

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE DOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO
ARTIFICIAL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE Y BOMBEO MECÁNICO VSH2
UTILIZADOS EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN.**

ELIANA YAIRA MACHETE ROJAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2007

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE DOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO
ARTIFICIAL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE Y BOMBEO MECÁNICO VSH2
UTILIZADOS EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN**

ELIANA YAIRA MACHETE ROJAS

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniera de Petróleos

TUTORES:

Ing. HERNANDO VARGAS
Occidental de Colombia, Inc.

Msc. FERNANDO CALVETE
Profesor Escuela Ing. De Petróleos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2007

A Dios por regalarme la vida, ser mi guía, confidente y amigo fiel.
A mis papitos, Fabiola y Salvador, por sus sacrificios, desvelos, amor y confianza.
A mis dos amores, Crístiam y Valentina, por ser el motor de mi vida.
A Lupe, Melbarak y Daniel por su amistad incondicional.

Eliana M.

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus agradecimientos a:

Mi familia, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, creer siempre en mí y darme las fuerzas suficientes para luchar por mis sueños. En especial a Salvador, Mery Fabiola, Cristiam Yamid y Danna Valentina, por la confianza que tuvieron en mí en este tiempo que estuve lejos y sobre todo por brindarme la oportunidad de pertenecer a la mejor familia del mundo y enseñarme el verdadero significado de la palabra “amor”.

Occidental de Colombia, Inc. por brindarme la oportunidad de realizar la práctica empresarial, demostrar los conocimientos adquiridos a lo largo de cinco años de estudios y con ésta cumplir con el requisito para recibir el título.

El Ingeniero Manuel Hernando Vargas Murcia por todo el tiempo que dedicó para aclararme muchos conocimientos, hacer valiosos aportes a mi trabajo y colaborar desinteresadamente al desarrollo del mismo, además, por todos sus consejos, disponibilidad y paciencia para trabajar con la “espelucada”.

El Msc. Fernando Enrique Calvete por su colaboración para la ejecución de la práctica empresarial y sus aportes para que este trabajo terminara en excelentes resultados por medio de su experiencia y profesionalismo.

Los Ingenieros Juan Carlos Trujillo, Ricardo Restrepo, Felipe Moreno, Juan Carlos Guzmán, Rodolfo Rivera, y en especial, a Omar Patiño, por compartir conmigo sus amplios conocimientos obtenidos a lo largo de la experiencia en la industria y permitirme crecer profesional y personalmente al lado de ellos.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería de Petróleos por que han hecho su mejor esfuerzo para formar excelentes profesionales y personas.

La señora Lilia, doña Alcira y Liliana porque cada una de ellas en su momento me ofreció el calor de un segundo hogar y con su experiencia y cariño hicieron que este paso lejos de mi familia fuese menos amargo.

Mis amigos de Universidad Melba, Daniel, Nidia, Erwin, Natalie, Ximena, Gerson, Camilo y Zaida por todos los bellos momentos compartidos, por su apoyo incondicional, por su cariño, por las peleas y sobre todo por su amistad sincera, siempre los llevaré en mi corazón.

Mis amigos de apartamento Mauricio, José Luís ("el gordo"), Fabián, Julián, Héctor, Laura, Edgardo, y Jorge Iván porque con sus chistes, las reuniones en el apartamento, las jugadas de Play Station, las tardes viendo partidos de fútbol y hasta con sus desorden han hecho que mi estadía en Bucaramanga fuese algo inolvidable que ha dejado un lindo recuerdo en mi corazón que difícilmente se podrá olvidar.

Mis compañeros de Socorro y Bucaramanga, por la alegría de conocerlos y hacer de esta etapa algo inolvidable para todos.

Y a todas las personas que aportaron un granito de arena para la realización de este proyecto y mi crecimiento personal y profesional durante esta etapa de mi vida.

RESUMEN

1. TITULO*

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE DOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE Y BOMBEO MECÁNICO VSH2 UTILIZADOS EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN

2. AUTORA**

ELIANA YAIRA MACHETE ROJAS

3. PALABRAS CLAVES

Bombeo Electrosumergible, Bombeo Mecánico VSH2, AutographPC, Rodstar-3.0, Valor Presente Neto, Dólar por Inversión, Pay Back.

4. DESCRIPCIÓN:

El desarrollo del Campo Caño Limón se realizó empleando el Sistema de Bombeo Electrosumergible debido a los altos caudales de producción y el elevado corte de agua esperado, pero debido a que algunos de los pozos han bajado considerablemente su producción hasta el punto de ser inferior de 1.000 BFPD, a partir de diciembre de 2.005 se está implementando el sistema de Bombeo Mecánico VSH2 (Variable Speed Hydraulic 2).

El propósito del presente estudio es hacer una evaluación técnica y económica del desempeño del Sistema de Bombeo Mecánico VSH2 frente el Bombeo Electrosumergible en los pozos que por sus condiciones de operación ha sido necesaria la instalación de este nuevo Sistema de Levantamiento Artificial y de este forma poder tomar decisiones futuras sobre el cambio de sistema de levantamiento artificial en éstos pozos del campo Caño Limón.

El análisis técnico busca determinar cual de los dos sistemas de Levantamiento Artificial ofrece mejor tratamiento a las condiciones de operación del campo como presencia de arena, bajas tasas de producción, corte de agua moderado, y bajo soporte de presión, además de comparar los software de seguimiento y diseño. El análisis económico pretende comparar los costos de inversión inicial, mantenimiento, pérdidas por producción diferida y consumo de energía para desarrollar la evaluación financiera basada en el Valor Presente Neto, Dólar por Inversión y Pay Back para determinar la viabilidad económica del cambio de Sistema de Levantamiento Artificial.

* Práctica Empresarial.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Fernando Enrique Calvete - Manuel Hernando Vargas.

ABSTRACT

1. TITLE*

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF TWO SYSTEMS OF ARTIFICIAL LIFT, ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMPING AND VSH2 SUCKER-ROD PUMPING, USED IN CAÑO LIMON FIELD

2. AUTHOR**

ELIANA YAIRA MACHETE ROJAS

3. KEYWORDS

Electrical Submersible Pumping, VSH2 Sucker-Rod Pumping, AutographPC, Rodstar-3.0, Net Present Value, Dollar by Investment, Pay Back.

4. ABSTRACT:

The development of the Caño Limón Field was carried out using the System of Electrical Submersible Pumping due to the high production wealth and the high waited water cut, but because some of the wells have gotten its production considerably, until the point off being inferior of 1.000 BFPD, from December of 2.005 the system of VSH2 Sucker-Rod Pumping is implementing (Variable Speed Hydraulic 2).

The purpose of the present study is to make a technical and economic evaluation of the performance of the System of VSH2 Sucker-Rod Pumping front the Electrical Submersible Pumping, in the wells that it has been necessary for its operation conditions the installation of this new System of Artificial Lift and of this way can make future decisions about the change of System of Artificial Lift in these wells of the Caño Limón Field.

The technical analysis looks for to determine which of the two Systems of Artificial Lift offers better treatment to the conditions of operation of the field like presence of sand, drops production rates, moderated water cut, and lower support of pressure, besides comparing the pursuit and design software. The economic analysis seeks to compare the costs of initial investment, maintenance, losses for differed production and energy consumption to develop the financial evaluation based on the Net Present Value, Dollar for Investment and Pay Back to determine the economic viability of the change of System of Artificial Lift.

* Práctica Empresarial.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Fernando Enrique Calvete - Manuel Hernando Vargas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	19
1. GENERALIDADES DEL CAMPO CAÑO LIMÓN	21
1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	21
1.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	23
1.3 GEOLOGÍA	24
1.3.1 Ubicación Geológica.	24
1.3.2 Geología Estructural	25
1.3.3 Estratigrafía.	26
1.3.4 Geología del Petróleo.	28
1.4 CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO	29
1.4.1 Propiedades Petrofísicas del Yacimiento.	29
1.4.2 Propiedades de los Fluidos.	31
2. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE Y BOMBEO MECÁNICO VSH2	33
2.1 SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	33
2.1.1 Equipo de Superficie.	34
2.1.2 Equipo De Subsuelo.	39
2.2 ANÁLISIS DE FALLAS SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE EN POZOS DE BAJO CAUDAL EN EL CAMPO DE CAÑO LIMON	48
2.2.1 Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF)	49
2.2.2 Análisis de fallas equipos Bombeo Electrosumergible de Bajo Caudal.	53
2.2.3 Fallas en la bomba.	55
2.2.4 Fallas en el motor.	56
2.2.5 Fallas del sello o protector.	57

2.2.6	Fallas en el Cable de Potencia.	57
2.2.7	Factores externos.	57
2.3	SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO	58
2.3.1	Equipo de Superficie.	59
2.3.2	Equipo de fondo	69
2.4	PROBLEMAS OPERACIONALES DEL SISTEMA BOMBEO MECÁNICO	
	VSH2	76
2.4.1	Fallas en la Unidad de Bombeo.	76
2.4.2	Fallas en las varillas.	77
2.4.3	Fallas en la Bomba de Subsuelo.	78
2.4.4	Factores externos.	78
3.	FACTORES QUE AFECTAN EL DISEÑO DE LOS MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN	79
3.1	PROPIEDADES DEL YACIMIENTO	79
3.1.1	Corte de Agua y gravedad API.	79
3.1.2	Índice de productividad.	80
3.2	PRESIONES DE FONDO	81
3.3	CONDICIONES DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL	81
3.4	FACTORES EXTERNOS QUE AFECTAN DISEÑO DEL LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL	83
4.	ANTECEDENTES OPERACIONALES DEL CAMPO CAÑO LIMÓN	85
4.1	ANTECEDENTES OPERACIONALES POZOS DE BAJO CAUDAL	86
4.1.1	Sistema de Bombeo Electrosumergible.	87
4.1.2	Sistema de Bombeo Mecánico VSH2.	90
4.1.3	Estimación tasa de producción con los Sistemas de Levantamiento Artificial	92
4.2	POTENCIAL DE PRODUCCIÓN	95
5.	EVALUACIÓN TÉCNICA	104
5.1	COMPARACIÓN TÉCNICA	104

