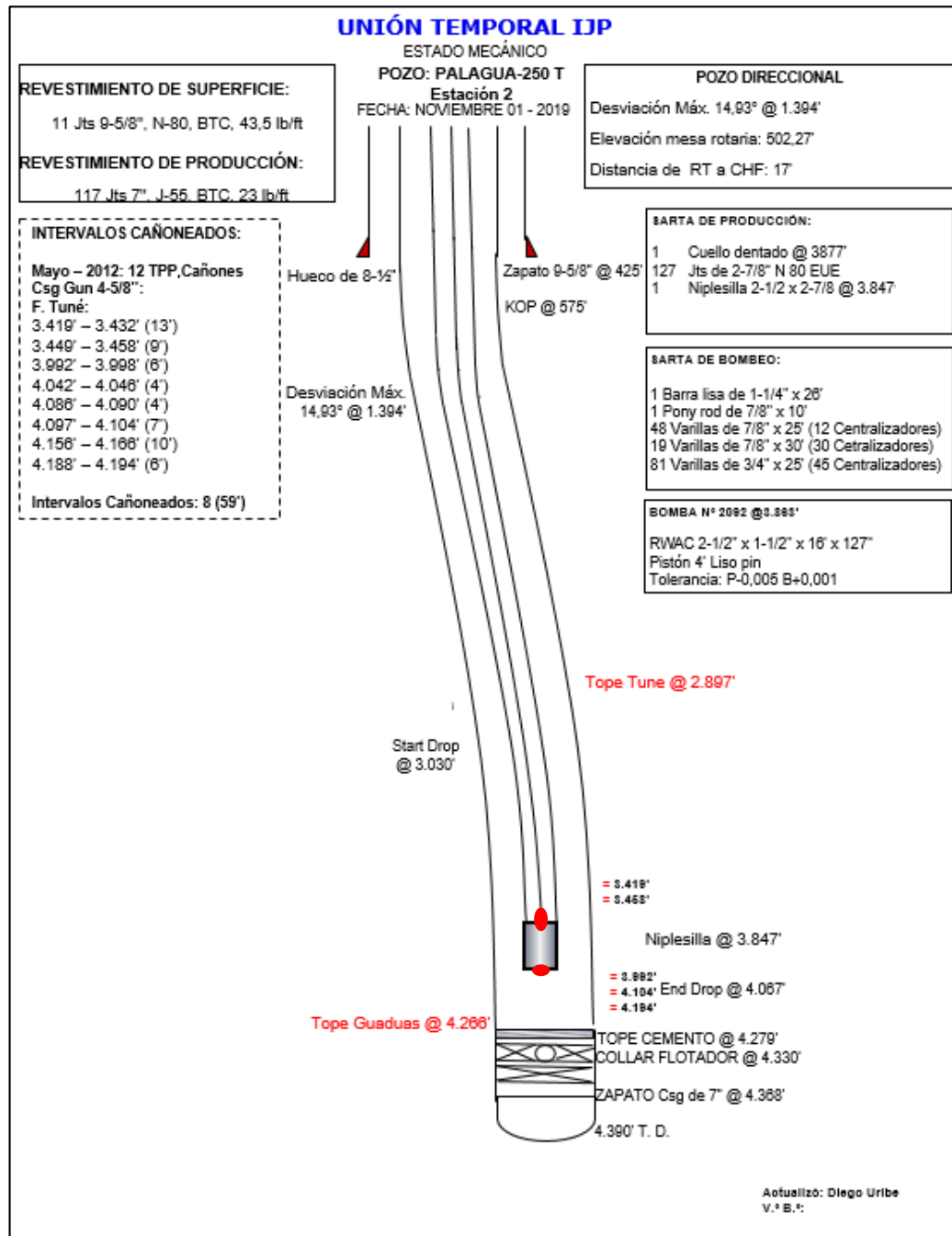
Imagen 11. Tubería cajas Tangent Flow



Fuente: unión temporal IJP

2.2.2.1 Estado mecánico del pozo después de la implementación de las cajas Tangent Flow. Se tiene bomba RWAC (bomba tipo inserta, con tipo de barril para pistón metálico de pared delgada, con localización del anclaje en el tope de tipo copas) de 2-1/2" x 1-1/2" x 16' x 127" con sarta de varillas de 3/4" y 7/8" y 4390' de TVD. La entrada de la bomba (intake) cuenta con una profundidad de 3863 ft. En la Imagen 12., se observa el punto rojo superior que indica la posición de la caja de la válvula viajera y el punto rojo inferior indica la posición de la caja de la válvula fija.

Imagen 12. Estado mecánico posterior a instalación cajas Tangent Flow



Fuente: base de datos Parko Services S.A.

2.3 TERCERA Y CUARTA ETAPA: EVALUACIÓN DE LAS PRUEBAS DE PRODUCCIÓN Y CARTAS DINAMOMÉTRICAS DEL POZO ESTUDIO ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS CAJAS TANGENT FLOW (ESCENARIO 1) Y DESPUES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS CAJAS TANGENT FLOW (ESCENARIO 2)

En esta sección, se muestra el procedimiento para el cumplimiento de la tercera y cuarta etapa en donde se realizan los análisis correspondientes a las cartas dinamométricas y a las pruebas de producción. Posteriormente, se realiza una comparación de los datos proporcionados por la empresa para cada uno de los Escenarios (1 y 2). Las variables para analizar son BFPD, BSW, BOPD, NFSB Total y Líquido, la eficiencia de llenado, SPM y GOR. El periodo de estudio está delimitado a los 3 meses previos a la implementación de la caja Tangent Flow (Escenario 1), es decir, agosto, septiembre y octubre de 2019 y por otro lado, el Escenario 2 esta delimitados a los 3 meses posteriores a la implementación, es decir, noviembre y diciembre de 2019 y enero de 2020. Para el análisis del Escenario 1, el cual hace referencia a la tercera etapa, son proporcionadas por la empresa las pruebas de producción y cartas dinamométricas mostradas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Pruebas de producción, cartas dinamométricas y fechas Escenario 1 (Tercera etapa)

	Mes	Pruebas de producción	Cartas dinamométricas
Escenario 1	1	09-ago.-19	28-ago.-19
		17-ago.-19	
		19-ago.-19	
		28-ago.-19	
	2	10-sep.-19	27-sept.-19
		11-sep.-19	
		14-sep.-19	
		17-sep.-19	
		27-sep.-19	
	3	08-oct.-19	20-oct.-19
		20-oct.-19	
		30-oct.-19	

Fuente: elaboración propia

Para el análisis del Escenario 2, el cual hace referencia a la tercera etapa, son proporcionadas por la empresa las pruebas de producción y cartas dinamométricas mostradas en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Fechas Escenario 2, pruebas de producción y carta dinamométricas (cuarta etapa)

	Mes	Pruebas de producción	Cartas dinamométricas
Escenario 2	4	05-nov.-19	06-nov.-19
		06-nov.-19	
		07-nov.-19	
		08-nov.-19	
		09-nov.-19	
		10-nov.-19	
		11-nov.-19	
		12-nov.-19	
		13-nov.-19	
		14-nov.-19	
		15-nov.-19	
		18-nov.-19	
		26-nov.-19	
		27-nov.-19	
	28-nov.-19		
	5	05-dic.-19	18-dic.-19
		06-dic.-19	
		18-dic.-19	
		19-dic.-19	
		20-dic.-19	
		22-dic.-19	
6	08-ene.-20	17-ene.-20	
	17-ene.-20		
	29-ene.-20		

Fuente: elaboración propia

A partir de las pruebas de producción proporcionadas por la empresa se tienen que los datos tomados en el lugar de pozo son BFPD, BSW, BOPD, gas y GOR. Por otro lado, los datos a verificar con el software TWM son los niveles de fluido sobre la bomba y la eficiencia de llenado. Ver Cuadro 3.

Cuadro 3. Datos pruebas de producción

Datos proporcionados en la prueba de producción	
Datos tomados en el lugar del pozo	BFPD, BSW, BOPD, Gas y GOR
Datos a verificar con TWM	NFSB Total, NFSB Líquido, Eficiencia de llenado

Fuente: elaboración propia

A lo largo del análisis de los dos Escenarios se tienen en cuenta las siguientes clasificaciones estandarizadas por la empresa respecto a la eficiencia de llenado de la bomba y nivel de fluido líquido sobre la bomba (NFSB líquido). Ver Tabla 1.

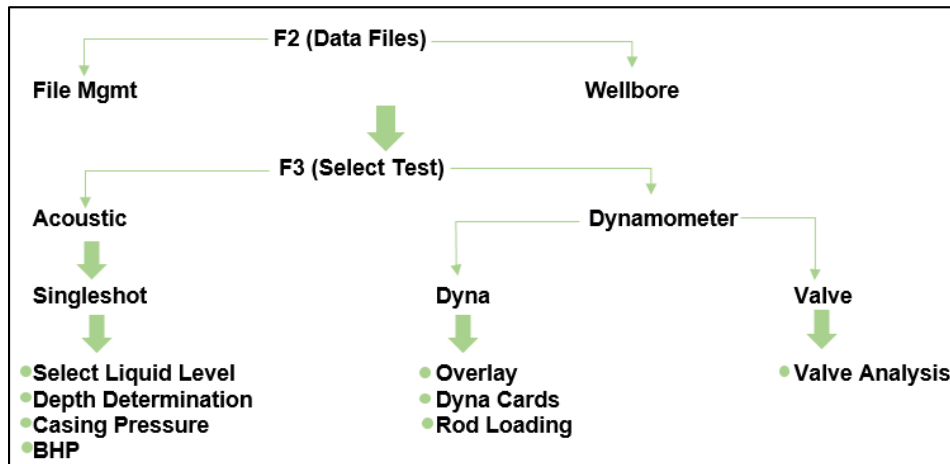
Tabla 1. Clasificación eficiencia de llenado y NLSB

	Eficiencia de llenado	NLSB
Alto	>70	>450 ft
Medio	40%-70%	250 ft- 450 ft
Bajo	<40%	<250 ft

Fuente: elaboración propia

2.3.1 Interpretación del software TWM. La empresa brinda 3 pruebas tomadas con el equipo Echometer para cada Escenario, que contienen cada una el Test de niveles de fluido, Test de válvulas y cartas dinamométricas proporcionadas por la empresa del periodo de los tres meses antes de la instalación de la nueva caja. Las cartas son visualizadas en el software TWM (Total Well Management) de Echometer, proporcionado por la empresa, en la modalidad de Recall Mode, en donde se muestra la información obtenida de las condiciones operativas del pozo de estudio, permitiendo comprender el comportamiento del sistema de levantamiento artificial por bombeo mecánico, mediante el análisis de fuerzas sobre las varillas y toma de niveles de fluido con el fin de comprender el origen de los datos de las pruebas de producción y su validez. Las secciones para utilizar de este software para el desarrollo del proyecto se pueden observar en el Diagrama 2.

Diagrama 2. Secciones software TWM- Recall Mode

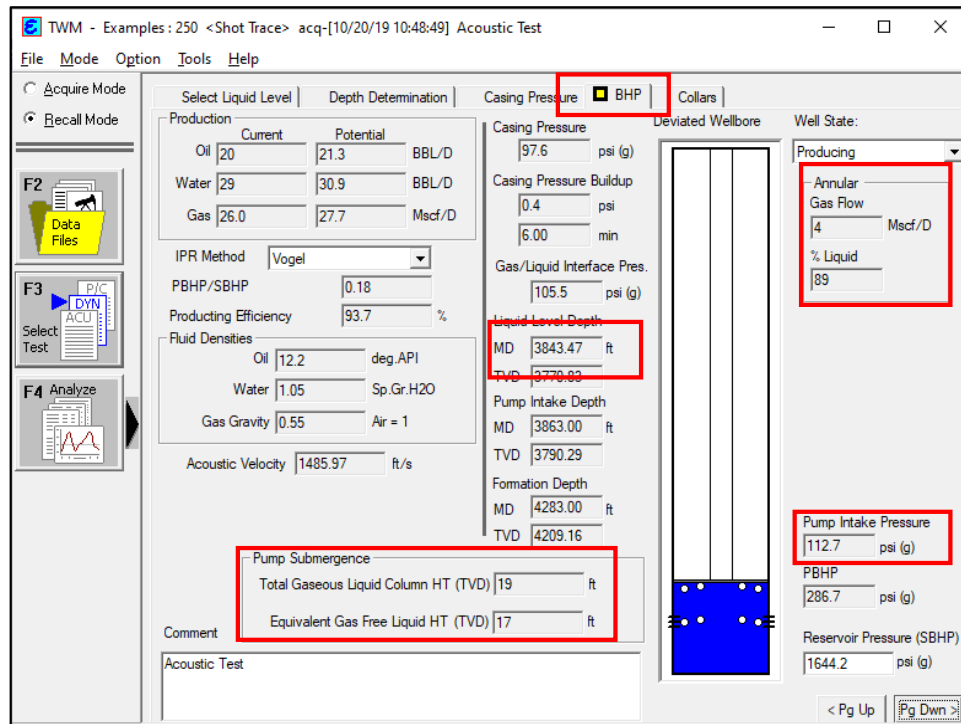


Fuente: elaboración propia

2.3.1.1 Selección de la prueba a analizar. Inicialmente en File Mgmt se procede a seleccionar la fecha de la prueba del pozo; A continuación, se verifica en la pestaña de Wellbore, dentro de la sección de Data Files, que las condiciones de las pruebas presenten la información correspondiente al estado mecánico del pozo para el Escenario 1 y para el Escenario 2. Posteriormente, se accede a la pestaña Acoustic> Singleshot donde se tiene la información de la prueba de nivel en la pestaña BHP; finalmente, se retorna a F3 (Select Test) en la pestaña Dynamometer para seleccionar la prueba Dyna (para analizar las cartas dinamométricas y el estrés de las varillas) o la prueba Valve (para analizar el Test de válvulas).

- **Prueba de nivel.** Las tres pruebas tomadas con el software Echometer, contienen cada una su prueba de nivel, donde en la sección BHP se tiene la posibilidad de identificar los resultados de la prueba de nivel, donde se obtiene un resumen de las propiedades de los fluidos en el fondo del pozo el cual proporciona valores dentro Liquid Level Depth el MD que nos indica la profundidad a la que se encuentra el tope de la columna de fluido. Dentro del recuadro de Pump Submergence se observan los valores de Total Gaseous Liquid Column y Equivalent Gas free Liquid, estos últimos hacen referencia al espesor de la columna de líquido con gas y al espesor de la columna de líquido sin gas, respectivamente. Además, se analiza la Pump Intake Pressure (Presión a la entrada de la bomba). Por medio de la prueba de restauración de Presión, se identifica la cantidad de gas que fluye a través del anular, permitiendo identificar el % de líquido presente en el anular (columna de fluido); de esta forma el software hace la respectiva corrección sobre la columna de fluido calculada a través de la prueba acústica, teniendo en cuenta la distancia entre el nivel de fluido identificado y la entrada de la bomba. Los resultados de las variables mencionadas se encuentran señaladas en la Imagen 13.

Imagen 13. Resumen BHP. Echometer

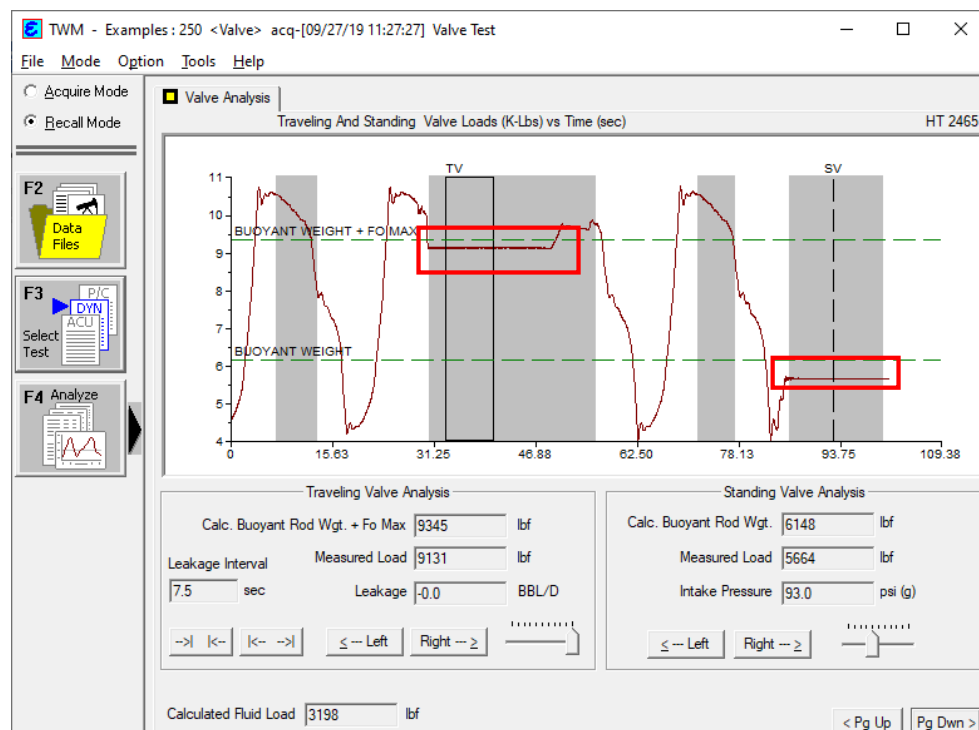


Fuente: elaboración propia con base en software TWM

- Test de válvulas.** Las tres pruebas tomadas con el software Echometer, contienen cada una su prueba de válvulas, la cual permite medir la carga que se ejerce en la barra pulida durante el ciclo de bombeo de la bomba de fondo del pozo estudio donde se determina si las válvulas de esta se encuentran funcionando correctamente mediante el grafico que arroja el software en la sección Valve Analysis como se observar en la Imagen 14. El buen sello está representado en los recuadros rojos, dos líneas rectas horizontales con un diferencial de carga, en representación de la válvula viajera (recuadro superior) y a la válvula fija (recuadro inferior). TWM hace la representación gráfica de la carga (K-blis) que se ejerce por la columna de fluidos con respecto al tiempo (Sec) en las válvulas de fondo tanto viajera como estacionaria, midiendo la fuerza que es ejercida sobre la barra pulida en la carrera ascendente donde la válvula viajera soporta todo el peso de la columna de fluidos y durante la carrera descendente donde la válvula estacionaria soporta la fuerza ejercida por la columna de fluidos⁴⁵.

⁴⁵ ECHOMETER. Well analyzer and TWM Software operating manual Traveling and standing valve test. [Sitio WEB]. Wichita Falls. La entidad. [29, abril, 2020]. Disponible en: < <https://cutt.ly/Zq7Zg> >

Imagen 14. Cargas en la válvula de fondo

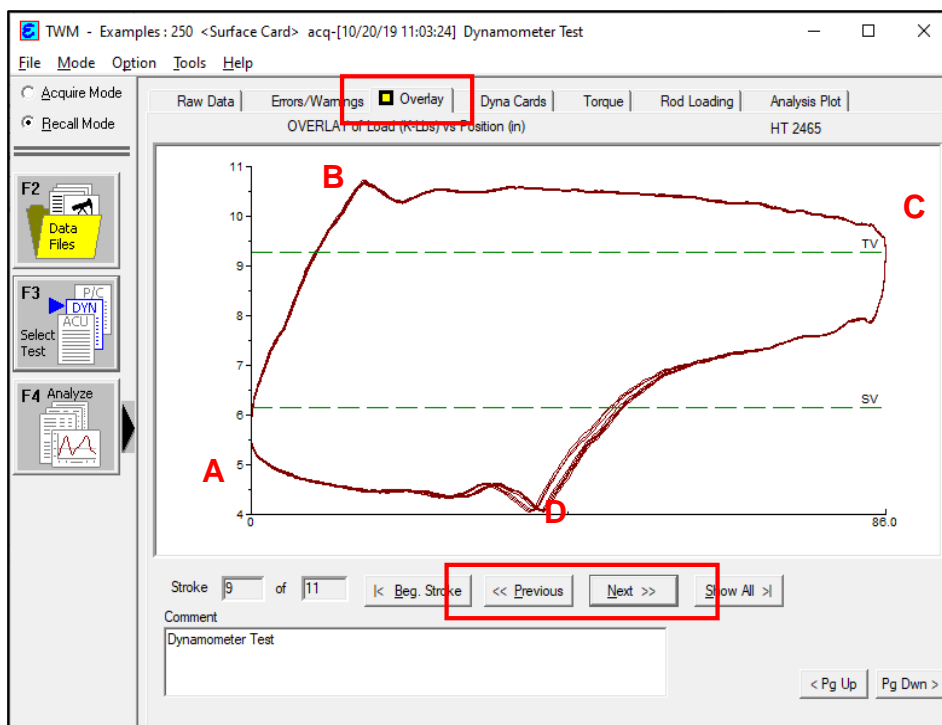


Fuente: elaboración propia con base en software TWM

- Prueba dinamométrica.** Las tres pruebas tomadas con el software Echometer, contienen cada una su prueba dinamométrica, en donde se analiza el diagrama que representa las fuerzas que intervienen en el ciclo de la bomba de fondo en cada una de ellas. Las fuerzas sobre la sarta de varillas son leídas en superficie a través del dinamómetro y las celdas de carga con el acelerómetro. El programa traduce los datos que obtiene a gráficos de carga (K-Lbs) versus posición del pistón (pulgadas). La cantidad puede variar de 3 a 7 hasta llegar a los 15 Strokes dependiendo de la necesidad que se tenga, en donde, teóricamente cada uno de los ciclos debe ser igual a los demás, sin embargo, en la medida en que las curvas se separen entre sí indica la presencia de gas⁴⁶. En la sección Overlay, en la Imagen 15., se puede identificar un resumen de la carga (K-lbs) respecto a la posición del pistón (In) de cada uno de los ciclos (Strokes) analizados de la carta de superficie. Con las opciones “Previous” y “Next” se puede observar qué tanto se llena la bomba con cada stroke. La incongruencia entre cada uno de los ciclos de estudio se puede identificar como alteraciones en los fluidos de fondo. La presencia de gas genera diferencias entre cada ciclo analizado (nótese como espacio entre las curvas D).

⁴⁶ ECHOMETER. Well analyzer and TWM Software operating manual Dyna Card. [Sitio WEB]. Wichita Falls. La entidad. [29, abril, 2020]. Disponible en: < <https://cutt.ly/Zfq7fZg> >

Imagen 15. Overlay

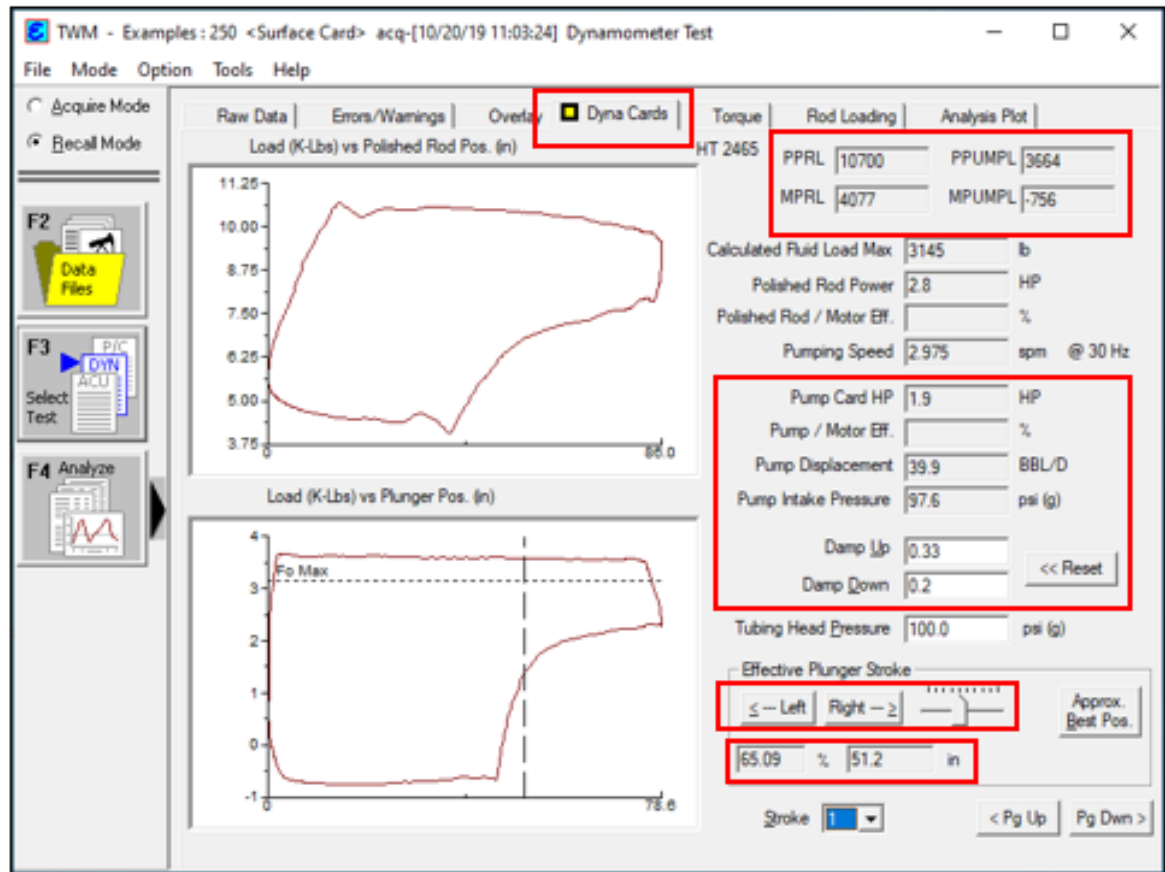


Fuente: elaboración propia con base en software TWM

En la Imagen 16., se puede apreciar en la parte superior izquierda la carta dinamométrica de superficie, la cual interpreta todas las fuerzas que afectan al ciclo y en la parte inferior izquierda se encuentra la carta dinamométrica de fondo. En esta última se ven las fuerzas que afectan a la bomba de subsuelo y permite interpretar los problemas asociados al llenado de la bomba de fondo una vez se verifica el buen estado de las válvulas con el Test de válvulas. En esta misma sección se pueden encontrar los datos asociados a los esfuerzos máximos y mínimos que puede presentar en la sarta de varillas PPRL (Peak Polish Rod Load) y MPRL (Minimun Polish Rod Load), los cuales son identificados como los rangos límites que delimitan la carta de superficie. Para la bomba de fondo estos datos se conocen como PPUMPL (Peak Pump Load) para el valor máximo de esfuerzo que se ejerce en fondo y MPUMPL (Minumun Pump Load) el cual identifica el valor mínimo de la carga ejercida en la bomba de fondo, este valor puede ser negativo en ocasiones debido a la fuerza de boyante.⁴⁷ En la parte inferior derecha se puede cambiar el número del stroke en la prueba.

⁴⁷ ECHOMETER. Well analyzer and TWM Software operating manual Dyna card. [SitioWEB]. Wichita Falls. La entidad. [29, abril, 2020]. Disponible en: <<https://hamdon.net/wp-content/uploads/2015/04/TWM-Software-Manual.pdf>>

Imagen 16. Dyna card

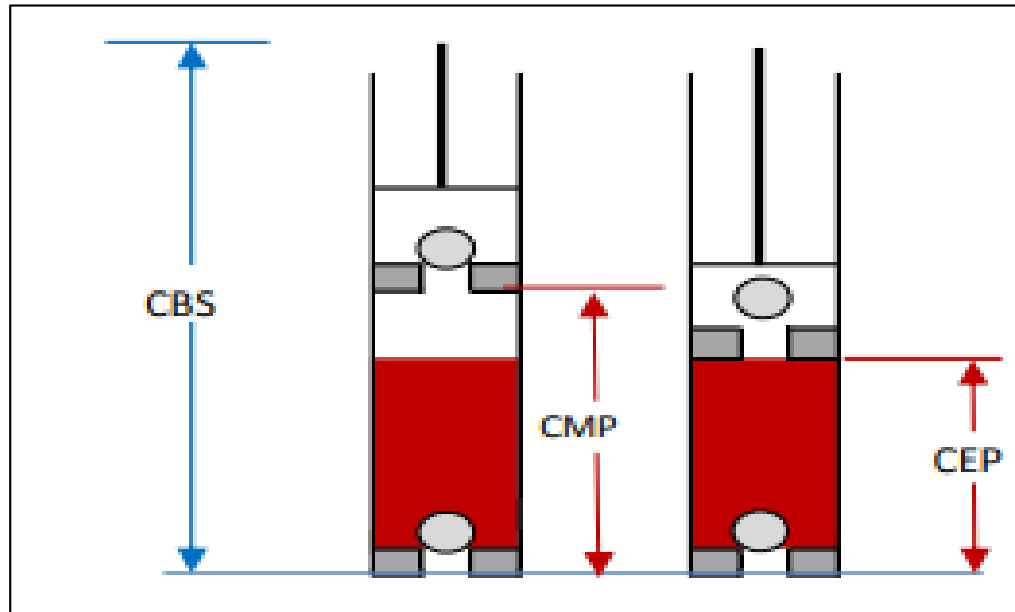


Fuente: elaboración propia con base en software TWM

En la Imagen 17., se explican las carreras que son tenidas en cuenta para una correcta interpretación de las cartas dinamométricas. En primer lugar se tiene la carrera de la barra pulida en superficie (CBS), la carrera máxima del pistón (CMP) que hace referencia a la máxima longitud de movimiento del pistón respecto al barril durante una carrera completa y por último, la carrera efectiva del pistón (CEP), es decir, la longitud de la carrera del pistón cuando la carga total del fluido está actuando sobre la válvula de pie. Se identifica con rojo el líquido que entra a la bomba, idealmente este debe ocupar el 100% del barril pero debido a la disolución del gas al entrar a la bomba, parte de ese volumen es ocupado por el mismo gas el cual disminuye el porcentaje de llenado de la bomba.⁴⁸

⁴⁸ OIL PRODUCTION. Bombeo mecánico. [Sitio WEB]. Buenos aires. La entidad. [27, abril, 2020]. Disponible en: <<http://oilproduction.net/files/Guia-de-Interpretacion-de-Dinamometrica-y-Calculo-de-Desplazamiento-en-Bombas-de-Profundidad.pdf>>

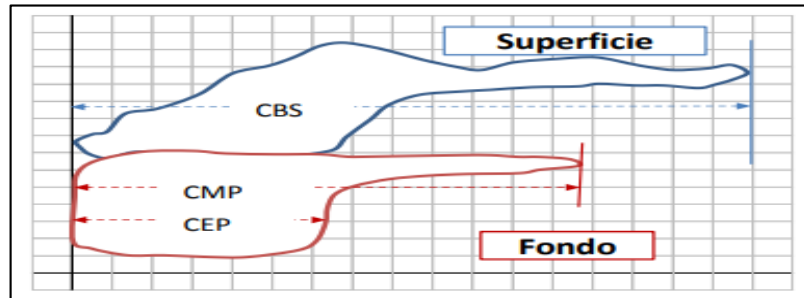
Imagen 17. Llenado del barril de fondo y sus dimensiones



Fuente: OIL PRODUCTION. Bombeo mecánico. [Sitio WEB]. Buenos aires. La entidad. [27, abril, 2020]. Disponible en: < <https://cutt.ly/Wfq7Bv9> >

Las distancias anteriores son representadas en las cartas dinamométricas y de superficie, como se describe en la Imagen 18., donde se puede observar claramente cada una de esas distancias y como la carrera efectiva del pistón es menor a la carrera máxima del pistón, debido a alguna falla en las válvulas.

Imagen 18. Distancias del barril de fondo

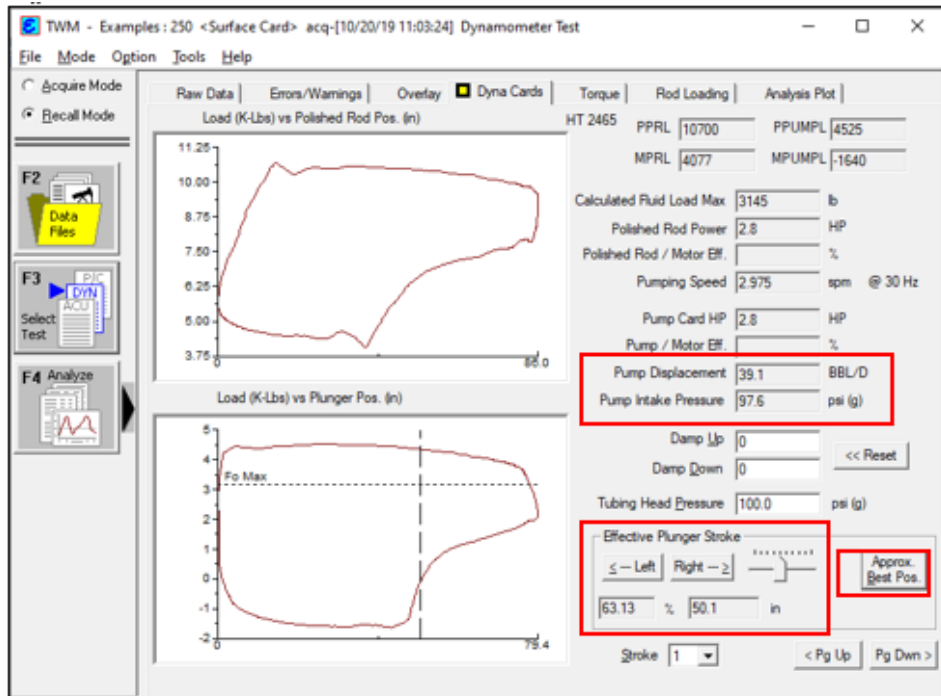


Fuente: OIL PRODUCTION. Bombeo mecánico. [Sitio WEB]. Buenos aires. La entidad. [27, abril, 2020]. Disponible en: < <https://cutt.ly/Wfq7Bv9> >

2.3.1.2 Tabulación e interpretación de datos por stroke. Con los datos presentados en la sección de Dyna Cards, son tabulados la carga de las varillas, la carga de la bomba, la velocidad de operación del sistema de bombeo mecánico, la presión a la entrada de la bomba, la carrera efectiva y máxima del pistón; Estos

datos son determinados seleccionando la opción de Mejor Aproximación para determinar el fluido desplazado por la bomba durante la carrera descendente arrojado por del software. Ver Imagen 19.

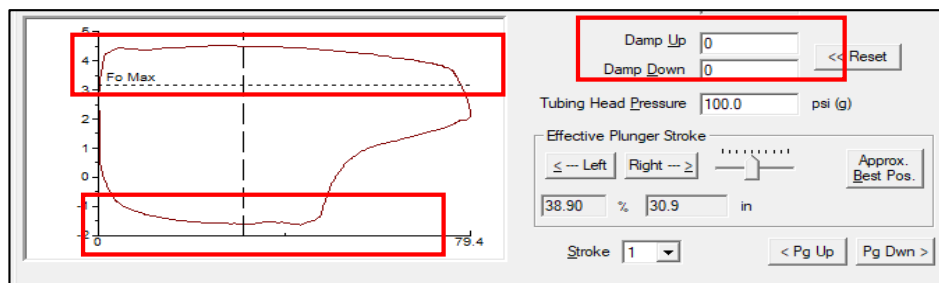
Imagen 19. Mejor aproximación software TWM



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

Las pérdidas por fricción generadas por la sarta de varillas de bombeo y el tubing, y del pistón y el barril son tenidas en cuenta mediante el ajuste de los factores Damp Up y Damp down; estos se ajustan hasta obtener las líneas horizontales superior e inferior de la carta dinamométrica de fondo. En la Imagen 20., se puede observar que los factores de fricción no se encuentran ajustados.

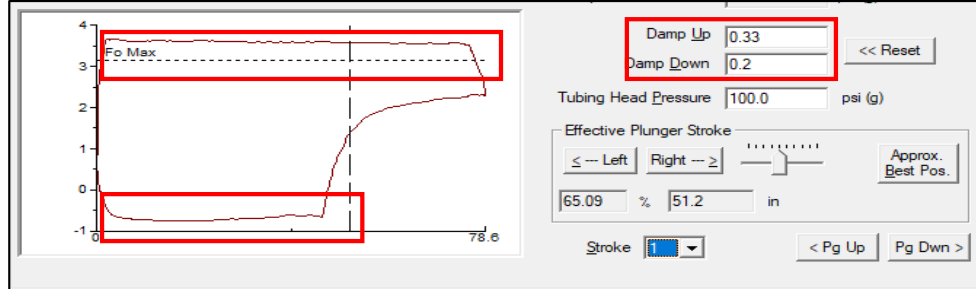
Imagen 20. Factores de fricción sin ajustar



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

En la Imagen 21., se puede observar cómo las líneas horizontales se encuentran más rectas debido al ajuste de los factores de fricción realizado.

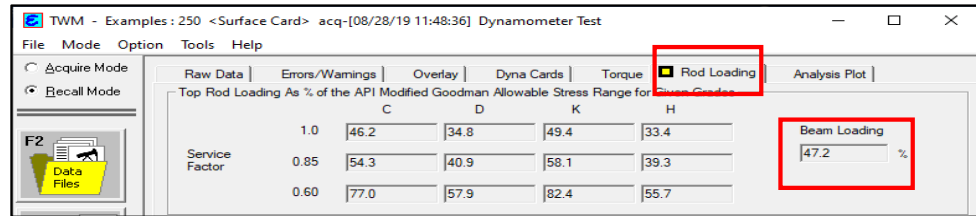
Imagen 21. Factores de fricción ajustados



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

- **Fuerzas de las varillas.** Se procede a identificar el porcentaje de estrés en la varilla el cual depende de la fuerza ejercida por el sistema de bombeo mecánico para un Stroke, este se encuentra ubicado en la pestaña Rod Loading de la prueba Dyna en la parte superior derecha. Para identificar el porcentaje promedio de la prueba realizada se procede a calcular el promedio obtenido en el porcentaje de estrés en la varilla durante cada Stroke evaluado por prueba. Ver Imagen 22.

Imagen 22. Sección fuerza de las varillas



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

Finalmente, las variables tabuladas por stroke se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Variables para tabular

Carga de las varillas	Carga de la bomba	General
Stress load, PPRL, MPRL	PPUMPL, MPUMPL	SPM, Desplazamiento de la bomba, PIP, THP, Damp UP, Damp Down, CEP twm, %CEP twm, CMP

Fuente: elaboración propia

Posterior a la tabulación de los datos por stroke se realiza un promedio mediante la Ecuación 1., para determinar el comportamiento general de la prueba.

Ecuación 1. Promedio aritmético

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n}$$

Fuente: RONDERO, Carlos. Calculo promedial. El caso de la media aritmética. En: Dialnet [sitio WEB]. Hidalgo, MX: La entidad [29, abril, 2020]. Archivo PDF. p. 392. Disponible en: < <https://cutt.ly/3fq5buX>>

- **Cálculos volumétricos.** Para determinar de dónde proviene la diferencia entre el desplazamiento de la bomba arrojado por el software TWM y los BFPD de la prueba de producción se procede a hacer el siguiente procedimiento. Inicialmente se determina el área del pistón mediante la Ecuación 2., teniendo en cuenta que el diámetro de este es 1.5 in.

Ecuación 2. Área del pistón

$$Ap = \pi * r^2 = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

Fuente: RIOS, Julio. Perímetro y área de un círculo [Video]. Youtube. Cali. (12, octubre, 2012, creación). 19:44:00 [consultado 29, abril, 2020]. Disponible en: < <https://cutt.ly/Hfq5VFG> >

Posteriormente, con el caudal indicado por las pruebas de producción, se procede a aplicar la Ecuación 3, despejando CEP, teniendo en cuenta que este será el real debido a que se determina a partir de lo obtenido de las pruebas de producción.

Ecuación 3. Caudal real

$$Q_{real} = 0.1484 * CEP_{real} * SPM * Ap$$

Fuente: HIRSCHFELDT, Marcelo. Guía de interpretación de dinamométrica y cálculo de desplazamiento en bombas de profundidad. En: Oil production [sitio web]. Argentina: La entidad [08-04-2016]. Archivo PDF disponible en: < <https://cutt.ly/Bfq6ijk> >

Teniendo los datos de la CEP_{real} y la CMP obtenida en el Cuadro 3, mediante la Ecuación 4., se determina el %CEP_{real}.

Ecuación 4. Porcentaje CEP real

$$\%CEP_{real} = \frac{CEP_{real}}{CMP} * 100$$

Fuente: HIRSCHFELDT, Marcelo. Guía de interpretación de dinamométrica y cálculo de desplazamiento en bombas de profundidad. En: Oil production [sitio web]. Argentina: La entidad [08-04-2016]. Archivo PDF disponible en: < <https://cutt.ly/0fq6jKz> >

Para determinar la carrera no efectiva del pistón durante todo el recorrido del ciclo de bombeo mecánico se utiliza la Ecuación 5.

Ecuación 5. CNEP

$$CNEP = CMP - CEP_{real}$$

Fuente: elaboración propia

Ahora, para determinar la CNEP inicial se debe tener en cuenta la CEP twm y la CEP real para llevar aplicar la Ecuación 6. Esto permite determinar la distancia al principio de la carrera que no se tiene en cuenta en el desplazamiento de fluido de la bomba debido a que el gas está ocupando dicho espacio.

Ecuación 6. CNEP inicial

$$CNEP_i = CEP_{twm} - CEP_{real}$$

Fuente: elaboración propia

Para determinar la CNEP final se debe tener en cuenta la CEP twm y la CMP para llevar aplicar la Ecuación 7. Esto permite determinar la distancia utilizada por el pistón para comprimir el gas que se encuentra en el barril antes de realizar el cierre de la válvula viajera.

Ecuación 7. CNEP final

$$CNEP_{final} = CMP - CEP_{twm}$$

Fuente: elaboración propia

Para determinar el fluido no desplazado se implementa la Ecuación 8., reemplazando N si se desea conocer el total, el de la CNEP inicial o final.

Ecuación 8. Fluido no desplazado

$$Q_{FND} = 0.1484 * Ap * Sp * N$$

Fuente: HIRSCHFELDT, Marcelo. Guía de interpretación de dinamométrica y cálculo de desplazamiento en bombas de profundidad. En: Oil production [sitio web]. Argentina: La entidad [08-04-2016]. Archivo PDF disponible en: <https://cutt.ly/bfq6SHY>

Por lo tanto, la tabulación de los datos por stroke incluye los datos mencionados en el Cuadro 5. Adicionalmente, se utiliza de igual forma la Ecuación 1., para realizar el promedio a dichas variables en cada mes de los respectivos Escenarios.

Cuadro 5. Datos por stroke tabulados

CEP Real (in)
BFPD prueba de producción (Bbl/d)
% CEP real
CNEP inicial (in)
%CNEPi
CNEP final (in)
%CNEPf
CNEP (in)
%CNEP
FND CNEP inicial (Bbl/d)
FND CNEP final (Bbl/d)
FND total (Bbl/d)

Fuente: elaboración propia

2.3.2 Comportamiento general de las pruebas de producción. Para comprender el comportamiento del pozo durante el Escenario 1 y 2, se presentan los gráficos BFPD, BOPD y %BSW Vs tiempo; eficiencia de llenado, GOR Vs tiempo; NFSB Total, eficiencia de llenado Vs tiempo y eficiencia de llenado, SPM Vs tiempo a partir de los cuales se realizará el análisis correspondiente.

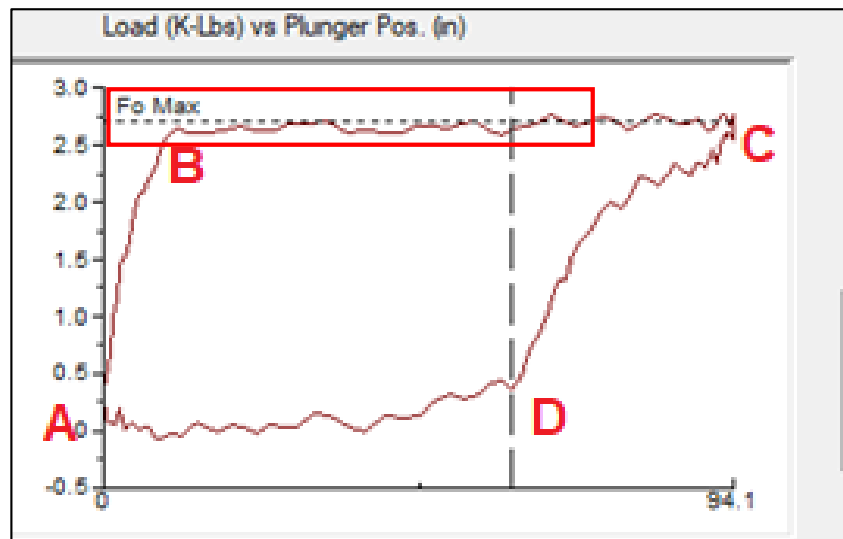
2.4 QUINTA ETAPA: COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ESCENARIO 1 Y EN EL ESCENARIO 2

Esta etapa comprende la comparación de las pruebas de producción y de las cartas dinamométricas del Escenario 1 (sección 2.1) y el Escenario 2 (sección 2.3) del proyecto con el fin de evaluar el efecto que tuvo la implementación de la caja Tangent Flow en el pozo estudio.

2.4.1 Comparación cualitativa de cartas de superficie Overlay. Se identifica en la sección Overlay los cambios presentados entre el Escenario 1 y 2 comparando la superposición de los recorridos realizados por los strokes teniendo en cuenta que cuando no se presenta homogeneidad entre las trayectorias, indica la presencia de gas, así como lo indica la forma de la carta dinamométrica superficial.

2.4.2 Comparación cualitativa de las cartas dinamométricas de fondo. Se identifica en la sección Dyna cards en la carta de fondo los cambios presentados entre el Escenario 1 y 2, mostrando una carta representativa de cada Escenario. Se hace una comparación en la forma del recorrido realizado entre los puntos A-B-C-D, la ubicación de línea "Fo Max" y la línea vertical intermitente la cual representa el cierre de la válvula fija. Ver Imagen 23.

Imagen 23. Carta dinamométrica de fondo



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

2.4.3 Comparación de los promedios obtenidos por stroke. Los resultados de cada prueba de los datos de producción, los promedios de las cartas dinamométricas y los cálculos de la cantidad de fluido no desplazado al principio y al final de la carrera son presentados de forma que se puedan identificar los resultados del Escenario 1 y los resultados del Escenario 2. Posteriormente, se presentan gráficamente los niveles de fluido, las cargas, la eficiencia de llenado, el GOR, las carreras del software y real a través del tiempo, permitiendo realizar un el respectivo análisis de cada comportamiento.

2.4.4 Comparación de las pruebas de producción. Se comienzan realizando los promedios de las pruebas de producción tanto para el Escenario 1 como para el Escenario 2. En las anteriores etapas, se realiza la representación gráfica de cada uno los parámetros de producción antes y después de la implementación de la caja

Tangent Flow, durante los tiempos delimitados en el proyecto. Al comparar los comportamientos de antes y después de la instalación de la caja Tangent Flow mediante las representaciones se espera encontrar cambios positivos después de la implementación del dispositivo en cuanto a la eficiencia de llenado de la bomba.

2.5 SEXTA ETAPA: EVALUACIÓN FINANCIERA

Este proyecto nace inicialmente a partir del interés de la empresa Parko Services S.A en determinar la aplicabilidad y rentabilidad que tiene la caja Tangent Flow en las operaciones con el sistema de bombeo mecánico para poder mostrar un soporte a sus clientes a la hora de ofrecer la instalación de las cajas en pozos que presentan bloqueo por gas. Es por eso que se realiza desde la perspectiva de una compañía operadora con una Tasa de Interés de Oportunidad (TIO) 13% anual, además la evaluación del proyecto se realiza con una unidad monetaria de Dólar americano (USD). La empresa evalúa financieramente los proyectos a tres (3) años con el fin de seleccionar los proyectos a implementar en este periodo de tiempo. Los resultados son mostrados semestralmente teniendo en cuenta dos escenarios, el primer escenario donde el pozo en estudio continúa con las cajas API y el segundo escenario donde son implementadas las cajas Tangent Flow; adicionalmente, se realiza este análisis con tres (3) alternativas del precio del petróleo: optimista, pesimista e intermedia. En este capítulo se realizan los análisis de inversión, de operación y de ingresos con el fin de determinar los indicadores financieros Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

2.5.1 Análisis de inversión (CAPEX). En la industria petrolera existen intervenciones a lo largo de la vida del pozo (workover), inversión realizada por la compañía operadora con el objetivo de mejorar o mantener la producción del mismo; en este caso el procedimiento que se requiere es realizar el cambio de las cajas API por las cajas Tangent Flow. Los costos de inversión serían los siguientes:

- Para el primer escenario, donde se continua con las cajas API, se debe tener en cuenta el costo de estas de \$ 534.00 USD y para el segundo escenario es el costo de la Tangent Flow (\$ 985.00 USD); estos costos hacen referencia a las dos cajas necesarias para cada bomba, incluyendo la caja para la válvula viajera como la caja para la válvula fija.
- Los costos que incluyen la intervención al pozo o procedimientos de WorkOver necesarios para la implementación de las cajas en cada escenario, lo cual incluye al trabajo de la cuadrilla que cuesta \$ 213.00 USD por hora y según la información proporcionada por la empresa Parko Services S.A. son 24 horas para retirar las varillas, debido a que la bomba se encuentra como parte integral de la sarta de varillas, por lo tanto, el costo de la cuadrilla total es de \$ 5,112.00 USD para el segundo escenario en donde se realiza el cambio a cajas Tangent Flow.

El costo de inversión total a realizar por la compañía operadora en el primer escenario es \$ 5,646 USD y para el segundo escenario es de \$ 6,097.00 USD.

2.5.2 Análisis de los costos de operación (OPEX). Este análisis hace referencia a la totalidad de los gastos operacionales en los cuales se va a incurrir durante la operación y extracción de crudo de determinado pozo. Se representa por el costo de levantamiento (lifting cost) promedio del Campo Palagua (\$ 18.00 USD) dentro del cual se encuentran incluidos los costos necesarios para la producción y tratamiento, transporte y almacenamiento. Los valores de producción a utilizar, en la proyección son determinados mediante las tendencias obtenidas de las gráficas de los BOPD de las pruebas de producción al finalizar cada escenario, tanto en el escenario previo a la instalación de las cajas Tangent Flow como del escenario después de la implementación de estas durante cada periodo de tres meses.

2.5.3 Análisis de ingresos. Para la proyección de los ingresos se tendrá en cuenta la variación de precios del crudo Brent. El primero de estos se refiere a una alternativa pesimista con un valor de \$ 23.88 USD, precio del barril promedio durante los meses de abril y mayo de 2020; por otro lado, la alternativa optimista contempla el costo del barril promedio durante el primer trimestre del año 2020 siendo \$ 50.44 USD; por último, el tercer valor que se tiene en cuenta para representar una alternativa intermedia entre la optimista y la pesimista es de \$ 37,16 USD, tomados del promedio entre los dos valores de la alternativa optimista y de la alternativa pesimista. Adicionalmente, se tiene en cuenta la Ley 756 de 2002 la cual indica para esta evaluación el 8% de las regalías sobre la producción determinada en los cálculos proyectados⁴⁹.

2.5.4 Valor Presente Neto (VPN). A partir de este indicador se evalúan una serie de flujos de caja futuros; aquella cantidad equivalente el día de hoy que asegura esas mismas sumas de dinero futuro, es decir, es la suma presente que equivale a los flujos de caja que se recibirán o pagarán en el futuro⁵⁰. Este indicador permite determinar la factibilidad del proyecto de la implementación de las cajas Tangent Flow. Previo al cálculo del VPN se procede a realizar la conversión de la Tasa de Interés de Oportunidad anual a una semestral mediante la Ecuación 9.

⁴⁹ FUNCIÓN PÚBLICA [Sitio web]. Colombia: Ley 756 de 2002 [30, Abril, 2020] Disponible en: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9154>>

⁵⁰ RANKIA [Sitio web]. Chile: ¿Cómo calcular el valor presente neto? [30, Abril, 2020] Disponible en: <<https://www.rankia.cl/blog/analisis-ipsa/3892041-como-calcular-valor-presente-neto-ejemplos>>

Ecuación 9. Tasa de Interés de Oportunidad

$$TIO_{semestral} = (1 + TIO_{anual\%})^{1/2} - 1$$

Fuente: LYNTIK [Sitio Web] Bogotá, Col: Conversión de tasas de interés [30, Abril, 2020] Disponible en: <<https://cutt.ly/7fq6MQN>>

La Ecuación 10., muestra el cálculo adecuado para el cálculo del VPN realizado para el escenario 1 (API) y para el escenario 2 (Tangent Flow) teniendo en cuenta las tres (3) alternativas planteadas, a partir de los flujos de caja netos (Optimista, pesimista e intermedia).

Ecuación 10. Valor Presente Neto

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Fuente: ECONOMIPEDIA [Sitio Web]. Madrid, Esp: Tasa interna de retorno (TIR) [30, Abril, 2020] Disponible en: <<https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>>

La ecuación de la Tasa Interna de Retorno (TIR) depende de las siguientes variables:

- **Inversión inicial previa (I₀):** monto que la empresa desembolsará en el momento inicial para efectuar la inversión.
- **Flujos netos efectivos (F_t):** diferencia entre los ingresos y gastos que se pueden obtener por la ejecución de un proyecto de inversión durante su vida útil.
- **Tasa de descuento (k):** O tasa de oportunidad es la tasa que se requiere sobre una inversión reflejando la oportunidad perdida de gastar o invertir en el presente.
- **n:** Número de periodos de duración del proyecto o la evaluación financiera.
El resultado obtenido se basará bajo los siguientes parámetros:
- **VPN > 0,** quiere decir que la inversión realizada durante el proyecto es válida debido a que se genera un beneficio o se supera la rentabilidad mínima.
- **VPN = 0,** en este caso, el resultado de la inversión indica que no se generaron ni beneficios ni pérdidas por lo que su realización resultará indiferente.

- **VPN < 0**, el proyecto de inversión, al cumplir con este resultado, indica que generará pérdidas a la empresa con la realización del proyecto, por lo tanto, este deberá ser rechazado⁵¹.

2.5.5 Beneficio Anual Uniforme Equivalente (BAUE). Teniendo en cuenta que el objetivo es determinar cuál de los dos tipos de cajas representan mayores beneficios económicos a la compañía operadora se procede a utilizar la metodología del indicador financiero Beneficio Anual Uniforme Equivalente. Este método consiste en convertir todos los ingresos y egresos en una serie uniforme de pagos. Para que un proyecto se pueda realizar, los ingresos deben ser mayores a los egresos, obteniendo un resultado positivo. En el caso contrario, donde los ingresos sean inferiores a los egresos, se obtiene un resultado negativo lo cual indica que el proyecto debe ser rechazado.

La mejor alternativa seleccionada debe ser la misma escogida por valor presente o por cualquier otro método de evaluación, como el VPN y la TIR, cuando las comparaciones son manejadas con propiedad⁵². Mediante la Ecuación 11., se determina un BAUE para el caso en donde no se implementen las cajas Tangent Flow (Opción 1) y para el caso en donde sí se implementen estas (Opción 2) para las tres alternativas de precio del barril (optimista, pesimista e intermedia). El caso que presente un valor de BAUE mayor indica que dicho caso representa mayores ganancias para la empresa.

Ecuación 11. Formula BAUE

$$BAUE = VPN * \frac{(1 + i)^n * i}{(1 + i)^n - 1}$$

Fuente: RIQUELME, Matias. Costo Anual Equivalente o Beneficio Anual Equivalente (CAUE O BAUE). En: Web y Empresas. [Sitio Web]. Chile: La entidad [5, septiembre, 2013]. Blog. Disponible en: < <https://cutt.ly/5fwwffh> >

2.5.6 Tasa Interna de Retorno (TIR). Este indicador se realiza con el fin de determinar la rentabilidad del proyecto de inversión. Esta se define también como la tasa de descuento que hace que el VPN sea igual a cero para un proyecto de

⁵¹ RANKIA [Sitio web]. Chile: ¿Cómo calcular el valor presente neto? [30, Abril, 2020] Disponible en: <<https://www.rankia.cl/blog/analisis-ipsa/3892041-como-calcular-valor-presente-neto-ejemplos>>

⁵² Economía para ingenieros. Evaluación de costo anual equivalente (CAUE). [en línea]. Tesis. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Bogotá: 2005 [Consultado 30, abril, 2020]. Disponible en: < <https://cutt.ly/GfwwjNZ> >

inversión dado como se presenta en la siguiente ecuación, utilizada para las tres alternativas de los dos escenarios⁵³. Ver Ecuación 12.

Ecuación 12. Tasa Interna de Retorno

$$VPN = 0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1 + TIR)} + \frac{F_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1 + TIR)^n}$$

Fuente: ECONOMIPEDIA [Sitio Web]. Madrid, Esp: Tasa interna de retorno (TIR) [30, Abril, 2020] Disponible en: < <https://cutt.ly/nfwwWqT> >

- **F_t**, flujos de dinero en cada periodo (t)
- **I₀**, inversión realiza en el momento inicial (t = 0)

Adicionalmente, para las conclusiones de este capítulo se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- **TIR > TIO**: Viable.
- **TIR < TIO**: No viable.
- **TIR = 0**: Indiferente.

⁵³ ECONOMIPEDIA [Sitio Web]. Madrid, Esp: Tasa interna de retorno (TIR) [30, Abril, 2020] Disponible en: < <https://cutt.ly/nfwwWqT> >

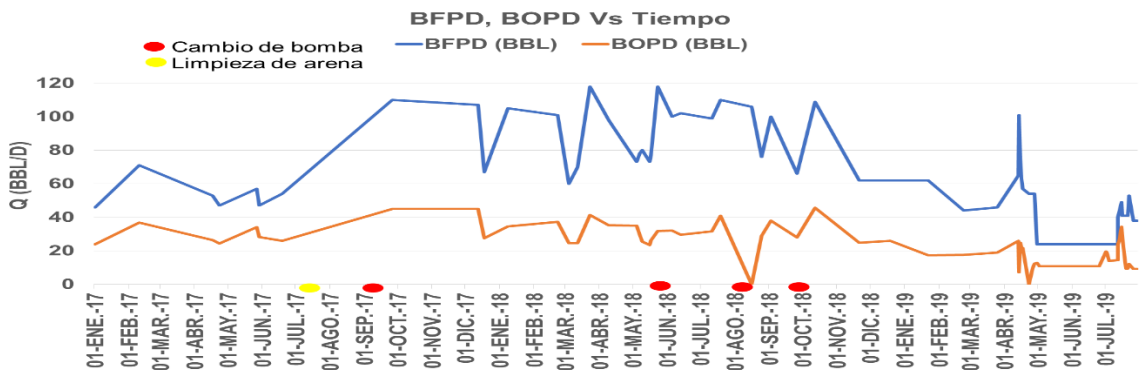
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En primer lugar, durante este capítulo serán descritas las pruebas de producción proporcionadas por la empresa desde el año 2017 hasta julio de 2019 de forma general con el fin de conocer más el pozo en los últimos años. Las pruebas de producción a partir de agosto de 2019 serán evaluadas en dos Escenarios; antes de la implementación de las cajas Tangent Flow (Escenario 1) y después de la Implementación de las cajas Tangent Flow (Escenario 2). Posteriormente, se revisan en los Escenarios 1 y 2 las pruebas de nivel, de válvulas y dinamométrica proporcionadas por la empresa, con el fin de conocer el estado del sistema de bombeo mecánico para las fechas de las pruebas. Como paso siguiente, se realiza la tabulación e interpretación de los datos por stroke en cada prueba para obtener un promedio de las variables identificadas en las pruebas y determinar su comportamiento general; lo anterior permite calcular la carrera efectiva del pistón para determinar la cantidad de fluido no desplazado por la bomba de fondo. Se realiza un análisis del comportamiento entre los dos Escenarios de los promedios de las cartas dinamométricas y después se analiza el comportamiento de las pruebas de producción. Finalmente, se evalúa financieramente la implementación de las cajas Tangent Flow mediante los indicadores Valor Presente Neto, Tasa Interna de Retorno y Costo Anual Uniforme Equivalente.

3.1 COMPORTAMIENTO DEL POZO DESDE ENERO 2017 HASTA JULIO DE 2019

A partir de las pruebas de producción proporcionadas en el Anexo A., al representar gráficamente el comportamiento de los fluidos de producción desde enero de 2017 hasta julio de 2019 se genera el Grafico 1., donde se identifica la intervención al pozo con una limpieza de arena (punto amarillo) y cambio de bomba en cuatro ocasiones (puntos rojos) bajo la configuración de las cajas API utilizadas durante este periodo de tiempo. El mecanismo de empuje primario es gas en solución según la información proporcionada por la empresa.

Gráfico 1. Caudal Vs Tiempo (2017- Julio 2019)

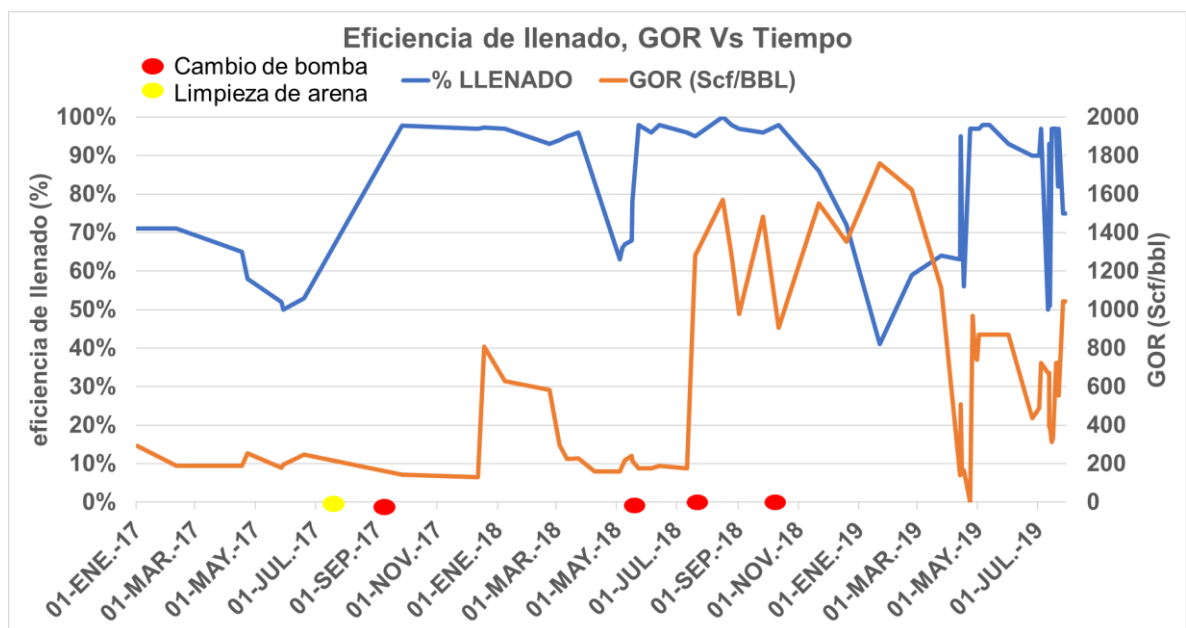


Fuente: elaboración propia

En el Grafico 1., se puede evidenciar la primera operación de limpieza de arena para este periodo) en julio de 2017 y previo a esta fecha se presenta una relación de los barriles de agua diarios respecto a los de petróleo de 1:1 y posterior a dicha intervención se presenta una relación 2:1 debido a que este es el comportamiento típico esperado al realizar este procedimiento en el cual el pozo absorbe agua tomando 432 bbl. Sin embargo, esta relación vuelve a ser 1:1 a partir de febrero de 2019 y a su vez se reduce la cantidad de petróleo producido. Se identifican los cambios de bomba realizados en septiembre de 2017 y en los meses de mayo, agosto y octubre de 2018.

Para identificar el comportamiento de la eficiencia de llenado bajo el funcionamiento de la caja API ante la relación gas-petróleo en el pozo durante este periodo de tiempo se procede a analizar el Grafico 2.

Gráfico 2. Eficiencia de Llenado, GOR Vs Tiempo (2017- Julio 2019)

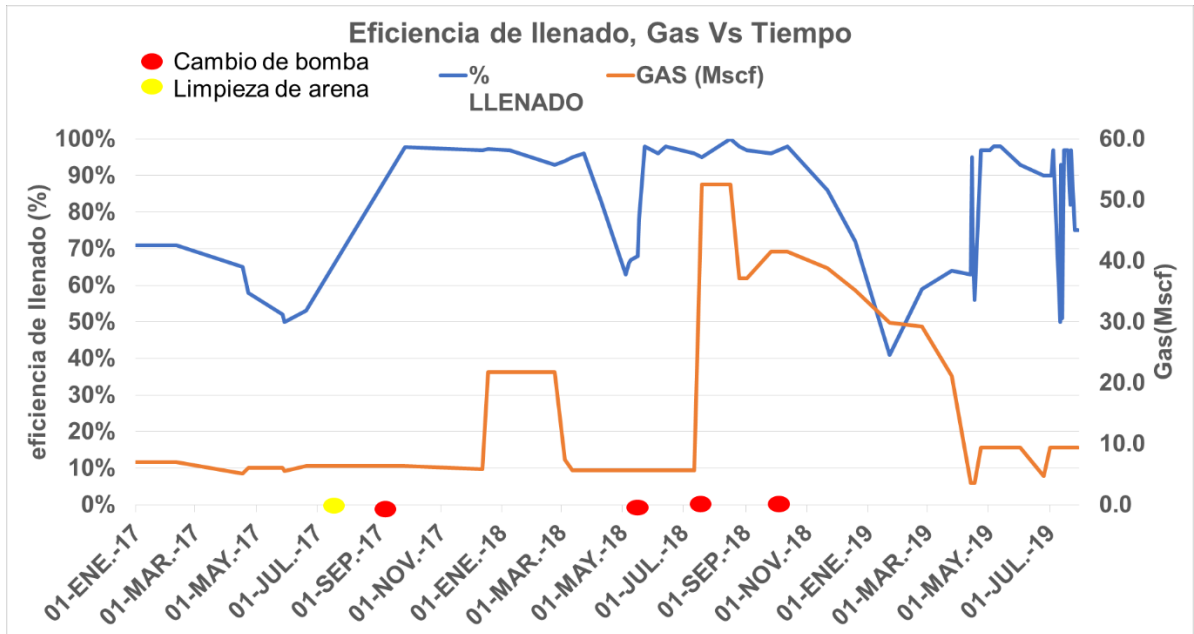


Fuente: elaboración propia

De el Grafico 2., se pueden identificar los cambios de bomba en los meses de mayo, julio y octubre de 2018 los cuales se producen luego de que se presentan GOR por encima de 600 Scf/bbl, indicando que la bomba no presenta buen manejo de gas. Una vez instalada la bomba con caja API en octubre de 2018 se visualiza que la eficiencia de llenado se reduce en más del 50%, debido a que se alcanza una relación gas- petróleo (GOR) superior a 1600 Scf/bbl. El comportamiento inestable del GOR afecta directamente la eficiencia de llenado de la bomba durante la vida útil de esta.

En el Grafico 3., se presenta el comportamiento desde el año 2017 hasta julio de 2019 de la eficiencia de llenado y del gas respecto al tiempo bajo el funcionamiento de las cajas API en la bomba de fondo.

Gráfico 3. Eficiencia de llenado, Gas Vs Tiempo

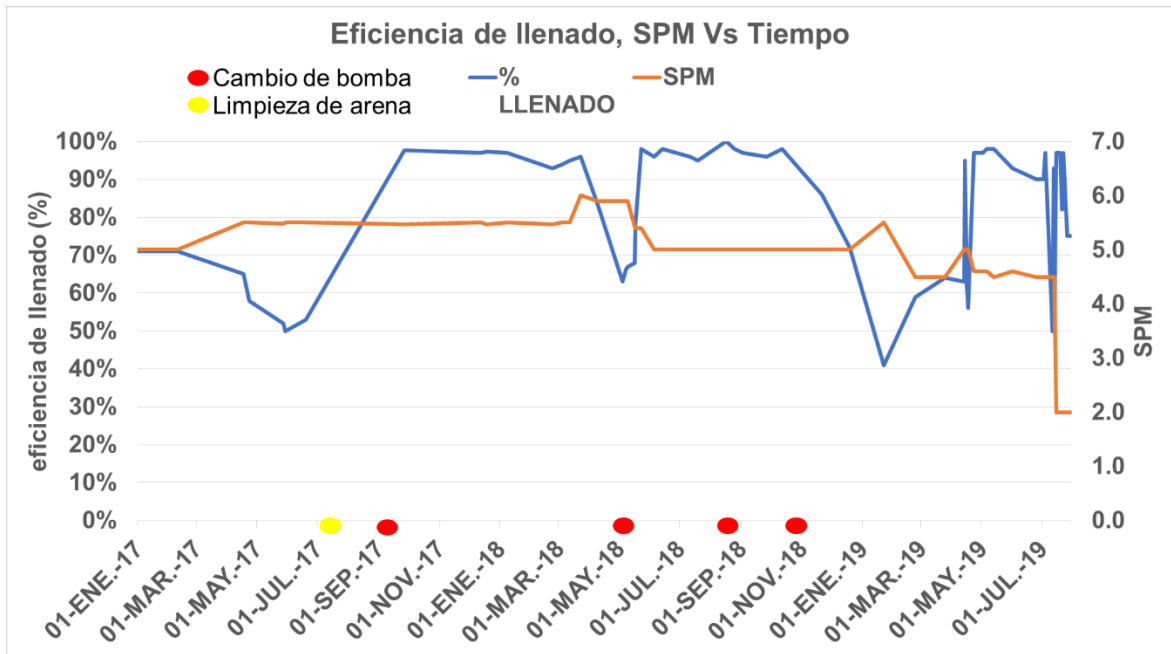


Fuente: elaboración propia

En el Grafico 3., se puede observar que durante el primer semestre del año 2017, con una producción de gas inferior a 8 Mscf/D, la eficiencia de llenado se encuentra por debajo del 71%. Después del primer cambio de bomba en septiembre de 2017 y de realizarse la limpieza de arena, aumenta la eficiencia de llenado de la bomba manejando la misma cantidad de gas manejada hasta el momento, después de un pico de gas que alcanzó los 20 Mscf/D se evidencia una disminución de la eficiencia de llenado y posteriormente se hace necesario realizar el cambio de la bomba (mayo de 2018) debido a que el pozo se para por fuga en válvula viajera (fenómeno que se presenta generalmente por la interferencia de gas). Las tasas de gas en el pozo aumentaron desde julio de 2018 alcanzando niveles de 50 Mscf/D, que disminuye paulatinamente hasta una tasa estable de 10 Mscf/D, por lo tanto la eficiencia de llenado ha presentado varias fluctuaciones sin lograr una estabilización constante. Adicionalmente, permite identificar que después de efectuar el último cambio de la bomba de fondo (octubre de 2018), a pesar de presentar una reducción en la producción de gas, la eficiencia de llenado se ve afectada, alcanzando valores cercanos al 40%.

El Grafico 4., representa el comportamiento general de la eficiencia de llenado de la bomba y de la velocidad de operación respecto al tiempo.

Gráfico 4. Eficiencia de llenado, SPM Vs Tiempo (2017- Julio 2019)



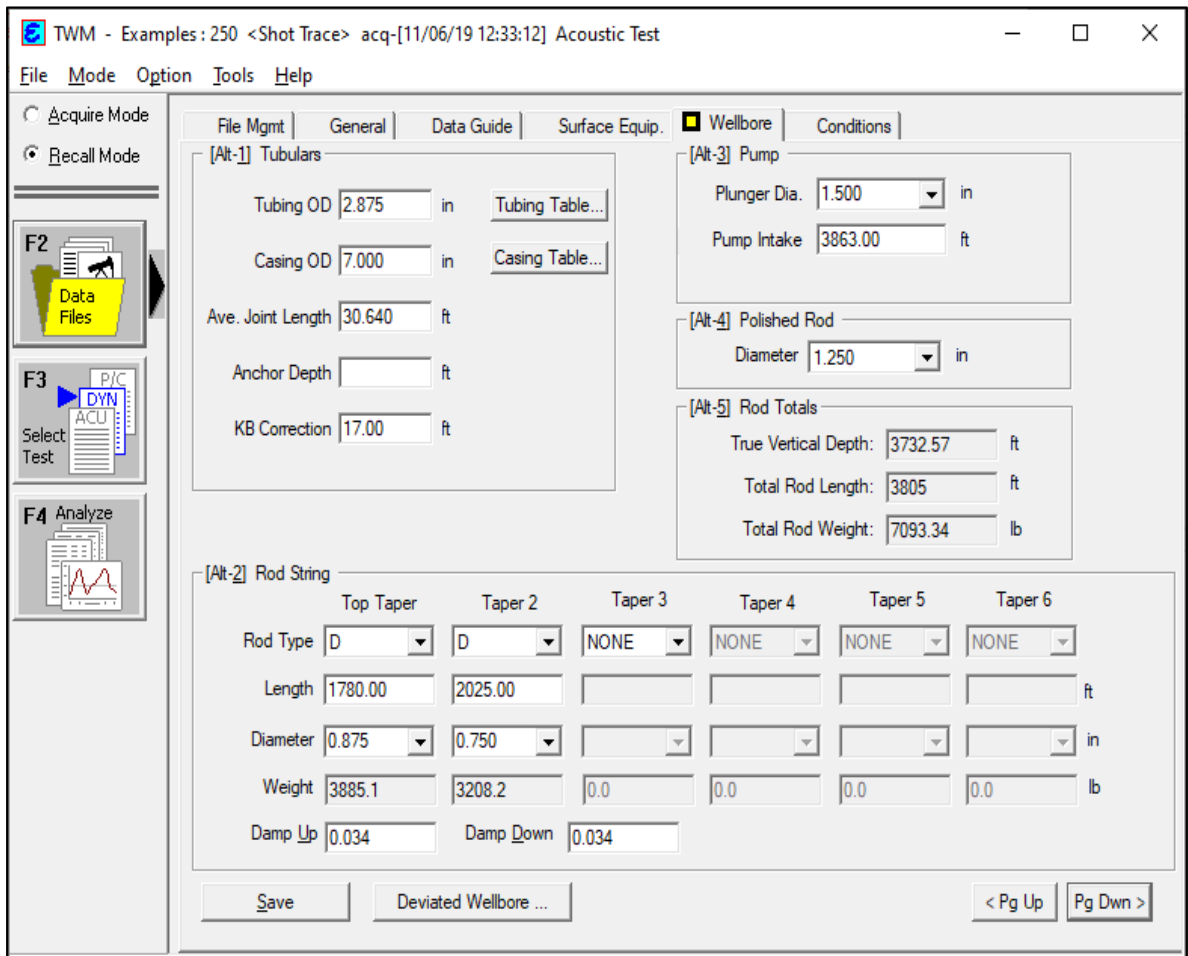
Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 4., al evaluar el comportamiento de la eficiencia de llenado de la bomba de fondo y de la velocidad a la que se realizan los recorridos del pistón por minuto (SPM) se puede evidenciar que los aumentos efectuados por los ingenieros de campo en la velocidad se ven reflejados en la reducción de la eficiencia de llenado. Como se puede ver en la primera mitad del año 2017, la velocidad aumenta en 10% respecto a enero 2017, generando una reducción del llenado de la bomba del 25% puesto que al generar una mayor cantidad de strokes por minuto, el fluido que ingresa a la bomba tiende a hacerlo en menores cantidades. Se puede evidenciar que las reducciones en la velocidad generan que la eficiencia de llenado se reestablezca por encima del 90%. Al final de este periodo, en mayo de 2019, debido a que la eficiencia de llenado decae a valores por debajo del 60%, se procede a reducir la velocidad, por parte de los operarios, sin obtener buenos resultados.

3.2 COMPORTAMIENTO DEL POZO P-250 POR BLOQUEO POR GAS SIN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA CAJA TANGENT FLOW (ESCENARIO 1)

Inicialmente se revisa la prueba de nivel, de válvulas y dinamométrica de las 3 pruebas tomadas con el software TWM, proporcionadas por la empresa para determinar el estado del pozo en dichas fechas. Luego, se pretende determinar el comportamiento general de la prueba promediando los resultados obtenidos en cada stroke. Primero se verifica en la sección F2 (Data Files), en la pestaña Wellbore que las condiciones de la prueba presenten la información correspondiente al estado mecánico del pozo. Ver Imagen 24.

Imagen 24. Wellbore Escenario 1

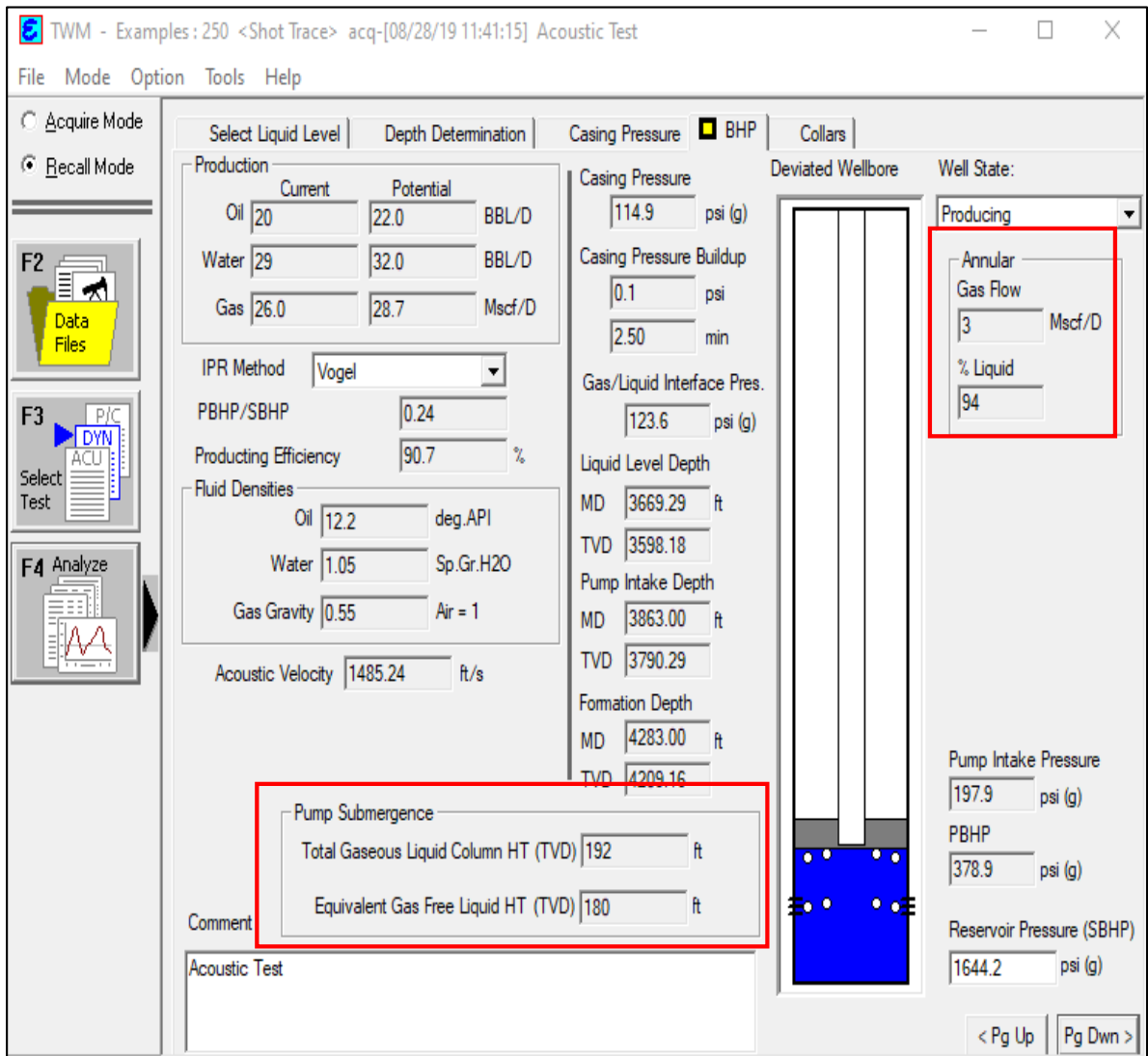


Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.2.1 Prueba mes 1. La primera prueba representativa, proporcionada por la empresa, del comportamiento de producción del pozo P-250 para el primer mes de estudio es del día 28 de agosto de 2019.

3.2.1.1 Prueba de nivel. En primer lugar, se procede a verificar la prueba acústica en donde se determina y según las pruebas realizadas por el anular mostrado en Imagen 25., que en este circulan alrededor de 3 Mscf/D, equivalente al 6% de la columna de fluido, el cual equivale a 180 ft de altura; por otro lado, se observa que el tope de la columna se encuentra a 3669,29 ft, con 192 ft de diferencia respecto a la posición de la entrada de la bomba. La presión intake (PIP) es de 197,9 Psi. Este nivel dinámico del pozo, el cual hace referencia a que es un pozo que se encuentra produciendo, es importante realizar el monitoreo pertinente para asegurarse de que el nivel de fluido en el pozo no sea inferior al nivel de la bomba, puesto que esto causaría daños en el equipo de subsuelo.

Imagen 25. Toma de nivel Mes 1

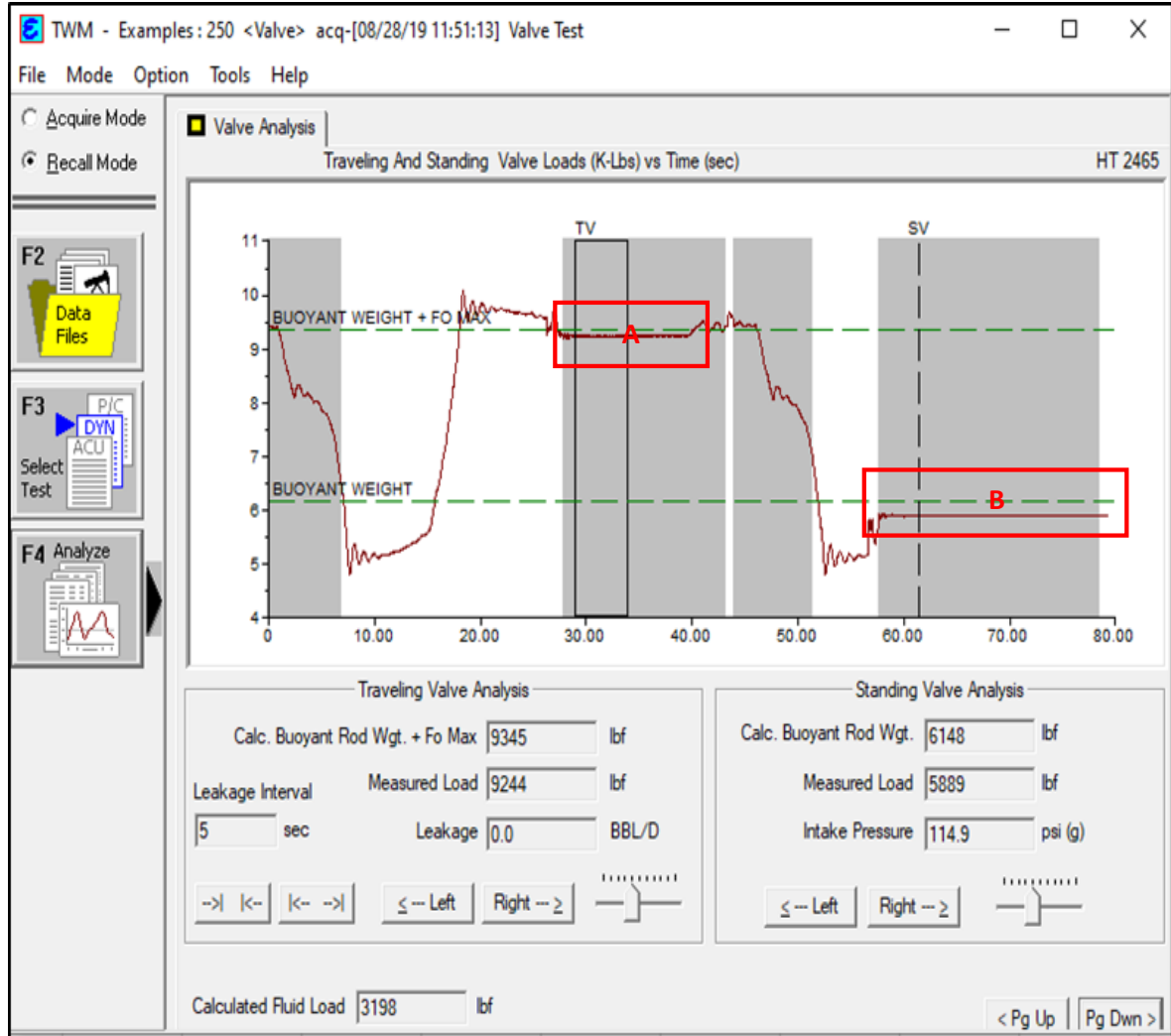


Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.2.1.2 Prueba de válvulas. A continuación, procede a revisar la prueba de válvulas. Como se puede ver, la Imagen 26., muestra el recuadro superior durante la carrera ascendente, el cual señala la tensión constante que se ejerce sobre la válvula viajera (A), equivalente a 9244 Lbf, esta tensión es muy cercana a la que ejerce la columna de fluido (línea verde Buoyant weight + Fpw max) por ende, esta no aporta presión al levantamiento de forma significativa. La tensión constante en ambas válvulas indica que no se presentan fugas de fluido durante los recorridos del pistón deducido a partir de la diferencia en las cargas sobre las válvulas, por lo tanto, se descarta que la baja eficiencia de llenado sea producto del mal sello de las

válvulas. Debido a que el filtrado (Leakage) es cero, no presenta el fenómeno de escurrimiento.