5.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE Y BOMBEO MECÁNICO VSH2	107
5.2.1 Diseño sistema de Bombeo Electrosumergible.	110
5.2.2 Diseño sistema de Bombeo Mecánico VSH2.	118
5.3 COMPARACIÓN SOFTWARE DE SEGUIMIENTO	125
6. EVALUACIÓN ECONÓMICA	140
6.1 INVERSION INICIAL	140
6.1.1 Sistema de Bombeo Electrosumergible.	140
6.1.2 Sistema de Bombeo Mecánico VSH2.	142
6.1.3 Comparación Inversión Inicial.	142
6.2 COSTOS DE MANTENIMIENTO	143
6.2.1 Sistema de Bombeo Electrosumergible.	143
6.2.2 Sistema de Bombeo Mecánico VSH2.	146
6.2.3 Comparación Costos de Mantenimiento.	147
6.3 CONSUMO DE ENERGÍA	148
6.3.1 Sistema de Bombeo Electrosumergible.	149
6.3.2 Sistema de Bombeo Mecánico VSH2.	149
6.3.3 Comparación Consumo de Energía.	150
6.4 PÉRDIDAS POR PRODUCCIÓN DIFERIDA	151
6.4.1 Sistema de Bombeo Electrosumergible.	152
6.4.2 Sistema de Bombeo Mecánico VSH2.	152
6.4.3 Comparación Pérdidas por Producción Diferida.	153
6.5 EVALUACIÓN FINANCIERA	154
6.6.1 Inversión.	155
6.6.2 Valor Presente Neto (VPN).	155
6.6.3 Dólar por Inversión (DPI).	156
6.6.4 Tiempo de Pago de la Inversión (Pay Back).	157
CONCLUSIONES	158
RECOMENDACIONES	159
BIBLIOGRAFIA	160

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del Campo Caño Limón.	24
Figura 2. Ubicación de los campos en el bloque Cravo Norte.	25
Figura 3. Columna Estratigráfica del Campo Caño Limón.	27
Figura 4. Bombeo Electrosumergible.	34
Figura 5. Transformador reductor (SDT).	35
Figura 6. Transformador elevador (SUT)	36
Figura 7. Variador de Velocidad.	36
Figura 8. Caja de Venteo pozo CY 06.	38
Figura 9. Cabezal de pozo.	38
Figura 10. Estator.	40
Figura 11. Rotores.	40
Figura 12. Tipos de Cable de Potencia.	41
Figura 13. Sello y cámara de empuje.	43
Figura 14. Bolsa elástica y cámaras laberínticas.	43
Figura 15. Intake.	44
Figura 16. Etapa de una bomba Bombeo Electrosumergible	45
Figura 17. Curva de rendimiento de una bomba.	46
Figura 18. Cantidad de fallas por Run Life.	52
Figura 19. Fallas por Caudal.	54
Figura 20. Causas de fallas caudal menor a 2000 BFPD.	55
Figura 21. Instalaciones y fallas caudales inferiores a 2000 bbls.	55
Figura 22. Unidad hidráulica VSH2.	61
Figura 23. Motor Eléctrico.	62
Figura 24. Acumulador de presión.	63
Figura 25. Botellas de Nitrógeno.	63

Figura 26. Bomba hidráulica.	64
Figura 27. Tanque de aceite.	65
Figura 28. Guaya, Elevador y Espaciador.	67
Figura 29. Barra Lisa.	68
Figura 30. Cabezal de pozo Unidad Hidráulica.	69
Figura 31. Sartas de varillas en sus empaques.	70
Figura 32. Bomba de subsuelo.	71
Figura 33. Ciclo de Bombeo.	73
Figura 34. Ancla de tubería tipo copas.	75
Figura 35. Facilidades de producción PF-2.	86
Figura 36. Operación equipo de Bombeo Electrosumergible sobredimensionado.	88
Figura 37. Causas de fallas en la bomba.	89
Figura 38. Sand Protector Packer.	91
Figura 39. Estado Mecánico CL-Y1.	92
Figura 40. Representación de las curvas de producción.	96
Figura 41. Mapa de Caño Limón de los pozos productores del C5.	98
Figura 42. Mapa de UCS para CL-Y1.	100
Figura 43. Parámetros de diseño LY-X1.	108
Figura 44. Condiciones de pozo - Diseño de Bombeo Electrosumergible.	110
Figura 45. Tornado de la bomba de Bombeo Electrosumergible.	111
Figura 46. Selección de Sello para Bombeo Electrosumergible.	112
Figura 47. Selección del motor para Bombeo Electrosumergible.	113
Figura 48. Selección del cable para Bombeo Electrosumergible.	114
Figura 49. Selección del Controlador para Bombeo Electrosumergible.	115
Figura 50. Reportes de AutographPC - Diseño Bombeo Electrosumergible.	116
Figura 51. Información de pozo - Diseño de Bombeo Mecánico.	118
Figura 52. Información de producción - Diseño de Bombeo Mecánico VSH2.	119
Figura 53. Información Bomba y Tubería - Diseño de Bombeo Mecánico VSH2.	120
Figura 54. Selección Sarta de Varillas - Diseño de Bombeo Mecánico VSH2.	120
Figura 55. Selección Unidad de Superficie - Diseño Bombeo Mecánico VSH2.	121

Figura 56. Selección del motor - Diseño Bombeo Mecánico VSH2.	122
Figura 57. Reporte de Rodstar - Diseño Bombeo Mecánico VSH2.	123
Figura 58. Dinagrama bajo condiciones ideales.	131
Figura 59. Resultados típicos de prueba de válvulas.	138
Figura 60. Comparación Costos de Inversión Inicial.	143
Figura 61. Comparación Costos de Mantenimiento.	148
Figura 62. Comparación Consumo de Energía.	150
Figura 63. Comparación Costos por Consumo de Energía.	151
Figura 64. Comparación Producción Diferida.	153
Figura 65. Comparación Pérdidas por Producción Diferida.	154

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades Petrofísicas de Caño Limón.	29
Tabla 2. Porosidades Promedio del Campo Caño Limón.	30
Tabla 3. Saturaciones Promedio del Campo Caño Limón.	31
Tabla 4. Propiedades promedias de los fluidos de Caño Limón.	31
Tabla 5. Nomenclatura API para Unidades de Bombeo Mecánico.	66
Tabla 6. Nomenclatura API para Bombas de Subsuelo Bombeo Mecánico.	74
Tabla 7. Antecedentes operacionales de Caño Limón.	93
Tabla 8. Cálculo de IP a partir de SPI.	99
Tabla 9. Potencial de producción con DD=P. Underbalance.	101
Tabla 10. Potencial de producción con DD=Pws.	102
Tabla 11. Comparación funcionamiento dos Sistemas de Levantamiento Artificial.	104
Tabla 12. Condiciones operacionales en instalaciones Bombeo Mecánico VSH2.	105
Tabla 13. Instalaciones Sistema de Bombeo Electrosumergible.	117
Tabla 14. Bomba, varillas y SPM Bombeo Mecánico VSH2.	124
Tabla 15. Cargas y consumo de Bombeo Mecánico VSH2.	124
Tabla 16. Medición de parámetros del funcionamiento de pozos.	126
Tabla 17. Dinagramas típicos de fondo.	132
Tabla 18. Costo Instalación Inicial Bombeo Electrosumergible.	141
Tabla 19. Costo Instalación Inicial Bombeo Mecánico VSH2.	142
Tabla 20. Costo por instalación equipo reparado Bombeo Electrosumergible.	144
Tabla 21. Costo por instalación equipo nuevo Bombeo Electrosumergible.	145
Tabla 22. Costos totales por mantenimiento Bombeo Electrosumergible.	146
Tabla 23. Costos totales por mantenimiento Bombeo Mecánico VSH2.	147

Tabla 24. Consumo de Energía Bombeo Electrosumergible.	149
Tabla 25. Consumo de Energía Bombeo Electrosumergible.	150
Tabla 26. Pérdidas por diferida Bombeo Electrosumergible.	152
Tabla 27. Pérdidas por diferida Bombeo Mecánico VSH2.	153
Tabla 28. Comparación Inversión.	155
Tabla 29. Comparación Valor Presente Neto.	156
Tabla 30. Comparación Dólar por Inversión.	156

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: GRÁFICAS UNCONSOLID COMPRESSIVE STRENGTH	164
ANEXO B: PARAMETROS DE YACIMIENTOS	169
ANEXO C: DISEÑOS BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	175
ANEXO D: DISEÑOS BOMBEO MECANICO VSH2	180
ANEXO E: CALCULOS ANALISIS FINANCIERO	186

INTRODUCCION

En las primeras etapas de desarrollo de un Campo se establece su magnitud y se determinan las características propias del mismo las cuales van cambiando a medida que se explota el Campo; Caño Limón es uno de los Campos más destacados de Latinoamérica por el alto nivel de producción de crudo y la calidad del mismo. Su desarrollo se realizó empleando el Sistema de Bombeo Electrosumergible como Sistema de Levantamiento Artificial debido a los altos caudales de producción y el elevado corte de agua esperado.