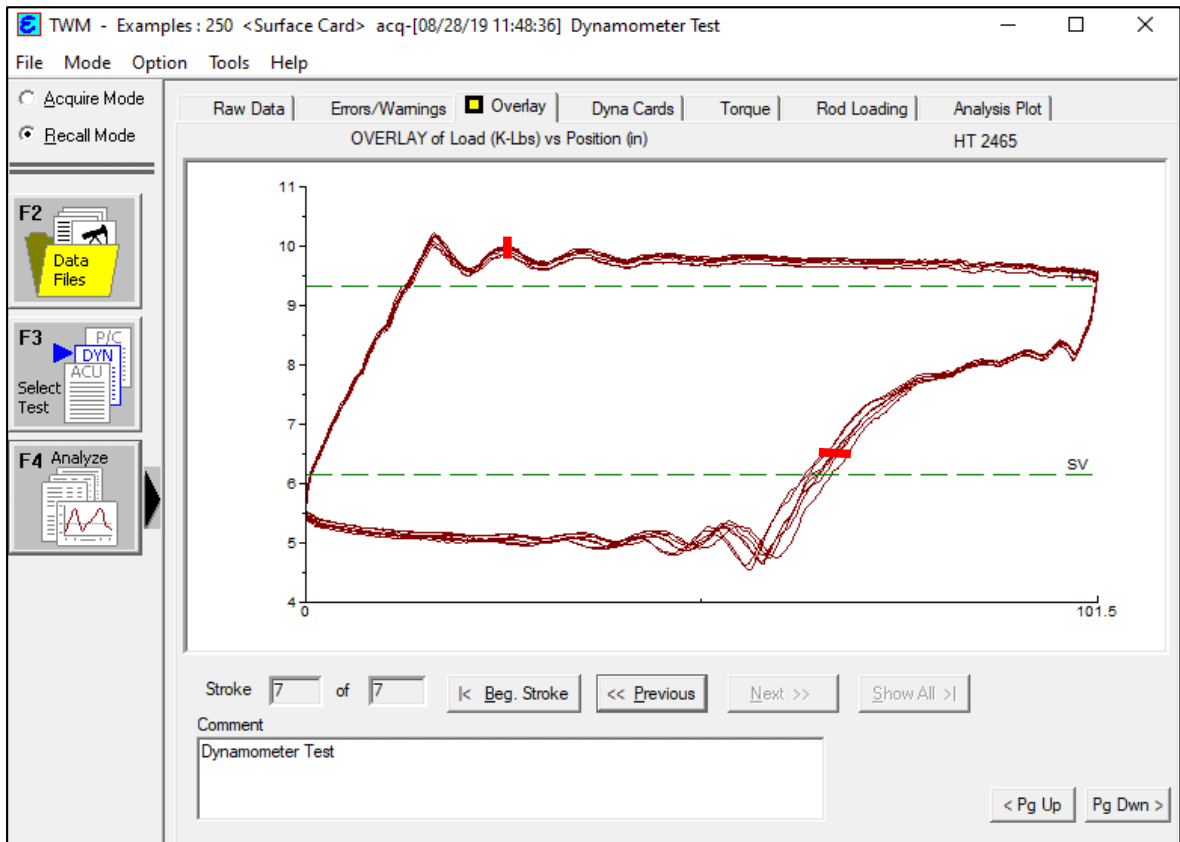
Imagen 26. Test de Válvulas Mes 1



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.2.1.3 Prueba dinamométrica. En la prueba dinamométrico, Imagen 27., se pueden observar las variaciones presentadas en la representación gráfica entre los strokes de la prueba analizada. Al realizarse el estudio bajo las mismas condiciones en cada uno de los strokes, las gráficas deberían superponerse y ser homogéneas. En este caso, los diferentes trayectos que realiza el pistón varían, representado por el espaciamiento entre los recorridos, por lo tanto, dicho espaciamiento es atribuido a una posible presencia de gas. Al comparar con la data obtenida en la prueba de niveles de fluido, se identifica presencia de gas, corroborando así que este afecta el llenado de la bomba a lo largo de su trayectoria.

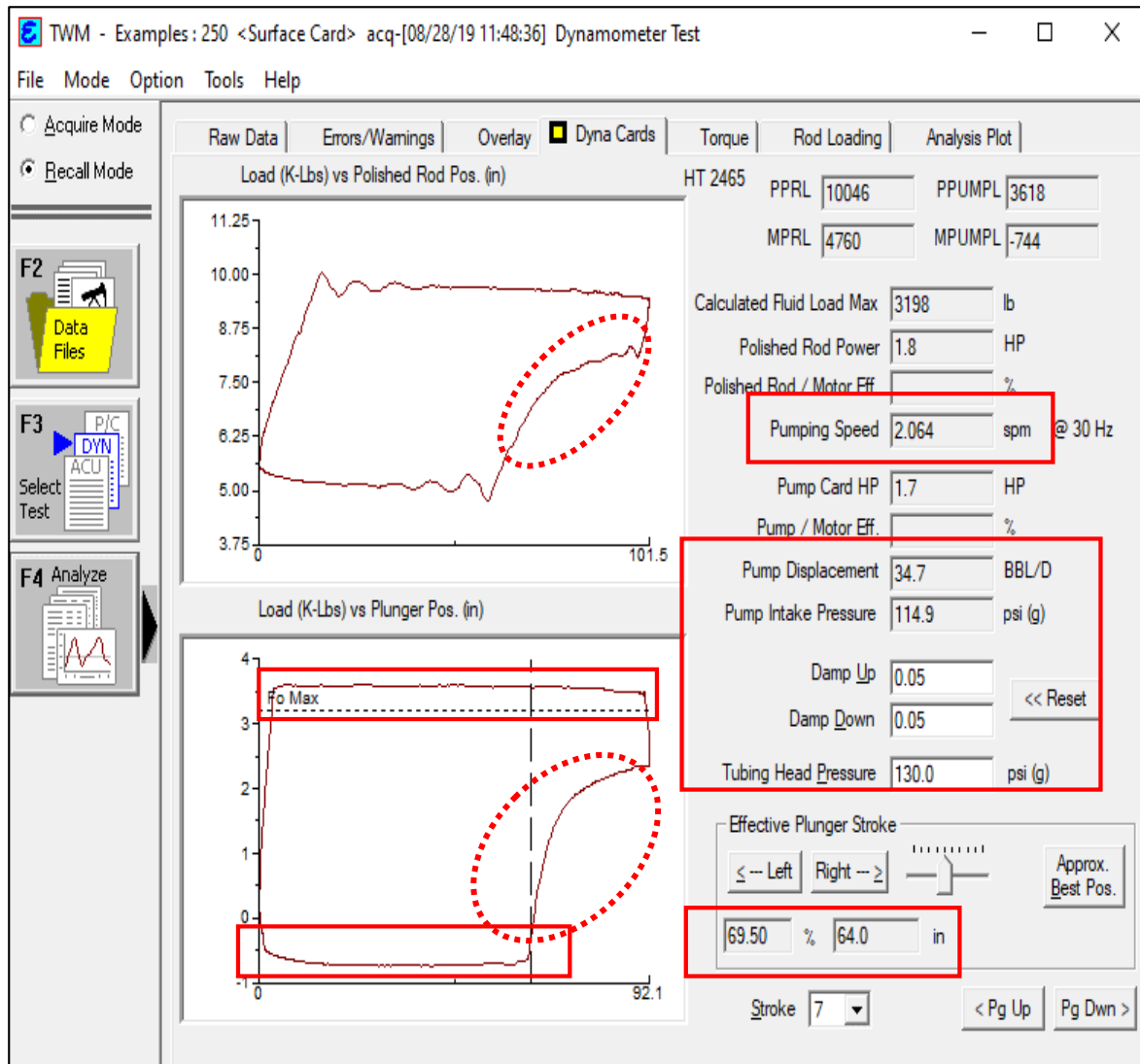
Imagen 27. Test dinamométrico, sección Overlay Mes 1



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

En la Imagen 28., en la sección de Dyna Cards se pueden observar el comportamiento típico de las cartas dinamométricas tanto de superficie (grafico superior) como de fondo (gráfico inferior). En este último, la línea punteada (Fo Max) representa la carga atribuida al nivel de la columna de fluido sobre la bomba y al encontrarse por debajo de las fuerzas ejercidas para el cierre de la válvula, se puede interpretar que la columna de fluido no aporta fuerza para realizar el levantamiento de fluidos, provocando un mayor esfuerzo por parte del sistema de levantamiento. El factor Damp up y Damp Down fueron ajustados a 0,05 representando las perdidas por fricción en el sistema. Las rectas horizontales de la gráfica superior e inferior son paralelas y no presentan perturbaciones relevantes que indiquen presencia de sedimentos. Por otro lado, se observan 64 pulgadas del viaje efectivo del pistón en comparación al viaje total del pistón de 92 pulgadas, perdiéndose 30,4% de la carrera del pistón. Finalmente, tanto la carta de superficie como la carta de fondo permiten identificar el fenómeno de la presencia de gas debido a la forma que se presenta en ambas graficas (óvalo), afectando directamente la eficiencia de llenado debido a que el gas al comprimirse ocupa espacio que podría ocupar el fluido.

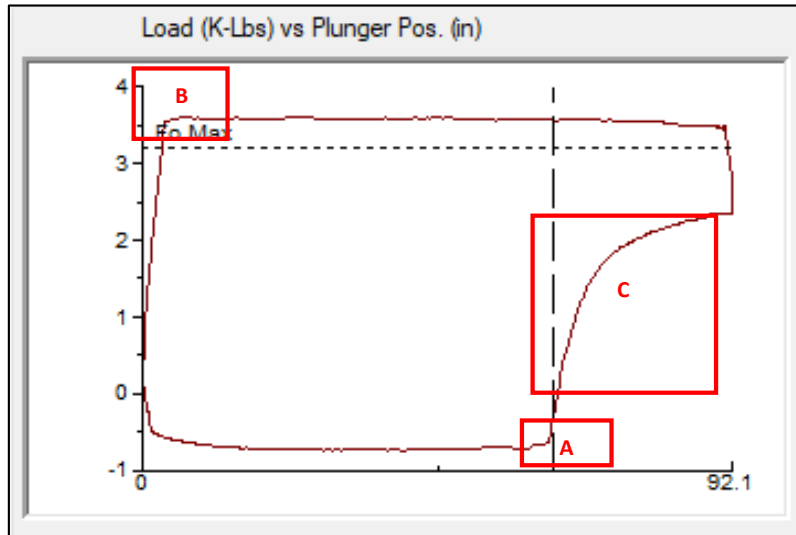
Imagen 28. Test dinamométrico Dyna cards Mes1



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

En la Imagen 29., se muestra el funcionamiento correcto de las válvulas (A y B). Por otro lado, se observa la zona donde se ejerce mayor carga durante la carrera descendente del pistón al realizar el cierre de la válvula fija. Este fenómeno ocurre cuando existe presencia de gas en el barril. Al interior del barril el gas se comprime, ocupando espacio que podría ser ocupado por el líquido, generando dificultad para el cierre de las válvulas, por lo que se ve afectado el llenado de la bomba de fondo.

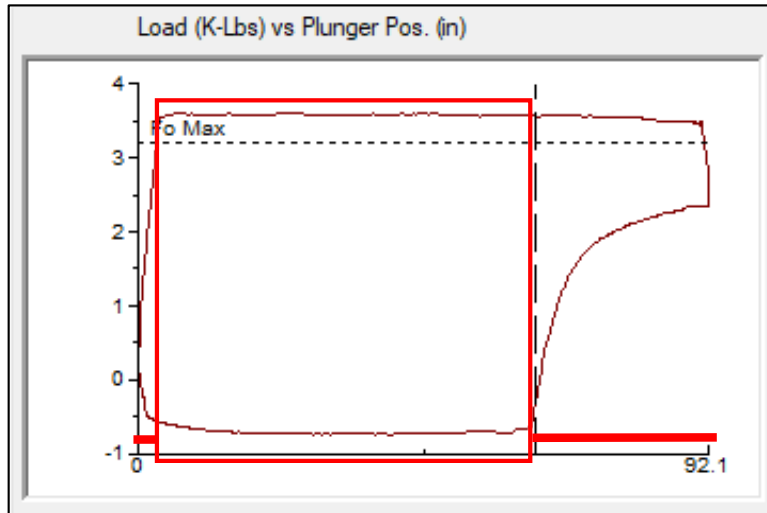
Imagen 29. Carta dinamoétrica de fondo mes 1



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

La Imagen 30., presenta el área que hace referencia al fluido desplazado realmente por la bomba de fondo (34.7 bbl/D) señalado con el recuadro. Además, como se puede ver en la figura, las líneas horizontales indican el recorrido no efectivo del pistón (CNEP) que da claridad en que las válvulas no están cumpliendo con los sellos adecuados puesto que el gas impide el cierre correcto, proporcionando una carrera efectiva menor a la que se debería alcanzar.

Imagen 30. Área de la CEP mes 1



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.2.1.4 Tabulación e interpretación de datos por stroke. Para identificar el comportamiento típico de la prueba se procede a realizar la toma de datos de cada uno de los strokes mostrados en la Tabla 2., e identificar las variaciones que existen entre sí. Así mismo se identifican la media de cada parámetro: esfuerzo máximo en la sarta de varillas la cual es de 10,122 lbf, esfuerzo mínimo de la sarta de varillas 4690 lbf, esfuerzo máximo de la bomba 3683 lbf y esfuerzo mínimo de la bomba - 817 lbf (valor negativo debido a la fuerza boyante, donde se encuentra sumergida la bomba). Al utilizar la desviación estándar permite identificar la separación entre cada uno de los datos tomados y entre mayor sea esta permitirá identificar como el gas afecta la superposición de las trayectorias graficadas anteriormente. Finalmente, al identificar el porcentaje de estrés de las varillas durante los strokes evaluados en el mes 1 se calcula que el porcentaje promedio obtenido durante la prueba es de 47.5% producido por una fuerza máxima promedio de 10,122 lbf.

Tabla 2. Data TWM mejor aproximación Mes 1

MES 1 (28/08/2019)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Stroke 5	Stroke 6	Stroke 7	Promedio
Carga de las varillas								
Stress load (%)	47.3	47.7	47.8	47.6	48	47	47.2	47.5
PPRL (lb)	10085	10166	10180	10148	10227	10004	10046	10122
MPRL (lb)	4752	4681	4665	4554	4628	4793	4760	4690
Carga de la bomba								
PPUMPL (lb)	3674	3701	3715	3715	3753	3606	3618	3683
MPUMPL (lb)	-801	-825	-843	-881	-876	-752	-744	-817
General								
SPM	2.067	2.067	2.067	2.067	2.067	2.067	2.067	2.067
Dto. de la bomba (bbl/D)	36.2	35	35	34.2	34.1	34.9	35.5	35.0
PIP (Psi)	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9
THP (Psi)	130	130	130	130	130	130	130	130
Damp Up	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Damp Down	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
CEP twm (in)	66.7	64.6	64.7	63.1	63	64.4	65.5	64.6
% CEP Twm	72.4	70.3	70.5	68.7	68.8	70.0	71.1	70.3
CMP (in)	92.1	91.9	91.8	91.8	91.6	92	92.1	91.9

Fuente: elaboración propia

Las líneas rojas horizontales presentadas en la Imagen 30., indican el fluido que no se desplaza al realizar el cierre de la válvula viajera pero que el software igualmente incluye dicho volumen dentro de sus cálculos, por lo tanto, el fluido verdaderamente desplazado tiende a ser menor por esta razón y se proceden a realizar los cálculos de la cantidad de volumen de más que se tiene en cuenta por el software.

La Tabla 3., muestra los datos obtenidos para calcular la distancia no efectiva inicial en donde se puede evidenciar el volumen de fluido perdido por este efecto, equivalente a 15.8 bbl/d, que incluye 1 bbl/d durante el recorrido ascendente, cuando la válvula viajera se cierra y la válvula fija se abre permitiendo que el fluido ingrese al barril; y por otro lado, se tienen 14,8 bbl/d de fluido que se desplazan debido a que durante la carrera descendente se presenta gas debido a que la válvula fija no se cierra a tiempo, por el fenómeno de compresión de gas.

Tabla 3. Data TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 1

MES 1 (28/08/2019)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Stroke 5	Stroke 6	Stroke 7	Promedio
CEP Real (in)	62.6	62.8	62.9	62.6	63	62.6	62.7	62.7
BFPD PP (BBL/D)	34	34	34	34	34	34	34	34
% CEP real	67.96	68.35	68.53	68.16	68.78	68.03	68.08	68.27
CNEP (in)	29.5	29.1	28.9	29.2	28.6	29.4	29.4	29.2
CNEP inicial (in)	4.1	1.8	1.8	0.5	0	1.8	2.8	1.8
CNEP final (in)	25.4	27.3	27.1	28.7	28.6	27.6	26.6	27.3
FTND (bbl/D)	16.0	15.8	15.6	15.8	15.5	15.9	15.9	15.8
FND CNEPi (BBL/D)	2.2	1.0	1.0	0.3	0.0	1.0	1.5	1.0
FND CNEPf (bbl/D)	13.8	14.8	14.7	15.6	15.5	15.0	14.4	14.8

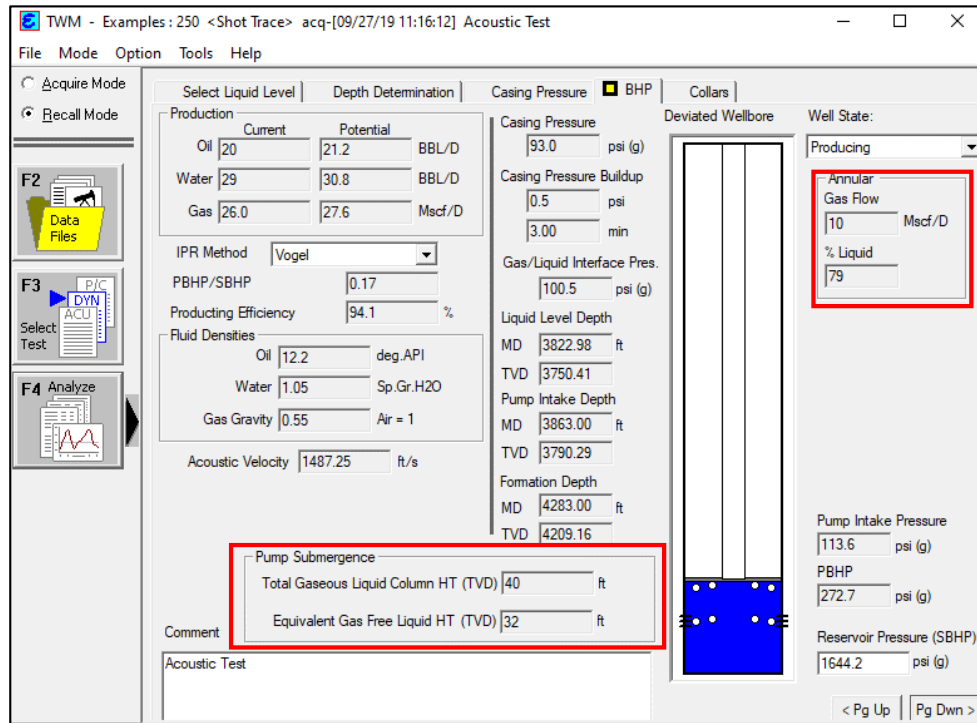
Fuente: elaboración propia

3.2.2 Pruebas Mes 2. La segunda prueba representativa, proporcionada por la empresa, del comportamiento de producción del pozo P-250 para el segundo mes de estudio se realizó el día 27 de septiembre de 2019.

3.2.2.1 Prueba de nivel. Para el resultado de la toma de nivel se tiene que el caudal de gas que maneja a través del anular del pozo aumenta en 7 Mscf/d respecto al mes anterior, la tasa de líquido presente en la columna de fluido es del 79%, reduciéndose en un 15% y se tiene una PIP baja de 113,6 psi. Adicionalmente, al

comparar con el mes anterior se puede notar una reducción en la columna total líquido-gas de 152 ft y del líquido libre de gas equivalente de 148 ft, lo cual se encuentra relacionado a la sugerencia que presenta la bomba. Por otro lado, la presión de intake, respecto al primer mes, se reduce en 57.4%, lo cual se da a partir de la reducción de la columna de fluido existente por encima del equipo de fondo. Ver Imagen 31.

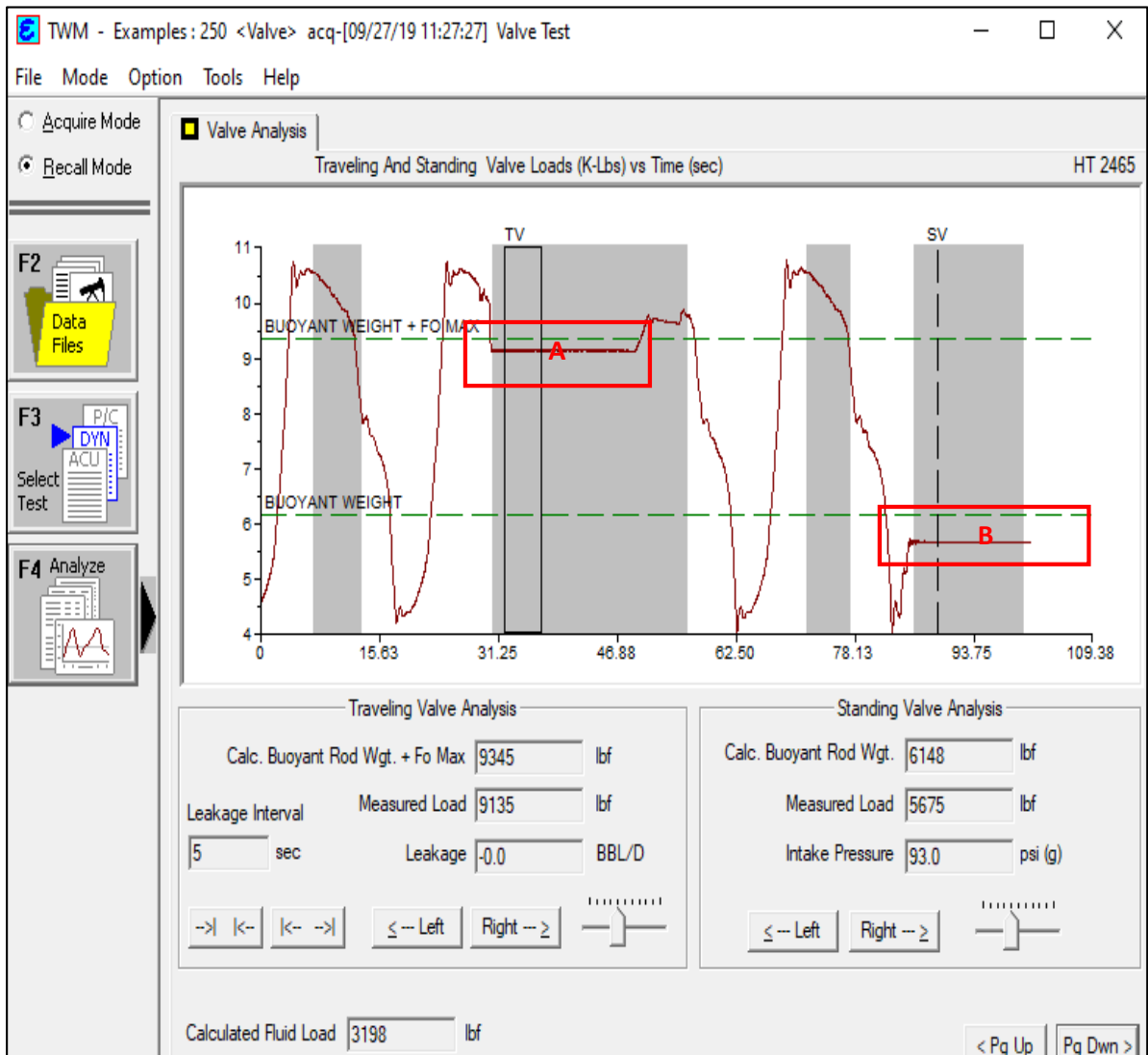
Imagen 31. Toma de nivel mes 2



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.2.2.2 Test de válvulas. Durante la revisión del Test de válvulas, Imagen 32., se observa la tensión constante en cada una de ellas, con un diferencial en la carga sobre la válvula similar al del mes previo, lo cual representa el buen funcionamiento de estas (A y B). Dentro de la misma sección del análisis de válvulas se determinó que la carga máxima para la válvula viajera fue de 9135 lb/f y para la válvula estática de 5675 lb/f, con una reducción en comparación al mes pasado de 109 Lb/f y 214 Lb/f respectivamente. La tensión constante presentada, asegura que no se presentan fugas del fluido durante los recorridos del pistón, por lo tanto, se afirma que las válvulas, al hacer funcionar correctamente, no son las causantes de que la bomba no presente un llenado mayor. Debido a que el filtrado (Leakage) es cero, no presenta el fenómeno de escurrimiento.

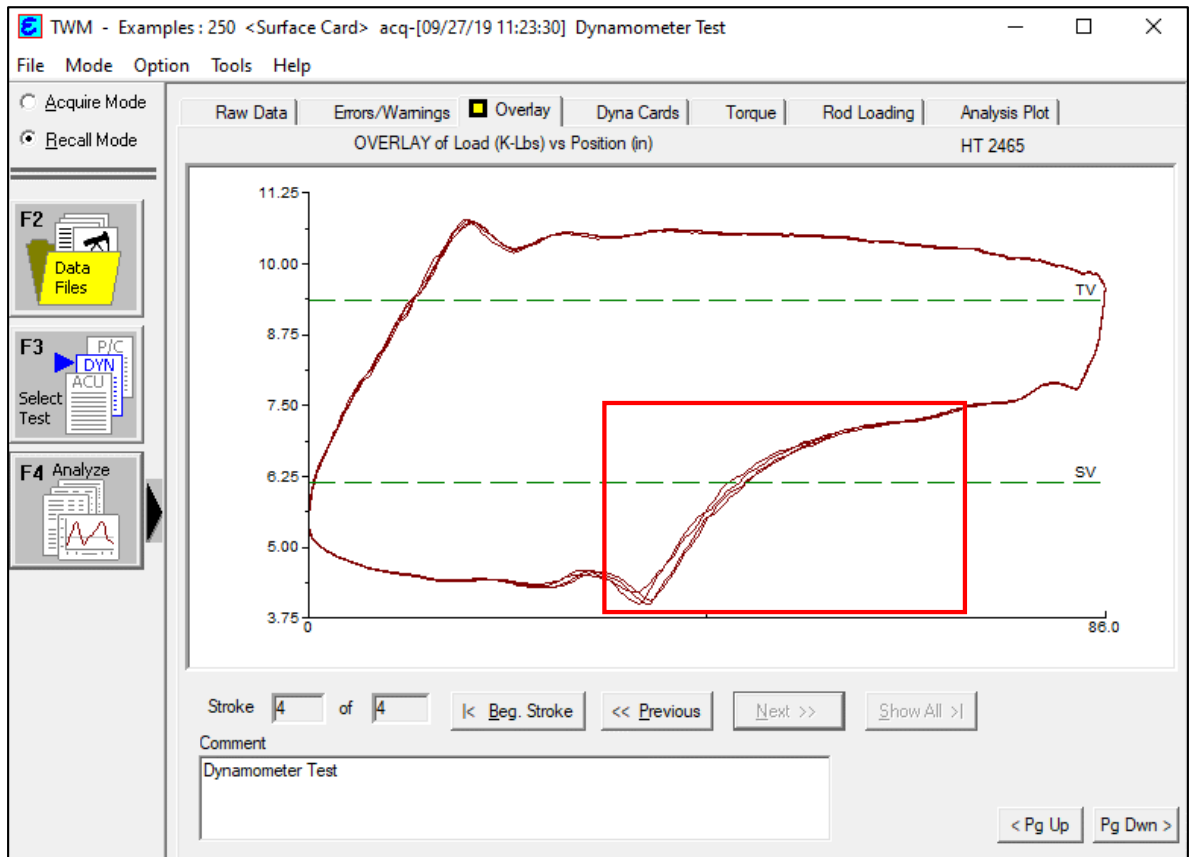
Imagen 32. Test de válvulas mes 2



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.2.2.3 Prueba dinamométrica. En la sección Overlay se muestra un espaciamiento entre las trayectorias del pistón en la carrera descendente. Lo anterior indica presencia de gas durante el ciclo de bombeo a lo largo de la carrera descendente del pistón, puesto que se muestra la variación de la carga que se genera en cada stroke y esta varía debido a la cantidad de gas que ingresa al barril durante cada ciclo de evaluado. Ver Imagen 33.

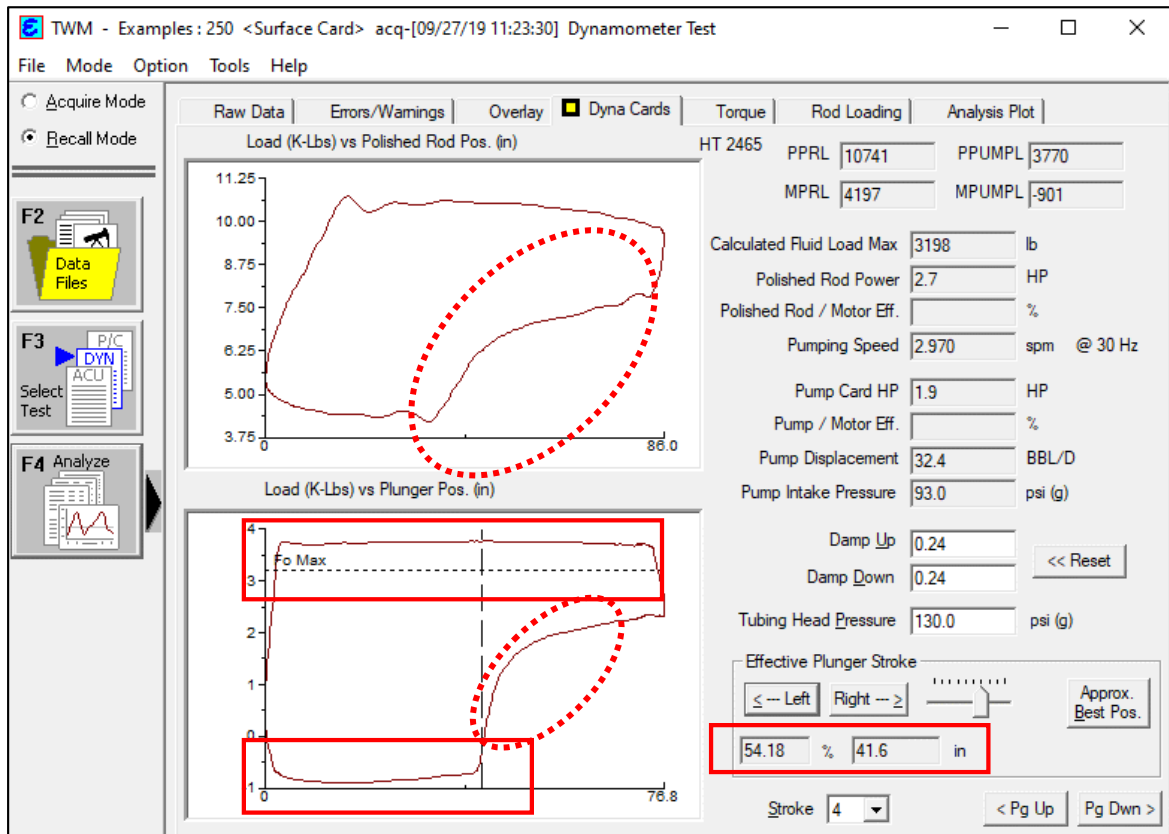
Imagen 33. Test dinamo métrico sección Overlay mes 2



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

En la Imagen 34., se puede notar que la línea de carga máxima que alcanza la carga de la bomba se encuentra por encima de la línea punteada que hace referencia al nivel de fluido máximo sobre la bomba (F_o Max), esto quiere decir que la bomba no se llena en su totalidad, así como se presenta en el mes anterior. Adicionalmente, se evidencia un aumento en la tensión ejercida en la sarta de varillas al realizar la carrera ascendente, debido al incremento de 500 lb de carga en la sarta de varillas, respecto al mes anterior, debido a que los niveles de fluido se reducen en 56%, provocando que el aporte de la presión de la columna de fluido también se reduzca. En esta sección se puede observar un comportamiento similar al del mes anterior en cuanto a la trayectoria del pistón; sin embargo, existe una reducción del 15.5% en cuanto al recorrido efectivo del pistón, estableciendo que ocurre a raíz de la interferencia de gas en el barril (óvalo), lo cual provoca un mayor esfuerzo por las válvulas al tener que hacer la compresión de este.

Imagen 34. Test dinamométrico sección Dyna cards mes 2



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.2.2.4 Tabulación e interpretación de datos por stroke. A partir de los datos obtenidos en el software TWM, se determina el esfuerzo máximo en la sarta de varillas es de 10,751 lbf, el esfuerzo mínimo de la sarta de varillas 4061 lbf, el esfuerzo máximo de la bomba 3761 lbf y esfuerzo mínimo de la bomba -911 lbf (valor negativo debido a la fuerza boyante, donde se encuentra sumergida la bomba). La desviación indica la separación entre los datos tomados, mostrando el efecto del gas en dichas variaciones. utilizar la desviación estándar nos permite identificar la separación entre cada uno de los datos tomados, entre mayor sea esta nos permite identificar como el gas afecta la superposición de las trayectorias graficadas anteriormente. Al realizar el procedimiento de reespaceo se evidencia la disminución de la carrera máxima del pistón, se identifica que el porcentaje de carrera efectiva del pistón disminuye con respecto al mes anterior de 69% a 56% por lo tanto el aporte de fluido a superficie se estima en 33,6 bbls/d. Al identificar el porcentaje de estrés de las varillas durante los strokes evaluados en el mes 2 se calcula que el porcentaje promedio obtenido durante la prueba es de 43.7% producido por una fuerza máxima promedio de 10,752 lbsf. Ver Tabla 4.

Tabla 4. Datos TWM mejor aproximación mes 2

MES 2 (27/09/2019)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Promedio
Carga de las varillas					
Stress load (%)	43.8	43.6	43.8	43.7	43.7
PPRL (lb)	10774	10721	10770	10741	10752
MPRL (lb)	3985	4058	4007	4197	4062
Carga de la bomba					
PPUMPL (lb)	3749	3764	3764	3770	3762
MPUMPL (lb)	-925	-909	-911	-901	-912
General					
SPM	2.975	2.965	2.975	2.97	2.971
Dto. de la bomba (bbl/D)	34.1	33.9	33.2	33.1	33.6
PIP (Psi)	93	93	93	93	93
THP (Psi)	130	130	130	130	130
Damp Up	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Damp Down	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
CEP twm (in)	43.7	43.6	42.6	42.5	43.1
% CEP Twm	56.29	56.72	55.35	55.32	55.92
CMP (in)	77	76.8	76.9	76.8	76.9

Fuente: elaboración propia

Al comparar el desplazamiento de fluido obtenido por los cálculos de TWM mostrados previamente (33,6 bbls/d) y los barriles de fluidos obtenidos en la prueba de producción (25 bbls), se presenta una diferencia que se le atribuye al fenómeno de compresión interno del barril; en la carrera ascendente se realiza la transferencia de fluidos del pozo al interior del barril, posteriormente al empezar la carrera descendente, el gas se comprime generando un mayor esfuerzo de la sarta de varillas para realizar el cierre correcto de la válvula fija. Durante este esfuerzo el gas logra comprimirse al interior del barril ocupando espacio que debería ser llenado con líquido y al terminar la carrera descendente el gas logra pasar a la tubería de

producción. Los datos obtenidos en la siguiente tabla permiten identificar la distancia del pistón que se pierden durante cada recorrido por dicho fenómeno de compresión interno (CNEP inicial; 11 in) además de la distancia durante la cual el gas no permite el cierre correcto de las válvulas y genera una carrera no efectiva del pistón durante la carrera descendente (CNEP final; 33.8 in) en donde no se desplazaron 8.6 bbl/d al inicio de la carrera y al final 26.3 bbl/d por el fenómeno de compresión del gas. Al realizar la suma de los del fluido obtenido en la prueba de producción 25 bbl/d y el volumen no desplazado por efecto del gas que se comprime dentro del barril 8.551 bbls/d se obtiene el valor estimado para el software twm de 33.575 bbl/día. Por lo tanto, se obtiene que el % efectivo de la carrera del pistón que desplaza líquido desde el fondo del pozo es del 42%. Ver Tabla 5.

Tabla 5. Data TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 2

MES 2 (27/09/2019)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Promedio
CEP Real (in)	32	32	32.2	32.1	32.1
BFPD PP (BBL/D)	25	25	25	25	25
% CEP real	41.78	41.72	41.85	42.82	42.04
CNEP (in)	45	44.8	44.7	44.7	44.8
CNEP inicial (in)	11.7	11.6	10.4	10.4	11.0
CNEP final (in)	33.3	33.2	34.3	34.3	33.8
FTND (bbl/D)	35.0	34.8	34.9	34.8	34.9
FND CNEPi (BBL/D)	9.0	9.0	8.1	8.1	8.6
FND CNEPf (bbl/D)	26.0	25.8	26.8	26.7	26.3

Fuente: elaboración propia

3.2.3 Prueba mes 3. La tercera prueba representativa, proporcionada por la empresa, del comportamiento de producción del pozo P-250 para el tercer mes de estudio se realizó el día 20 de octubre de 2019.

3.2.3.1 Prueba de nivel. En cuanto a lo obtenido durante la toma de nivel, en este caso se presenta que la sumergencia de la bomba reduce su columna de fluido líquido- gas en un 47.5% y el líquido libre de gas equivalente en un 53.1% respecto al segundo mes y esto incrementa la posibilidad de que se generen daños en el equipo. Sin embargo, el líquido por el anular aumenta en un 10% siendo esta una posible razón de que la sumergencia de la bomba se haya visto reducida. Por otro lado, se tiene que la presión de intake es de 112,7, valor muy similar al mes anterior

pero bastante bajo, lo cual corrobora que no existe mucho fluido por encima de la bomba. Ver Imagen 35.

Imagen 35. Toma de nivel mes 3

TWM - Examples : 250 <Shot Trace> acq-[10/20/19 10:48:49] Acoustic Test

File Mode Option Tools Help

Acquire Mode
 Recall Mode

Select Liquid Level | Depth Determination | Casing Pressure BHP | Collars

Production
 Oil: Current 20, Potential 21.3, BBL/D
 Water: 29, 30.9, BBL/D
 Gas: 26.0, 27.7, Mscf/D

IPR Method: Vogel
 PBHP/SBHP: 0.18
 Producing Efficiency: 93.7 %

Fluid Densities
 Oil: 12.2 deg.API
 Water: 1.05 Sp.Gr.H2O
 Gas Gravity: 0.55 Air = 1
 Acoustic Velocity: 1485.97 ft/s

Casing Pressure: 97.6 psi (g)
 Casing Pressure Buildup: 0.4 psi
 6.00 min
 Gas/Liquid Interface Pres.: 105.5 psi (g)

Well State: Producing
 Annular Gas Flow: 4 Mscf/D
 % Liquid: 89

Liquid Level Depth
 MD: 3843.47 ft
 TVD: 3770.83
 Pump Intake Depth
 MD: 3863.00 ft
 TVD: 3790.29
 Formation Depth
 MD: 4283.00 ft
 TVD: 4209.16

Pump Submergence
 Total Gaseous Liquid Column HT (TVD): 19 ft
 Equivalent Gas Free Liquid HT (TVD): 17 ft

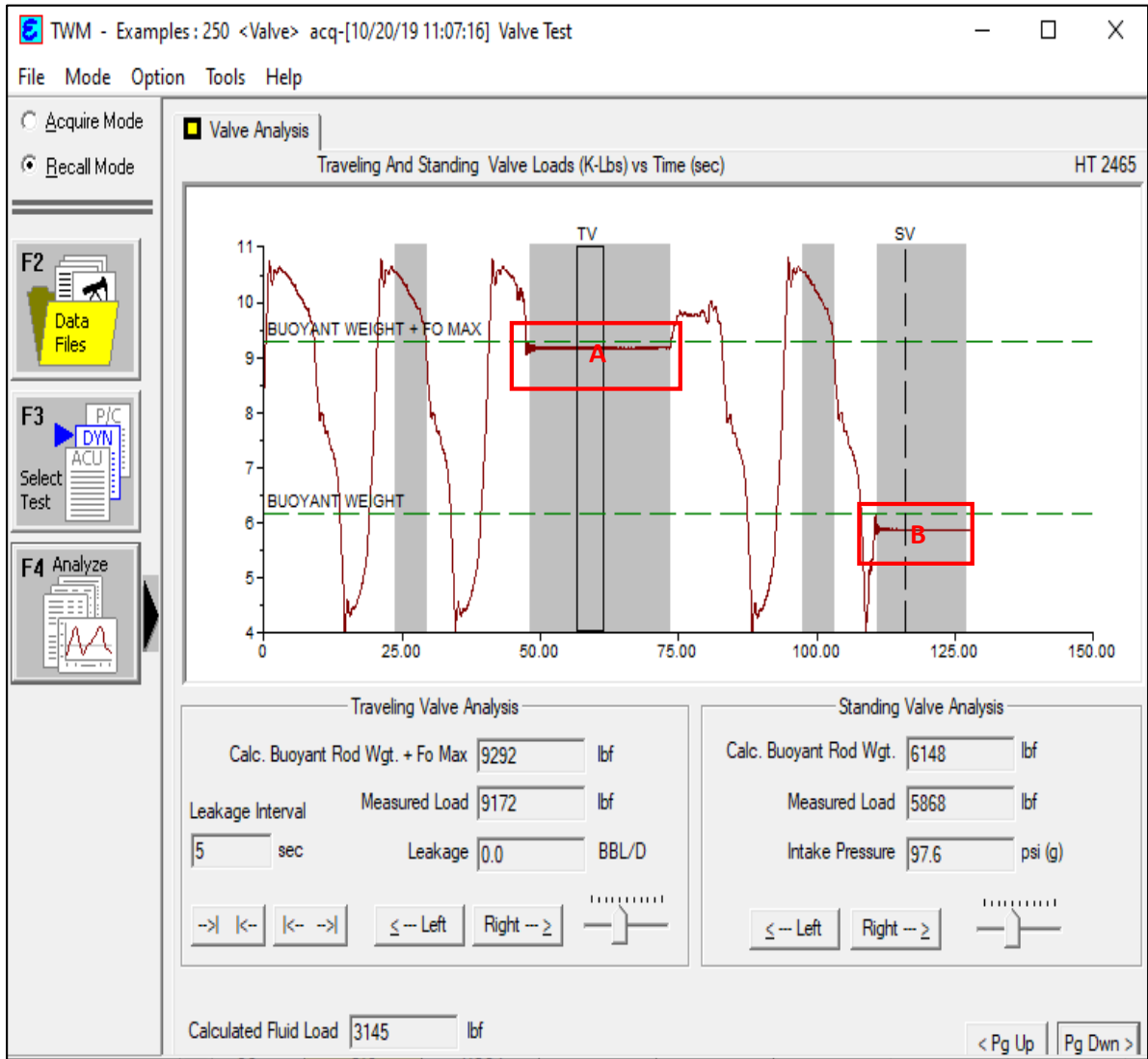
Pump Intake Pressure: 112.7 psi (g)
 PBHP: 286.7 psi (g)
 Reservoir Pressure (SBHP): 1644.2 psi (g)

Comment: Acoustic Test
 < Pg Up Pg Dwn >

Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.2.3.2 Test de válvulas. A través de los resultados obtenidos en la prueba de válvulas, se puede decir que se continúa manteniendo el sello adecuado de estas debido a que se presenta la tensión constante tanto en la válvula viajera (A) como en la válvula fija (B) con un diferencial de carga de 3470 Lb aproximadamente, muy similar a los dos meses anteriores. Debido a que el filtrado (Leakcage) es cero, no presenta el fenómeno de escurrimiento. Ver Imagen 36.

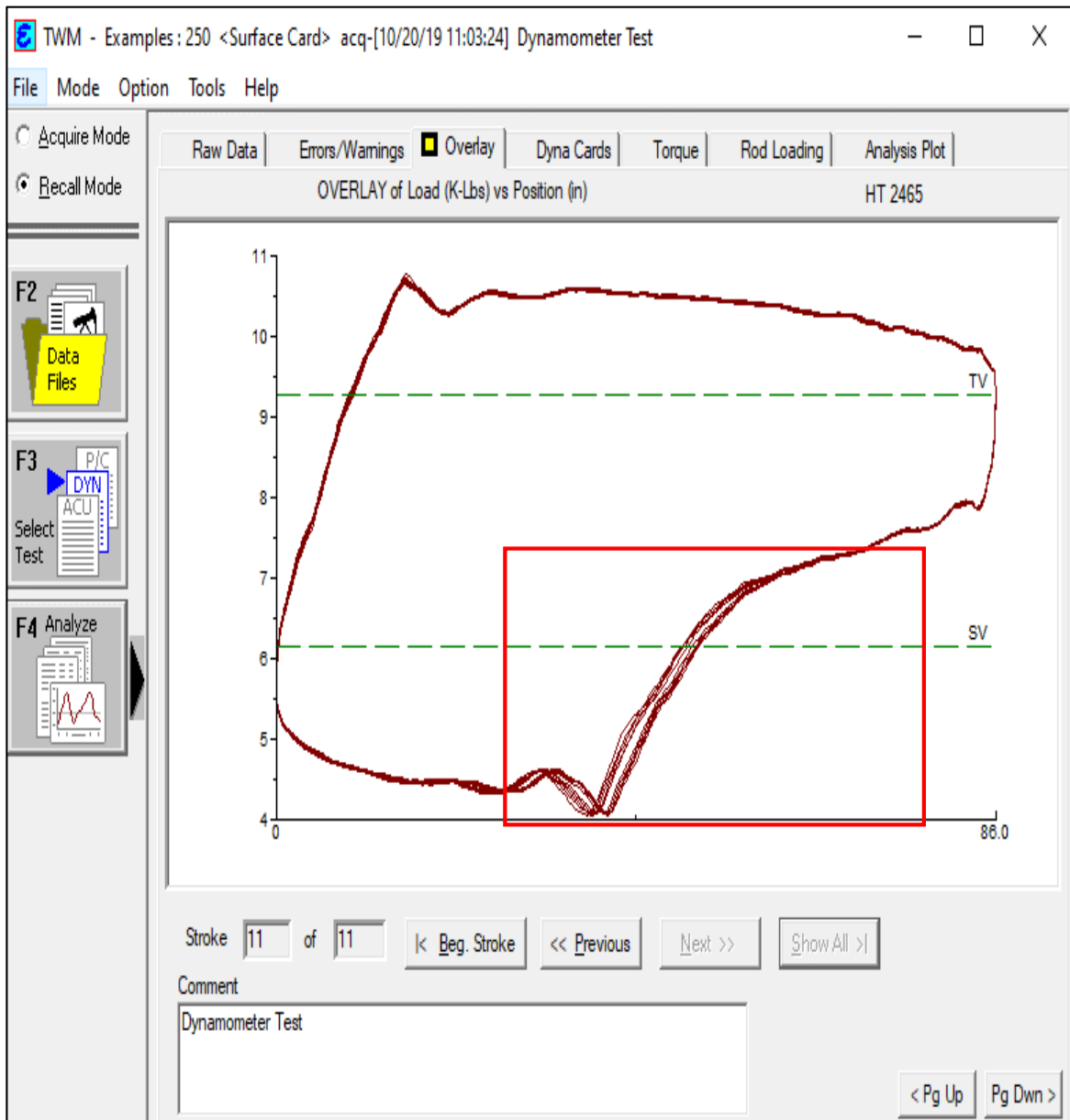
Imagen 36. Test de válvulas mes 3



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.2.3.3 Prueba dinamométrica. En la sección Overlay de la prueba dinamométrico se puede observar, así como en las cartas anteriores, la interferencia de gas en la carrera descendente del pistón. Este fenómeno característico de la compresión del gas dentro del barril de la bomba provoca la reducción del desplazamiento efectivo del pistón. Ver Imagen 37.

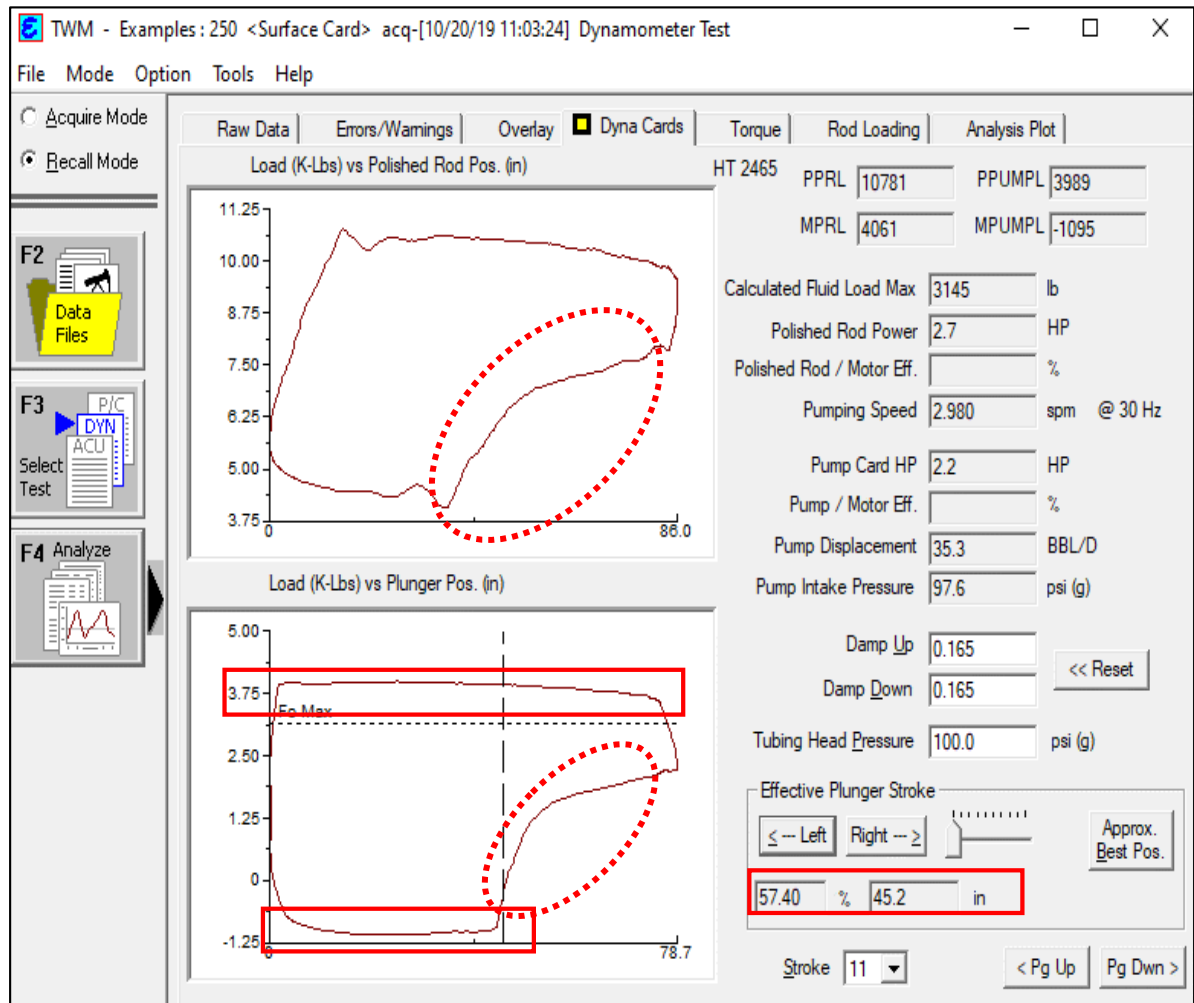
Imagen 37. Test dinamométrico sección Overlay mes 3



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

La carrera efectiva del pistón cada vez es menor debido a la interferencia de gas en el fondo, causando una disminución drástica en la eficiencia de bombeo, el gas cada vez ocupa mayor cantidad de espacio en el fondo del barril. Los niveles de fluido se presentan cada vez más bajos. Ver Imagen 38.

Imagen 38. Test dinámico sección Dyna cards mes 3



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.2.3.4 Tabulación e interpretación de datos por stroke. Como se puede observar en la Tabla 6, se obtienen los valores promedio la prueba por cada variable en donde se determina que el esfuerzo máximo de la sarta de varillas es de 10,708 Lb, su esfuerzo mínimo de 4,079 Lb, los esfuerzos máximo y mínimo de la bomba son de 3,974 Lb y -1,078 Lb, respectivamente. El valor negativo del esfuerzo mínimo de la bomba se presenta negativo debido a que la bomba se encuentra sumergida y se presenta la fuerza boyante. La desviación de los datos representa el efecto del gas en cada trayectoria. Al identificar el porcentaje de estrés de las varillas durante los strokes evaluados en el mes 3 se calcula que el porcentaje promedio obtenido durante la prueba es de 43.54% producido por una fuerza máxima promedio de 10,708 lbf.

Tabla 6. Datos TWM mejor aproximación mes 3

MES 3 (20/10/2019)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Stroke 5	Stroke 6	Stroke 7	Stroke 8	Stroke 9	Stroke 10	Stroke 11	Promedio
Carga de las varillas												
Stress load (%)	43.5	43.4	43.4	43.6	43.5	43.5	43.5	43.4	43.7	43.6	43.8	43.54
PPRL (lb)	10700	10666	10674	10717	10696	10699	10698	10683	10740	10733	10781	10708
MPRL (lb)	4077	4083	4107	4085	4086	4083	4062	4073	4058	4098	4061	4079
Carga de la bomba												
PPUMPL (lb)	3959	3961	3961	3970	3969	3978	3975	3982	3982	3990	3989	3974
MPUMPL (lb)	-1062	-1062	-1058	-1075	-1082	-1079	-1089	-1087	-1086	-1084	-1095	-1078
General												
SPM	2.975	2.98	2.985	2.975	2.98	2.975	2.98	2.975	2.985	2.975	2.98	2.979
Dto. de la bomba (bb/D)	37.8	37.7	36.8	37.4	38.1	37.8	37.7	36.8	36.5	36.3	36	37.2
PIP (Psi)	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6
THP (Psi)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Damp Up	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165
Damp Down	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165
CEP twm (in)	48.4	48.2	47	47.9	48.7	48.5	48.2	47.1	46.6	46.5	46.1	47.6
% CEP Twm	61.4	61.11	59.5	60.74	61.68	61.49	61.16	59.77	59.04	59.01	58.51	60.31
CMP (in)	78.9	78.9	79	78.8	78.9	78.8	78.8	78.8	78.9	78.7	78.7	78.8

Fuente: elaboración propia

Al comparar el desplazamiento de fluido obtenido por los cálculos de TWM (37.2 bbls/d) y los barriles de fluidos obtenidos de la prueba de producción 24 bbls, se evidencia una discordancia la cual se le puede atribuir al fenómeno de compresión interno del barril, donde en la carrera ascendente se realiza la transferencia de fluidos del pozo al interior del barril. Posteriormente al empezar la carrera descendente el gas se comprime generando un mayor esfuerzo de la sarta de varillas para realizar el cierre correcto de la válvula fija, durante este esfuerzo el gas logra comprimirse al interior del barril ocupando espacio el cual debería ser llenado con líquidos y al terminar la carrera descendente este logra pasar a la tubería de producción. Ver Tabla 7.

Tabla 7. Datos TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 3

MES 3 (20/10/2019)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Stroke 5	Stroke 6	Stroke 7	Stroke 8	Stroke 9	Stroke 10	Stroke 11	Promedio
CEP Real (in)	30.7	30.9	30.8	30.9	30.5	30.7	30.8	30.6	30.8	30.9	30.6	30.7
BFPD PP (BBL/D)	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
% CEP real	38.9	39.11	39	39.24	38.68	38.89	39.12	38.77	39.09	39.28	38.9	39.00
CNEP (in)	48.2	48	48.2	47.9	48.4	48.1	48	48.2	48.1	47.8	48.1	48.1
CNEP inicial (in)	17.7	17.3	16.2	17	18.2	17.8	17.4	16.5	15.8	15.6	15.5	16.8
CNEP final (in)	30.5	30.7	32	30.9	30.2	30.3	30.6	31.7	32.3	32.2	32.6	31.3
FTND (bb/D)	37.6	37.5	37.7	37.4	37.8	37.5	37.5	37.6	37.7	37.3	37.6	37.6
FND CNEPi (BBL/D)	13.8	13.5	12.7	13.3	14.2	13.3	13.0	12.2	11.7	11.7	11.4	12.8
FND CNEPf (bb/D)	23.8	24.0	25.0	24.1	23.6	24.3	24.5	25.4	25.9	25.6	26.2	24.8

Fuente: elaboración propia

3.2.4 Comportamiento general Escenario 1. Se procede a realizar análisis del comportamiento de las pruebas de producción para los meses 1, 2 y 3 en cuanto a

los barriles de fluido diarios, BSW, barriles de petróleo diarios, niveles de fluido sobre la bomba, eficiencia de llenado, SPM y GOR.

En la Tabla 8., se pueden ver los datos arrojados por las pruebas de producción proporcionadas por la empresa durante el periodo de los tres meses previos a la instalación de la caja Tangent Flow. En esta se tiene el nivel de fluido total bombeado (NFSB Total), el nivel de fluido sobre la bomba líquido (NFSB Líquido), el porcentaje de llenado (% llenado) los strokes por minuto (SPM), relación gas-petróleo (GOR), gas, los barriles de fluido y barriles de petróleo por día (BFPD, BOPD).

Tabla 8. Resultados Escenario 1

	FECHA	BFPD (BBL/ D)	BSW (%)	BOPD (BBL/ D)	NFSB TOTAL (ft)	NFSB LIQ (ft)	Eficiencia de llenado %	SPM	GAS (Mscf/ D)	GOR (Scf/ bbl)
MES 1	09-ago.-19	36	76%	9	465	465	73%	2.0	9.4	1044
	17-ago.-19	36	75%	9	465	465	73%	2.0	9.9	1100
	19-ago.-19	36	50%	18	465	465	73%	2.0	9.9	550
	28-ago.-19	34	50%	17	192	180	69%	2.1	9.9	582
MES 2	10-sep.-19	34	46%	18	0	0	47%	2.1	9.9	550
	11-sep.-19	40	46%	22	0	0	47%	3.0	9.9	495
	14-sep.-19	34	46%	18	2	1	39%	3.0	9.9	550
	17-sep.-19	19	54%	9	3	3	49%	3.0	8.9	989
	27-sep.-19	25	54%	12	40	32	41%	3.0	8.9	809
MES 3	08-oct.-19	24	54%	11	57	50	53%	3.0	8.9	809
	20-oct.-19	24	54%	11	19	17	50%	3.0	29.3	2664
	30-oct.-19	24	54%	11	19	17	50%	3.0	29.3	2664
PROMEDIO		31	55%	14	144	141	55%	3	13	1067

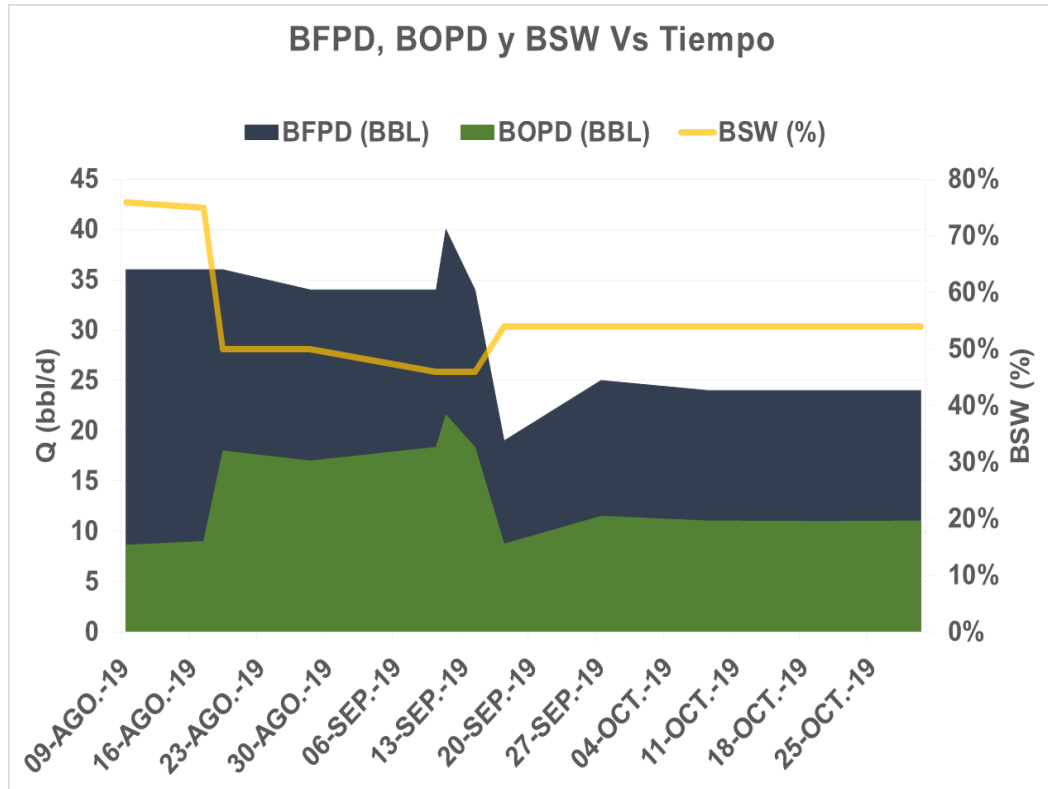
Fuente: elaboración propia

Como puede ser observado en la Tabla 8., para el tercer mes se presenta una reducción en la producción de fluido del 32.4% respecto al primero, con una reducción de los barriles de petróleo del 17%. Lo anterior se encuentra relacionado con la capacidad de llenado de la bomba de fondo, debido a que esta se reduce en 29%. Adicionalmente, se puede observar que para septiembre no se presenta nivel de fluido sobre la bomba, por lo tanto, se determina que la bomba se encuentra expuesta a presentar daños en el equipo. Además, la reducción en el llenado de la

bomba esta inversamente relacionado con los SPM, así como puede observar en la tabla, las menores velocidades presentan un mayor llenado de la bomba. El nivel de fluido disminuye por la misma razón, puesto que a medida que la velocidad aumenta, el nivel de fluido sobre la bomba disminuye.

Ahora bien, con el fin de determinar la relación entre los barriles producidos y el BSW se genera el Grafico 5.

Gráfico 5. BOPD, BFPD, BSW Vs Tiempo (Escenario 1)

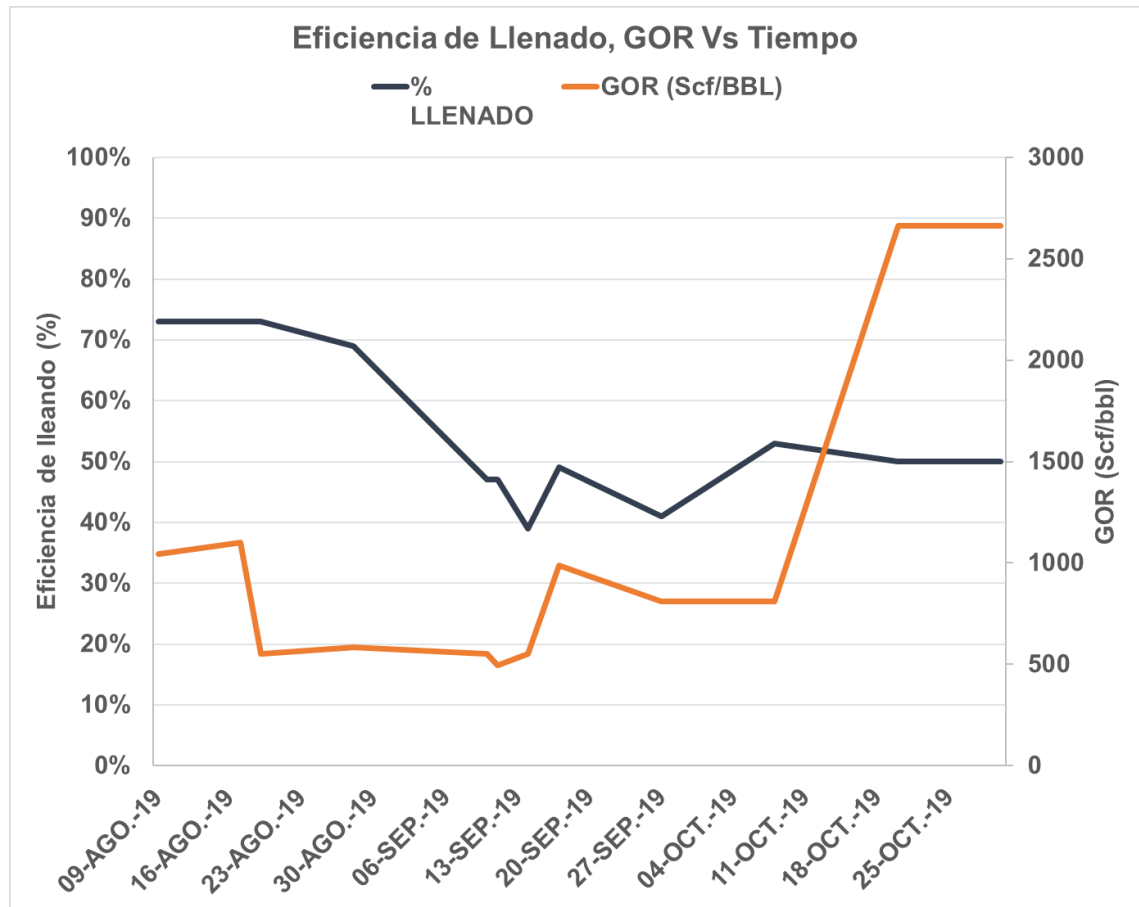


Fuente: elaboración propia

En el Grafico 5., se puede evidenciar que hasta mediados del mes 1 se tiene una relación agua-petróleo 2:1, sin embargo, la cantidad de petróleo se duplica entre el mes 1 y el mes 2, alcanzando 18 BOPD con una relación agua- petróleo 1:1, debido a que el BSW se reduce en un 15%. Posteriormente, Al final del Mes 2 se identifica que la cantidad de fluido decrece en 30% con respecto al valor promedio del Mes 1 y se mantiene constante durante el mes 3 manteniendo la relación agua-petróleo 1:1.

La relación entre el GOR y la eficiencia de llenado durante los meses 1, 2 y 3 se puede visualizar en el Grafico 6.

Gráfico 6. GOR, %Llenado Vs Tiempo (Escenario 1)

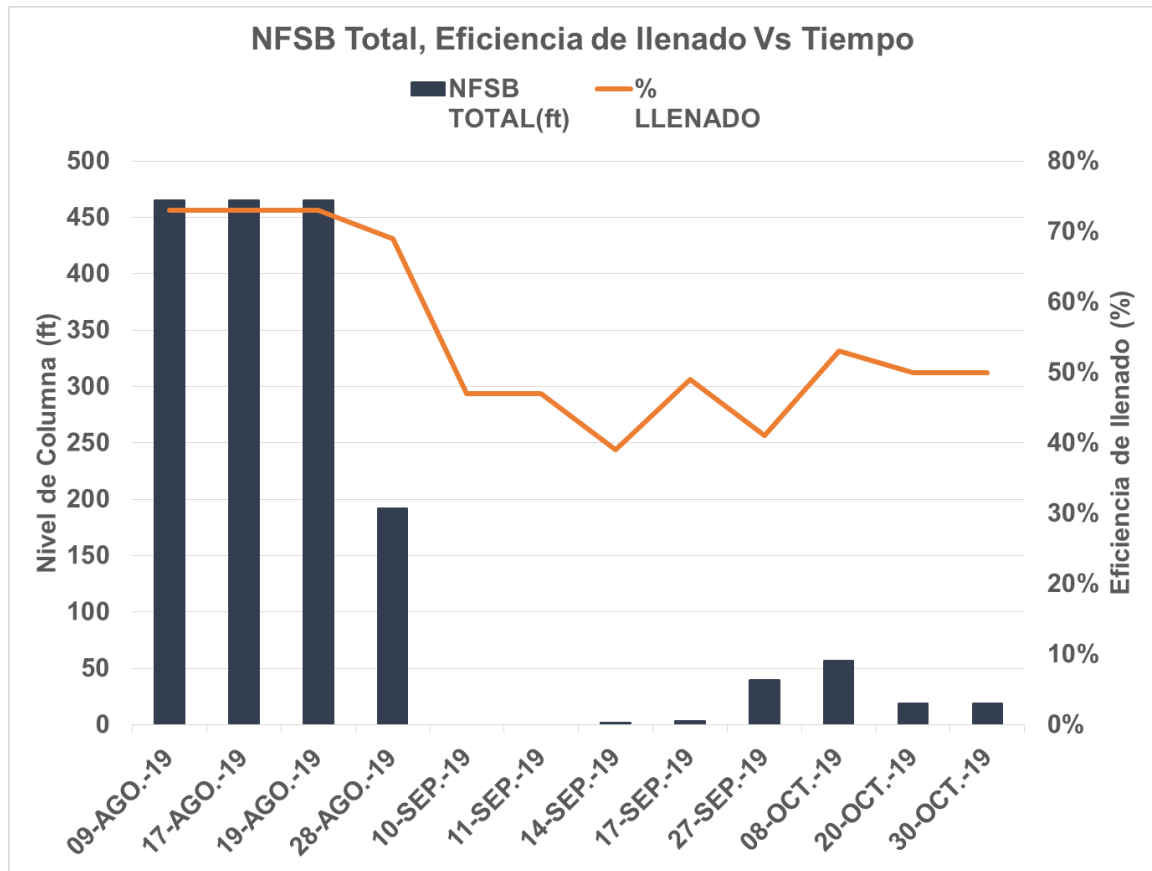


Fuente: elaboración propia

Como se puede ver en el Gráfico 6., durante este periodo de tiempo la bomba no supera el 70% de llenado, teniendo en cuenta que los valores de GOR, hasta octubre de 2019, se encuentran por debajo de 700 Scf/Bbl y posteriormente, al finalizar el periodo, se alcanzan los 2664 Scf/bbl, reduciendo la eficiencia en 3%. Se puede decir que se mantiene una relación inversa entre la eficiencia de llenado y el GOR.

Con el fin de determinar el efecto del nivel de fluido total sobre la bomba y la eficiencia de llenado de esta durante el Escenario 1 respecto al tiempo, previo a la implementación de la caja, se procede a realizar el respectivo análisis del Grafico 7.

Gráfico 7. NFSB Total, eficiencia de llenado Vs Tiempo (Escenario 1)

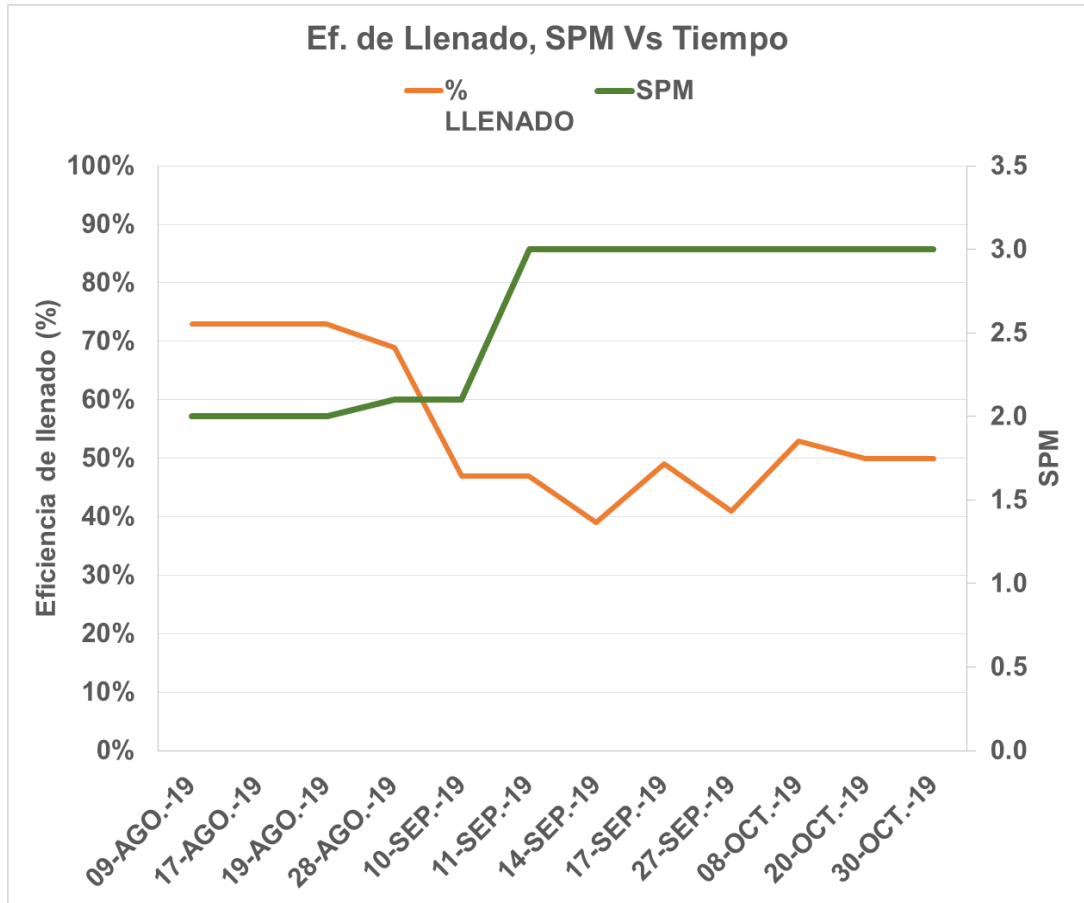


Fuente: elaboración propia

Se puede observar en el Gráfico 7., que el nivel de fluido sobre la bomba total afecta directamente al llenado de la misma puesto que entre mayor sea el nivel de la columna sobre la bomba, mayor será la presión en la entrada de la bomba (PIP), generando un aumento del diferencial de presión entre el barril y el fondo del pozo, permitiendo que los fluidos se movilicen con mayor facilidad al interior de la bomba y asimismo, el equipo de superficie tiene que realizar un esfuerzo menor para el levantamiento. Entre el Mes 1 y el Mes 3 se observa una reducción de 92% del llenado con 365 ft menos de nivel de fluido sobre la bomba. Teniendo en cuenta que los niveles de fluido por debajo de los 250 ft se consideran bajos.

A continuación, para evaluar la eficiencia de llenado de la bomba respecto a la velocidad con la que se bombea, se analiza el Gráfico 8.

Gráfico 8. Eficiencia de llenado, SPM Vs Tiempo (Escenario 1)

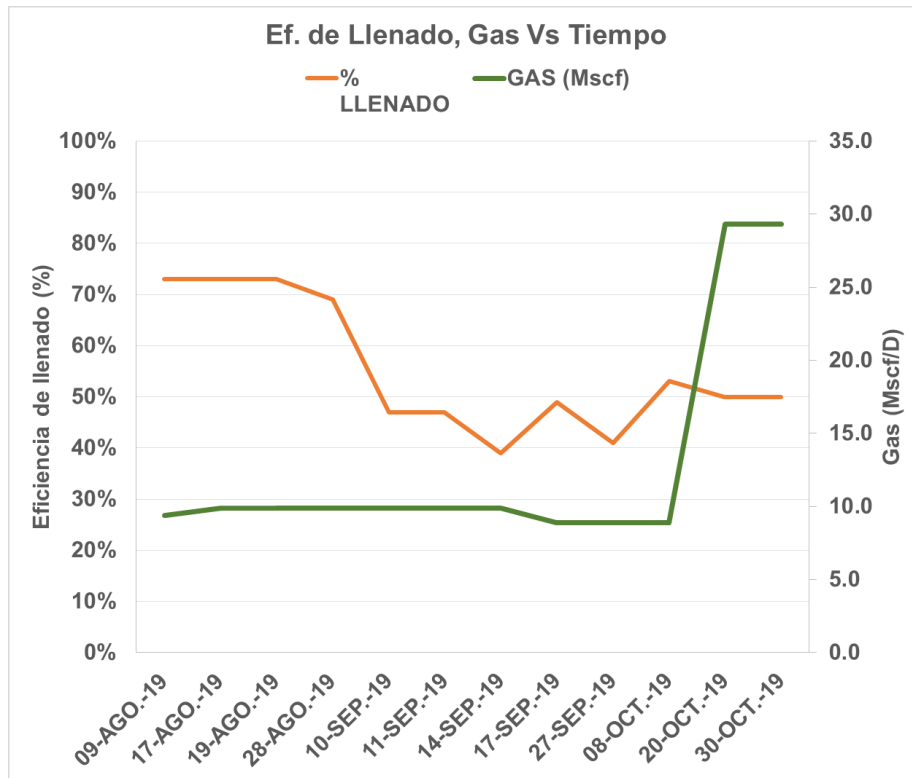


Fuente: elaboración propia

De el Grafico 8., se determina que existe una relación inversa entre estas dos variables, en donde, a medida que se aumenta la velocidad, la eficiencia de llenado se reduce, sin embargo, la eficiencia de llenado se ve afectada por otros factores, como lo es el gas en solución, debido a la agitación del fluido en el fondo del pozo por el aumento en la velocidad de operación, permitiendo que el gas en solución se separe del petróleo. Se puede ver que mediados del mes 2 la velocidad pasa de 2.1 a 3 SPM y posteriormente los valores máximos que alcanza la eficiencia de llenado es de 53%, determinada como eficiencia media y como valores mínimos, una eficiencia de llenado de 39%, la cual se encuentra dentro del rango de eficiencia de llenado baja.

En el Grafico 9., se muestra el comportamiento de la eficiencia de llenado frente a la presencia de gas superior a 8 Mscf/d con un mínimo de 39% de eficiencia de llenado de la bomba de fondo.

Gráfico 9. Eficiencia de llenado, gas Vs Tiempo (Escenario 1)



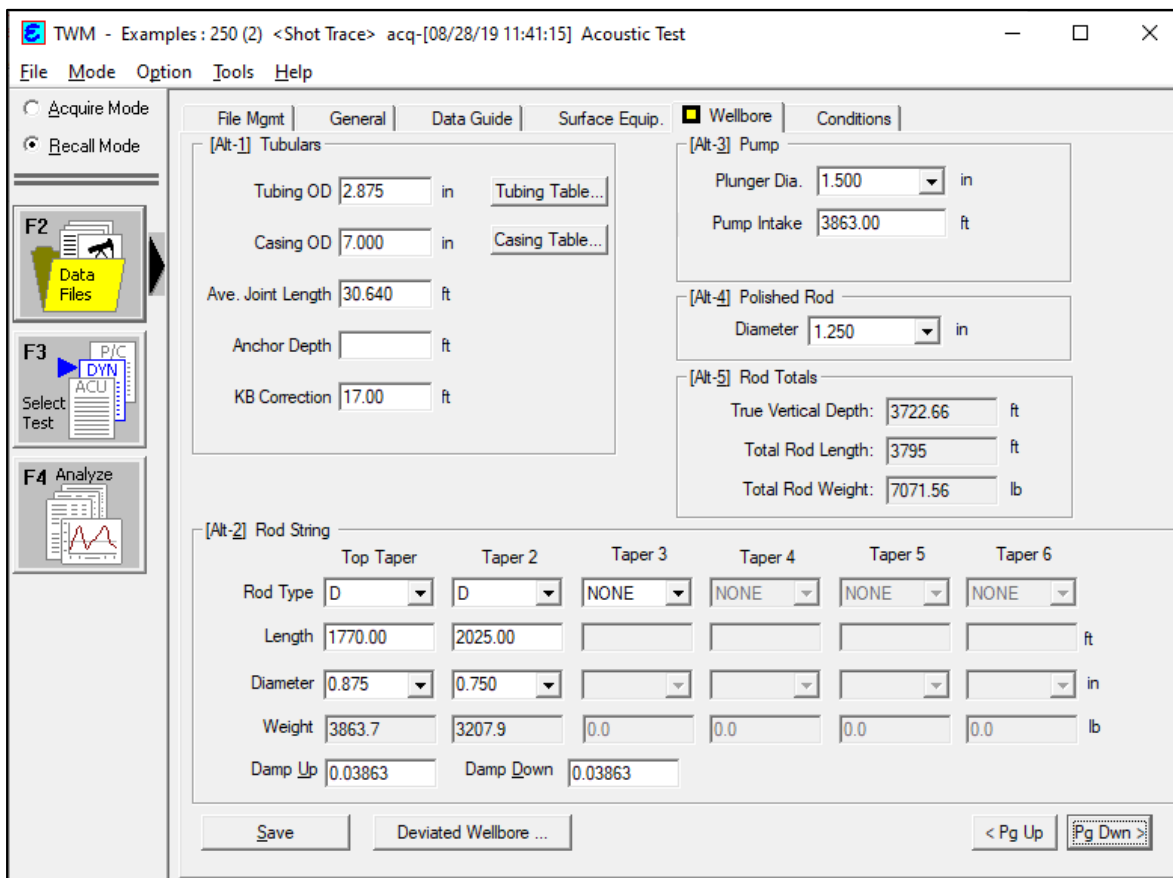
Fuente: elaboración propia

En el Grafico 9., se observa que durante el primer mes (agosto de 2019), se evidencia una eficiencia de llenado constante del 73% ante una producción constante de gas de 10 Mscf/D, la eficiencia de llenado disminuye durante el segundo mes (septiembre de 2019), por debajo del 50%; Se atribuye dicha reducción de llenado de la bomba a la disminución del nivel de fluido sobre la bomba. Para el tercer mes (octubre de 2019) se evidencia el aumento de la producción de gas hasta 29.5 Mscf/D periodo donde se presenta el bloqueo del sistema de levantamiento artificial.

3.3 COMPORTAMIENTO DEL POZO P-250 POR BLOQUEO POR GAS POSTERIOR A LA IMPLEMENTACIÓN DE LA CAJA TANGENT FLOW (ESCENARIO 2)

Inicialmente se revisa la prueba de nivel, de válvulas y dinamométrica de las 3 pruebas tomadas con el software TWM, proporcionadas por la empresa para determinar el estado del pozo en dichas fechas. Luego se pretende determinar el comportamiento general de la prueba promediando los resultados obtenidos en cada stroke. Primero se verifica en la sección F2 (Data Files), en la pestaña Wellbore que las condiciones de la prueba presenten la información correspondiente al estado mecánico del pozo. Ver Imagen 39.