Debido a que los pozos que lo integran presentan una rápida declinación de la presión y una disminución considerable en los caudales de producción, en los últimos cuatro años ha sido necesario usar los equipos de Bombeo Electrosumergible a frecuencias inferiores a las requeridas por el sistema para lograr un desempeño óptimo. Y debido a que algunos de los pozos han bajado considerablemente su producción hasta el punto de ser inferior de 1.000 BFPD se han presentado problemas operacionales que han hecho ver la necesidad de evaluar el método de Levantamiento Artificial ya existente con respecto a otros sistemas que desarrollan nuevas tecnologías y se cree pueden ser una opción para continuar con la vida productiva de Caño Limón.

A partir de diciembre de 2.005 en pozos donde la declinación en la presión y la reducciones en su caudal son bastante notorias se está implementando el sistema de Bombeo Mecánico VSH2 (Variable Speed Hydraulic 2), que es un sistema de Levantamiento Artificial que se ha utilizado ampliamente en Canadá con muy buenos resultados y se esta implementando por primera vez en Colombia en el Campo Caño Limón.

El propósito del presente estudio es hacer una evaluación técnica y económica del desempeño del Sistema de Bombeo Mecánico VSH2 frente el Bombeo Electrosumergible en los pozos que por sus condiciones de operación ha sido necesaria la instalación de este nuevo Sistema de Levantamiento Artificial y de este forma poder tomar decisiones futuras sobre el cambio de Sistema de Levantamiento Artificial en éstos pozos del Campo Caño Limón.

El análisis técnico busca determinar cual de los dos Sistemas de Levantamiento Artificial ofrece mejor tratamiento a las condiciones de operación del campo como presencia de arena, bajas tasas de producción, corte de agua moderado, y bajo soporte de presión, además de comparar el software de seguimiento y diseño y los parámetros empleados por cada una de las empresas de servicio para satisfacer las necesidad de Occidental de Colombia, Inc.

El análisis económico pretende comparar los costos de inversión inicial, mantenimiento, pérdidas por producción diferida y consumo de energía para determinar la viabilidad económica del cambio de Sistema de Levantamiento Artificial, con base en datos financieros como Valor Presente Neto, Dólar por Inversión y Tiempo de Pago de la Inversión.

1. GENERALIDADES DEL CAMPO CAÑO LIMÓN

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS¹²

A finales de la década de los 70's, Occidental International Exploration and Production Corporation se vincula a Colombia mediante la firma Occidental de Colombia, Inc. (OXY), iniciando estudios y exploraciones de posibles áreas prospectivas en la región del Magdalena Medio. A comienzos de la década de los 80, OXY dirige sus operaciones al departamento de Arauca, localizado en la parte nororiental del país, zona limítrofe con Venezuela donde ya existían 61 pozos exploratorios pero con resultados despreciables (dos yacimientos con reservas totales de 20 MMB de crudo liviano y un yacimiento de 90 MMB de crudo de 13,6 API, ninguno de ellos fue comercial).

El 1 de julio de 1.980 OXY firma el contrato de Asociación Cravo Norte con ECOPETROL y se inicia la primera fase exploratoria sobre los bloques Cravo Norte, Cinaruco, Rondón, Orocué y Guarrojo de un millón de hectáreas cada uno; un reto de enormes proporciones porque OXY estaba contractualmente obligada a la devolución de un 50% de las áreas seleccionadas al final del primer año de exploración. Cuadrillas de sísmica y equipos de perforación trabajaron durante este periodo para producir 2.800Km de datos sísmicos, 19 pozos estratigráficos y 2 pozos exploratorios, dando así, respuesta a algunas de las incógnitas sobre la estratigrafía de la cuenca, la presencia de rocas sellantes y la migración de hidrocarburos.

¹ MARTINEZ, Gina y SANDOVAL, Angélica. Factibilidad de Implementación del Sistema de Bombeo Hidráulico en pozos de la formación Carbonera Superior del Campo Caño Limón. Santafé de Bogotá, 1999. Trabajo de Grado (Ingenieras de Petróleos). Universidad América.

² RIVERO R. T. y DOMINGUEZ J. G. Caño Limon Field Colombia: The Latest Giant Oil Reservoir in South America. SPE N° 15153, 1988.

En el segundo año de exploración, se continuó con los estudios sísmicos y se perforaron 10 pozos exploratorios. En cuatro de estos pozos se encontraron pequeñas cantidades de hidrocarburo en trampas estructurales y estratigráficas del borde somero de la cuenca San Joaquín. Estos descubrimientos aunque no tuvieron un valor comercial, abrieron el camino hacia el descubrimiento de Caño Limón porque probaron que las áreas retenidas por OXY tenían todos los ingredientes geológicos necesarios para dar cabida a un yacimiento de petróleo.

Finalmente el Campo Caño Limón fue descubierto luego de la perforación del pozo direccional Caño Limón 01, que inició el 20 de abril de 1.983, alcanzando una profundidad total de 10.176 pies y obteniendo una producción de crudo (31° API promedio) a una tasa promedio de 10.690 BFPD o 3.425 BOPD de la formación Mirador Inferior; lo cual dio lugar a que en Julio de este mismo año se declarara la productividad del yacimiento y en septiembre de 1.985 se estimaran las reservas del campo en un millón de barriles.

La perforación de los pozos La Yuca 1 y Matanegra 1 sobre estructuras aledañas después del descubrimiento de petróleo en el pliegue de Caño Limón, demostraron que el campo comprende tres cierres estructurales ahora identificados como las áreas productivas de Caño Limón, La Yuca y Matanegra. Este descubrimiento fue para OXY la culminación de un intenso esfuerzo exploratorio de tres años que involucro 4.000Km de sísmica, 20 pruebas estratigráficas y 12 pozos exploratorios iniciando la producción de petróleo el 7 de diciembre de 1.985.

La compañía petrolera Shell se convirtió en socio de la Asociación Cravo Norte en 1.985, con lo cual la participación quedó conformada en un 50% para ECOPETROL, 25% para OXY y el 25% restante para Shell.

En el último semestre de 1.998 Shell vendió sus acciones a OXY, quedando conformado el contrato de asociación Cravo Norte por ECOPETROL y OXY, cada uno con un 50% de participación. La duración del contrato es de 28 años que se divide en el periodo de exploración con una duración máxima de 6 años y el de producción de 22 años; al finalizar este periodo todas las instalaciones, equipos y producción restante pasan a ser propiedad de ECOPETROL sin ningún costo.

Las condiciones económicas del Contrato de Asociación Cravo Norte le aseguran al estado Colombiano el 82% de las utilidades netas generadas por el proyecto petrolero. Esta participación mayoritaria la recibe el Estado a través de ECOPETROL. Las regalías equivalen al 20% de la producción del Campo.

1.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA ³⁴

El Campo Caño Limón está ubicado dentro del área del contrato de Asociación Cravo Norte, la cual abarca un área de 260.000 hectáreas localizada en el extremo Norte de la cuenca de los Llanos Orientales de Colombia, en el Departamento de Arauca, 50Km al sur occidente de su capital y entre la población de Arauquita y el caserío La Yuca.

Geográficamente el sector Cravo Norte esta limitado al norte y al este por el río Arauca, al sur con el río Casanare y al oeste con la Cordillera Oriental.

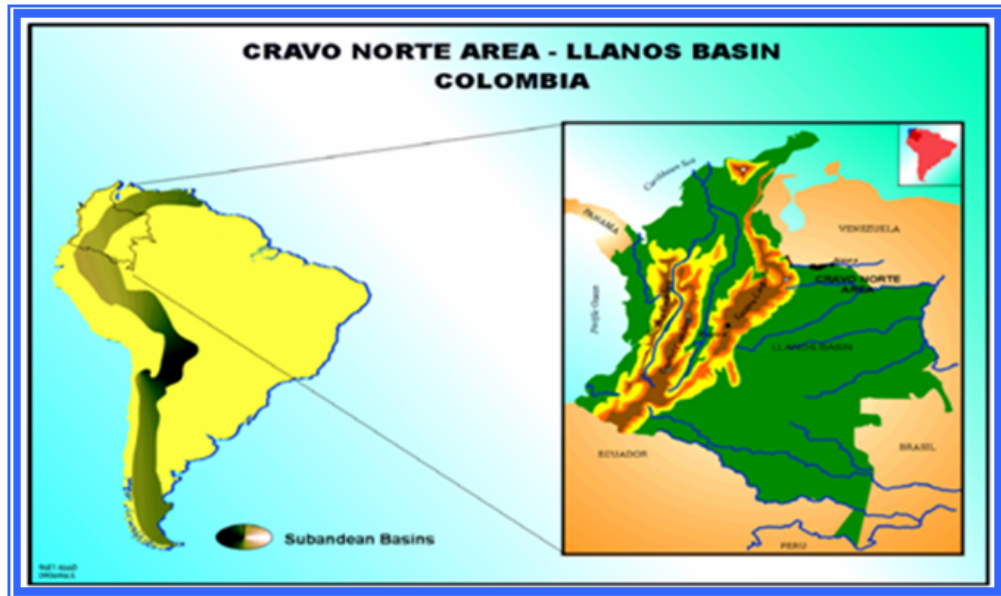
El campo se enmarca dentro de las Coordenadas Gauss con origen 3° Este:

N:	1'256.000 m	-	1'264.000 m
E:	992.000 m	-	1'004.000 m

³ GABELA, Victor H. Asociación ECOPETROL-Occidental Campo Caño Limón. Llanos Orientales de Colombia. En: II SIMPOSIO EXPLORACIÓN DE CUENCAS SUBANDINAS. Ponencias II Simposio Exploración de cuencas Subandinas. Bogotá, Agosto de 1985.

⁴ RIVERO y DOMINGUEZ, Op.Cit.

Figura 1. Localización del Campo Caño Limón.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

1.3 GEOLOGÍA⁵⁶⁷

Los yacimientos comprenden arenas deltáicas pobremente consolidadas del Cretáceo al Oligoceno, con una profundidad promedio de 7.600 pies (2.315 m) y el mecanismo de producción es un fuerte y activo empuje hidráulico natural.