Imagen 39. Wellbore Escenario 2

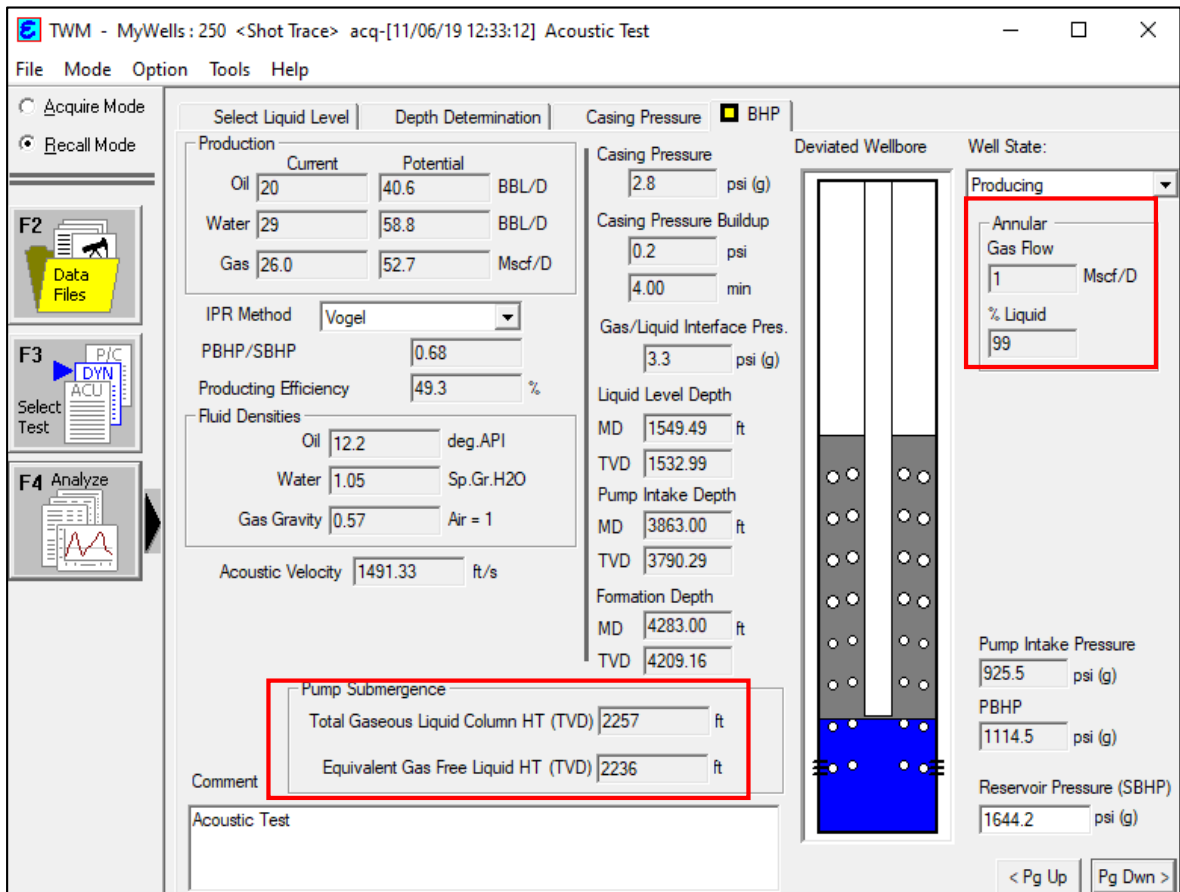


Fuente: elaboración propia con base en: software TWM

3.3.1 Prueba mes 4. Las pruebas entregadas por la empresa representativas del comportamiento de producción del pozo P-250 para el primer periodo de estudio después de la instalación de la caja Tangent Flow fueron realizadas el día 6 de noviembre de 2019, las condiciones de operación para este periodo de tiempo se establecieron a 3 SPM y una longitud de la carrera de la barra lisa de 86 in.

3.3.1.1 Prueba de nivel. Para este primer mes, luego del cambio de la caja API a la caja Tangent Flow se observa un incremento de la presión de la entrada de la bomba, alcanzando un valor de 925.5 Psi lo cual viene dado por el incremento en la columna de fluido sobre la bomba, haciendo referencia a la sumergencia. Se pueden observar los valores de la columna de líquido gaseoso total y el líquido sin gas equivalente, 2257 y 2236 ft respectivamente. Adicionalmente, el gas a través del anular es de tan solo 1 Mscf/D y comparando con el tercer mes, incrementa en un 10% el paso de líquido por el anular. Además, al verificar en la prueba de producción correspondiente se notifica un incremento de 40 BFPD respecto al mes previo de este análisis. Ver Imagen 40.

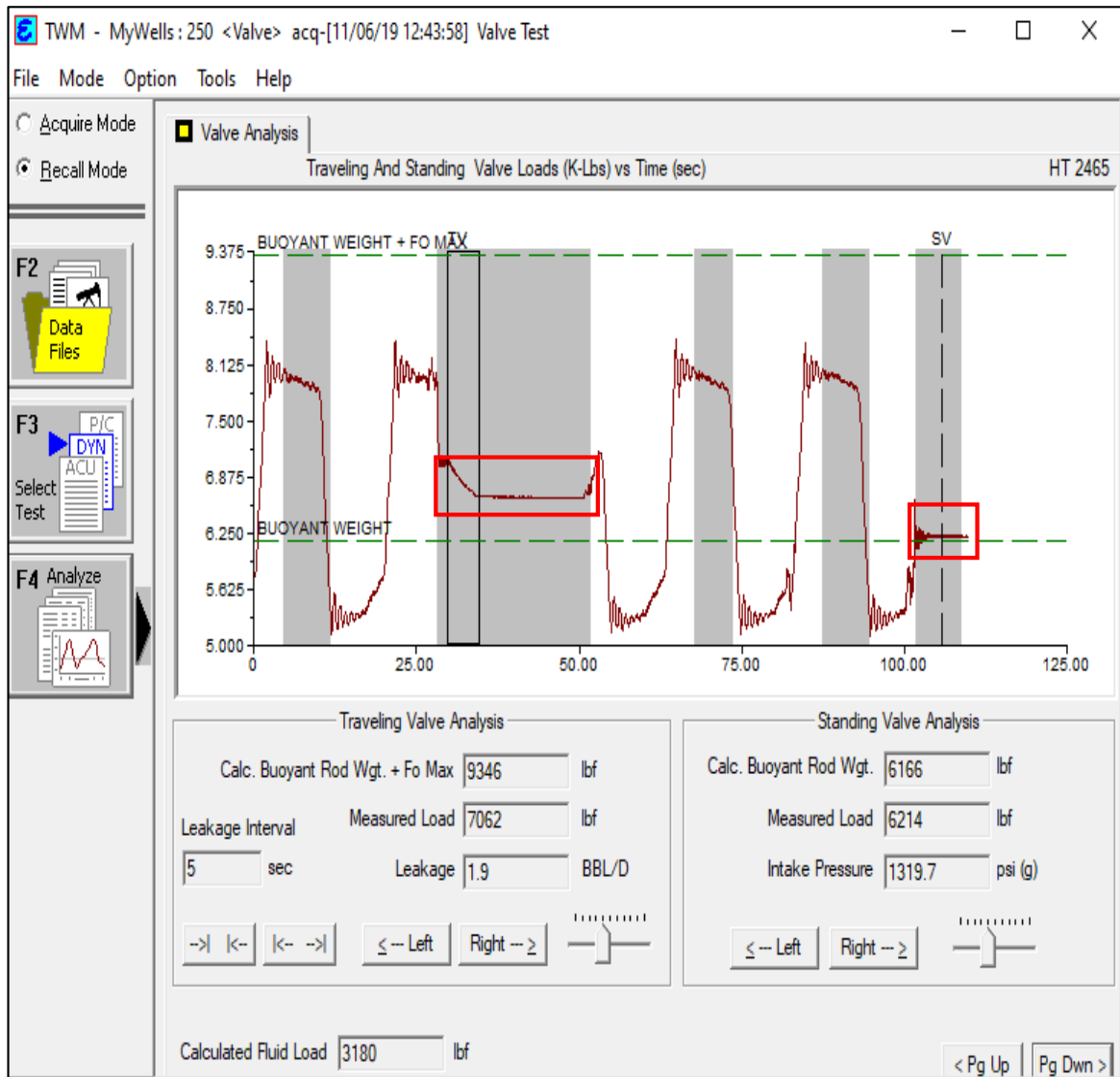
Imagen 40. Toma de nivel mes 4



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.3.1.2 Prueba de válvulas. En la Imagen 41., se muestra la prueba de válvulas realizado y se observa la tensión constante ejercida sobre las válvulas lo cual indica el funcionamiento adecuado de estas. Sin embargo, se evidencia el fenómeno de escurrimiento (rectángulo izquierdo) donde el fluido se filtra por medio del espacio que se deja entre el anular y el dispositivo Tangent Flow con el fin de evitar la erosión por partículas sólidas durante la operación y permitir la lubricación del dispositivo. En esta prueba se evidencia que la tensión ejercida durante la prueba no supera la fuerza ejercida por la columna de fluido, debido al aumento en los niveles de la misma, por lo tanto, el esfuerzo realizado por las válvulas se reduce, en vista de que la caja Tangent Flow se encuentra diseñada para reducir la interferencia de gas, permitiendo que el fluido ingresa con mayor facilidad al barril y en un tiempo menor, provocando un diferencial de carga menor. Se identifica el fenómeno de escurrimiento pues el filtrado (leakage) se encuentra dentro de los rangos del 0.5 a 2% de filtrado de la prueba, sin embargo, es un fenómeno esperado que no afecta significativamente la producción.

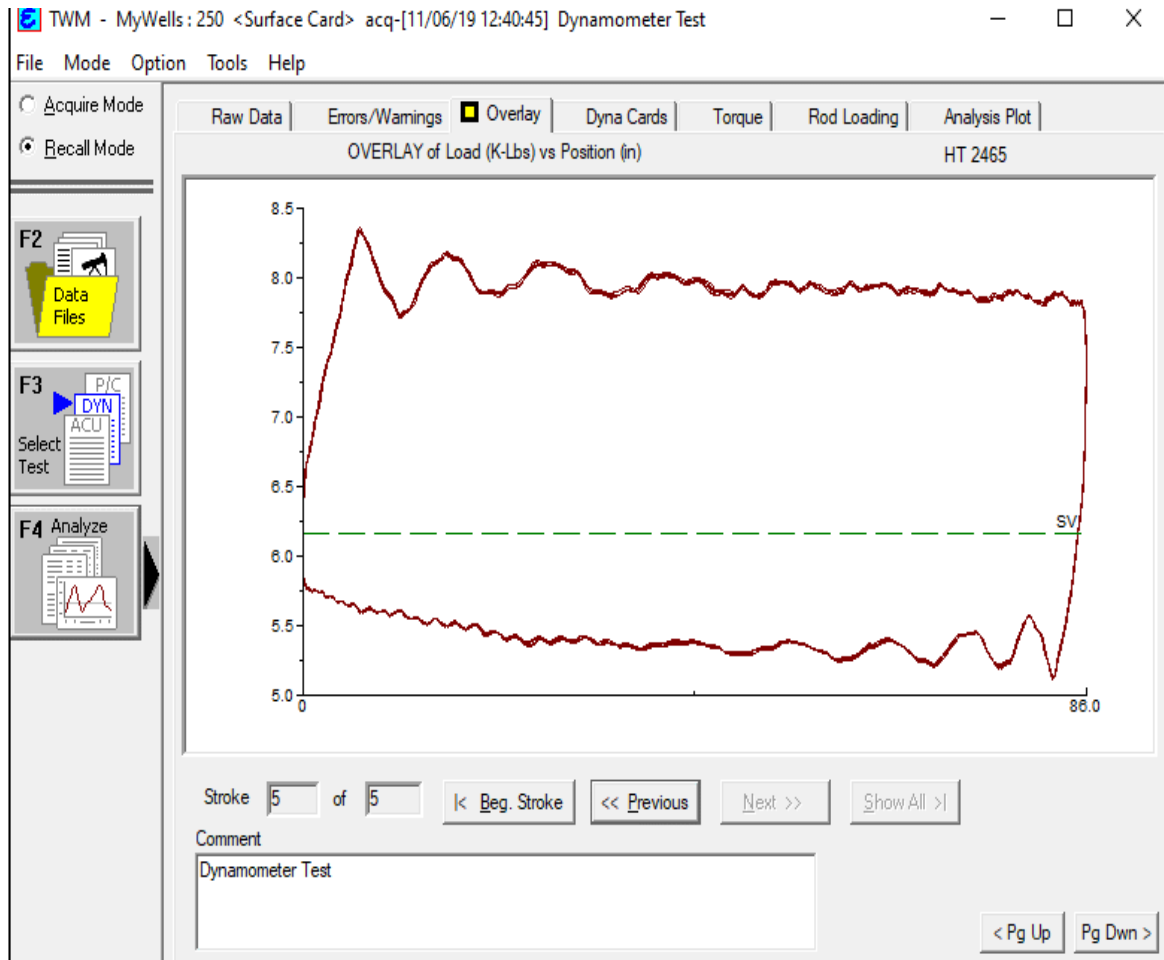
Imagen 41. Test de válvulas mes 4



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.3.1.3 Prueba dinamométrica. En la Imagen 42., se puede contemplar la homogeneidad de las curvas al sobreponer entre si las trayectorias ejercidas por el pistón. Al no presentarse el espaciamento se deduce que no existe interferencia de gas durante los recorridos. Al verificar la prueba de producción se corrobora notando que la eficiencia de llenado es del 100%.

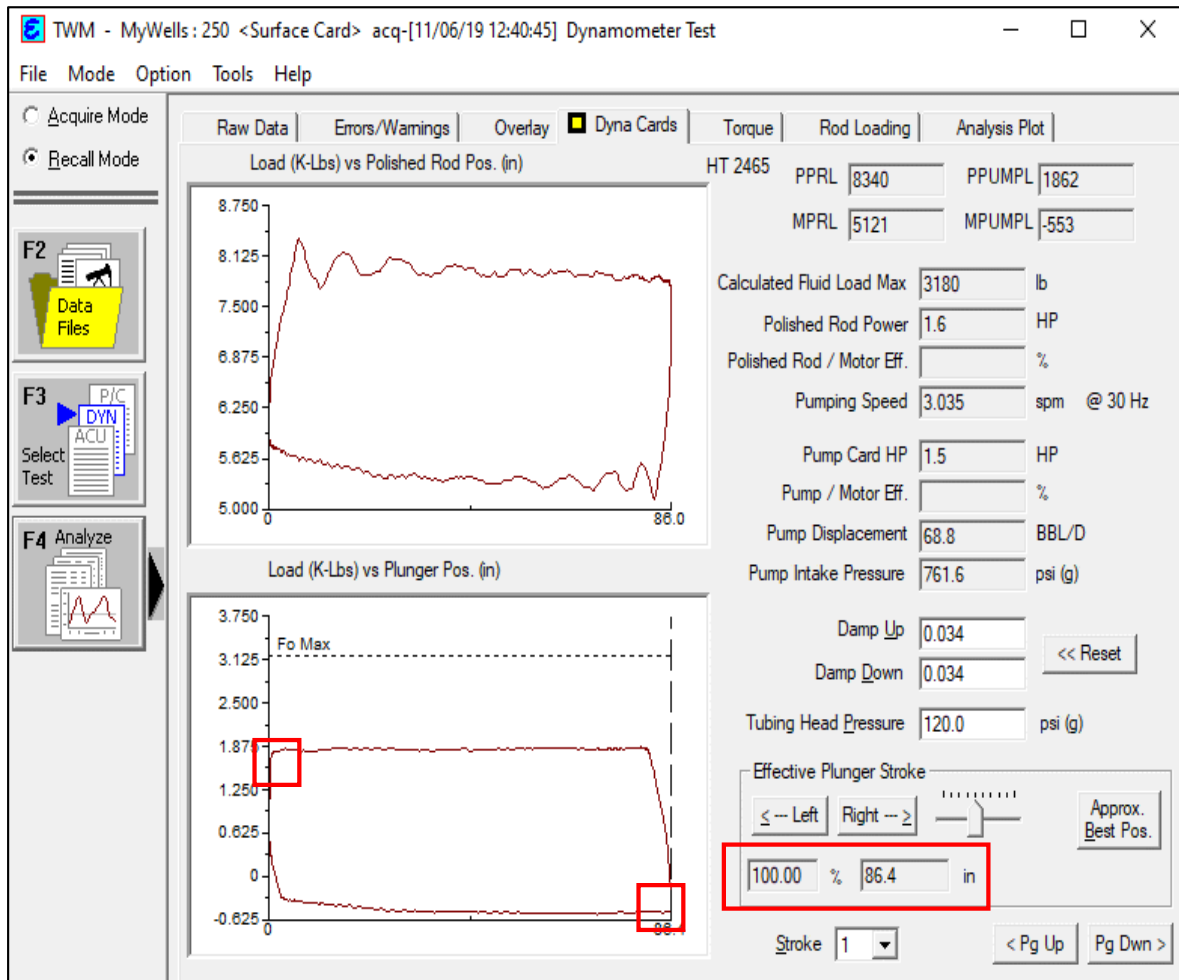
Imagen 42. Overlay mes 4



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

El Test dinamométrico, se observa en la Imagen 43., la carta dinamométrica de la bomba de fondo mostrando la línea punteada por encima de la carga máxima de la bomba indicando que hay buena sumergencia y al ver que es una carta dinamométrica más pequeña en comparación a las anteriores, indica que el pozo está lleno; esto se puede corroborar con el excelente llenado de la bomba que se presenta (100%). Además, se observa que CMP y CEP son iguales, lo cual determina que cada stroke se está realizando completo y sin interferencia de gas. Los vértices superior izquierdo e inferior derecho de la carta dinamométrica de fondo representan el buen sello de las válvulas. Por otro lado, no existen perturbaciones a lo largo de la carrera del pistón que indique presencia de sedimentos.

Imagen 43. Test dinamométrico mes 4



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.3.1.4 Tabulación en interpretación de datos por stroke. A partir de la recopilación de los datos de cada stroke se obtuvo que el esfuerzo máximo en la sarta de varillas es de 8,350 lbf y el mínimo de 5,122 lbf, esfuerzo máximo y mínimo de la bomba 1,873 lbf y -52 lbf, respectivamente. El valor negativo se da debido a la fuerza boyante, donde se encuentra sumergida la bomba. La desviación estándar permite identificar la separación entre cada uno de los datos tomados, al ver que los valores entre los datos y sus respectivas escalas no son significativos permite corroborar el comportamiento simétrico de cada uno de los strokes los cuales no se ven afectados por la presencia de gas. Al identificar el porcentaje de estrés de las varillas durante los strokes evaluados en el mes 4 se calcula que el porcentaje promedio obtenido durante la prueba es de 33.9% producido por una fuerza máxima promedio de 8,350 lbf. Ver Tabla 9.

Tabla 9. Datos TWM mejor aproximación mes 4

MES 4 (6/11/2019)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Stroke 5	Promedio
Carga de las varillas						
Stress load (%)	33.9	33.9	33.9	34	34	33.94
PPRL (lb)	8340	8340	8347	8358	8366	8350
MPRL (lb)	5121	5120	5125	5121	5123	5122
Carga de la bomba						
PPUMPL (lb)	1862	1871	1868	1880	1882	1873
MPUMPL (lb)	-553	-556	-560	-566	-574	-562
General						
SPM	3.035	3.041	3.035	3.041	3.035	3.037
Dzto. bomba (BBL/D)	68.8	68.9	68.8	69	68.9	68.9
PIP (Psi)	761.6	760.5	758.6	751.7	749	756.3
THP (Psi)	120	120	120	120	120	120
Damp Up	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
Damp Down	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
CEP twm (in)	86.4	86.4	86.4	86.5	86.5	86.4
% CEP Twm	100	100	100	100	100	100
CMP (in)	86.4	86.4	86.4	86.5	86.5	86.4

Fuente: elaboración propia

Al comparar los barriles obtenidos a través de la mejor aproximación de TWM en la carta dinamométrica representativa para el periodo de estudio y la prueba de producción tomada en dicha fecha se identifica que se están perdiendo 4.8 in en la CEP al realizar el cierre de la válvula fija y la apertura de la válvula viajera; este fenómeno se presenta debido a la alta presión generada por los niveles de la

columna de fluido medidos sobre la entrada de la bomba, ocasionando la apertura prematura de la válvula fija. Ver Tabla 10.

Tabla 10. Datos TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 4

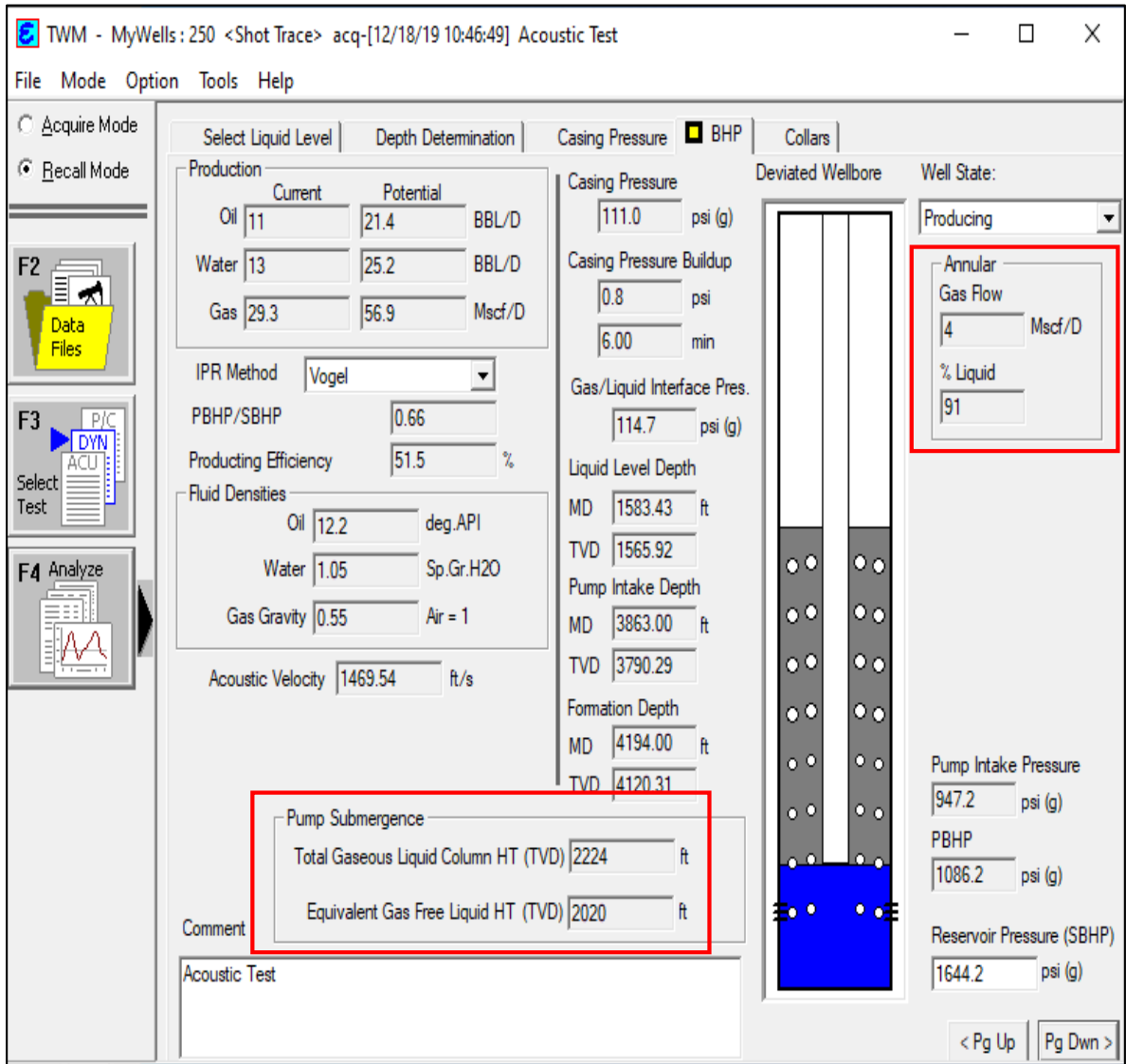
MES 4 (6/11/2019)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Stroke 5	Promedio
CEP Real (in)	81.6	81.6	81.7	81.3	81.7	81.6
BFPD PP (BBL/D)	65	65	65	65	65	65
% CEP real	94.5	94.5	94.5	94	94.5	94.4
CNEP (in)	4.8	4.8	4.7	5.2	4.8	4.9
CNEP inicial (in)	4.8	4.8	4.7	5.2	4.8	4.9
CNEP final (in)	0	0	0	0	0	0
FTND (bbl/D)	3.82	3.83	3.74	4.15	3.82	0.03
FND CNEPi (BBL/D)	3.82	3.83	3.74	4.15	3.82	0.03
FND CNEPf (bbl/D)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: elaboración propia

3.3.2 Prueba mes 5. Las pruebas entregadas por la empresa, representativas del comportamiento de producción del pozo P-250 para el segundo periodo de estudio después de la instalación de la caja Tangent Flow, realizadas el día 18 de diciembre de 2019, las condiciones de operación para este periodo de tiempo se mantienen iguales que las del mes 4.

3.3.2.1 Prueba de nivel. En la Imagen 44 se puede observar que la sumergencia se ha reducido en un 5.5% en promedio respecto al mes anterior, sin embargo, se encontró en 97% en la eficiencia de llenado de la bomba con una reducción del 3% respecto al mes previo. Tomando en cuenta la prueba de producción, se determina que hubo un incremento del 6.25% de los BFPD. Por último, la PIP presenta un incremento del 2.3% lo cual justifica el incremento en la producción de fluido, puesto que esta representa la fuerza ejercida por la columna de fluido sobre la bomba. De acuerdo con la prueba de producción, la eficiencia de bombeo de la bomba se encuentra en 100%. La presencia de gas 4 Mscf/d indica la movilización de hidrocarburos del yacimiento al pozo.

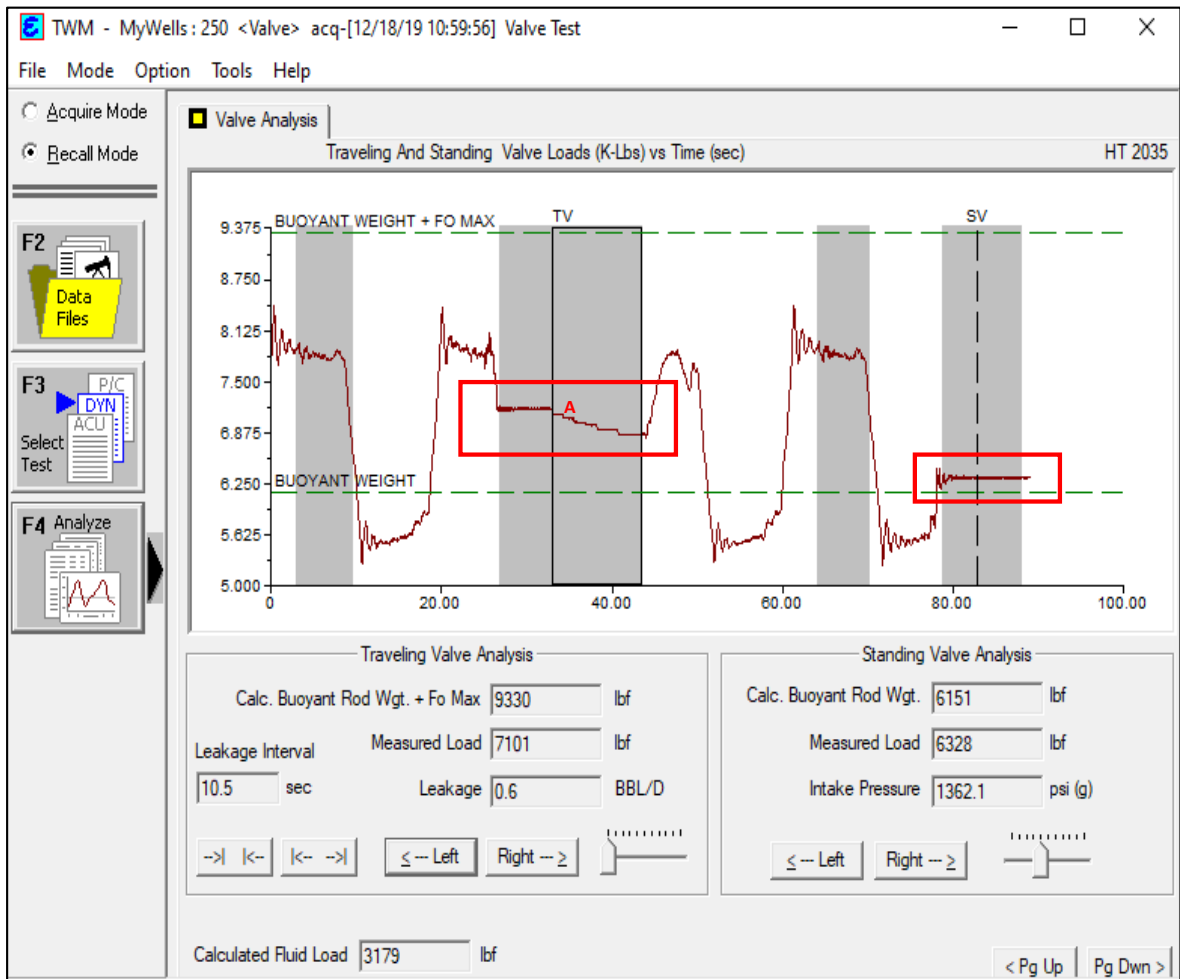
Imagen 44. Toma de nivel mes 5



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.3.2.2 Prueba de válvulas. En los resultados obtenidos en el Test de válvulas, mostrado en la Imagen 45., se presenta una tensión decreciente en la válvula viajera (TV), por lo tanto, se presenta el fenómeno de escurrimiento al igual que en el mes previo. La cantidad de fluido representado por el escurrimiento es inferior al 5% del fluido diario producido en la prueba. La carga máxima ejercida sobre las válvulas es menor a la fuerza que ejercer la columna de fluido. Se identifica el fenómeno de escurrimiento pues el filtrado (leakage) se encuentra dentro de los rangos del 0.5 a 2% de filtrado de la prueba, sin embargo, es un fenómeno esperado que no afecta significativamente la producción.

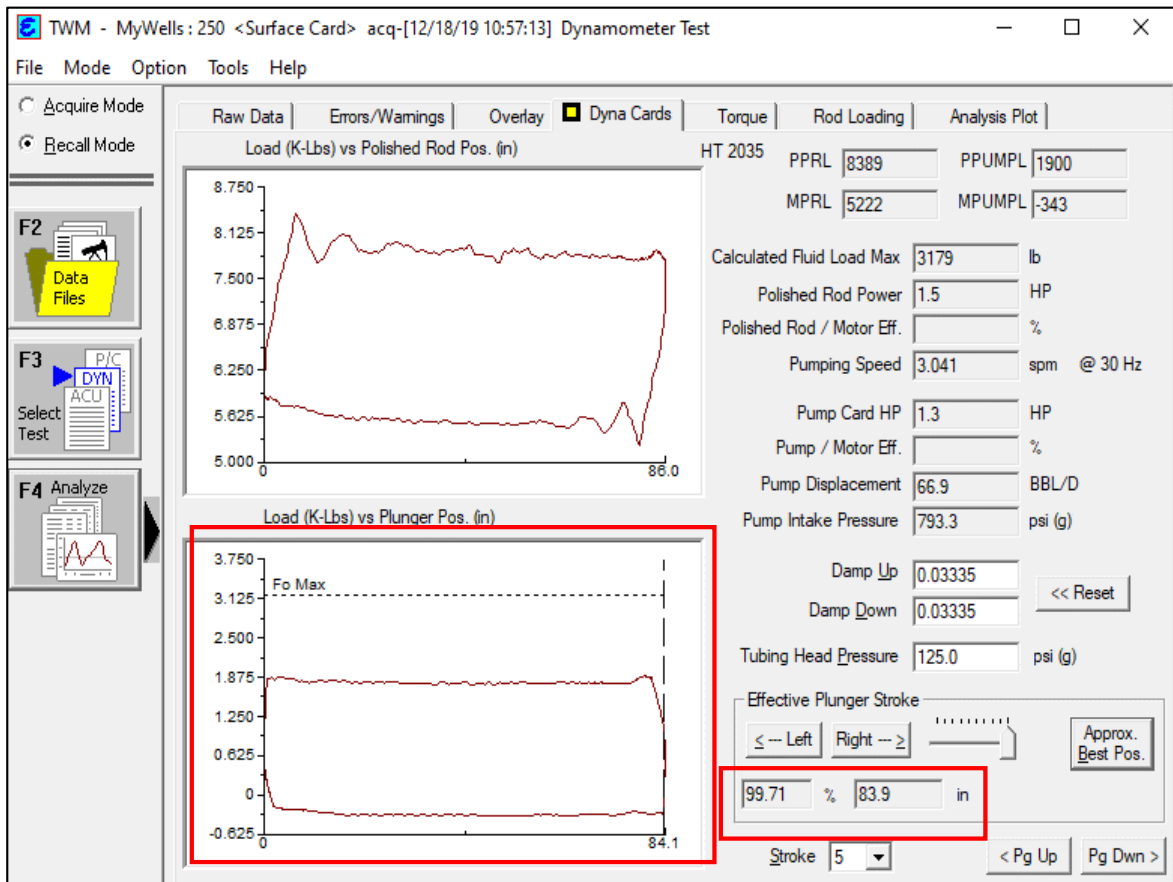
Imagen 45. Test de válvulas mes 5



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.3.2.3 Prueba dinamométrica. Como se puede ver en la Imagen 46., la carta dinamométrica de fondo presenta una carrera efectiva del pistón de 99.8% sobre la carrera máxima de este (84.1%) con una reducción del 0.2% de la misma respecto al mes anterior. Adicionalmente, se observa que el Fo Max (nivel de fluido máximo) se encuentra por encima de la carga máxima de la bomba, por lo tanto, se corrobora la buena sumergencia que se mantiene con respecto al mes anterior lo cual evita que se presenten daños en el equipo a causa de bajos niveles de la columna de fluido. Por otro lado, las rectas horizontales de la gráfica superior e inferior son paralelas, haciendo referencia a que no hay perturbaciones que indiquen la presencia de sedimentos. Se presenta una reducción del 2.9% de la carrera efectiva del pistón. La simetría de la carta expresa el buen comportamiento del dispositivo de fondo y su buena relación con el manejo de gas presente en el fondo del pozo.

Imagen 46. Test dinamométrico mes 5



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.3.2.4 Tabulación e interpretación de datos por stroke. Se identifica el esfuerzo máximo y mínimo de la sarta de varillas de 8,397 lbf y 5,233 lbf, respectivamente. Se determina el esfuerzo máximo y mínimo de la bomba 1,903 lbf y -353 lbf, respectivamente. El valor negativo se da debido a la fuerza boyante, donde se encuentra sumergida la bomba. La desviación estándar permite identificar la separación entre cada uno de los datos tomados. Al ver que los valores entre los datos y sus respectivas escalas no son significativos, permite corroborar el comportamiento simétrico de cada uno de los strokes los cuales no se ven afectados por la presencia de gas. Al identificar el porcentaje de estrés de las varillas durante los strokes evaluados en el mes 5 se calcula que el porcentaje promedio obtenido durante la prueba es de 34.14% producido por una fuerza máxima promedio de 8,397 lbsf. Ver Tabla 11.

Tabla 11. Datos TWM mejor aproximación mes 5

MES 5 (18/12/2019)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Stroke 5	Promedio
Carga de las varillas						
Stress load (%)	34.2	34.1	34.2	34.1	34.1	34.14
PPRL (lb)	8409	8392	8419	8380	8389	8398
MPRL (lb)	5249	5244	5224	5226	5222	5233
Carga de la bomba						
PPUMPL (lb)	1908	1902	1905	1900	1900	1903
MPUMPL (lb)	-365	-362	-350	-346	-343	-353
General						
SPM	3.046	3.046	3.046	3.046	3.041	3.045
Dsto. de la bomba (BBL/D)	67.3	67.3	67.2	67.1	66.9	67.2
PIP (Psi)	792	791.8	792.1	794.1	793.3	792.7
THP (Psi)	125	125	125	125	125	125
Damp Up	0.03335	0.03335	0.03335	0.03335	0.03335	0.033
Damp Down	0.03335	0.03335	0.03335	0.03335	0.03335	0.033
CEP twm (in)	84.3	84.2	84.1	84	83.9	84.1
% CEP Twm	99.98	99.93	99.81	99.73	99.71	99.83
CMP (in)	84.3	84.2	84.3	84.2	84.1	84.22

Fuente: elaboración propia

El desplazamiento de fluido calculado por el software TWM es igual al valor obtenido en la prueba de producción 68 BFPD, la carrera efectiva del pistón es igual a su carrera máxima. Ver Tabla 12.

Tabla 12. Datos TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 5

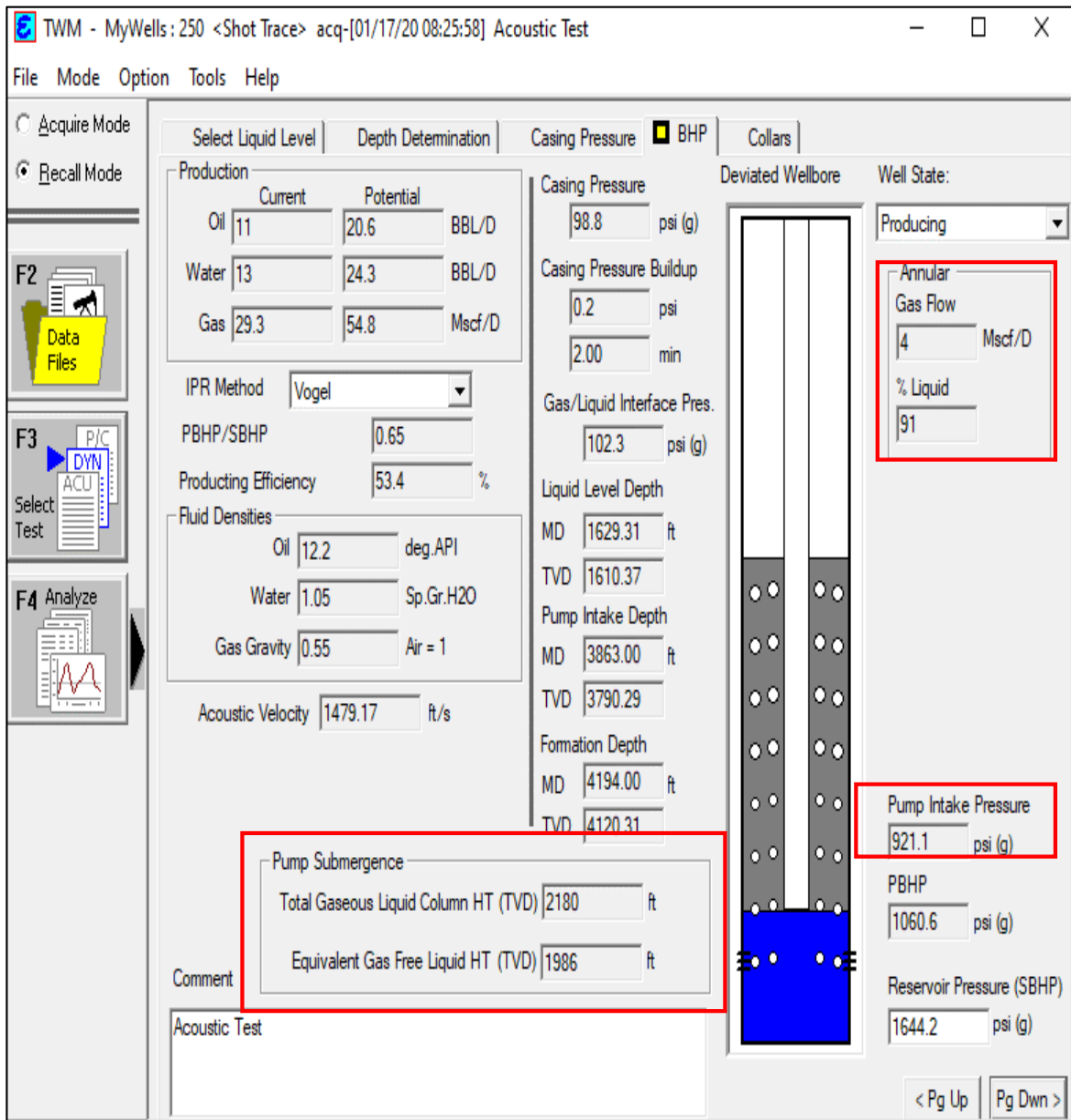
MES 5 (18/12/2019)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Stroke 5	Promedio
CEP Real (in)	84.3	84.2	84.1	84	83.9	84.1
BFPD PP (BBL/D)	68	68	68	68	68	68
% CEP real	99.98	99.93	99.81	99.73	99.71	99.83
CNEP (in)	0	0	0.2	0.2	0.2	0.1
CNEP inicial (in)	0	0	0	0	0	0
CNEP final (in)	0	0	0.2	0.2	0.2	0.1
FTND (bbl/D)	0.000	0.000	0.160	0.160	0.159	0.096
FND CNEPi (BBL/D)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FND CNEPf (bbl/D)	0.000	0.000	0.160	0.160	0.159	0.096

Fuente: elaboración propia

3.3.3 Prueba mes 6. Las pruebas entregadas por la empresa, representativas del comportamiento de producción del pozo P-250 para el tercer periodo de estudio después de la instalación de la caja Tangent Flow, realizadas el día 17 de enero de 2020, para este periodo de tiempo respecto a la prueba anterior, pasaron de 3 a 3.5 SPM.

3.3.3.1 Prueba de nivel. Inicialmente, en la toma de nivel se puede observar que, con respecto al mes anterior, el gas y el líquido a través del anular se mantienen constantes. La sumergencia se reduce por el aumento en la velocidad a 3.5 SPM, mostrado en la prueba de producción, lo cual provoca que la columna de fluido se reduzca, generando una reducción del 2.8% de la PIP. La eficiencia de bombeo se mantiene cerca del 100%, muy similar al mes previo. Por otro lado, los BFPD aumentaron en 15%, alcanzando los 78 BFPD. La reducción del 3% en el llenado de la bomba se estima que es a causa del aumento en la velocidad del bombeo. Ver Imagen 47.

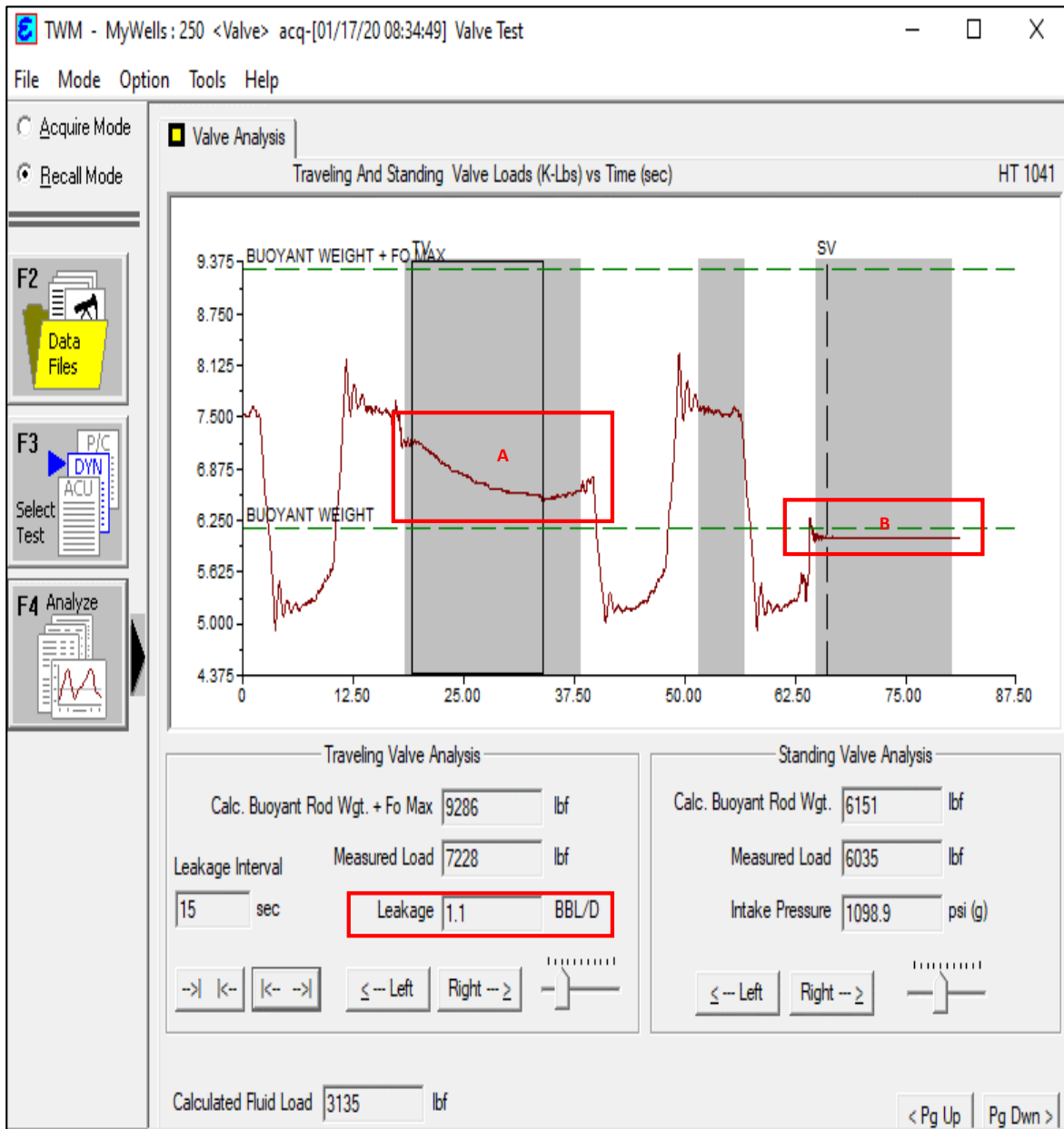
Imagen 47. Toma de nivel mes 6



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.3.3.2 Prueba de válvulas. Como se observa en la Imagen 48., se presenta una curvatura en U, producida por el fenómeno de escurrimiento en la válvula viajera, generando la reducción del desplazamiento en 1.1 Bbl/D. Por otro lado, se observa el correcto funcionamiento de la válvula fija, representado mediante la línea constante (B). Se identifica el fenómeno de escurrimiento pues el filtrado (leakage) se encuentra dentro de los rangos del 0.5 a 2% de filtrado de la prueba, sin embargo, es un fenómeno esperado que no afecta significativamente la producción.

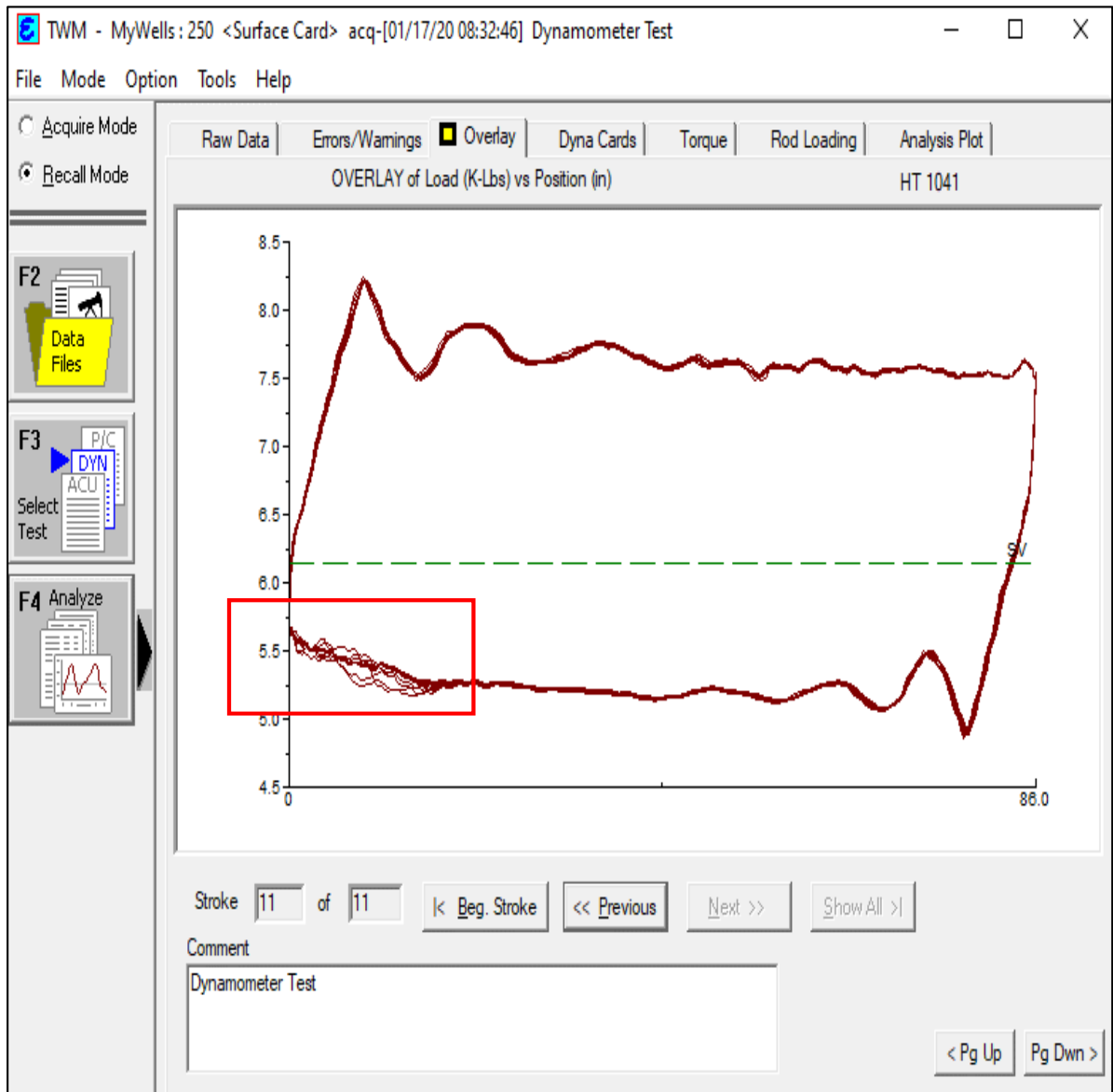
Imagen 48. Test de válvulas mes 6



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.3.3.3 Prueba dinamométrica. La Imagen 49., muestra la sección Overlay, donde se superponen los recorridos realizados por los strokes analizados en la prueba, donde se evidencia en el rectángulo inferior izquierdo, la heterogeneidad de las medidas este comportamiento anormal es debido al alto nivel de la columna de fluido la cual ejerce una fuerza suficiente para abrir la válvula fija, antes de lo estimado. No tiene relación con el manejo de gas en el fondo del pozo.

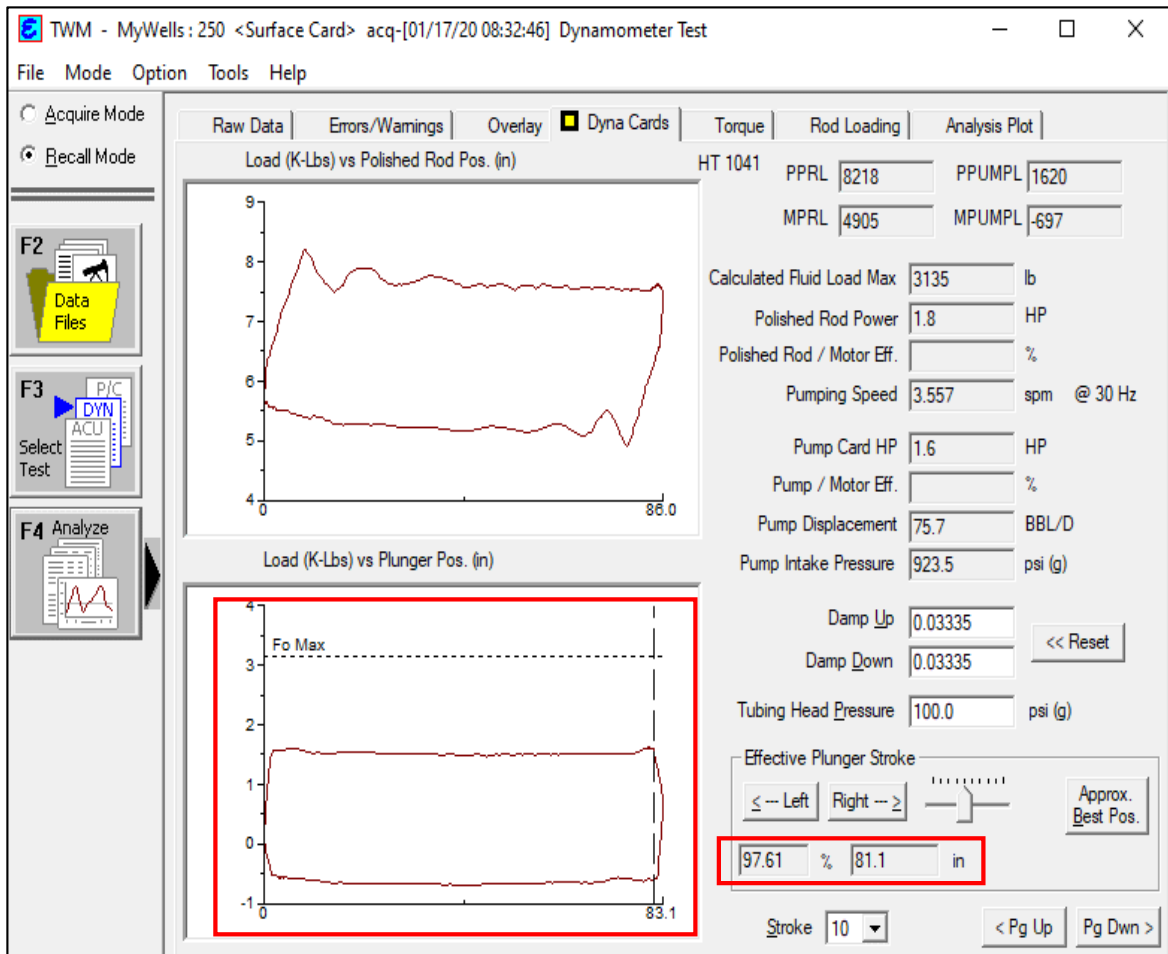
Imagen 49. Test dinamométrico mes 6



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

Al contemplar la carta dinamométrica de fondo, mostrada en la Imagen 50., se puede ver que la trayectoria del pistón se mantiene correctamente. El nivel de fluido máximo sobre la bomba se mantiene constante respecto al mes anterior, por encima de la bomba lo cual indica que el pozo está lleno y tiene buena sumergencia. Las líneas horizontales del recorrido, al ser paralelas, significa que no hay perturbaciones que indiquen la presencia de sedimentos.

Imagen 50. Test dinamométrico mes 6



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.3.3.4 Tabulación e interpretación de datos por stroke. Se identifica el esfuerzo máximo y mínimo de la sarta de varillas de 8,220 lbf y 4,892 lbf, respectivamente. Se determina el esfuerzo máximo y mínimo de la bomba 1,623 lbf y -718 lbf, respectivamente. El valor negativo se da debido a la fuerza boyante, donde se encuentra sumergida la bomba. La desviación estándar permite identificar la separación entre cada uno de los datos tomados. Al ver que los valores entre los datos y sus respectivas escalas no son significativos, permite corroborar el comportamiento simétrico de cada uno de los strokes los cuales no se ven afectados por la presencia de gas. Al identificar el porcentaje de estrés de las varillas durante los strokes evaluados en el mes 6 se calcula que el porcentaje promedio obtenido durante la prueba es de 34.6% producido por una fuerza máxima promedio de 8,220 lbf. Ver Tabla 13.

Tabla 13. Datos TWM mejor aproximación mes 6

MES 6 (17/01/2020)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Stroke 5	Stroke 6	Stroke 7	Stroke 8	Stroke 9	Stroke 10	Stroke 11	Promedio
Carga de las varillas												
Stress load (%)	33.6	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.42
PPRL (lb)	8255	8213	8217	8224	8224	8214	8224	8222	8207	8218	8207	8220
MPRL (lb)	4866	4877	4881	4889	4885	4894	4901	4908	4898	4905	4910	4892
Carga de la bomba												
PPUMPL (lb)	1644	1623	1622	1626	1622	1621	1623	1619	1620	1620	1618	1623
MPUMPL (lb)	-708	-769	-763	-728	-723	-704	-704	-702	-698	-697	-704	-718
General												
SPM	3.557	3.564	3.557	3.557	3.557	3.557	3.557	3.557	3.564	3.557	3.564	3.559
Dsto. de la bomba (BBL/D)	76.5	76.8	76.7	76.7	76.7	76.7	76.8	76.8	77.1	76.9	77.1	76.8
PIP (Psi)	918.1	922.9	922.7	922.1	922.3	924.1	923.9	922.1	923.6	923.5	923.1	922.6
THP (Psi)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Damp Up	0.0334	0.033	0.0334	0.0334	0.0334	0.0334	0.0334	0.033	0.033	0.0334	0.0334	0.033
Damp Down	0.0334	0.033	0.0334	0.0334	0.0334	0.0334	0.0334	0.033	0.033	0.0334	0.0334	0.033
CEP twm (in)	82.1	82.1	82.2	82.2	82.7	82.2	82.3	82.2	82.5	82.4	82.4	82.3
% CEP Twm	98.85	98.83	98.93	99.07	99.05	99.04	99.08	99.05	99.15	99.11	99.1	99.02
CMP (in)	82.9	83.1	83.1	83	83	83	83	83.1	83.2	83.1	86	83.3

Fuente: elaboración propia

Se puede observar en la Tabla 14 que se presenta una diferencia de 1.2 bbl/D

Tabla 14. Datos TWM de acuerdo con BFPD prueba de producción mes 6

MES 6 (17/01/2020)	Stroke 1	Stroke 2	Stroke 3	Stroke 4	Stroke 5	Stroke 6	Stroke 7	Stroke 8	Stroke 9	Stroke 10	Stroke 11	Promedio
CEP Real (in)	82.1	82.1	82.2	82.2	82.7	82.2	82.3	82.2	82.5	82.4	82.4	82.3
BFPD PP (BBL/D)	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
% CEP real	98.83	98.83	98.86	99.07	99.5	99.04	99.08	99.05	99.15	99.11	99.1	99.06
CNEP (in)	0.8	1	0.9	0.8	0.3	0.8	0.7	0.9	0.7	0.7	3.6	1.02
CNEP inicial (in)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CNEP final (in)	0.8	1	0.9	0.8	0.3	0.8	0.7	0.9	0.7	0.7	3.6	1.0
FTND (bbl/D)	0.7	0.9	0.8	0.7	0.3	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	3.4	1.0
FND CNEPi (BBL/D)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FND CNEPf (bbl/D)	0.7	0.9	0.8	0.7	0.3	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	3.4	1.0

Fuente: elaboración propia

3.3.4 Comportamiento general Escenario 2. Al realizarse el procedimiento de limpieza de arena se espera que durante los primeros días el pozo retorne la cantidad de fluido que tomo (455 bbl obtenido de la prueba de producción), y que los niveles de la columna de fluido aumenten debido a que secciones que anteriormente no aportaban fluidos al fondo del pozo actualmente se encuentran libres. En la Tabla 15 se muestran los datos de las pruebas de producción durante los meses siguientes a la instalación de la caja Tangent Flow en el pozo de estudio. Donde se evidencia durante la primera semana, del 5 al 13 de noviembre de 2019, un alto corte de agua como se esperaba alcanzando el 100%, después de producir

un acumulado de 490 bbl de agua, el 14 de noviembre de 2019 se evidencia la producción de hidrocarburos a superficie. El BSW se estabiliza en valores alrededor del 80%.

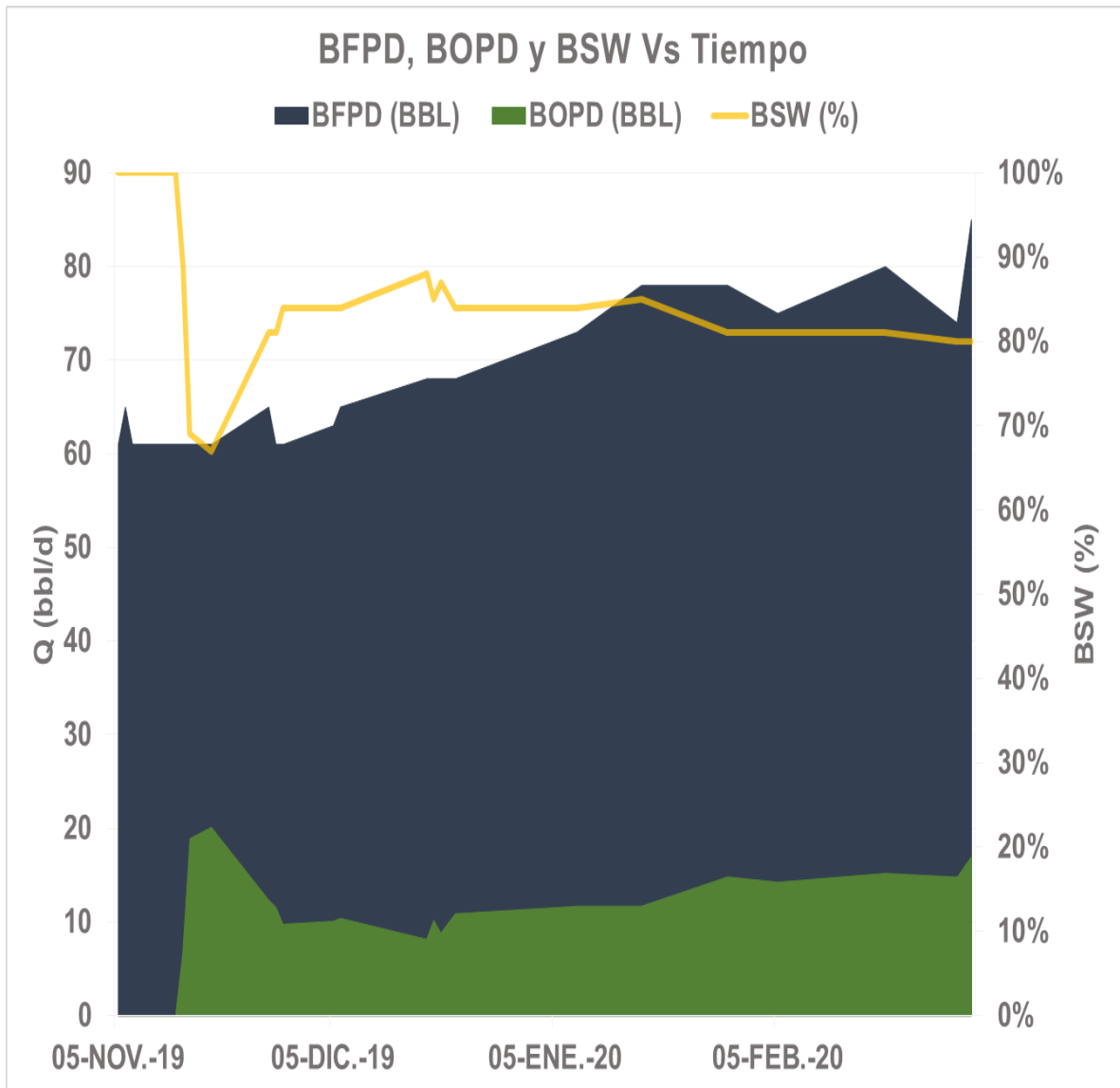
Tabla 15. Pruebas de producción Escenario 2

	FECHA	BFPD (BBL/D)	BSW (%)	BOPD (BBL/D)	NFSB TOTAL(ft)	NFSB LIQ (ft)	Eficiencia de llenado %	SPM	GAS (Mscf/D)	GOR (Scf/bbl)
MES 4	05-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	0
	06-nov.-19	65	100%	0	2,257	2,236	100%	3.0	9.5	0
	07-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	0
	08-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	0
	09-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	0
	10-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	0
	11-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	0
	12-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	0
	13-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	0
	14-nov.-19	61	89%	7	3,025	2,732	94%	3.0	9.5	1416
	15-nov.-19	61	69%	19	3,025	2,732	94%	3.0	9.5	502
	18-nov.-19	61	67%	20	3,025	2,732	94%	3.0	9.5	472
	26-nov.-19	65	81%	12	2,310	2,009	96%	3.0	9.5	820
	27-nov.-19	61	81%	12	2,310	2,009	96%	3.0	9.5	792
28-nov.-19	61	84%	10	2,310	2,009	96%	3.0	9.5	973	
MES 5	05-dic.-19	63	84%	10	2,227	1,683	95%	3.0	9.5	942
	06-dic.-19	65	84%	10	2,266	2,130	97%	3.0	9.5	913
	18-dic.-19	68	88%	8	2,224	2,020	97%	3.0	11.7	1434
	19-dic.-19	68	85%	10	2,224	2,020	97%	3.0	11.7	1147
	20-dic.-19	68	87%	9	2,224	2,020	97%	3.0	11.7	900
22-dic.-19	68	84%	11	2,224	2,020	97%	3.0	11.7	1075	
MES 6	08-ene.-20	73	84%	12	2,187	1,996	94%	3.5	11.7	1002
	17-ene.-20	78	85%	12	2,180	1,986	97%	3.5	10.6	906
	29-ene.-20	78	81%	15	2,180	1,986	97%	3.5	10.6	715
MES 7	05-feb.-20	75	81%	14	2,201	2,058	98%	3.5	14.7	1032
	20-feb.-20	80	81%	15	2,064	1,920	93%	4.0	14.7	1050
MES 8	01-mar.-20	74	80%	15	2,064	1,920	93%	4.0	10.6	716
	03-mar.-20	85	80%	17	2,035	1,828	98%	4.0	10.6	624
PROMEDIO		67	88%	8	2308	2141	97%	3	10	623

Fuente: elaboración propia

Para determinar el comportamiento de los fluidos del pozo y el BSW se procede a analizar el Grafico 10.

Gráfico 10. Caudal, BSW Vs Tiempo Escenario 2

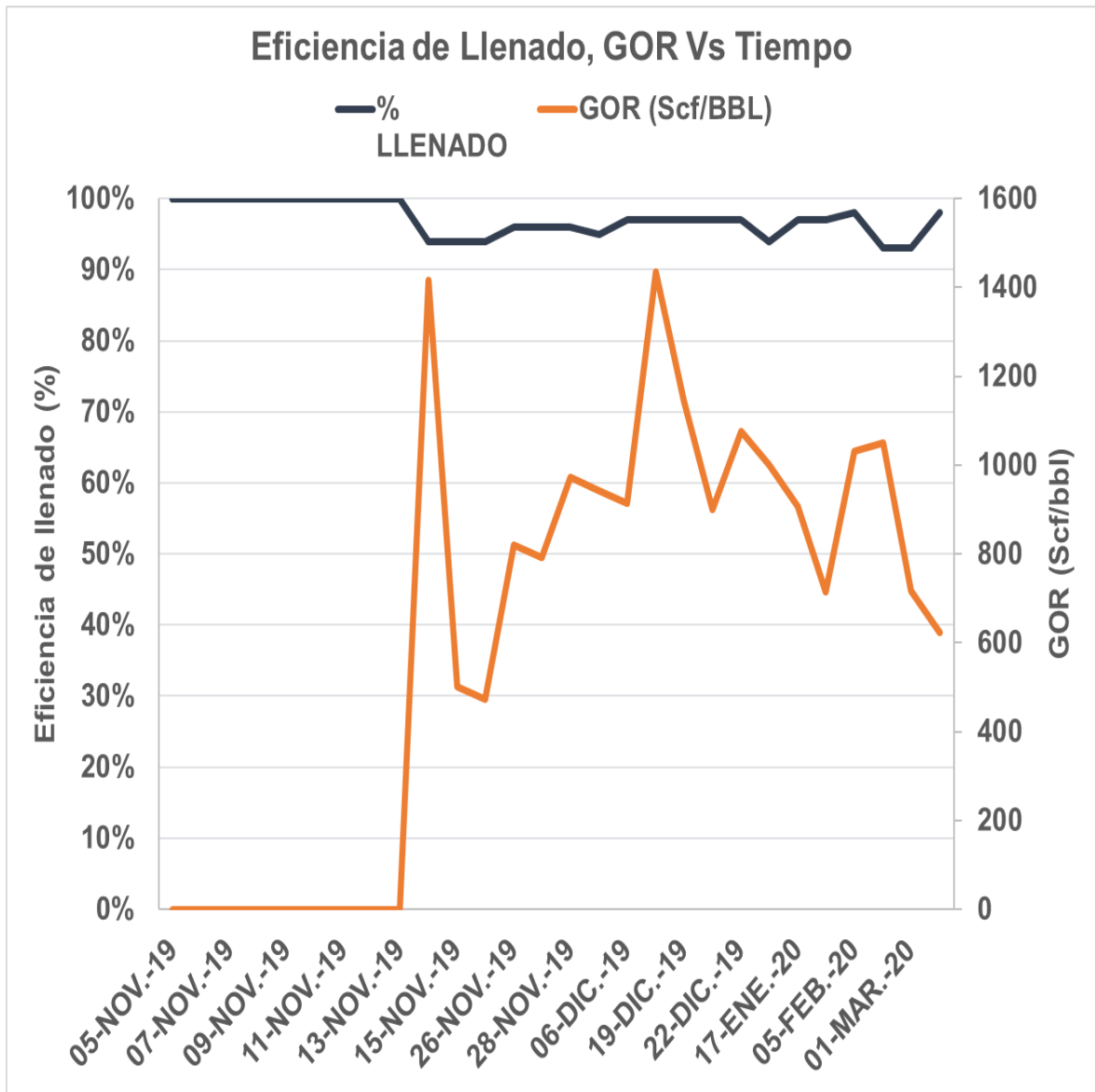


Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 10., se puede evidenciar la relación general 4:1 que presenta la producción de agua diaria respecto a la de petróleo. También se observa que después del mes 4 el BSW se mantiene alrededor del 80%. La tasa de petróleo aumenta paulatinamente a partir del mes cinco (5) hasta estabilizarse alrededor de 15 bbl/d.

Por medio del Gráfico 11., se identifica el comportamiento de la caja Tangent Flow ante la relación gas-petróleo.

Gráfico 11. Eficiencia de llenado, GOR Vs Tiempo (Escenario 2)

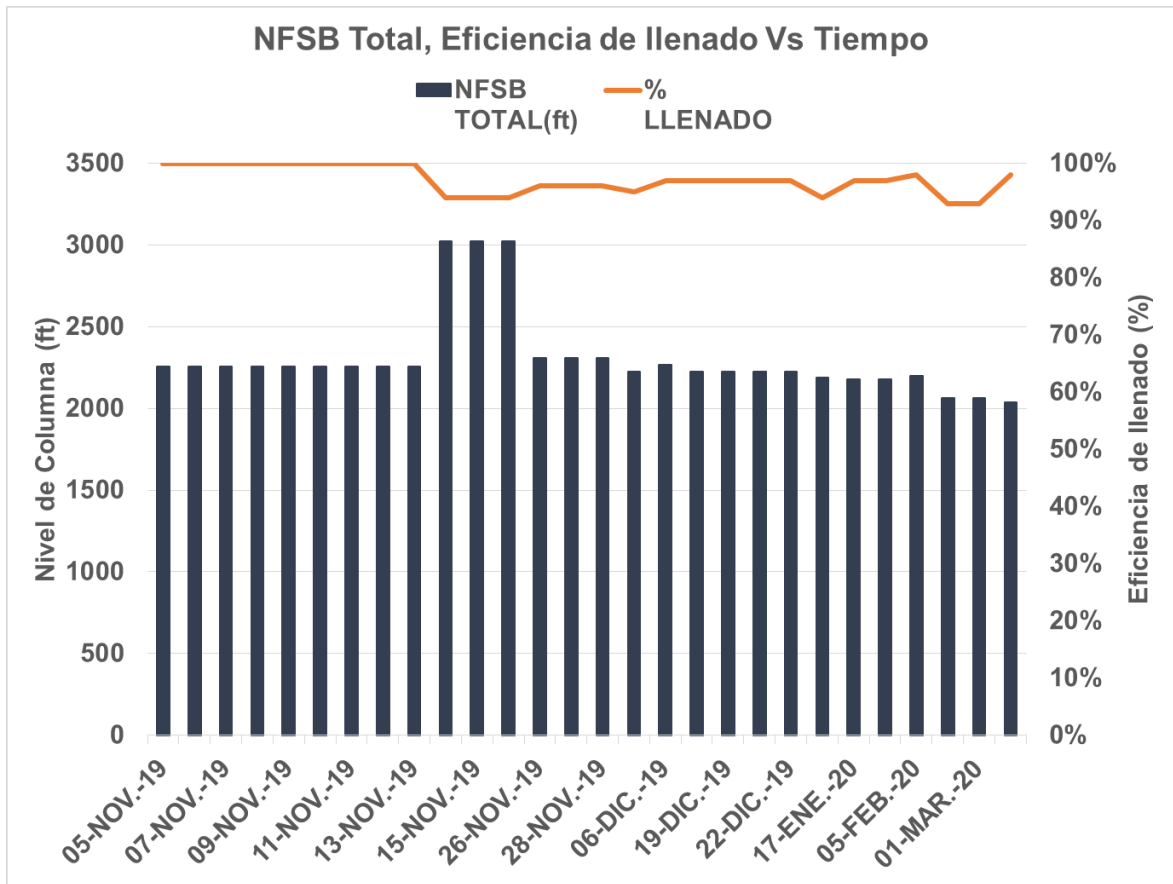


Fuente: elaboración propia

En el Grafico 11., se evidencia que a pesar de que se presentan valores de GOR encima de 1400 Scf/bbl, como se puede notar en los picos presentados a mediados de noviembre y a principios de diciembre, e igualmente la eficiencia de llenado se encuentra por encima del 90%, de esta manera se puede identificar el buen funcionamiento de la caja Tangent Flow en el pozo estudio.

En el Grafico 12., se presenta el comportamiento del efecto del nivel de fluido sobre la bomba total sobre la eficiencia de llenado durante el Escenario 2.

Gráfico 12. NFSB, eficiencia de llenado Vs Tiempo (Escenario 2)

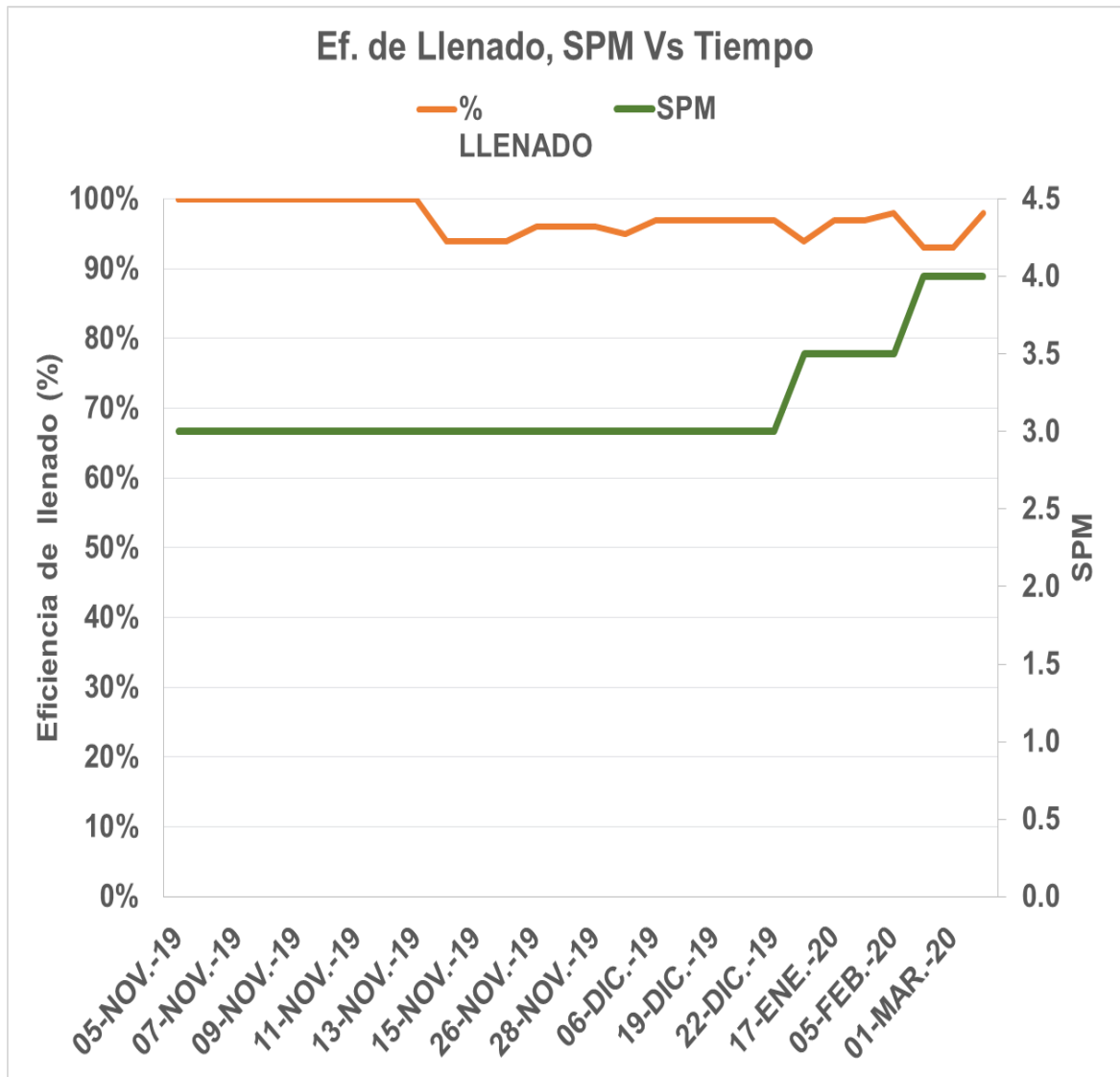


Fuente: elaboración propia

El Gráfico 12., muestra que el nivel de fluido se mantiene por encima de 2000 ft, En cuanto a la relación entre el nivel de fluido total sobre la bomba y la eficiencia de llenado durante este periodo, se observa que durante la primera mitad del mes 6, se mantienen constantes debido a que se acaba de realizar la limpieza de arena en el pozo, entonces se han retirado las obstrucciones que hayan podido existir en el pozo, permitiendo mantener un mayor nivel de fluido sobre la bomba. Al final del mismo mes se observa un aumento del 34% del nivel total, alcanzando los 3000 ft y el nivel en general se mantiene por encima de 2000 ft, es decir, se presenta una respuesta positiva con la implementación de la caja Tangent Flow al pozo. Se puede notar que la eficiencia de llenado se mantiene por encima de 93%, clasificándose como eficiencia alta, a pesar de las fluctuaciones en la columna de fluido, por lo tanto, se determina que el aumento de líquido en la misma permite que la presión a la entrada de la bomba sea óptima para el buen funcionamiento del equipo de fondo.

Para determinar el comportamiento presentado durante el Escenario 2 del efecto de la velocidad de bombeo sobre la eficiencia de llenado se procede a analizar el Gráfico 13.

Gráfico 13. Eficiencia de llenado, SPM Vs Tiempo Escenario 2

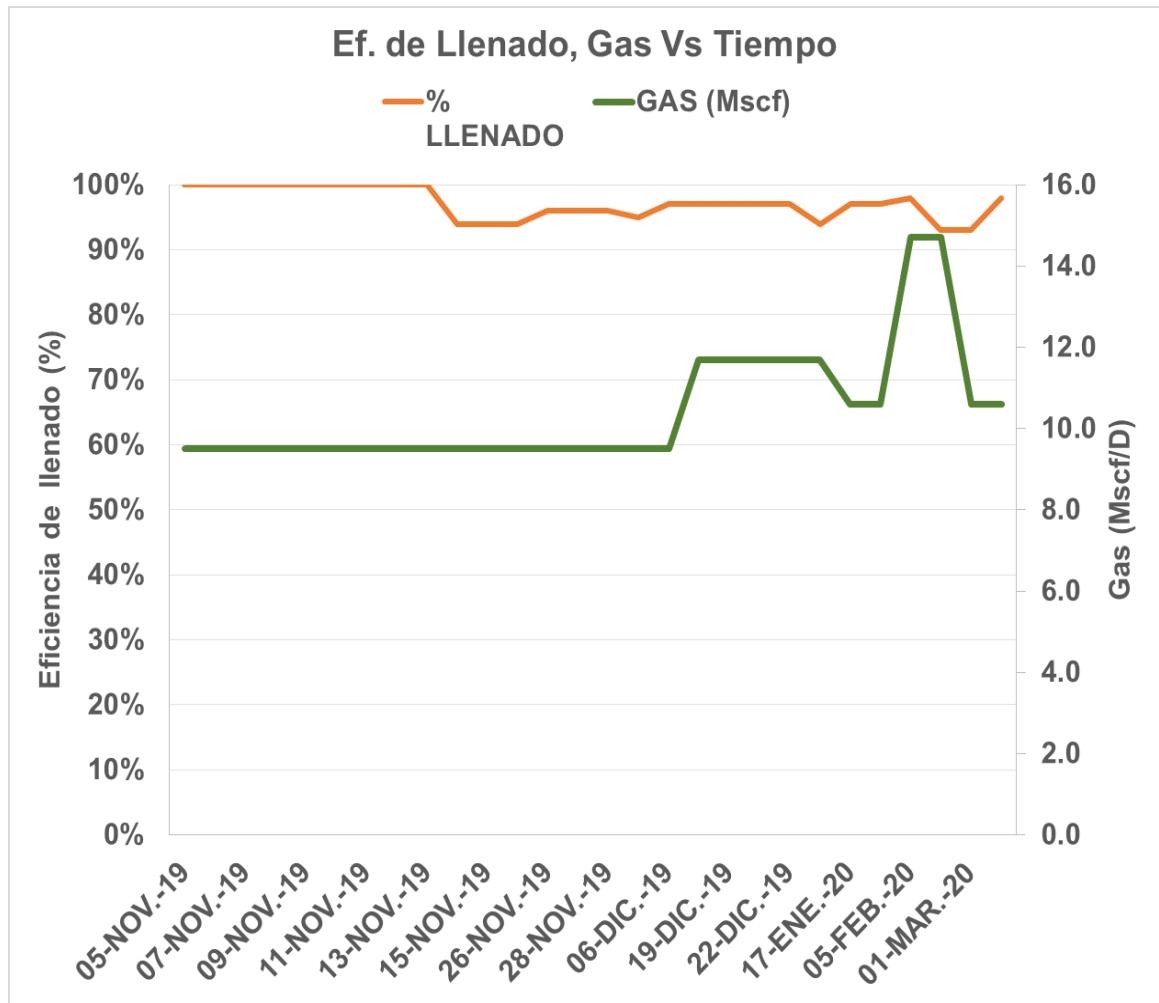


Fuente: elaboración propia

En el Grafico 13., se observa que a pesar de que se incrementa la velocidad en 1 SPM, la eficiencia de llenado no se reduce significativamente puesto que su eficiencia se encuentra entre 93-100%.

El Grafico 14., muestra el comportamiento de la eficiencia de llenado de la bomba de fondo frente a la presencia de gas durante el Escenario 2 que abarca el periodo de evaluación posterior a la implementación de las cajas Tangent Flow.