1.3.1 Ubicación Geológica. El campo está situado sobre el arco de Arauca en el flanco Norte de la Cuenca de los Llanos Orientales, al norte de éste arco se encuentran las cuencas de Barinas y Apure (Venezuela), al este el escudo granítico de Guyana y al oeste la cordillera de los Andes.

⁵ AMOROCHO, Diana M. Análisis Técnico-Económico del retiro de válvulas de seguridad de fondo y panel OTIS en pozos del Campo Caño Limón. Bucaramanga, 2006. Trabajo de Grado (Ingeniera de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

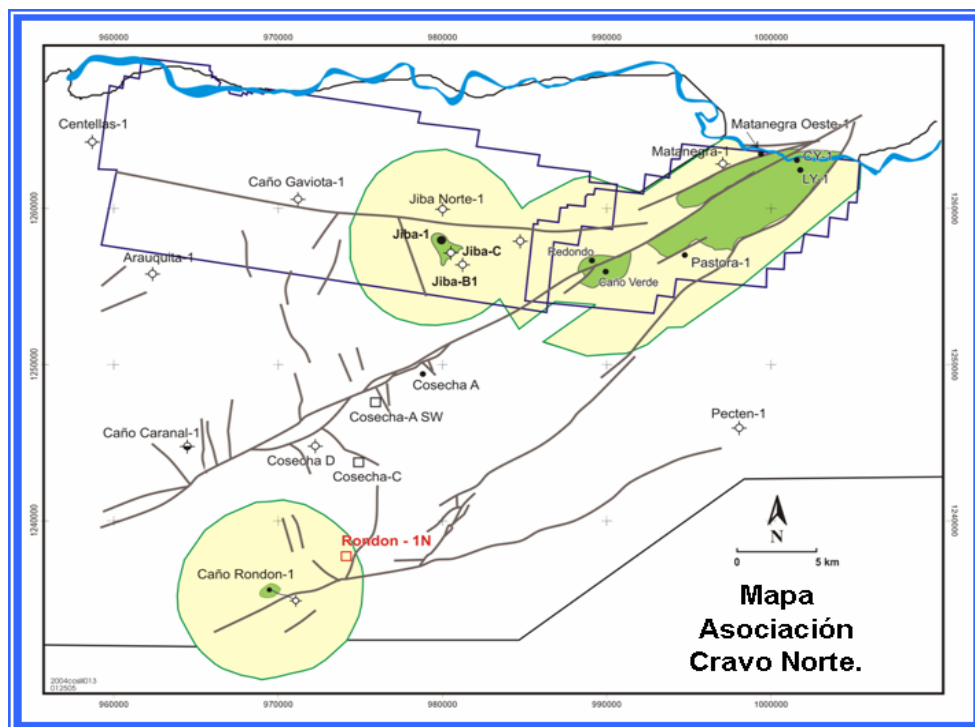
⁶ CLEVELAND, M.N y MOLINA, J. Deltaic Reservoir of the Caño Limon Field, Colombia, South América. Casebook in Easth Science, 1990.

⁷ MARTINEZ SANDOVAL, Op. Cit.

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

1.3.2 Geología Estructural. El Campo comprende tres cierres estructurales, cada uno de ellos asociado a un área productiva, denominados Caño Limón, Matanegra y La Yuca. La formación de estas estructuras se debe al movimiento lateral de la Falla Caño Limón, que secciona el Campo de noreste a suroeste y al desplazamiento asociado a las fallas convergentes de Matanegra y La Yuca, que delimitan los respectivos bloques estructurales.

Figura 2. Ubicación de los campos en el bloque Cravo Norte.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

El Campo Caño Limón se separa del Campo Caño Yarumal debido a la Falla de Arauca que es de corta extensión, corre paralela al río Arauca y une las fallas de Matanegra y La Yuca en la parte norte del Campo. Adicionalmente los Campos Redondo y Caño Yarumal se encuentran ubicados en la parte suroeste del Bloque Cravo Norte y separados gracias a la falla Caño Limón.

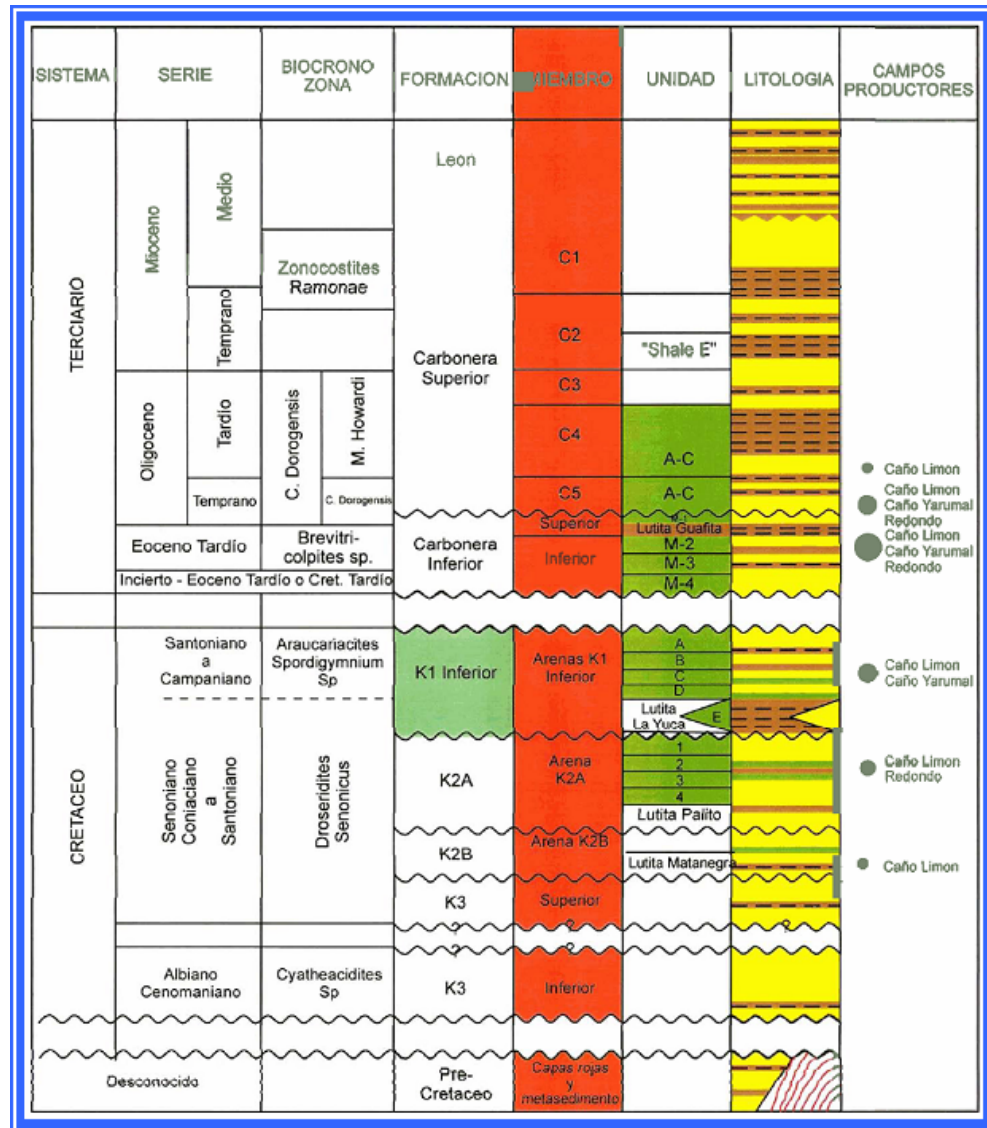
El área productiva se encuentra comprendida por 18 bloques, de los cuales: Tonina, Remana, Redondo Este, Araguato, Pastora, Caño Redondo, Cosecha A, Cosecha A, La Yuca Este y Matanegra Oeste contienen sólo un pozo, y Caño Limón, Matanegra, Caño Yarumal, La Yuca, Rondón, Cano Verde, Caricare - Redondo y Jiba contienen varios pozos. Al agrupar estos bloques se forman los 8 campos que son: Caño Limón, Caño Yarumal, Redondo, Tonina, Remana, La Yuca Este, Redondo Este y Caricare - Redondo.

1.3.3 Estratigrafía. La sección estratigráfica se extiende desde el Precretáceo al Cretáceo reciente y comprende 9.200 pies (2.804 metros) de columna sedimentaria.

Los estratos productores comprenden cuatro formaciones sedimentarias, la Formación Carbonera Inferior/Mirador de edad Eoceno de mayor relevancia en cuanto a producción se refiere debido a que contiene el 80% del petróleo total in situ del Campo, las formaciones K1, K2A de edad cretácea tardía y la formación Carbonera Superior de edad Oligoceno.

La Columna Estratigráfica de los Campos Caño Limón, Caño Yarumal y Redondo es:

Figura 3. Columna Estratigráfica del Campo Caño Limón.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Precretáceo. En general esta sección comprende areniscas y lutitas arenosas, de posible edad paleozoica. En Colombia y en especial en el campo Caño Limón la secuencia estratigráfica con interés petrolífero se analiza a partir del Cretáceo Superior y son denominadas cobertura productiva.

Cretáceo. Compuesta principalmente por areniscas finas, con alto contenido de cuarzo acompañada con intercalaciones de arcillolitas. Su espesor es superior a 400 pies (150 metros). Esta edad geológica se ha dividido en el Campo Caño Limón en cuatro unidades operacionales limitadas por discordancias que son la base del K3, K2A, K2B y K1.