Gráfico 14. Eficiencia de llenado, Gas Vs Tiempo Escenario 2



Fuente: elaboración propia

Como se observa en el Gráfico 14., durante el Mes 4, donde se presenta una eficiencia de llenado del 100%, se identifica una producción de gas constante de 9.5 Mscf/D. Adicionalmente, se observa que la producción de gas alcanza 14.7 Mscf/D con una eficiencia de llenado superior al 93% lo cual demuestra que a pesar de que se presentó una producción de gas promedio de 10 Mscf/D, con las cajas Tangent Flow no se presenta interferencia de gas.

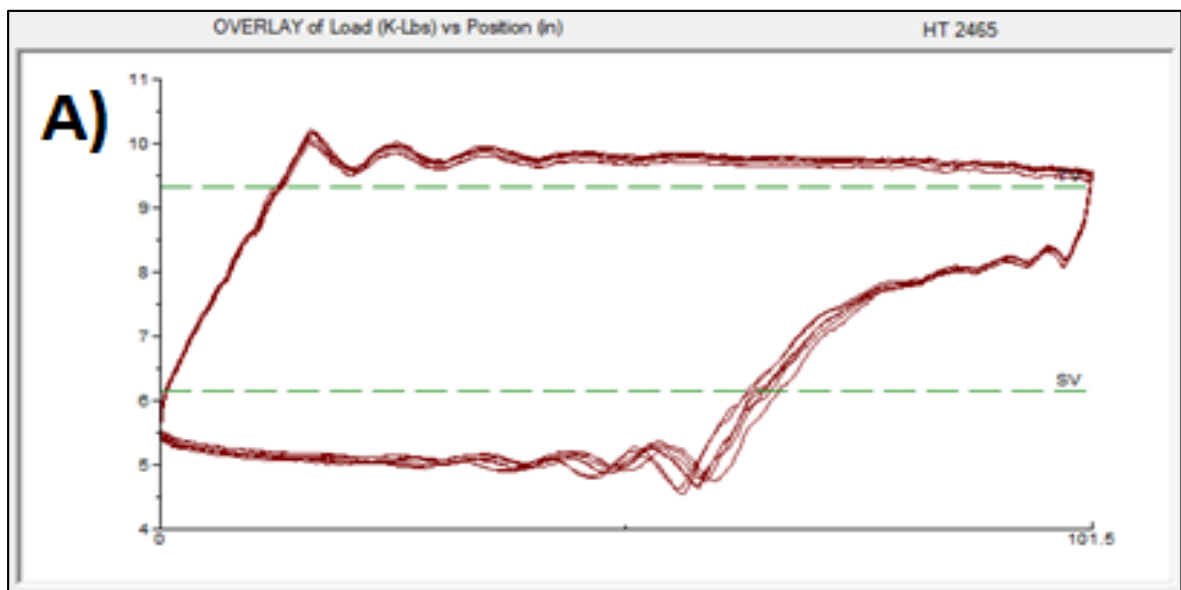
3.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Se identifica el comportamiento representativo del pozo antes de la implementación (Escenario 1) y después de la implementación de la caja Tangent Flow (Escenario 2). Se realiza la comparación de los datos obtenidos por cada uno de los periodos

con el fin de identificar el cambio de los diversos parámetros estudiados después de implementar la caja Tangent Flow.

3.4.1 Comparación de la carta superficial. Para el Escenario 1, como se puede apreciar en la Imagen 51., se evidencia durante la carrera descendente en la carta superficial, se identifica un mayor esfuerzo realizado para realizar el cierre de la válvula y alcanzar la tensión constante en la válvula fija; resultado de la compresión de gas durante la carrera descendente del pistón. Además, se evidencia como la línea punteada Fo max se encuentra bajo el tope de los recorridos realizados por los strokes, debido a los bajos niveles de fluido presentes en el pozo.

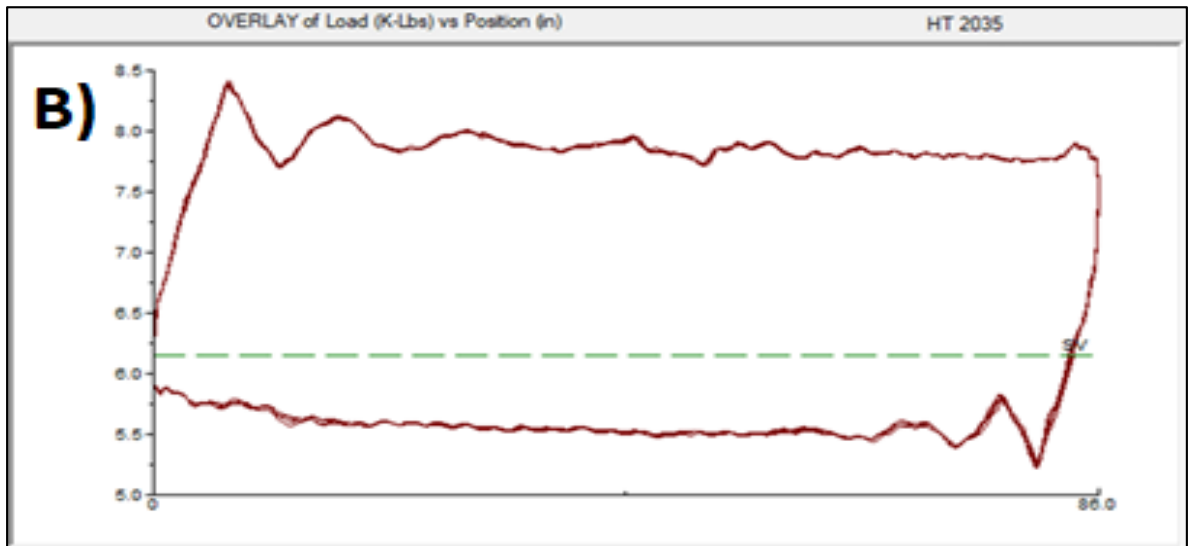
Imagen 51. Carta superficial Escenario 1



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

Por otro lado, se logra evidenciar cómo disminuye la distorsión entre los strokes analizados respecto a la carta de superficie previa, debido a que los recorridos de estos en esta se superponen, a diferencia de los strokes del Escenario 1 donde todos realizaban trayectorias diferentes debido al manejo de gas. Dicho fenómeno no se evidencia en la carta del Escenario 2, la forma de la carta se asemeja a la de un rectángulo homogéneo. Además, no se evidencia la línea punteada, lo que significa que la fuerza ejercida por la columna de fluido es superior a la máxima fuerza realizada por el sistema de levantamiento durante el ciclo de operación. Ver Imagen 52.

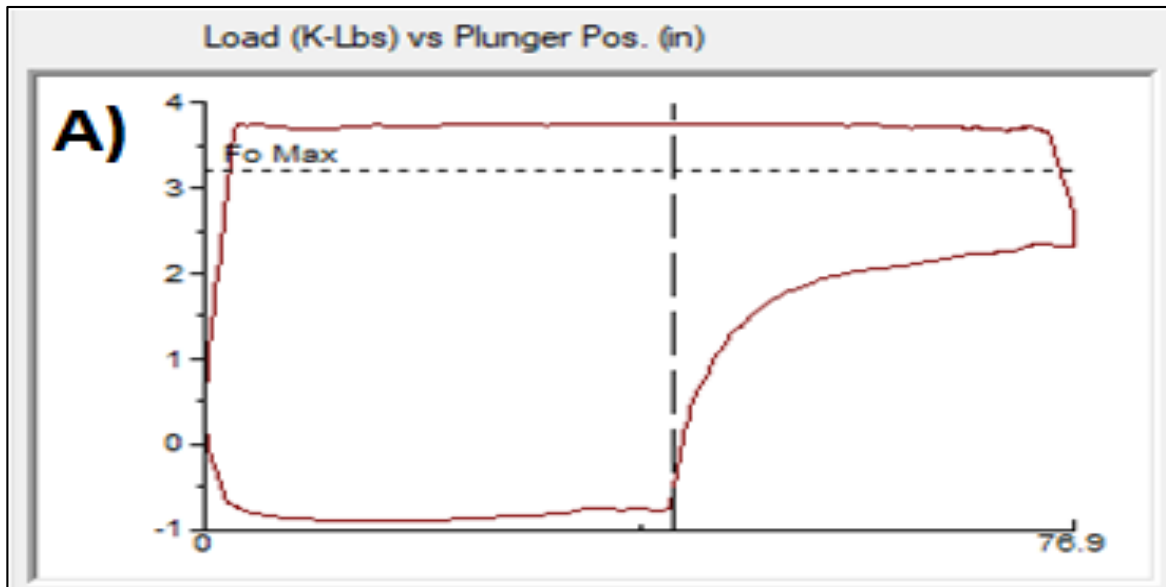
Imagen 52. Carta de superficie Escenario 2



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.4.2 Comparación de la carta de fondo. En la Imagen 53 se puede evidenciar la figura que presenta la carta de “pistola”, debido a la interferencia de gas durante el Escenario 1. La línea punteada vertical se ubica a la mitad de la carrera efectiva del pistón donde se realizaba el cierre de la válvula, debido a la distancia que gastaba el pistón generando la presión necesaria para realizar el cierre de la válvula.

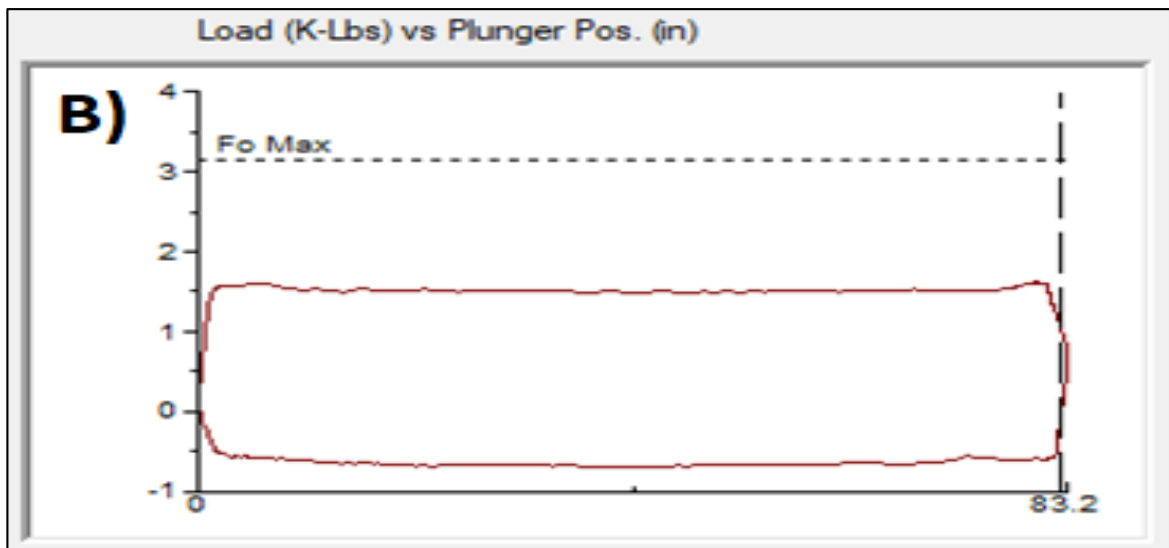
Imagen 53. Carta de fondo Escenario 1



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

En la Imagen 54., se puede notar el cambio en la forma de la carta de fondo del Escenario 1, con las cajas API, respecto a la Imagen 53 (Escenario 2). En el Escenario 2 se presenta una forma rectangular, además el tamaño de la carta que se presenta posterior a la implementación es más pequeño, debido a que la altura de la línea horizontal disminuye y se ubica bajo la línea punteada horizontal Fo max, lo que representa que la carga máxima para realizar la operación es menor a la carga que genera la columna de fluido en el sistema. La línea punteada vertical se ubica en el límite derecho de la carta lo cual representa el aprovechamiento de la carrera máxima del pistón para realizar desplazamiento de fluido. Se evidencia, además, lo pegada que se encuentra el recorrido del pistón en el eje vertical costado izquierdo, indicando que la válvula viajera se cierra inmediatamente comienza el recorrido ascendente.

Imagen 54. Carta de fondo Escenario 2



Fuente: elaboración propia con base en software TWM

3.4.3 Tabulación y comparación de datos obtenidos. En la tabla se pueden identificar los promedios obtenidos durante el Escenario 1 y 2 de los datos de producción, de las cartas dinamométricas, y los cálculos realizados para identificar la cantidad de fluido no desplazado a raíz de la interferencia de gas. La tabla se divide en los datos obtenidos de los promedios de las pruebas de producción, obtenido de los datos de cada stroke analizado durante las pruebas dinamométricas y los cálculos realizados para identificar las distancias no efectivas en la carrera del pistón y su efecto en la cantidad de fluido desplazado; en este se evidencia principalmente la reducción del 99% de la CNEP en el Escenario 2 respecto al Escenario 1, generando que en la misma proporción se reduzca el fluido total no desplazado, permitiendo que la eficiencia de llenado para el Escenario 2 sea superior en 84% respecto al Escenario 1. Ver Tabla 16.

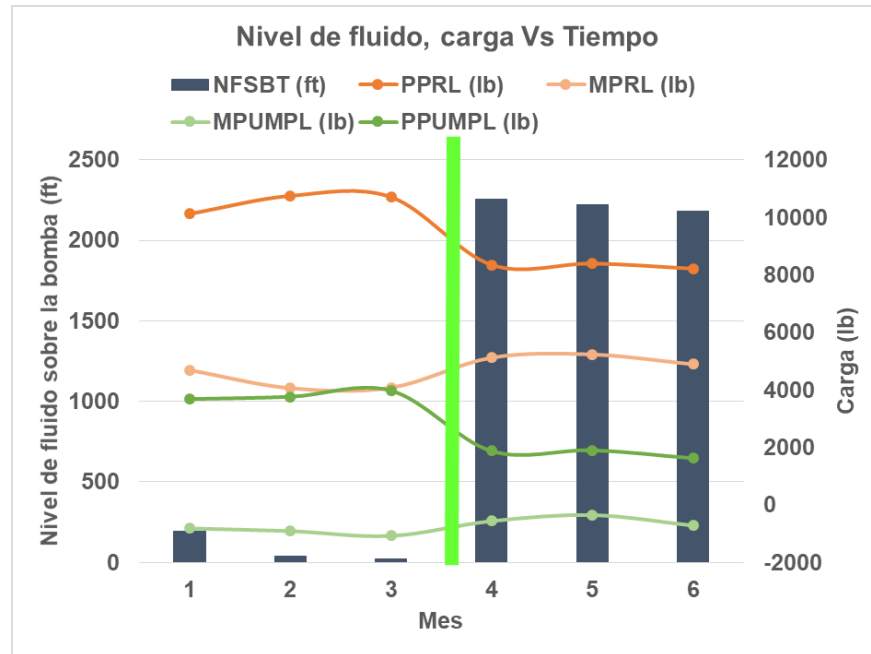
Tabla 16. Resultados promedio TWM comparativa

Tipo de caja	API (Escenario 1)			Tangent Flow (Escenario 2)			
	Mes	1	2	3	4	5	6
	Fecha	28/08/2019	27/09/2019	20/10/2019	6/11/2019	18/12/2019	17/01/2020
Datos de producción							
BFPD (Bbl/d)	34	25	24	65	68	78	
BSW (%)	50%	54%	54%	100%	88%	85%	
BOPD (Bbl/d)	17	12	11	0	8	12	
NFSB Total (ft)	192	40	19	2257	2224	2180	
NLSB Líquido (ft)	180	32	17	2236	2220	1986	
Llenado (%)	69%	41%	50%	100%	97%	97%	
GOR (Mscf/bbl)	582	809	2664	792	1434	906	
Cartas dinamométricas							
Stress load (%)	47.50	43.70	43.54	33.94	34.14	33.42	
PPRL (lb)	10122	10752	10708	8350	8398	8220	
MPRL (lb)	4690	4062	4079	5122	5233	4892	
PPUMPL (lb)	3683	3762	3974	1873	1903	1623	
MPUMPL (lb)	-817	-912	-1078	-562	-353	-718	
SPM	2.1	2.971	2.979	3.037	3.045	3.559	
BFPD TWM (Bbl/d)	35	33.6	37	68.9	67.2	76.8	
PIP (Psi)	114.9	93	97.6	756.3	792.7	922.6	
THP (Psi)	130	130	100	120	125	100	
Damp Up	0.05	0.24	0.165	0.034	0.033	0.033	
Damp Down	0.05	0.24	0.165	0.034	0.033	0.033	
CEP TWM (in)	64.6	43.1	47.60	86.4	84.1	82.3	
% CEP TWM	70.3%	55.92%	60.31%	100%	99.83%	99.02%	
CMP (in)	91.9	76.9	78.8	86.4	84.22	83.3	
Calculos volumétricos							
CEP Real (in)	62.7	32.1	30.7	82	84.1	82.3	
BFPD prueba de producción (Bbl/d)	34	25	24	65	68	78	
% CEP real	68%	42%	39%	94%	100%	99%	
CNEP inicial (in)	1.8	11	16.8	4.9	0	0	
%CNEPi	2%	14%	21%	6%	0%	0%	
CNEP final (in)	27.3	33.8	31	4.9	0.1	1	
%CNEPf	30%	44%	40%	6%	0%	1%	
CNEP (in)	29.2	44.8	48.1	0	0.1	1	
%CNEP	32%	58%	61%	0%	0%	1%	
FND CNEP inicial (Bbl/d)	1.0	8.6	12.8	0.03	0	0	
FND CNEP	14.8	26.3	24.8	0.03	0.096	1	
FND total (Bbl/d)	15.8	34.9	37.6	0	0.096	1	

Fuente: elaboración propia

A partir de los datos obtenidos en la Tabla 15., se procede a realizar el respectivo análisis. En primer lugar, se realiza dicho análisis sobre los niveles de fluido y la carga a lo largo de los dos Escenarios. Ver Gráfico 15.

Gráfico 15. Nivel de fluido carga Vs Tiempo Escenario 1 y 2

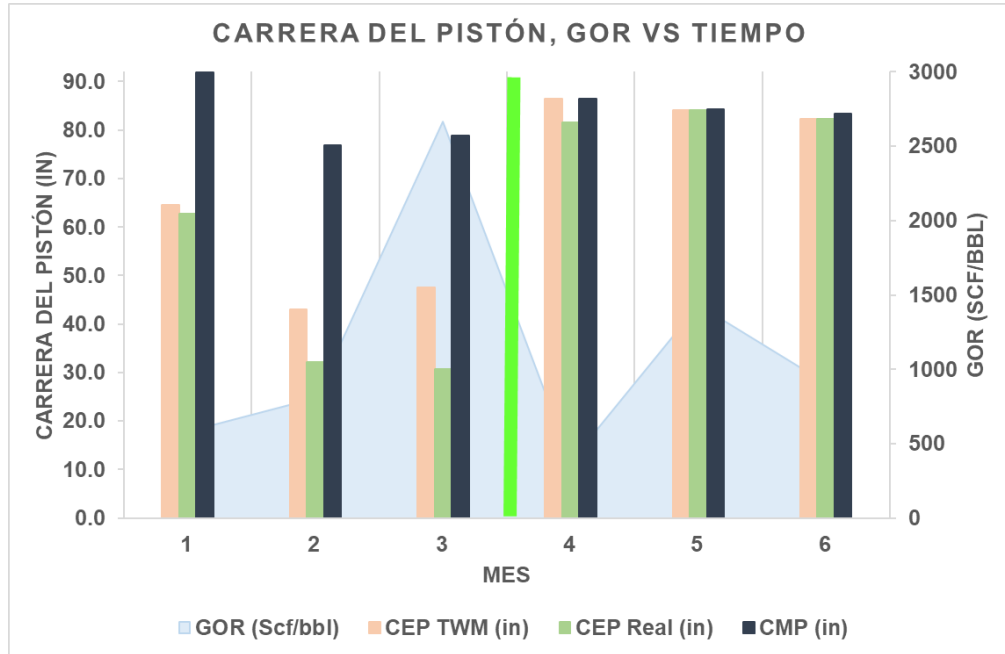


Fuente: elaboración propia

Al realizar la comparativa de los niveles de fluido y la carga ejercida por las varillas durante los dos Escenarios del proyecto se identifica la relación y el aporte de la presión que ejerce la columna de fluido y su aprovechamiento durante el levantamiento de fluidos a superficie. En el Gráfico 15, se evidencia que durante el Escenario 1 la carga máxima ejercida sobre las varillas PPRL (lbf) y la carga ejercida sobre la bomba de fondo PPUMPL (lbf) son superiores a la misma fuerza ejercida durante el Escenario 2 donde se alcanzaron niveles de fluido sobre la bomba superiores a 1500 ft. Así mismo, se observa que para el Escenario 1 la diferencia entre la carga máxima de la sarta de varillas PPRL (lbf) y la carga mínima de la sarta de varillas MPRL (lbf) es superior que en Escenario 2 donde el diferencial disminuye alrededor de 50% con respecto al Escenario 1. El aumento de la presión de intake producido por el nivel de la columna de fluido permite el flujo de los fluidos del fondo del pozo al interior del barril, de esta manera el sistema de bombeo mecánico no tiene que realizar altos esfuerzos para succionar los fluidos. Al realizar el promedio de los meses 1,2 y 3 del Escenario 1 se obtiene que el estrés promedio de la sarta de varillas es de 44.9% producido por una fuerza máxima equivalente a 10,526 lbf. Después de la implementación de la caja Tangent Flow y el procedimiento de limpieza de arena el estrés de la varilla promedio es de 34.5% producido por una fuerza máxima equivalente a 8,322 lbf, reduciendo el estrés de las varillas en 25%.

Para evidenciar el comportamiento obtenido bajo los dos Escenarios en cuanto al comportamiento de la carrera del pistón promedio en cada mes en relación con el GOR, se procede a analizar el Grafico 16.

Gráfico 16. Carrera del pistón, GOR Vs tiempo Escenario 1 y 2

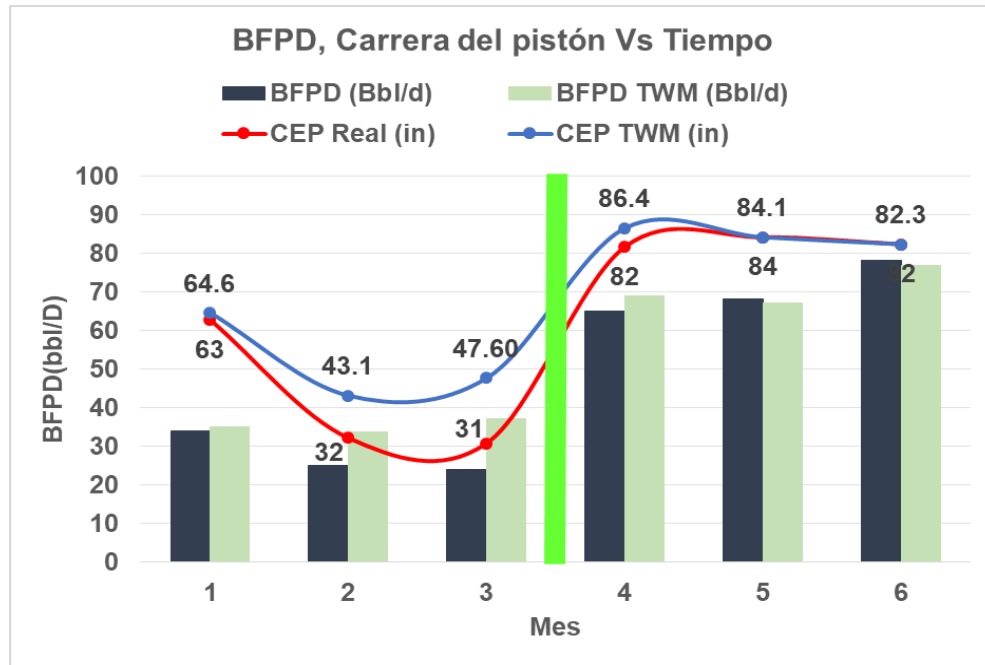


Fuente: elaboración propia

Se puede observar del Grafico 16., que ante el aumento de gas durante el Escenario 1, se evidencia una disminución en la carrera efectiva del pistón, distancia utilizada para desplazar líquidos del fondo del pozo a la tubería de producción. En el mes 1, se evidencia la presencia de gas al tiempo que se nota una disminución de la CEP TWM y una pequeña diferencia con respecto a la CEP real, a medida que avanzan los periodos se evidencia cómo el aumento del GOR disminuye la CEP TWM, pues a mayor cantidad de gas más distancia gasta el pistón en comprimir el gas en el barril. Adicionalmente, se evidencia cómo disminuye, la CEP real utilizada para desplazar líquidos durante el Escenario 1; esto se debe a que parte del gas que se comprime logra superar la presión para ingresar a la tubería de producción, en el mes 2. Por medio de la variable %CNEP_f de la Tabla 15, Se logra identificar que en promedio se utiliza el 37% de la carrera máxima del pistón para comprimir gas en el barril de fondo. Por medio de la variable %CNEP_i de la Tabla 15, En el mes 2 donde el GOR equivale a 1018 Scf/bbl, se evidencia que el 14% de la CEP Max es utilizada para desplazar gas desde el fondo del pozo hacia la tubería de producción. Para el mes 3 la producción de gas es de 2180 Scf/bbl y se obtiene que el 21% de la CEP Max es utilizada para desplazar gas, por este motivo la eficiencia de bombeo disminuye. Este fenómeno no se presenta en el escenario 2 después de la implementación de la caja Tangent Flow.

En el Grafico 17., se evidencia el comportamiento de la carrera del pistón y los barriles de fluido, con los datos del software y de la prueba de producción respecto al tiempo a lo largo del Escenario 1 y del Escenario 2.

Gráfico 17. BFPD, carrera del pistón Vs Tiempo



Fuente: elaboración propia

Durante el Escenario 1 se obtienen diferentes valores entre la prueba de producción y el software TWM, como se explicó anteriormente esto ocurre debido a la compresión de gas en el fondo del barril y a la disminución de la carrera efectiva del pistón para desplazar líquidos. En el Grafico 17 se compara la cantidad de fluido que se debería haber producido ante la carrera aproximada por el software TWM y la cantidad de fluido obtenido realmente con la respectiva distancia utilizada para movilizar líquidos desde el fondo del pozo, donde la producción se ve disminuida en 10 bbls/d. Para el mes 5, el fenómeno anteriormente descrito desaparece debido a la geometría del dispositivo utilizado en fondo para manejo de gas, por lo tanto, los datos obtenidos mediante el software y la prueba de producción coinciden. Adicionalmente, para el Escenario 1, la carrera utilizada por el pistón para comprimir el gas que ingresa al fondo del barril corresponde al 40% de la carrera máxima del pistón. Por otro lado, se identificó que se está utilizando el 21% de la carrera máxima del pistón para desplazar gas a superficie. La aplicación de cajas Tangent Flow permite que se reduzcan estos fenómenos en su totalidad debido al diseño del dispositivo, permitiendo la recuperación de 36 bbl/D que se perdían bajo la condición de operación de 84 in.

3.4.4 Comparativa resultados pruebas de producción. La Tabla 17., muestra los promedios obtenidos a lo largo de los Escenario 1 y 2. En esta se puede evidenciar un incremento de 55% de BSW, de 36 BFPD y por ende los niveles de fluido aumentaron en más de 2000 ft y finalmente la eficiencia de llenado en 42%, sin embargo, para el Escenario 2 se presentaron relaciones gas- petroleo reducidas en 18%, así como la cantidad de barriles de petroleo se redujo en 43%.

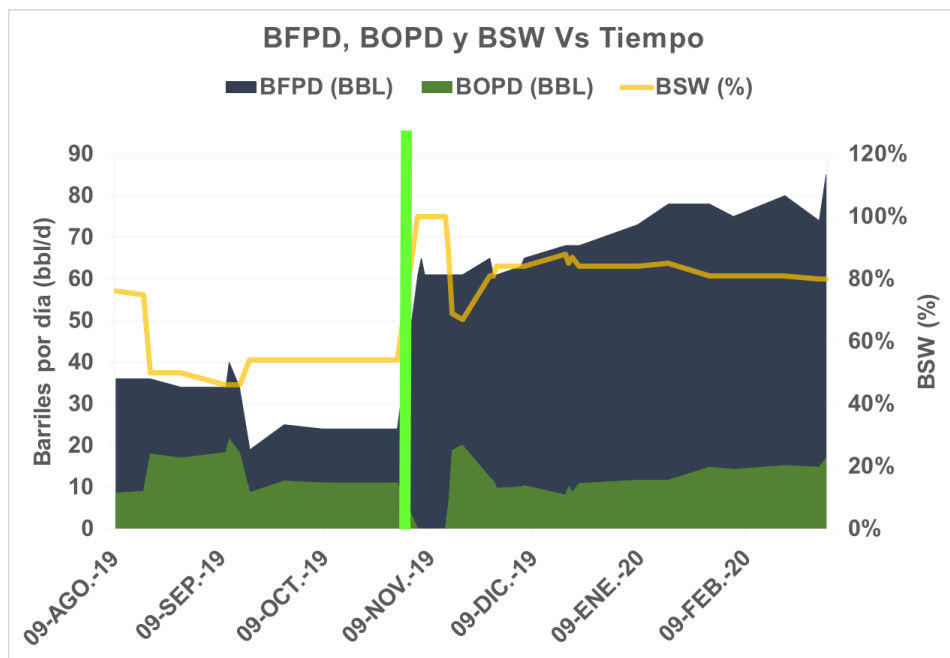
Tabla 17. Promedio pruebas de producción Escenario 1 y 2

Escenario	BFPD (BBL)	BSW (%)	BOPD (BBL)	NFSB TOTAL(ft)	NFSB	% LLENADO	SPM	GAS (Mscf)	GOR (Scf/BBL)
					LIQ (ft)				
1	30.0	55%	13.3	146	143.0	56%	2.6	14	1181.1
2	72.3	84%	11.7	2203	2024.9	96%	3.5	11	797.1

Fuente: elaboración propia

El Grafico 18., muestra el comportamiento de los barriles de petroleo diarios, barriles de fluido diarios y BSW como resultado de la implementación de las cajas Tangent Flow en la bomba de fondo.

Gráfico 18. BFPD, BOPD y BSW Vs Tiempo



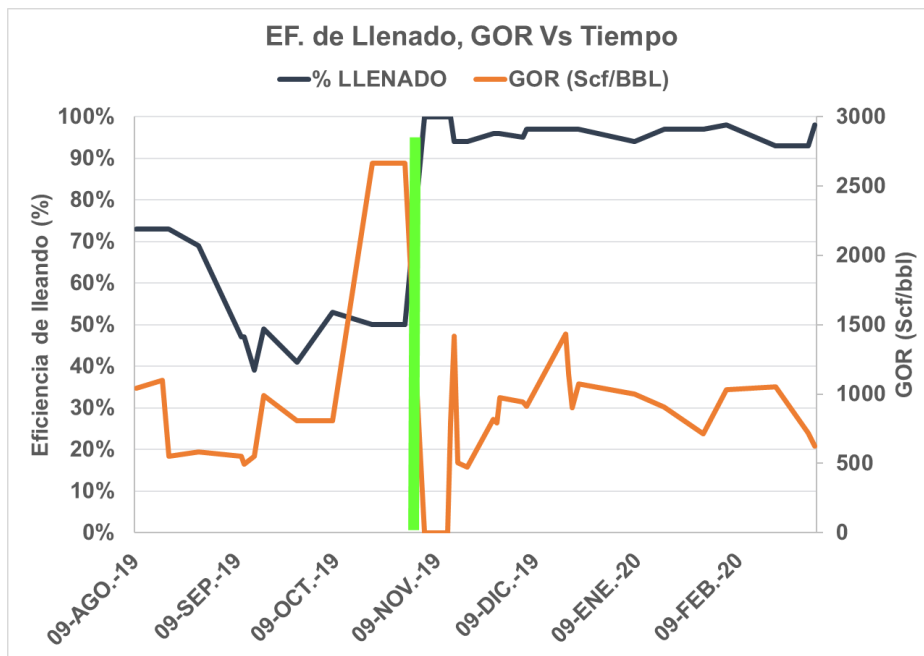
Fuente: elaboración propia

En el Grafico 18., se puede observar que se presenta un incremento de 42.3 bbl/D de fluido total y esto además de mostrar el beneficio de las cajas Tangent Flow, también manifiestan el efecto de la limpieza de arena realizada durante el cambio

de las cajas. Por otro lado, se puede ver que al finalizar el Escenario 1 la producción de petróleo se mantiene en 11 bbl/D y al finalizar el Escenario 2 la producción de petróleo se enucentra en 17 bbl/D mostrando una tendencia ascendente. Adicionalmente, se determina que el promedio del petróleo del Escenario 1(13.3 BOPD) es mayor al promedio del petróleo del Escenario 2 (11.7 BOPD) debido a la limpieza de arena realizada; asimismo, se estima que la zona donde se realizo la limpieza de arena tiene una alta saturacion de agua. Debido a que la movilidad del petroleo hacia la cara del pozo es más lenta que la del agua, la produccion del petroleo se reduce en el Escenario 2. Sin embargo, se evidencia que la produccion de petróleo aumenta con el tiempo durante el segundo Escenario. Adicionalmente, se observa una relación agua- petróleo 1:1 para el Escenario 1 la cual se incrementa para el Escenario 2 pues se obtiene una relación 4:1. Durante la primera semana se observa que el pozo retorna a superficie el agua inyectada durante la limpieza de arena (455 bbl).

Para determinar el comportamiento tanto del Escenario 1 como del Escenario 2 de el efecto del GOR en la eficiencia de llenado se realiza el analisis respectivo del Grafico 19.

Gráfico 19. Eficiencia de llenado, GOR vs Tiempo



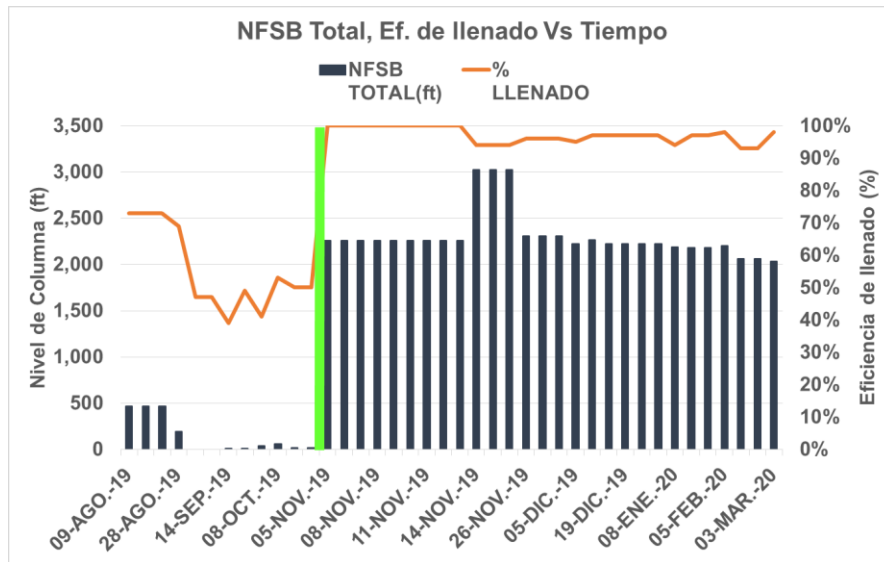
Fuente: elaboración propia

En el Grafico 19., durante el Escenario 1 se evidencia un aumento paulatino de la relación gas-petróleo (GOR) acompañado de una relación inversamente proporcional con la eficiencia de llenado de la bomba, comportamiento típico de estas variables durante la vida productiva del pozo, adicionalmente se observa una

eficiencia de llenado crítica (por debajo del 40%), como se ve durante el mes 2 (septiembre), a pesar de manejar un GOR por debajo de 1000 Scf/bbl; Para el Escenario 2 se evidencia una leve disminución en la relación gas-petróleo por parte del pozo comparado con el pico producido durante el Escenario 1, sin embargo, la relación gas-petróleo se mantiene sobre 1000 Scf/bbl. Además, la eficiencia de llenado no siguió su comportamiento típico, puesto que se evidencio una eficiencia de llenado de la bomba superior al 95% para el Escenario 2. El comportamiento de las cartas dinámométricas, ante estas condiciones de producción, evidencian el correcto funcionamiento de los dispositivos de fondo instalados.

En cuanto al comportamiento de la eficiencia de llenado de la bomba de fondo a partir del nivel de fluido sobre la bomba total, este se representa en el Grafico 20., con el fin de ser analizada.

Gráfico 20. NFSB y Eficiencia de llenado vs Tiempo

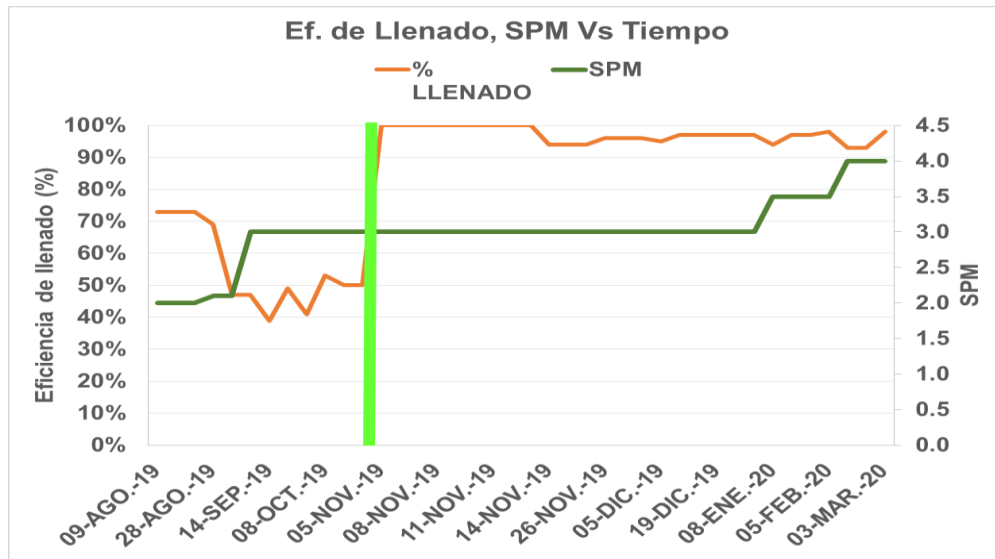


Fuente: elaboración propia

Al evaluar el nivel de fluido sobre la bomba con la eficiencia de llenado, se puede notar en el Grafico 20., que se presenta un incremento del 50% en la eficiencia de llenado del Escenario 1 al Escenario 2. Por otro lado, la eficiencia de llenado para el Escenario 1 se vio afectada reduciendose 20% con la reducción de 500 ft de nivel de fluido sobre la bomba, sin embargo, para el Escenario 2 se presentan reducciones de la columna de fluido de más de 600 ft y no representan un efecto significativo sobre la eficiencia de la bomba debido a que esta se mantiene por encima del 93%.

El Grafico 21., muestra el comportamiento de la eficiencia de llenado respecto a la variación de la velocidad de bombeo durante los Escenarios 1 y 2 con el fin de realizar el analisis correspondiente.

Gráfico 21. Eficiencia de llenado y SPM vs Tiempo

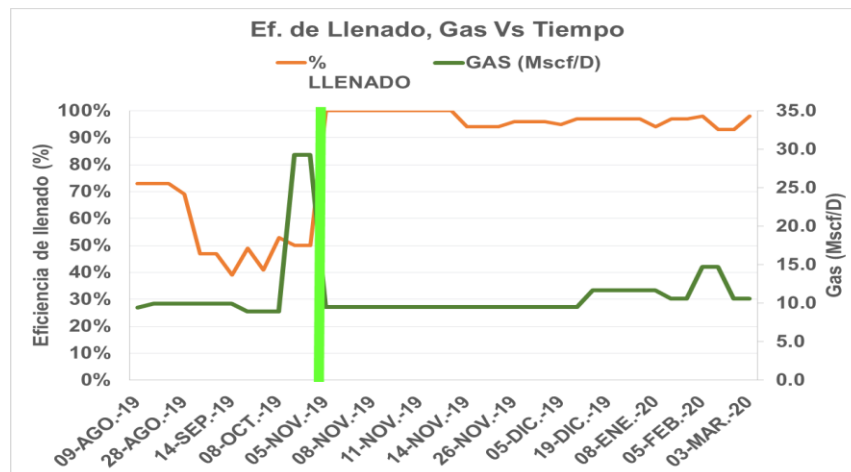


Fuente: elaboración propia

En cuanto al Gráfico 21., la cual representa el comportamiento de la eficiencia de llenado y la velocidad de los Escenarios 1 y 2, se identifica que durante el Escenario 1 la relación de estas variables es inversamente proporcional, puesto que a medida que se aumenta la velocidad, la eficiencia de llenado disminuye notablemente; sin embargo, durante el Escenario 2, la velocidad se incrementa en 33% pero esto no representa una reducción significativa para la eficiencia de llenado debido a que el valor mínimo que presenta a lo largo de este Escenario es 93%.

En el Gráfico 22., se puede observar el comportamiento de la eficiencia de llenado frente al gas a lo largo del Escenario 1 y 2.

Gráfico 22. Eficiencia de llenado, Gas Vs Tiempo (Escenario 1 y 2)



Fuente: elaboración propia

En el Grafico 22., se evidencia que la eficiencia de llenado para el Escenario 2 es superior al 90%, con tasas de gas superiores a 10 Mscf/D, a diferencia del Escenario 1 donde la eficiencia de llenado es menor al 75% ante tasas de gas inferiores a 10 Mscf/D; por lo tanto, la implementación de las cajas Tangent Flow presentan un buen manejo del flujo de gas al presentar eficiencias de llenado cerca del 100% con tasas de gas que alcanzan cerca de los 12 Mscf/D.

3.5 EVALUACIÓN FINANCIERA

Teniendo en cuenta que todo proyecto realizado en la industria busca obtener beneficios económicos a su compañía y en este caso, la empresa Parko Services S.A desea ofrecerle una mayor rentabilidad a sus clientes a través de sus productos y servicios se dispone a realizar la viabilidad financiera de la implementación de las cajas Tangent Flow, desde la perspectiva de una empresa operadora, mediante los indicadores Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Beneficio Anual Uniforme Equivalente (BAUE) los cuales serán evaluados teniendo en cuenta una Opción 1 (Proyección con cajas API) y una Opción 1 (Proyección con cajas Tangent Flow) teniendo en cuenta tres alternativas diferentes de precio del barril; como alternativa optimista \$50.44 USD, alternativa pesimista \$23.88 USD y una intermedia \$37.16 USD. La unidad monetaria es Dólar americano (USD). La producción para la Opción 1 planteada, en donde se continua con las cajas API, se determinó a través de la Gráfica 5., la cual muestra que el crudo se encontraba estabilizándose en 11 bbl/D antes de la implementación de las cajas Tangent Flow; para la Opción 2 planteada se determina que, al final del periodo de evaluación la cantidad de crudo producida se encontraba alrededor de los 17 bbl/D (Ver Grafica 10.), valores tomados para la proyección.

Inicialmente, se realiza la conversión de la Tasa de Interés de Oportunidad (TIO) anual a una TIO semestral, a través del cual se obtiene un resultado de 6.3%. Con la TIO semestral y los datos proporcionados por la empresa del análisis de costos de inversión, de costos de operación y de ingresos se procede a realizar el flujo de caja correspondiente a los dos escenarios, el Escenario 1 en el cual el pozo continua con las cajas API y el Escenario 2 en donde se realiza el cambio a cajas Tangent Flow; lo anterior es realizado para las tres alternativas (optimista, pesimista e intermedio) teniendo en cuenta su evaluación semestral.

3.5.1 Valor Presente Neto. A partir de la Ecuación 10., se determina el Valor Presente Neto para los dos escenarios en cada alternativa para cada alternativa, teniendo en cuenta los flujos de caja netos de cada caso.

3.5.1.1 Alternativa optimista. La proyección de flujo de efectivo neto de la alternativa optimista (precio del barril: \$ 50.44 USD) para el Escenario 1 (API) y para el Escenario 2 (Tangent Flow) son mostrados en esta sección.

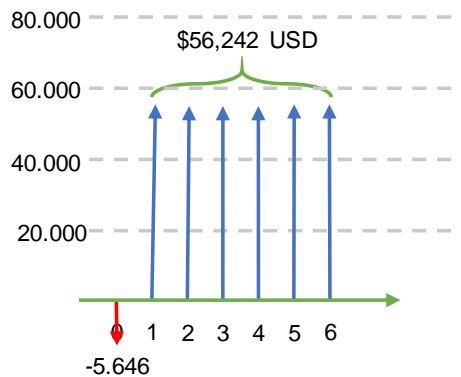
• **Escenario 1 (Cajas API).** A continuación se muestra en la Tabla 18., la proyección del flujo de efectivo correspondiente al Escenario 1 (API) y la representación gráfica de la proyección del flujo neto de efectivo de la misma opción mostrada en el Grafico 23., teniendo en cuenta que se realiza para la alternativa Optimista en donde el precio del barril corresponde a \$50.44 USD.

Tabla 18. Proyección flujo efectivo Escenario 1 (API) alternativa optimista

Semestre	0	1	2	3	4	5	6
No. barriles semestre		1,980	1,980	1,980	1,980	1,980	1,980
Regalías (bbl)		158	158	158	158	158	158
Precio (USD)		50.44	50.44	50.44	50.44	50.44	50.44
INGRESOS OPERACIONALES (USD)		91,882	91,882	91,882	91,882	91,882	91,882
Costos de producción		35,640	35,640	35,640	35,640	35,640	35,640
UTILIDAD (USD)		56,242	56,242	56,242	56,242	56,242	56,242
INVERSIONES (USD)	5,646						
FLUJO NETO DE EFECTIVO (USD)	-5,646	56,242	56,242	56,242	56,242	56,242	56,242

Fuente: elaboración propia

Gráfico 23. Proyección flujo neto de efectivo Escenario 1 (API) alternativa optimista



Fuente: elaboración propia

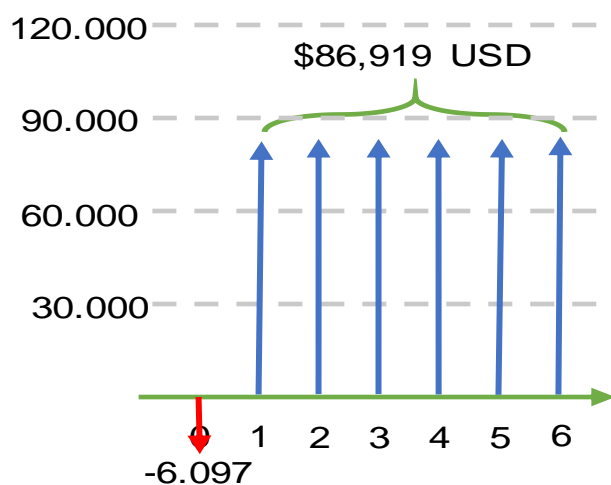
• **Escenario 2 (Cajas Tangent Flow).** A continuación se muestra en la Tabla 19., la proyección del flujo de efectivo correspondiente al Escenario 2 (Tangent Flow) y la representación gráfica de la proyección del flujo neto de efectivo de la misma opción mostrada en el Grafico 24., teniendo en cuenta que se realiza para la alternativa Optimista en donde el precio del barril corresponde a \$50.44 USD.

Tabla 19. Proyección de flujo de efectivo caja Escenario 2 (Tangent Flow) alternativa optimista

Semestre	0	1	2	3	4	5	6
No barriles semestre		3,060	3,060	3,060	3,060	3,060	3,060
Regalías (bbl)		245	11,360	11,360	11,360	11,360	11,360
Precio (USD)		50.44	50.44	50.44	50.44	50.44	50.44
INGRESOS OPERACIONALES (USD)		141,99	141,99	141,99	141,99	141,99	141,99
Costos de producción (USD)		55,08	55,08	55,08	55,08	55,08	55,08
UTILIDAD (USD)		86,919	86,919	86,919	86,919	86,919	86,919
INVERSIONES (USD)	6,097						
FLUJO NETO DE EFECTIVO (USD)	-6,097	86,919	86,919	86,919	86,919	86,919	86,919

Fuente: elaboración propia

Gráfico 24. Proyección de flujo neto de efectivo Escenario 2 (Tangent Flow) alternativa optimista



Fuente: elaboración propia

3.5.1.2 Alternativa pesimista. La proyección de flujo de efectivo neto de la alternativa pesimista (precio del barril: \$ 23.88 USD) para el Escenario 1 (API) y para el Escenario 2 (Tangent Flow) son mostrados en esta sección.

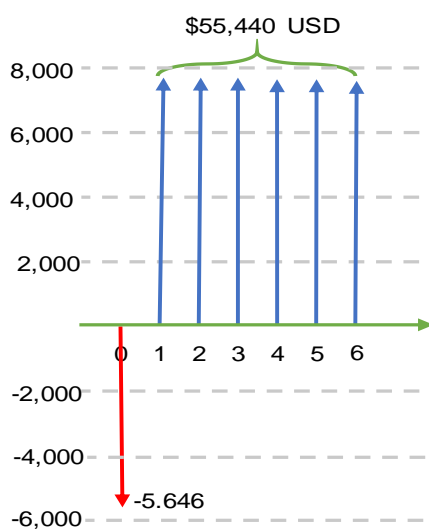
- **Escenario 1 (Cajas API).** A continuación se muestra en la Tabla 20., la proyección del flujo de efectivo correspondiente el Escenario 1 (API) y la representación gráfica de la proyección del flujo neto de efectivo de la misma opción mostrada en el Grafico 25., teniendo en cuenta que se realiza para la alternativa Pesimista en donde el precio del barril corresponde a \$23.88 USD.

Tabla 20. Proyección de flujo efectivo Escenario 1 (API) alternativa pesimista

Semestre	0	1	2	3	4	5	6
No Barriles semestre		1,980	1,980	1,980	1,980	1,980	1,980
Regalías (bbl)		158	158	158	158	158	158
Precio (USD)		23.88	23.88	23.88	23.88	23.88	23.88
INGRESOS OPERACIONALES (USD)		43,500	43,500	43,500	43,500	43,500	43,500
Costos de producción (USD)		35,640	35,640	35,640	35,640	35,640	35,640
UTILIDAD (USD)		7,860	7,860	7,860	7,860	7,860	7,860
INVERSIONES (USD)	5,646						
FLUJO NETO DE EFECTIVO (USD)	-5,646	7,860	7,860	7,860	7,860	7,860	7,860

Fuente: elaboración propia

Gráfico 25. Proyección de flujo neto Escenario 1 (API) alternativa pesimista



Fuente: elaboración propia

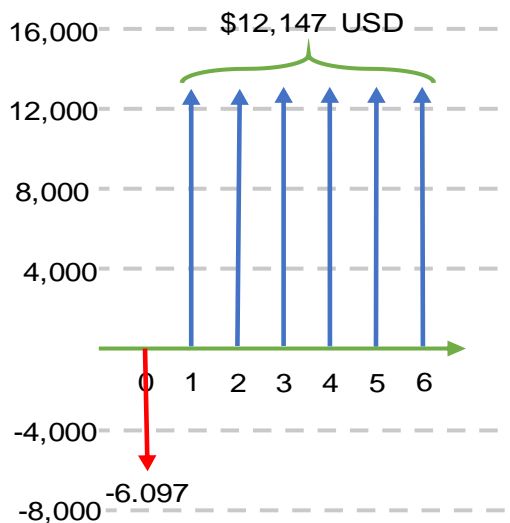
- **Escenario 2 (Cajas Tangent Flow).** A continuación se muestra en la Tabla 21., la proyección del flujo de efectivo correspondiente al Escenario 2 y la representación gráfica de la proyección del flujo neto de efectivo del mismo escenario mostrada en el Gráfico 26., teniendo en cuenta que se realiza para la alternativa Pesimista en donde el precio del barril corresponde a \$23.88 USD.

Tabla 21. Proyección de flujo de efectivo Escenario 2 (Tangent Flow) alternativa pesimista

Semestre	0	1	2	3	4	5	6
No Barriles semestre		3,060	3,060	3,060	3,060	3,060	3,060
Regalías (bbl)		245	5,378	5,378	5,378	5,378	5,378
Precio (USD)		23.88	23.88	23.88	23.88	23.88	23.88
INGRESOS OPERACIONALES (USD)		67,227	67,227	67,227	67,227	67,227	67,227
Costos de producción (USD)		55,080	55,080	55,080	55,080	55,080	55,080
UTILIDAD (USD)		12,147	12,147	12,147	12,147	12,147	12,147
INVERSIONES (USD)	6,097						
FLUJO NETO DE EFECTIVO (USD)	-6,097	12,147	12,147	12,147	12,147	12,147	12,147

Fuente: elaboración propia

Gráfico 26. Proyección de flujo neto de efectivo Escenario 2 (Tangent Flow) alternativa pesimista



Fuente: elaboración propia

3.5.1.3 Alternativa intermedia. La proyección de flujo de efectivo neto de la alternativa intermedia (precio del barril: \$ 37.16 USD) para el Escenario 1 (API) y para el Escenario 2 (Tangent Flow) son mostrados en esta sección.

- **Escenario 1 (Cajas API).** A continuación se muestra en la Tabla 22., la proyección del flujo de efectivo correspondiente al Escenario 1 (API) y la representación gráfica de la proyección del flujo neto de efectivo del mismo escenario mostrada

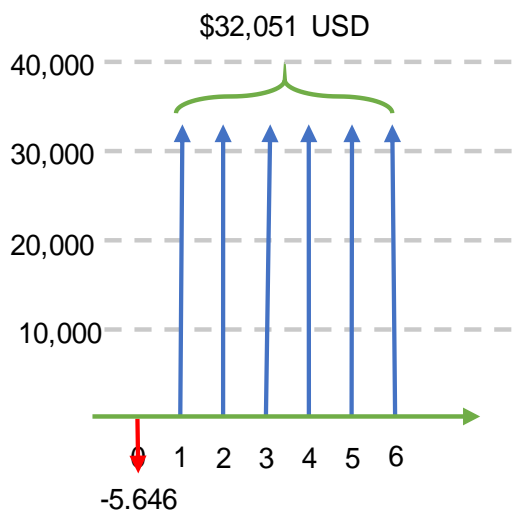
en el Grafico 27., teniendo en cuenta que se realiza para la alternativa Intermedia en donde el precio del barril corresponde a \$37.16 USD.

Tabla 22. Proyección de flujo efectivo Escenario 1 (API) alternativa intermedia

Semestre	0	1	2	3	4	5	6
No barriles semestre		1,980	1,980	1,980	1,980	1,980	1,980
Regalías (bbl)		158	158	158	158	158	158
Precio (USD)		37.16	37.16	37.16	37.16	37.16	37.16
INGRESOS OPERACIONALES (USD)		67,69	67,69	67,69	67,69	67,69	67,69
Costos de producción (USD)		35,64	35,64	35,64	35,64	35,64	35,64
UTILIDAD (USD)		32,05	32,05	32,05	32,05	32,05	32,05
INVERSIONES (USD)	5,646						
FLUJO NETO DE EFECTIVO (USD)	-5,646	32,05	32,05	32,05	32,05	32,05	32,05

Fuente: elaboración propia

Gráfico 27. Proyección de flujo neto de efectivo Escenario 1 (API) alternativa intermedia



Fuente: elaboración propia

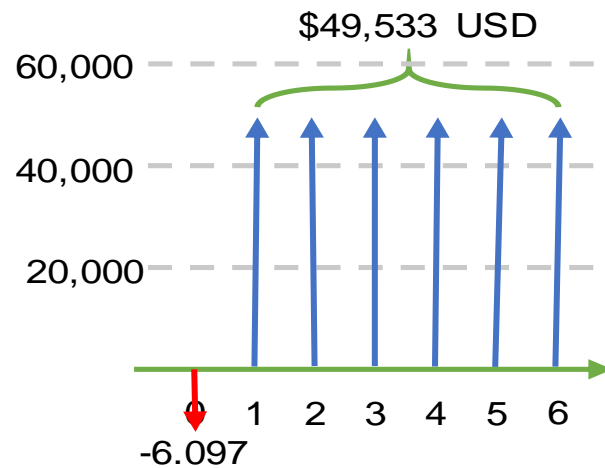
- **Escenario 2 (Cajas Tangent Flow).** A continuación se muestra en la Tabla 23., la proyección del flujo de efectivo correspondiente al Escenario 2 y la representación gráfica de la proyección del flujo neto de efectivo del mismo escenario mostrada en el Grafico 28., teniendo en cuenta que se realiza para la alternativa Intermedia en donde el precio del barril corresponde a \$37.16 USD.

Tabla 23. Proyección de flujo de efectivo Escenario 2 (Tangent Flow) alternativa intermedio

Semestre	0	1	2	3	4	5	6
No Barriles semestre		3,060	3,060	3,060	3,060	3,060	3,060
Regalías (bbl)		245	8,369	8,369	8,369	8,369	8,369
Precio (USD)		37.16	37.16	37.16	37.16	37.16	37.16
INGRESOS OPERACIONALES (USD)		104,613	104,613	104,613	104,613	104,613	104,613
Costos de producción (USD)		55,080	55,080	55,080	55,080	55,080	55,080
UTILIDAD (USD)		49,533	49,533	49,533	49,533	49,533	49,533
INVERSIONES (USD)	6,097						
FLUJO NETO DE EFECTIVO (USD)	-6,097	49,533	49,533	49,533	49,533	49,533	49,533

Fuente: elaboración propia

Gráfico 28. Proyección de flujo neto de efectivo Escenario 2 (Tangent Flow) alternativa intermedio



Fuente: elaboración propia

A partir de los flujos netos de efectivo mostrados previamente para los dos escenarios con las tres alternativas, se obtienen los siguientes resultados mostrados en la Tabla 24.

Tabla 24. Cálculos VPN

Alternativa	VPN API	VPN Tangent Flow
Optimista	\$268,311.55 USD	\$417,291.95 USD
Intermedia	\$150,475.70 USD	\$235,181.99 USD
Pesimista	\$32,639.85 USD	\$53,072.04 USD

Fuente: elaboración propia

Observando la Tabla 24., se determina que para todos los casos el VPN es superior a 0, por lo tanto en todos los casos es válido el proyecto sin embargo, debido a que el Valor Presente Neto para las tres alternativas con el Escenario 2 (cajas Tangent Flow) es superior en 55%, 56% y 62% para las alternativas optimista, intermedia y pesimista, respectivamente; por lo tanto, se recomienda a la compañía operadora la implementación de las cajas Tangent Flow (Escenario 2).

3.5.2 Beneficio Anual Uniforme Equivalente (BAUE). El siguiente indicador permitirá realizar la evaluación y comparación de la empresa aplicando el Escenario 1 (API) y el Escenario 2 (Tangent Flow), mostrando los beneficios anuales traídos a valor presente. A partir de los valores del VPN hallados en la Tabla 24., tanto para el Escenario 1 (API) como para el Escenario 2 (Tangent Flow), en las tres alternativas, se procede a aplicar la Ecuación 11 para determinar el Beneficio Anual Uniforme Equivalente (BAUE). En la Tabla 25., se muestra el beneficio anual uniforme equivalente obtenido para la alternativa optimista, intermedia y pesimista.

Tabla 25. Cálculos BAUE

Alternativa	BAUE API	BAUE Tangent Flow
Optimista	\$55,082.42 USD	\$85,667.02 USD
Intermedia	\$30,891.57 USD	\$48,281.16 USD
Pesimista	\$6,700.73 USD	\$10,895.31 USD

Fuente: elaboración propia

Al realizar la comparación entre los dos Escenarios, se determina que, evidentemente, el Escenario 2 (Tangent Flow) en un campo que presenta bloqueo por gas traerá beneficios anuales uniformes equivalentes superiores al Escenario 1 (API) en \$ 30,584.6 USD, \$ 17,389.59 USD y \$ 4,194.58 USD en la alternativa optimista, intermedia y pesimista, respectivamente.

3.5.3 Tasa interna de retorno (TIR). Utilizando la Ecuación 12., se procede a determinar la viabilidad del proyecto. La Tabla 26., muestra los valores

determinados para los dos escenarios de la Tasa Interna de Retorno para la alternativa optimista, pesimista e intermedio.

Tabla 26. TIR para cada alternativa y escenario

Alternativa	TIR API	TIR Tangent Flow
Optimista	996.13%	1425.60%
Intermedia	567.66%	812.41%
Pesimista	138.45%	198.95%

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la Tabla 26., los resultados obtenidos son superiores a la Tasa de Interes de Oportunidad, por lo tanto, se consideran viables para los seis casos, sin embargo, las tres alternativas del Escenario 2 (Tangent Flow) son superiores a las tres alternativas del Escenario 1 (API) lo cual indica que el Escenario 2 (Tangent Flow), representa un menor riesgo de no conseguir la rentabilidad mínima esperada que en los resultados obtenidos del Escenario 1 (API). Adicionalmente, como se observa, los valores se encuentran sobreestimados, por lo tanto, no se recomienda basarse en este indicador para tomar decisiones frente a las cajas Tangent Flow.

La Tabla 27., muestra el resumen de los resultados obtenidos para las tres alternativas en los dos escenario del Valor Presente Neto, Beneficio Anual Uniforme Equivalente y Tasa Interna de Retorno.

Tabla 27. Resumen indicadores financieros

Alternativa	VPN API	VPN Tangent Flow	BAUE API	BAUE Tangent Flow	TIR API	TIR Tangent Flow
Optimista	\$268,312	\$417,292	\$55,082	\$85,667	996.1%	1425.6%
Intermedia	\$150,476	\$235,182	\$30,892	\$48,281	567.7%	812.4%
Pesimista	\$ 32,640	\$53,072	\$6,701	\$10,895	138.5%	198.9%

Fuente: elaboración propia

- **Conclusión de la evaluación financiera.** Desde una perspectiva financiera, la mejor opción a aplicar por la empresa operadora es la Opción 2 (cajas Tangent Flow) en pozos que presenten bloqueo por gas debido a que el Valor Presente Neto de la implementación del proyecto en las alternativas optimista (\$417,292 USD), intermedia (\$235,182 USD) y pesimista (\$53,072 USD) siendo superiores a cero, indicando la validez de estos y se les da prioridad debido a que son

superiores a la Opción 1 en 55%, 56% y 62% para las alternativas optimista, intermedia y pesimista, respectivamente; además la Opción 2, en un campo que presenta bloqueo por gas, traerá beneficios anuales uniformes equivalentes superiores a la Opción 1 en \$ 30,584.6 USD, \$ 17,389.59 USD y \$ 4,194.58 USD en la alternativa optimista, intermedia y pesimista, respectivamente. Finalmente, no se recomienda tener en cuenta el indicador Tasa Interna de Retorno para determinar la viabilidad del proyecto debido a que los valores se encuentran sobreestimados.

4. CONCLUSIONES

- Para el Escenario 2 (Cajas Tangent Flow) la eficiencia de llenado de la bomba de fondo aumentó en 40% respecto al Escenario 1 (Cajas API), alcanzando una eficiencia del 96% cumpliendo con la hipótesis planteada en donde se esperaba una eficiencia superior al 75% debido a que se presenta una mejora con las cajas Tangent Flow en cuanto al manejo de gas, en vista del diseño que presentan sus rieles con el fin de impedir que el gas ocupe espacio que debería ser ocupado por petróleo.
- La implementación de las cajas Tangent Flow representan un buen manejo del flujo de gas debido a que la eficiencia de llenado para el Escenario 2 (Cajas Tangent Flow) es superior al 90%, con tasas de gas superiores a 10 Mscf/D, a diferencia del Escenario 1 (Cajas API) donde la eficiencia de llenado es menor al 75% ante tasas de gas inferiores a 10 Mscf/D.
- El aumento en la columna de fluido, superior a 2000 ft, para el Escenario 2 (Tangent Flow) genera una reducción en la fuerza máxima ejercida por las varillas (PPRL) del 21% y en la fuerza máxima ejercida por la bomba del 53% debido a que el estrés de las varillas se reduce en 25%, generando un menor esfuerzo por el sistema de bombeo mecánico para levantar una mayor cantidad de fluido a superficie.
- El Test de válvulas del Escenario 2 permite concluir que se presentó el fenómeno de escurrimiento con un filtrado de fluido inferior a 2 bbl/D a través del espacio anular entre el inserto y el pistón, siendo menor al 2% de fluido producido en la prueba sin embargo, no afecta la producción significativamente pues se encuentra dentro del rango esperado que proporciona la lubricación y de la misma forma, reduce el desgaste de la caja Tangent Flow.
- Debido a la limpieza de arena realizada el mismo día de la implementación de las cajas Tangent Flow, se presenta un comportamiento característico de esta intervención en el pozo al igual que en el periodo de 2017-2018 en donde incremento la relación agua-petróleo después de la limpieza de arena; teniendo en cuenta que para la limpieza de arena, el 01 de noviembre de 2019 fueron inyectados 455 Bbl de agua, se establece que el periodo de retorno de esta se dio entre el 05 y 13 de noviembre de 2019 donde se presentó un corte de agua del 100%.
- Desde el punto de vista financiero, la mejor opción a implementaar en pozos que presenten bloqueo por gas son las cajas Tangent Flow (Escenario 2) debido a que el Valor Presente Neto de la implementación del proyecto en las alternativas optimista (\$417,292 USD), intermedia (\$235,182 USD) y pesimista (\$53,072 USD) al ser superiores a cero, indican la factibilidad de su aplicación y se les da prioridad

debido a que son superiores al Escenario 1 (API) en 55%, 56% y 62% para las alternativas optimista, intermedia y pesimista, respectivamente.

- El Escenario 2 (Tangent Flow), en un campo que presenta bloqueo por gas, traerá beneficios anuales uniformes equivalentes superiores al Escenario 1 (API) en \$30,584.6 USD, \$17,389.59 USD y \$4,194.58 USD en la alternativa optimista, intermedia y pesimista, respectivamente.

5. RECOMENDACIONES

- Alargar los periodos de estudio de la caja Tangent Flow en el pozo P-250 del campo Palagua para identificar posibles comportamientos adversos que se puedan presentar antes nuevas condiciones de operación.
- Realizar el estudio de eficiencia energética del sistema de bombeo mecánico en el pozo P-250 antes y después de la implementación de la caja Tangent Flow, para identificar los gastos asociados al consumo energético al usar este dispositivo y el impacto de la reducción de la fuerza impresa sobre la sarta de varillas.
- Realizar el estudio en los dos pozos nuevos donde la unión temporal IPJ han decidido implementar cajas Tangent Flow debido al buen desempeño del dispositivo en el pozo P-250.
- Monitorear los test de válvulas para identificar comportamientos anómalos en la válvula viajera que no sean relacionados con el fenómeno de escurrimiento.

BIBLIOGRAFÍA

BELLARBY, Jonathan, Well completion design: En: Beam pumps. Aberdeen, UK: Elsevier, 2009. p. 355.

_____. Well completion design: En: Beam pumps. Aberdeen, UK: Elsevier, 2009. p. 356.

BROWN, Kermit, The technology of the artificial lift: En: Beam pumps. Tulsa, Oklahoma: PennWell, 1984. p. 230.

_____.The technology of the artificial lift: En: Beam pumps. Tulsa-Oklahoma: PennWell, 1984. p. 233.

_____.The technology of the artificial lift: En: Beam pumps. Tulsa, Oklahoma: PennWell, 1984. p. 320.

CABRERA Nicolas et al. Análisis y Propuestas de Mejora de Proyectos de Inyección de Agua Ejecutados en Reservorios de Diversas Características. En: Espol [sitio WEB]. Quito. La entidad. [29, abril, 2020]. Archivo PDF. p. 2. Disponible en: <<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/20814/1/articulo%20tesis.pdf>>

CAMPOS, Orlando et al. Estudio para el cambio de sistema de levantamiento artificial a bombeo mecánico en el campo lago agro operado por EP-Petroecuador. [en línea]. Tesis. Escuela Politécnica Nacional, Quito: 2011. [Consultado 27, abril, 2020]. Disponible en: <<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4222>>

CARDONA, Mónica et al. Bombeo mecánico. [Biblioteca Fundación Universidad de América]. Tesis. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.:1995. [Consultado 27, abril, 2020]. p. 15.

_____.Bombeo mecánico. [Biblioteca Fundación Universidad de América]. Tesis. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.:1995. [Consultado 27, abril, 2020]. p. 41.

_____.Bombeo mecánico. [Biblioteca Fundación Universidad de América]. Tesis. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.:1995. [Consultado 27, abril, 2020]. p. 55.

COYES, Corbin et al. Field-Driven Initiative to Improve Artificial Lift Efficiency and Reliability With an Engineered Sucker Rod Pump Ball Valve Insert. En: Tangentflow inc. [sitio WEB]. Red Deer, AB: La entidad. [29, abril, 2020]. Archivo PDF. p.1. Disponible en: https://12916e1b-d15a-5dcc-964d-e59ffbcf5698.filesusr.com/ugd/53dce0_d1f2b8e5d4c44b19bf80eb7d00902c95.pdf

ECHOMETER. Well analyzer and TWM Software operating manual Acquisition of Acoustic Data and Quality Control. [Sitio WEB]. Wichita Falls. La entidad. [29, abril, 2020]. Disponible en: <<https://hamdon.net/wp-content/uploads/2015/04/TWM-Software-Manual.pdf>>

ECONOMIPEDIA [Sitio Web]. Madrid, Esp: Tasa interna de retorno (TIR) [30, Abril, 2020] Disponible en: <<https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>>

FUNCIÓN PUBLICA [Sitio web]. Colombia: Ley 756 de 2002 [30, Abril, 2020] Disponible en: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9154>>

GILES, Ranald. Empuje y flotación de mecánica de los fluidos e hidráulica, Madrid-ES: Mcgraw-Hill, 1994, p. 65. ISBN 84-481-1898-7 tercera edición.
HAMDON. Total Well Management System. [Sitio WEB]. Edmonton, AB. La entidad. [29, abril, 2020]. Disponible en: <<https://hamdon.net/products/total-well-management-system/>>

International training group technical assistance. [25- abril-2020]. Archivo PDF. p. 24. Disponible en: <https://christian3306.files.wordpress.com/2010/10/bombeo-mecanico-optimizacion-diagnostico-y-operacion.pdf>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos NTC-1486-6166. Bogotá D.C: El instituto, 2018. ISBM. 9789588585673. 153 p.

Economía para ingenieros. [25- abril-2020]. Archivo PDF. p. 4. Disponible en: <https://www.emagister.com/uploads_user_home/Comunidad_Emagister_922_CO-STO_ANUAL_EQUIVALENTE_-CAUE-.pdf>

OIL PRODUCTION. Bombeo mecánico. [Sitio WEB]. Buenos aires. La entidad. [27, abril, 2020]. Disponible en: <<http://oilproduction.net/files/Guia-de-Interpretacion-de-Dinamometrica-y-Calculo-de-Desplazamiento-en-Bombas-de-Profundidad.pdf>>

P&G CONSULTING. Biblioteca. [Sitio Web] Zulia: Petróleo y gas consultores, La entidad. [28, abril, 2020]. p. 18. Disponible en: <<http://pygconsultores.com.ve/wp-content/uploads/2019/01/CARTAS-DINAGRAFICAS.pdf>>

PARTIDAS, Héctor. Bombeo mecánico optimización, diagnóstico y operación [en línea]. Anzoátegui-Venezuela.: 2003. [5, junio, 2020]. Disponible en: <<https://christian3306.files.wordpress.com/2010/10/bombeo-mecanico-optimizacion-diagnostico-y-operacion.pdf>>

RANKIA [Sitio web]. Chile: ¿Cómo calcular el valor presente neto? [30, Abril, 2020]
Disponible en: <<https://www.rankia.cl/blog/analisis-ipsa/3892041-como-calcular-valor-presente-neto-ejemplos>>

UPC GLOBAL [Sitio Web] Fulshear, Texas: Pistola de gas compacta. [05,06,2020].
Disponible en: <<https://www.upcoglobal.com/es/p/echometer/pistolas-de-gas/pistola-de-gas-compacta>>

ANEXO A
PRUEBAS DE PRODUCCIÓN

FECHA	BFPD (BBL)	BSW (%)	BOP D	NFSB TOTAL(ft)	NFSB LIQ (ft)	% LLENADO	SPM	GAS (Mscf)	GOR (Scf/BBL)
01-ene.-17	46	48%	24	1,457	1,243	71%	5.0	7.0	293
04-abr.-17	Incrementar velocidad de 5.0 a 5,5 SPM.								
10-feb.-17	71	48%	37	1,457	1,413	71%	5.0	7.0	190
17-abr.-17	53	50%	27	1,457	1,413	65%	5.5	5.1	189
23-abr.-17	47	48%	24	1,467	1,406	58%	5.5	6.1	254
27-may.-17	57	40%	34	597	597	52%	5.5	6.1	178
29-may.-17	47	40%	28	597	597	50%	5.5	5.5	196
19-jun.-17	54	52%	26	1,401	1,401	53%	5.5	6.4	246
21-jun.-17	Pozo parado por no bombeo.								
20-jul.-17	Fuga en tubería / Limpieza de arena								
17-sep.-17	Pozo parado por no bombeo, revisión equipo de subsuelo.								
24-sep.-17	Cambio de bomba: Probó tubería con bomba anclada con 500 Psi, sin éxito.								
26-sep.-17	110	59%	45	2,426	2,426	98%	5.5	6.4	142
06-oct.-17	56	55%	25	2,106	1,712	98%	5.5	5.8	232
12-dic.-17	107	58%	45	1,547	1,232	97%	5.5	5.8	129
18-dic.-17	67	59%	27	1,717	1,703	97%	5.5	21.8	807
07-ene.-18	Pozo no bombea, pendiente revisión por técnico dinagramas								
08-ene.-18	105	67%	35	1,711	1,711	97%	5.5	21.8	629
22-feb.-18	101	63%	37	1,186	1,186	93%	5.5	21.8	583
28-feb.-18	105	65%	37	1,148	933	95%	5.5	21.8	593
04-mar.-18	60	59%	25	1,148	933	94%	5.5	7.4	296
12-mar.-18	70	65%	25	1,514	1,463	95%	5.5	5.6	224
13-mar.-18	Incrementó velocidad de 5,5 a 6,0 SPM.								
23-mar.-18	118	65%	41	1,454	1,454	96%	6.0	5.6	229
09-abr.-18	98	64%	35	560	446	83%	5.9	5.6	159
25-abr.-18	Pozo parado por no bombeo, revisó por técnico, quedo bombeando.								
04-may.-18	73	52%	35	17	17	63%	5.9	5.6	160
07-may.-18	78	62%	30	9	9	66%	5.9	5.6	189
09-may.-18	80	68%	26	6	6	67%	5.9	5.6	219
10-may.-18	Disminuyó velocidad de 5,9 a 5,4 SPM.								
15-may.-18	80	71%	23	307	307	75%	5.4	5.6	241
16-may.-18	73	68%	23	28	28	68%	5.4	5.6	240
17-may.-18	77	66%	26	3	3	78%	5.4	5.6	214
23-may.-18	118	73%	32	1,376	1,376	98%	5.4	5.6	176
23-may.-18	Pozo parado, Fuga en válvula viajera presenta fuga severa.								
30-may.-18	Cambio de bomba Bomba RWAC No. 2114 (2-1/2" x 1-1/2" x 16' x 127").								
05-jun.-18	100	68%	32	1,869	1,869	96%	5.0	5.6	175
13-jun.-18	102	71%	30	2,034	2,034	98%	5.0	5.6	189
11-jul.-18	99	68%	32	1,809	1,327	96%	5.0	5.6	177
19-jul.-18	110	63%	41	1,863	1,472	95%	5.0	52.5	1280
14-ago.-18	88	62%	33	2,090	2,029	80%	5.0	52.5	1570
14-ago.-18	Pozo parado por no bombeo, revisión equipo de subsuelo.								
15-ago.-18	Cambio de bomba.								
16-ago.-18	106	100%	0	2,561	2,561	100%	5.0	52.5	1570
25-ago.-18	76	62%	29	2,279	1,628	98%	5.0	37.1	1279
02-sep.-18	100	62%	38	1,734	1,382	97%	5.0	37.1	976
26-sep.-18	66	58%	28	1,558	1,093	96%	5.0	41.5	1482
12-oct.-18	109	58%	46	1,888	1,888	98%	5.0	41.5	907
12-oct.-18	Pozo parado por no bombeo, revisión equipo de subsuelo.								

FECHA	BFPD (BBL)	BSW (%)	BO P D (BBL)	NFSB TOTAL(ft)	NFSB LIQ (ft)	% LLENADO	SPM	GAS (Mscf)	GOR (Scf/BBL)
14-oct.-18	Cambio de bomba Probó acción de bombeo con 500 psi, ok.								
24-oct.-18	64	58%	27	2,577	701	98%	5.0	40.8	1511
21-nov.-18	62	60%	25	713	550	86%	5.0	38.8	1552
19-dic.-18	62	58%	26	564	453	72%	5.0	35.2	1354
02-ene.-19	Incrementó velocidad de 5,0 a 5,5 SPM.								
22-ene.-19	62	72%	17	137	115	41%	5.5	29.9	1759
23-ene.-19	Disminuyó velocidad de 5,5 a 4,5 SPM.								
23-feb.-19	44	60%	18	691	570	59%	4.5	29.2	1622
25-mar.-19	46	59%	19	416	334	64%	4.5	21.1	1111
28-mar.-19	Aumentó velocidad de 4,5 a 5,0 SPM.								
05-abr.-19	Revisó válvula-cheque en cabeza de pozo: En buenas condiciones.								
10-abr.-19	Prueba de ascenso de presión (PBU)								
12-abr.-19	106	100%	0	416	334	100%	5.1	21.1	1119
13-abr.-19	65	60%	26	416	334	63%	5.0	3.6	138
14-abr.-19	101	93%	7	416	334	95%	5.0	3.6	509
14-abr.-19	Pozo parado por no bombeo, se reespació y queda en observación.								
15-abr.-19	75	67%	25	416	334	73%	5.0	3.6	145
16-abr.-19	63	65%	22	416	334	62%	5.0	3.6	163
17-abr.-19	57	62%	22	416	334	56%	5.0	3.6	166
21-abr.-19	Retiro Memory Gauge								
23-abr.-19	54	100%	0	1,222	1,222	97%	4.6	9.4	0
24-abr.-19	54	90%	5	1,222	1,222	97%	4.6	9.4	3133
26-abr.-19	54	82%	10	1,222	1,222	97%	4.6	9.4	967
28-abr.-19	54	77%	12	1,222	1,222	97%	4.6	9.4	757
30-abr.-19	24	47%	13	1,222	1,222	97%	4.6	9.4	739
02-may.-19	24	55%	11	2,159	2,015	97%	4.6	9.4	870
06-may.-19	24	55%	11	2,128	1,804	98%	4.6	9.4	870
13-may.-19	24	55%	11	2,119	1,931	98%	4.5	9.4	870
13-may.-19	Reespació pozo y la bomba recupera 12".								
01-jun.-19	24	55%	11	1,928	1,665	93%	4.6	9.4	870
25-jun.-19	24	55%	11	1,395	1,271	90%	4.5	4.7	435
28-jun.-19	Incrementó recorrido de 83" a 100".								
01-jul.-19	24	18%	20	1,395	1,271	90%	4.5	9.4	478
02-jul.-19	24	20%	19	1,395	1,271	90%	4.5	9.4	490
04-jul.-19	24	42%	14	1,222	1,222	97%	4.5	9.4	723
04-jul.-19	Pozo parado por no bombeo, se reespació, recuperó 4" y queda bombeando.								
11-jul.-19	24	40%	14	36	32	50%	4.5	9.4	671
12-jul.-19	24	40%	14	971	959	93%	4.5	9.4	671
12-jul.-19	40	40%	24	647	602	93%	4.5	9.4	392
12-jul.-19	Pozo por no bombeo, reespació y queda trabajando Ok. Válvula viajera con fuga.								
13-jul.-19	43	40%	26	40	35	51%	4.5	9.4	392
13-jul.-19	Disminuyó velocidad de 4,5 a 3,5 SPM.								
14-jul.-19	Disminuyó velocidad de 3,5 a 2,0 SPM.								
15-jul.-19	49	30%	34	727	699	97%	2.0	9.4	313
15-jul.-19	válvula viajera con fuga.								
16-jul.-19	41	30%	29	727	699	97%	2.0	9.4	336
19-jul.-19	41	77%	9	727	699	97%	2.0	9.4	723
21-jul.-19	41	77%	9	483	416	82%	2.0	9.4	723
22-jul.-19	53	77%	12	797	797	97%	2.0	9.4	553
22-jul.-19	Pozo por no bombeo, reespació y queda trabajando Ok.								

FECHA	BFPD (BBL)	BSW (%)	BOP D (BBL)	NFSB TOTAL(ft)	NFSB LIQ (ft)	% LLENADO	SPM	GAS (Mscf)	GOR (Scf/BBL)
26-jul.-19	38	76%	9	383	383	75%	2.0	9.4	1044
29-jul.-19	38	76%	9	383	383	75%	2.0	9.4	1044
09-ago.-19	36	76%	9	465	465	73%	2.0	9.4	1044
17-ago.-19	36	75%	9	465	465	73%	2.0	9.9	1100
19-ago.-19	36	50%	18	465	465	73%	2.0	9.9	550
28-ago.-19	34	50%	17	192	180	69%	2.1	9.9	582
09-sep.-19	Instaló unidad C-228D retirada del P-222. Quedó con 86" y 3,0 SPM.								
10-sep.-19	34	46%	18	0	0	47%	2.1	9.9	550
11-sep.-19	40	46%	22	0	0	47%	3.0	9.9	495
14-sep.-19	34	46%	18	2	1	39%	3.0	9.9	550
17-sep.-19	19	54%	9	3	3	49%	3.0	8.9	989
27-sep.-19	25	54%	12	40	32	41%	3.0	8.9	809
08-oct.-19	24	54%	11	57	50	53%	3.0	8.9	809
20-oct.-19	24	54%	11	19	17	50%	3.0	29.3	2664
30-oct.-19	24	54%	11	19	17	50%	3.0	29.3	2664
01-nov.-19	Instalación de la caja Tangent- Flow. Limpieza de arena (455 bbl de agua).								
04-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	792
05-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	792
06-nov.-19	65	100%	0	2,257	2,236	100%	3.0	9.5	792
07-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	792
08-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	792
09-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	792
10-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	792
11-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	792
12-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	792
13-nov.-19	61	100%	0	2257	2236	100%	3.0	9.5	792
14-nov.-19	61	89%	7	3,025	2,732	94%	3.0	9.5	1416
15-nov.-19	61	69%	19	3,025	2,732	94%	3.0	9.5	502
18-nov.-19	61	67%	20	3,025	2,732	94%	3.0	9.5	472
26-nov.-19	65	81%	12	2,310	2,009	96%	3.0	9.5	820
27-nov.-19	61	81%	12	2,310	2,009	96%	3.0	9.5	792
28-nov.-19	61	84%	10	2,310	2,009	96%	3.0	9.5	973
05-dic.-19	63	84%	10	2,227	1,683	95%	3.0	9.5	942
06-dic.-19	65	84%	10	2,266	2,130	97%	3.0	9.5	913
18-dic.-19	68	88%	8	2,224	2,020	97%	3.0	11.7	1434
19-dic.-19	68	85%	10	2,224	2,020	97%	3.0	11.7	1147
19-dic.-19	Incrementó velocidad de 3,0 a 3,5 SPM.								
20-dic.-19	68	87%	9	2,224	2,020	97%	3.0	11.7	900
22-dic.-19	68	84%	11	2,224	2,020	97%	3.0	11.7	1075
08-ene.-20	73	84%	12	2,187	1,996	94%	3.5	11.7	1002
17-ene.-20	78	85%	12	2,180	1,986	97%	3.5	10.6	906
29-ene.-20	78	81%	15	2,180	1,986	97%	3.5	10.6	715
05-feb.-20	75	81%	14	2,201	2,058	98%	3.5	14.7	1032
06-feb.-20	Incrementó velocidad de 3.5 a 4.0 spm.								
20-feb.-20	80	81%	15	2,064	1,920	93%	4.0	14.7	1050
01-mar.-20	74	80%	15	2,064	1,920	93%	4.0	10.6	716
03-mar.-20	85	80%	17	2,035	1,828	98%	4.0	10.6	624