Terciario. Esta sección se encuentra conformada por cuatro formaciones: Carbonera Inferior, Carbonera Superior, León y Guayabo; compuestas generalmente por areniscas arcillosas, areniscas arcósicas, cuarcíticas, por arcillolitas y algunas intercalaciones de lutitas. Su espesor promedio aproximado es de 7.600 pies.

1.3.4 Geología del Petróleo. Dentro de la geología del petróleo podemos definir:

Roca Generadora. Análisis geoquímicos realizados en muestras de petróleo del Campo Caño Limón indican que esta proviene principalmente de sedimentos marinos ricos en materia orgánica, a diferencia de los crudos producidos por otros campos ubicados en áreas cercanas en la misma cuenca. La fuente de generación de los aceites producidos en el área de Caño Limón se cree que son los sedimentos profundos hacia el oeste de la cuenca (Piedemonte Llanero) o de las cuencas vecinas de Venezuela.

Roca Almacenadora. Las unidades K1 y K2 del cretáceo y Carbonera Inferior/Mirador y superior del terciario son en general las rocas almacenadoras en el Campo.

Roca Sello. El sello del Campo esta conformado por las arcillas del la formación Carbonera Superior y por las diferentes fallas que se encuentran en esta región.

Tipo de Trampa. Las acumulaciones de aceite en el área de Caño Limón son de tipo estructural, definiéndose algunos entrampamientos sedimentarios siempre controlados por las fallas.

1.4 CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO⁸

1.4.1 Propiedades Petrofísicas del Yacimiento. La evaluación de las propiedades petrofísicas del Campo se ha llevado a cabo con un minucioso análisis de perfiles eléctricos tomados a los diferentes pozos, pruebas de rutina a los corazones disponibles para obtener porosidad y permeabilidad de las arenas y análisis especiales para determinar las propiedades dinámicas del yacimiento.

Algunas de las principales propiedades petrofísicas del yacimiento son:

Tabla 1. Propiedades Petrofísicas de Caño Limón.

CARACTERÍSTICAS DE LA ROCA	
Profundidad Promedio	7.600 pies
Área	8.900 acres
Espesor neto Petrolífero	150 pies
Presión inicial (@ 7.100 pies, BNM)	3.213 psi
Temperatura (@ 7.100 pies, BNM)	207° F
Porosidad	25%
Permeabilidad	5000 mD
Saturación de agua inicial	25%

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

1.4.1.1 Porosidad. Los valores de porosidad se han determinado a partir de la correlación establecida entre las porosidades medidas en los núcleos y las calculadas de los registros eléctricos. Las porosidades de las áreas productivas del Campo Caño Limón son altas observándose los mayores valores en la

⁸ AMOROCHO, Op. Cit.

Formación Carbonera Inferior, seguida de las arenas C5 de la Carbonera Superior y el miembro cretáceo K2, como se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2. Porosidades Promedio del Campo Caño Limón.

ÁREA	FORMACIÓN	POROSIDAD (%)
CAÑO LIMÓN	Carbonera Superior	20.6
	Carbonera Inferior/Mirador	23.8
LA YUCA	Carbonera Superior	21.3
	Carbonera Inferior/Mirador	23.8
	K1 (Cretáceo)	19.9
MATANEGRA	Carbonera Superior	25.1
	Carbonera Inferior/Mirador	26.8
	K1 (Cretáceo)	19.9
	K2 (Cretáceo)	24.6

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

1.4.1.2 Permeabilidad. Los valores de permeabilidad se han determinado basándose en análisis de presiones hechos en pruebas a la formación, pruebas de producción y análisis de corazones.

Las permeabilidades mas altas corresponden a las arenas de la Formación Carbonera Inferior, las cuales tienen un valor promedio de 5 darcys. Para las arenas K1 los valores promedio de permeabilidad son de 1 darcy, y para las arenas del K2 de 2 darcys.

1.4.1.3 Saturación de los Fluidos. Las formaciones petrolíferas de Caño Limón se encuentran a una presión superior a la presión de burbuja (50psi) y por tal razón no habrá gas libre en el yacimiento durante toda su vida productiva, sino que únicamente contendrá petróleo y agua.

La saturación de fluidos se determina con base en la evaluación de registros eléctricos, en la utilización de programas que incorporan parámetros de porosidad

y arcillosidad de los reservorios y con base en permeabilidades relativas para el sistema de drenaje, obteniendo los siguientes datos de saturaciones promedias.

Tabla 3. Saturaciones Promedio del Campo Caño Limón.

ÁREA	FORMACIÓN	SATURACIÓN DE ACEITE (%)
CAÑO LIMÓN	Carbonera Superior	67.0
	Carbonera Inferior/Mirador	76.9
LA YUCA	Carbonera Superior	74.9
	Carbonera Inferior/Mirador	76.9
	K1 (Cretáceo)	37.3
MATANEGRA	Carbonera Superior	50.0
	Carbonera Inferior/Mirador	70.4
	K1 (Cretáceo)	37.3
	K2 (Cretáceo)	73.2

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

1.4.2 Propiedades de los Fluidos. El análisis PVT muestran que los fluidos se encuentran a una presión superior a la presión de saturación, lo que indica la presencia solo de fases líquidas en la producción; por lo cual el Campo Caño Limón se clasifica como un yacimiento subsaturado.

Tabla 4. Propiedades promedias de los fluidos de Caño Limón.

CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS	
Gravedad API del petróleo	29° API
Densidad del petróleo	0.88 gr/cc
Factor Volumétrico @ 207°F y 3.200 psi	1.05 bbls/stb
Viscosidad del petróleo @ 207°F y 3.200 psi	4 cp
Presión de Burbuja	50 psi
Relación Gas-Aceite (GOR)	8 SCF/STB
Relación Agua-Aceite (WOR)	90%

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

El gas en solución medido en el laboratorio (Rs) es inferior a 15 PCN/BN. El bajo contenido de gas contribuye a la baja compresibilidad del petróleo por lo cual se espera un mínimo aporte de energía al yacimiento por expansión del petróleo. La siguiente tabla muestra el resumen de las principales características del crudo de Caño Limón.

2. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE Y BOMBEO MECÁNICO VSH2

Basados en los estudios de simulación de yacimientos realizados se determinó que el levantamiento con Bombeo Electrosumergible (ESP) era el método más adecuado de producción para ser utilizado en el desarrollo del Campo Caño Limón, principalmente por los altos caudales de producción y profundidades de las formaciones productoras.

En la actualidad el 98% de los pozos maneja el Bombeo Electrosumergible, ESP (Electrical Sumersible Pumping), cuatro usan un sistema combinado de levantamiento artificial denominado ESPCP (Bomba PCP con motor de fondo) y 9 tienen instalado el Bombeo Mecánico con dos tipos de unidad de superficie, la llamada VSH2 (Bombeo Mecánico con Unidad Hidráulica en Superficie) y la Rotafléx (Unidad de superficie con banda de accionamiento).

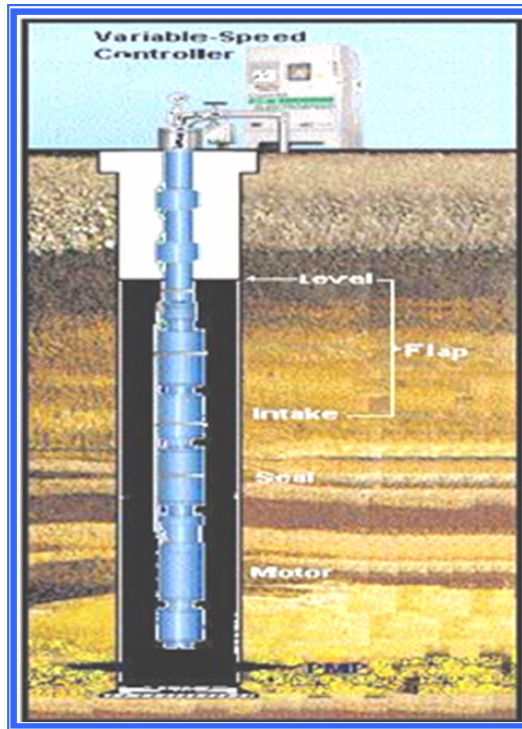
2.1 SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

El sistema de Bombeo Electrosumergible, es considerado como un sistema muy eficiente dados los resultados obtenidos en el campo desde hace ya casi 20 años, y que a pesar del problema de arena que se presenta en algunos pozos, ya están diseñados con una configuración en las bombas (AR) que ofrecen mayor duración a los desgaste abrasivos que se presentan por la arena.

Las ventajas de este sistema incluyen el manejo de altos caudales de fluido, mantenimiento rápido, permite una pronta atención a los pozos caídos y una

pronta recuperación de la inversión inicial. Se compone básicamente por dos grupos de equipos, de superficie y fondo.

Figura 4. Bombeo Electrosumergible.



Fuente: Baker Hughes - Centrilift.

2.1.1 Equipo de Superficie. Sin contar con la energía necesaria que debe ser suministrada y que no es parte directa de este estudio, el equipo de superficie lo componen transformadores para regular los voltajes necesarios y un variador de frecuencia (VSD). Los tamaños o potencia de estos equipos dependen de los parámetros de operación del equipo de fondo. Su funcionamiento básico es así: la energía que proviene de las líneas de distribución eléctrica de 13.8KV (Kilo Voltios) o 34.5KV, es reducida mediante el SDT (Step Down Transformer) a 480V que es la tensión requerida por los tableros de control.

Los variadores de frecuencia VSD, permiten que el motor trabaje a diferentes velocidades, variando la frecuencia de la corriente alterna y manteniendo la

relación Voltios/Hertz constante. Debido a que el voltaje requerido por el motor es superior al de salida del VSC, se emplea el SUT (Step Up Transformer) para elevar dicho voltaje. En Caño Limón este voltaje está entre 1000 y 3600 Voltios que es la tensión que requiere el motor de fondo para poder operar.

2.1.1.1 Generador de potencia eléctrica. Es la fuente que proporciona la potencia eléctrica necesaria para la operación del equipo de fondo. En Caño Limón existen tres fuentes de suministro de energía: ISA, la empresa Nacional y la propia generación.

2.1.1.2 Transformador reductor (SDT). Se encarga de reducir el voltaje de las líneas de distribución de alta tensión (de 13,8KV a 34,5KV) a la tensión requerida por el variador o a la entrada del controlador de frecuencia (entre 460V y 380V).

Figura 5. Transformador reductor (SDT).



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

2.1.1.3 Transformador elevador (SUT). Se encarga de incrementar la tensión que sale del variador o controlador de frecuencia al nominal requerido por el motor para que opere eficientemente (1000V – 3760V).

Figura 6. Transformador elevador (SUT)



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

2.1.1.4 Controladores del motor. Es el equipo utilizado para controlar el arranque y los parámetros de operación del motor desde superficie. Su funcionamiento permite controlar y mantener la frecuencia a la cual el operador desea que trabaje el motor de la bomba, sin necesidad de sacar el equipo de fondo.

Figura 7. Variador de Velocidad.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Existen tres tipos de controladores de motor:

Arrancador directo o swichboard (SB). Consiste en un arranque con un conjunto de circuitos en estado sólido, con protecciones por alta o baja carga, alto o bajo voltaje, fluctuaciones en la frecuencia del sistema de potencia. La potencia tanto a la entrada como a la salida tiene una frecuencia constante de 60Hz, por lo tanto el motor siempre gira a +/- 3.600rpm. Los arranques del motor son bruscos con este tipo de tablero.

Arrancador suave o soft starter (SS). Es similar a un arrancador directo en que previene también al motor de cambios bruscos en la corriente, pero está diseñado para controlar la corriente y el voltaje en los bornes del motor durante el periodo de arranque incrementando gradualmente la frecuencia, hasta alcanzar los 60 Hz nominales del sistema. Una vez encendido el motor, el SS trabaja a 60Hz.

Controlador de frecuencia variable (VSD). Una bomba electrosumergible queda limitada cuando se opera a una frecuencia fija, el controlador de frecuencia variable elimina esta restricción permitiendo variar la frecuencia y por lo tanto la velocidad de la bomba, logrando operarla en un amplio rango de caudal de acuerdo al tipo de bomba. Además de proteger el equipo de fondo contra las variaciones de voltaje del sistema, permite variar la frecuencia de salida hacia el motor y controlar la corriente, manteniendo así constante la relación Voltios/Hertz.

2.1.1.5 Caja de venteo o de conexiones (Vent Box). Cumple básicamente tres funciones: Servir de conexión eléctrica entre el cable de potencia de subsuelo con el cable proveniente del sistema de control, ventilar con la atmósfera los gases que puedan estar atrapados dentro de los cables del motor y permitir un rápido chequeo de los voltajes y corrientes para diagnóstico de los problemas en el equipo de fondo.

Figura 8. Caja de Venteo pozo CY 06.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

2.1.1.6 Cabezal del pozo. Está constituido por el conjunto de válvulas para control del pozo y otros accesorios que permiten conectar el sistema de potencia de superficie con el cable de potencia de fondo, pasándolo a través del colgador de la tubería.

Figura 9. Cabezal de pozo.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

El paso del cable a través de la cabeza del pozo debe realizarse usando sistema de sello alrededor del cable y las válvulas deben garantizar la máxima presión posible de descarga de la bomba.

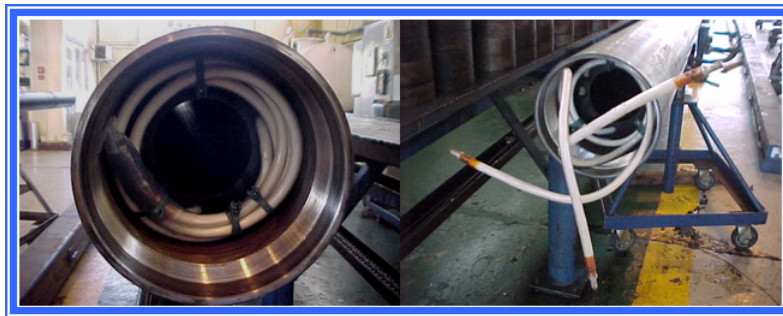
2.1.2 Equipo De Subsuelo. El equipo de fondo es el corazón del sistema Bombeo Electrosurgible y opera dentro del pozo, a la profundidad calculada del cabezal del pozo. El conjunto de subsuelo para una instalación de ESP está conformado en orden de instalación desde fondo por: Motor, Cable de Potencia, Sello o protector, Separador de Gas (si es necesario), Intake, Bomba.

2.1.2.1 Motor. Es un motor trifásico, bipolar, tipo jaula de ardilla que corre a una velocidad relativamente constante de 3500 RPM, operando con una frecuencia de 60 Hz y es el encargado de suministrar la potencia mecánica necesaria para mover la bomba y convertir la energía eléctrica en energía mecánica. El motor internamente está lleno con aceite dieléctrico que permite lubricar las partes giratorias del motor y transferir el calor generado hacia la carcasa donde es disipado por el fluido de producción; por esto es importante que el fluido de producción pase por la carcasa del motor a una velocidad mínima para que sea garantizada la refrigeración del motor.

El motor está compuesto por un eje donde se colocan pequeños rotores, sostenidos en sus extremos por una balinera, la cual soporta cualquier movimiento radial que pueda tener el rotor al girar. Este conjunto (eje y rotores) es colocado dentro del estator, el cual recibe la energía eléctrica desde la superficie, genera los campos magnéticos y a su vez el movimiento rotativo que es transmitido a la bomba. Este movimiento es transmitido hasta la bomba utilizando conectores (couplings) entre los ejes de los sellos y las bombas. El sentido del movimiento depende de la dirección de la corriente, permitiendo en un momento dado girar la bomba en sentido contrario con solo invertir el sentido de la corriente eléctrica en superficie.

Estator: Tubo metálico (housing) que en su interior tiene unos anillos o láminas perforadas de acero de bajo contenido de carbono y últimamente acero inoxidable, por las que se hacen pasar los alambres que constituyen las bobinas del motor. Es la parte externa del motor que rodea los rotores sin hacer contacto con ellos y contiene unos devanados que generan un campo magnético al hacer circular corriente por su bobinado.

Figura 10. Estator.



Fuente: Baker Hughes - Centrilift.

Rotores: Barras de cobre que forman una especie de jaula, donde se induce una corriente y se genera el movimiento al interactuar con los campos magnéticos de los devanados. Las barras están unidas por medio de láminas de acero. Cada uno de estos rotores tiene aproximadamente 12 pulgadas de largo y aporta 15HP.

Figura 11. Rotores.



Fuente: Baker Hughes - Centrilift.

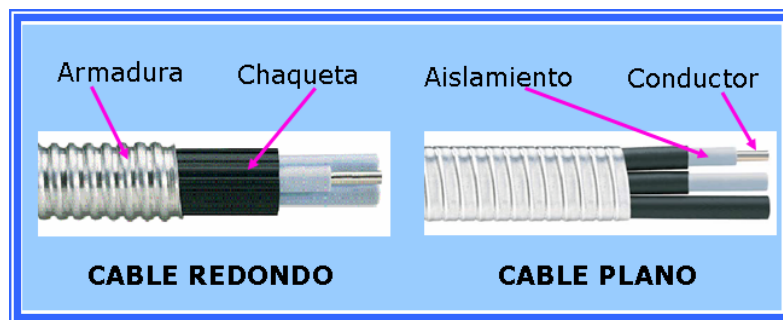
Para especificar un motor es necesario conocer además del voltaje y amperaje, su potencia, serie, número de serial y modelo.

2.1.2.2 Cable de Potencia. Es un conductor de tres fases, a través del cual se transmite desde superficie la corriente eléctrica requerida por el motor. Su selección depende del voltaje y corriente necesaria para operar el motor, de la temperatura de fondo del pozo y del nivel de aislamiento eléctrico.

El tipo de cable de potencia usado en Caño Limón es el plano hasta la “Y” tool (aproximadamente unos 80 pies), en la demás longitud se usa cable redondo número 1, los dos con resistencia de aislamiento hasta de 5kV.

Los cables de potencia tienen una *armadura* de acero galvanizado, una *chaqueta* protectora, para que las condiciones en el pozo no afecten el conductor. El *conductor* es un cable de cobre, que viene revestido de un polímero que sirve de *aislamiento*.

Figura 12. Tipos de Cable de Potencia.



Fuente: Baker Hughes - Centrilift.

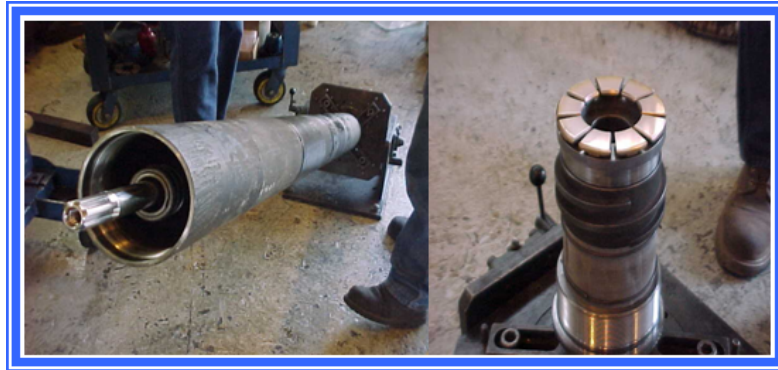
2.1.2.3 Sello o Protector. Elemento de diseño especial que se coloca entre el motor y la bomba, formado por un conjunto de cámaras las cuales contienen una serie de laberintos por donde circula un aceite dieléctrico. Sus principales funciones son:

- Conectar el motor con la bomba mediante los coupling que se colocan en los ejes del motor y la bomba.
- Soportar las fuerzas de empuje producida por las etapas de la bomba y la cabeza del fluido, para que no sean transmitidas al motor.
- Evitar que el fluido del pozo entre al motor igualando la presión del aceite con la del fluido del pozo.
- Igualar la presión dentro del motor con la del espacio anular, eliminando presiones diferenciales a través de los elementos de sello del eje.
- Absorber la expansión y contracción del aceite del motor debido al calentamiento y enfriamiento de este cuando está operando y/o está parado.

Los sellos utilizados en Caño Limón se componen de: Una bolsa elástica, sellos mecánicos, cámaras laberínticas y una cámara de empuje que absorbe las cargas axiales de la bomba que pueden dañar al motor. La denominación de los sellos está dirigida a conocer el número de cámaras que posee (de bolsa o laberínticas) y el tipo de cojinete.

El funcionamiento es así: Los fluidos del pozo hacen contacto con la bolsa elástica del sello, por la cual se regula la presión del aceite del motor; si la bolsa se rompe, un sello mecánico actúa; si este falla, el fluido entra en la primera cámara laberíntica, la cual retarda el paso hacia la segunda cámara; se encuentra otro sello, si este falla, el fluido ingresa a la segunda cámara donde también es retardado y finalmente, si se rompe el último sello, el fluido de pozos entra al motor y lo dañará irremediabilmente.

Figura 13. Sello y cámara de empuje.



Fuente: Baker Hughes - Centrilift.

Figura 14. Bolsa elástica y cámaras laberínticas.



Fuente: Baker Hughes - Centrilift.

2.1.2.4 Intake o entrada a la bomba. Es la parte que tiene contacto directo con el fluido del pozo y por la que pasa el fluido del pozo al interior de la bomba; debido a las características de turbulencia que produce el fluido a la entrada de la bomba, el intake tiene un eje debidamente soportado por bujes de alta resistencia a la abrasión que sirve para dar soporte al eje de la bomba, evitando movimientos axiales.

Figura 15. Intake.



Fuente: Baker Hughes - Centrilift.

Es importante tener en cuenta la ubicación de este dispositivo durante el diseño del equipo, ya que su posicionamiento dentro del pozo determina los cálculos de potencia necesaria para el levantamiento del crudo y la columna de fluido suficiente para que el fluido entre a la bomba por los orificios del intake, sin que se produzca el fenómeno de cavitación y de esta forma el fluido pueda ser tomado por el primer impulsor de la bomba para aumentar sucesivamente su velocidad a través de cada etapa de la bomba, traduciéndose finalmente en incremento de presión del fluido que lo haga llegar a superficie.

2.1.2.5 Bomba. Es una bomba centrífuga, con un impulsor que transfiere energía mecánica a un fluido por la acción rotativa del mismo (parte en movimiento) el cual gira dentro del difusor (parte estática). A este conjunto impulsor-difusor se le llama *etapa*.

El resumen del funcionamiento de una etapa es el siguiente: A medida que el impulsor gira, todo el fluido que entra en él es expulsado hacia afuera por acción de la fuerza centrífuga haciéndolo llegar a las paredes del difusor el cual por su

diseño hace que el fluido llegue al impulsor de la siguiente etapa, y se repita esta acción sucesivamente.

Figura 16. Etapa de una bomba Bombeo Electrosumergible



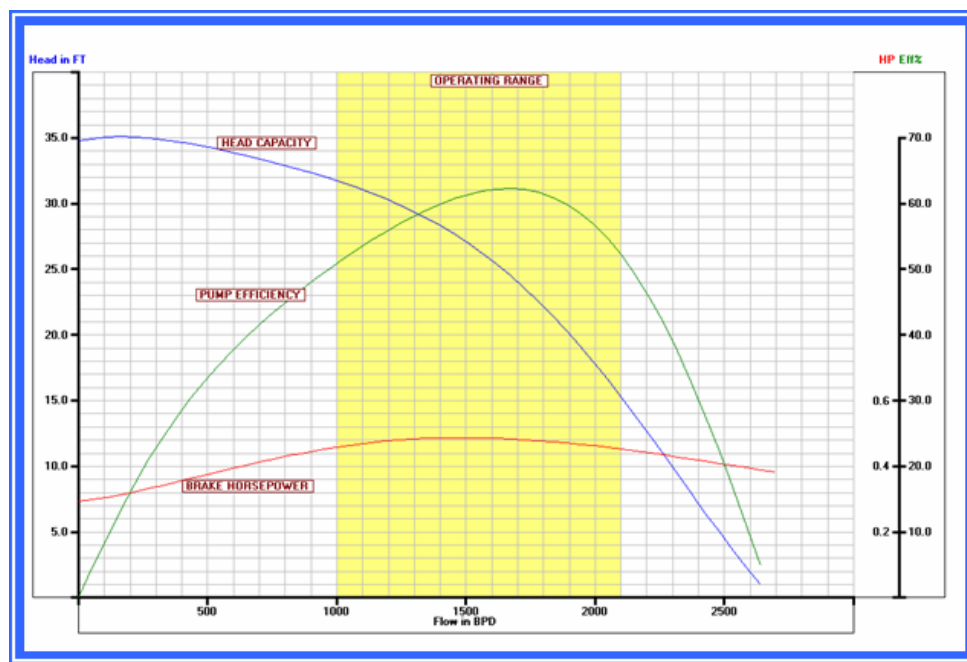
Fuente: Baker Hughes - Centrilift.

A mayor número de etapas, mayor es la presión desarrollada por la bomba, pues la velocidad inicial de la primera etapa, se incrementa a la salida de la misma, siendo en el segundo ciclo ya no cero la velocidad inicial sino una cantidad, que incrementa aún mas la velocidad del fluido, convirtiendo este incremento de velocidad en presión. En este proceso el caudal se mantiene constante porque este depende de la velocidad del motor. Las etapas donde el impulsor tiene libertad de movimiento axial con respecto al eje, se denominan *flotadoras*, mientras que en aquellas en donde el impulsor esta fijo, se denominan *compresoras*.

Bombas resistentes a la abrasión (AR). Estas bombas son soportadas radialmente instalándoles bujes especiales para atenuar la vibración producida por el desgaste de las etapas. Estos bujes son de dos cuerpos, *un hongo o sombrero* que gira con el impulsor y *un buje fijo* en el difusor.

Las bombas electrosumergibles se comportan respondiendo a una curva de rendimiento o eficiencia de acuerdo al diseño del tipo de etapa. Estas curvas se calculan a diferentes frecuencias mostrando el rango de operación y el punto de mayor eficiencia. Suministran información sobre una sola etapa de la bomba ESP, pero con base en ellas se puede calcular la cabeza entregada por toda la bomba, el caudal o capacidad, la eficiencia y otros parámetros con que debe operar.

Figura 17. Curva de rendimiento de una bomba.



Fuente: Baker Hughes - Centrilift.

Toda bomba debe diseñarse para que opere lo mas cerca al centro del tornado, donde entrega el máximo de eficiencia hidráulica y mecánica. Si una bomba opera a un caudal mayor que la del diseño se puede producir excesivo empuje hacia arriba (*up-thrust*), o por el contrario cuando la bomba opera a un caudal menor que la de diseño se puede presentar excesivo empuje hacia abajo (*downthrust*).

Para medir el rendimiento de la bomba se utiliza agua fresca (gravedad específica 1.0) como fluido, por lo tanto, para calcular la potencia de otros líquidos, esta debe ser multiplicada por la gravedad específica del fluido. La cabeza para una aplicación determinada puede ser calculada en pies, y la cabeza y capacidad deseadas pueden ser leídas directamente de las curvas sin corrección, siempre y cuando la viscosidad del líquido sea cercana a la del agua. El número de etapas requeridas se calcula dividiendo la cabeza dinámica total entre la cabeza en pies por cada etapa.

2.1.2.6 Componentes Opcionales. Son elementos que no son indispensables para la función principal que es la de bombear el crudo, su utilización depende de los requerimientos que tenga el operador y de la función específica de cada uno de estos. Los más usuales son:

Sensor de presión: Fabricado en cristal de cuarzo, constituye un elemento clave para monitorear el comportamiento de la presión del yacimiento y optimizar la operación del equipo ESP.

Válvula cheque: Debe colocarse entre 6 y 8 juntas sobre la descarga de la bomba, evita que se produzca flujo invertido cuando se detiene la bomba, lo cual causa la rotación en sentido inverso de la instalación, se recomienda para pozos profundos con baja presión de fondo. En ambientes de arena moderados evita el asentamiento de la arena sobre la bomba cuando esta se apaga.

Válvula de drenaje: Es necesario instalarla siempre que se instale una válvula cheque convencional.

Válvula de seguridad: Se instala entre 600 y 800 pies de profundidad, está normalmente cerrada, se mantiene abierta a través de una línea de control presurizada a 3000 psi, su instalación depende de los requerimientos de seguridad

del área. La válvula se cierra en el evento de que se rompa la línea de flujo o por la pérdida de presión de la línea de control.

Y-Tool: Es una conexión con derivación donde la bomba ESP se instala a un lado y por la sección recta se coloca un tapón recuperable con cable. Se recomienda su instalación siempre y cuando el diámetro del revestimiento lo permita con el tipo de bomba que se desea correr. Es ideal para tomar registros de producción y presiones de fondo con el pozo en producción.

Empaque: Permite aislar el espacio anular, se utiliza por razones de seguridad, en este caso se debe instalar en conjunto con una válvula de seguridad, en el caso de pozos profundos se utiliza para proteger el cable de los fluidos del pozo.

2.2 ANÁLISIS DE FALLAS SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE EN POZOS DE BAJO CAUDAL EN EL CAMPO DE CAÑO LIMÓN

Se ha pretendido entender la forma como se mide la confiabilidad de un sistema de tal manera que permita determinar una probabilidad medible de que el equipo trabaje adecuadamente por un tiempo determinado bajo unas condiciones operativas previamente establecidas.

Una forma dentro de la industria petrolera de tener esta probabilidad ha sido desarrollada en busca de poder predecir el tiempo esperado de operación de un equipo, la cual se ha llamado MTBF (Mean Time Before Failure) Tiempo Medio Antes de la Falla. El principal objetivo es, reducir el número de fallas en los equipos, mejorando la confiabilidad del sistema. A continuación se hace un análisis sencillo del MTBF.

2.2.1 Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF)⁹¹⁰. Earl B. Brookbank, ingeniero de la compañía Baker Hughes-Centrilift hizo una presentación a la SPE Workshop en mayo de 1996, titulada: “How Do You Measure Run Life”, (¿Cómo mide usted el Tiempo de Vida?) donde explica como el mejor método estadístico para medir el tiempo de operación esperado o tiempo medio entre fallas de los equipos de Bombeo Electrosumergible. Es un estudio estadístico que explica cómo fueron aplicadas las teorías de Herd and Jonson al bombeo electrosumergible.

Con base en el anterior trabajo, los Ingenieros Rafael Lastra y Armando Rueda de Occidental de Colombia, Inc. hicieron una adaptación del modelo de análisis de supervivencia desarrollado por Brookbanks al campo Caño Limón. Este método ha sido aplicado durante los últimos 19 años de producción del campo para el cálculo del MTBF. Sin duda las teorías estadísticas a lo largo del tiempo se han revaluado, pero de igual manera debido a que los datos históricos no son fáciles de cambiar, se ha mantenido este sistema, previa confirmación de que las nuevas teorías y métodos tienen muy poco valor agregado en el cálculo del desempeño de los equipos de bombeo electrosumergible.

La definición estadística general del MTBF es:

$$MTBF = \frac{\textit{Tiempo real de funcionamiento}}{\textit{número de fallas}} \quad (2.1)$$

Donde:

Tiempo real de funcionamiento: Es el tiempo real de funcionamiento de los equipos, dentro de un período de tiempo (preferiblemente mayor a diez años) que

⁹ BROOKBANK, E. B. y BEBAK, K. Dando Sentido al Tiempo Medio Antes de la Avería (MTBF, sigla en inglés) y otras estadísticas de Vida Útil. Baker Hughes-Centrilift. 2003.

¹⁰ LASTRA, Rafael y RUEDA, Armando. Estimating MTBF Using Survival Analysis Techniques. En: 1997 ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMA WORKSHOP. Houston, Texas. 1997.

significa, el tiempo de equipos en funcionamiento menos el tiempo de equipos fallados. Esto quiere decir que a diferencia de otros métodos estadísticos como el promedio, la mediana, etc, este sistema tiene en cuenta el tiempo que los equipos se mantienen trabajando.

Número de fallas: Es la suma total de fallas ocurridas en el campo, a causa del no funcionamiento de uno de los elementos del sistema electrosumergible. En este punto se aplica la norma de datos censurados y no censurados que se explica mas adelante.

La ecuación 2.1 se puede escribir de la siguiente manera:

$$MTBF = \frac{\text{tiempo de equipos corriendo}}{\# \text{ de fallas}} + \frac{\text{tiempo de equipos parados}}{\# \text{ de fallas}} \quad (2.2)$$

La primera parte de esta ecuación determina la vida promedio de los equipos que están corriendo. La segunda, la vida promedio de los equipos que han fallado.

La segunda parte es muy fácil de calcular, pues se conoce el día de instalación de un equipo y el día de la falla. La primera parte de la ecuación no es tan fácil de estimar, pues no hay una relación entre las fallas de los equipos de todo un campo y el tiempo de funcionamiento de los equipos que no han fallado. Debe existir un factor entre las unidades corriendo y el número de fallas de todo el campo que no se conoce. Hay que recordar que esta ecuación es para todo el campo o toda la población de la muestra de datos dentro del tiempo escogido de análisis.

En este punto se aplicaron las diferentes teorías estadísticas. El método consiste en clasificar de manera ascendente los tiempos de operación $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i, \dots, t_N$ para N equipos en una muestra, y dentro de un período de tiempo establecido, donde se incluyan datos censurados y datos fallados.

Los datos censurados corresponden a los equipos que se removieron por alguna razón diferente a la falla de uno de sus componentes, es decir que la falla no es atribuible al equipo ESP. Por ejemplo: rediseño, reacondicionamiento del pozo, abandono, operación inapropiada, daño en la tubería, instalación inapropiada y condiciones inesperadas del pozo.

Los datos no censurados o fallados hacen referencia a los equipos que se sacaron del pozo como consecuencia de una falla de alguno de sus componentes (bomba, motor, sello o cable) ya sea mecánica o eléctrica.

Para cada uno de los tiempos se definen varias funciones estadísticas como:

- Distribución acumulada de fallas.
- Relación recursiva de falla.
- Probabilidad Condicional
- Función de Confiabilidad

Finalmente, con todas estas funciones definidas se aplican a la ecuación para calcular el MTBF:

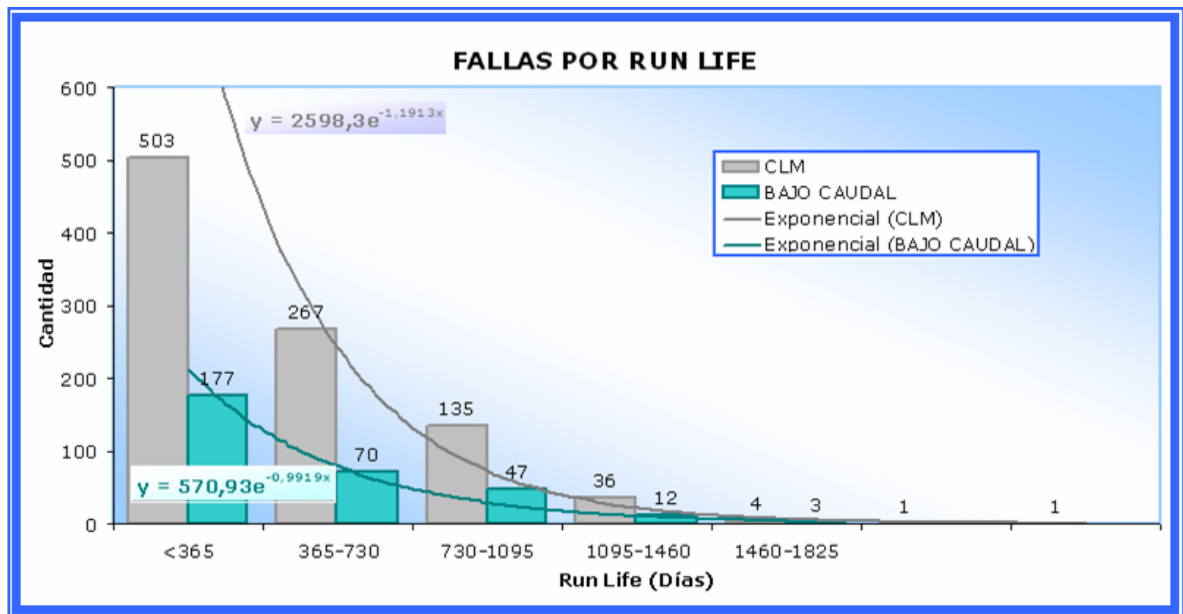
$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt \approx \sum_{i=1}^N R(t_{i-1})(t_i - t_{i-1}) \quad (2.3)$$

Para aplicar éste método solo es necesario tener información del tiempo de operación de cada uno de los equipos y un identificador que determine si el dato es censurado o no. En Caño Limón el tiempo de operación se considera como tiempo real de funcionamiento pues el sistema Scada, por radio, permite tener el control exacto del tiempo de funcionamiento del equipo, medido en minutos, traducido a fracciones de hora del día.

La información utilizada para hacer el análisis que aquí se expone, se obtuvo de los registros de los pulling e instalaciones existentes en el archivo *Artificial Lift Failures (ALS)* que se maneja en la compañía. Se tomaron los registros de los equipos instalados durante el periodo de tiempo del 01 de enero de 1996 al 31 de diciembre de 2005. En total se encontraron 950 equipos extraídos, en 274 pozos fallados en el período indicado. La base de datos además indica: fecha de instalación, fecha de pulling, tiempo corrido, razón de pulling, componente de ESP fallado, descripción de la falla.

Con el propósito de conocer la diferencia entre los equipos de bajo caudal y todos los demás, se graficaron los datos de fallas en los pozos instalados durante el periodo de tiempo mencionado.

Figura 18. Cantidad de fallas por Run Life.



Fuente: MACHETE, E. Y.

En la gráfica anterior se puede ver la tendencia exponencial de los datos, observando que el comportamiento de los equipos instalados en Caño Limón comparados con los equipos instalados de bajo caudal son similares.

El cálculo del MTBF para los pozos de bajo caudal utilizando una macro en Excel, es de 727 días, el cual comparado con el MTBF de todo el campo de 742 días nos podemos dar cuenta de la diferencia que se presenta en estas cifras implica que los pozos de Bombeo Electrosumergible en pozos de bajo caudal incrementan el gasto del mantenimiento por la necesidad de mayores cambios de equipos ESP con los servicios asociados para realizar esta labor.

2.2.2 Análisis de fallas equipos Bombeo Electrosumergible de Bajo Caudal.

Se define bajo caudal a los pozos que han trabajado con equipos de producción entre 450 y 6,100 BFPD.

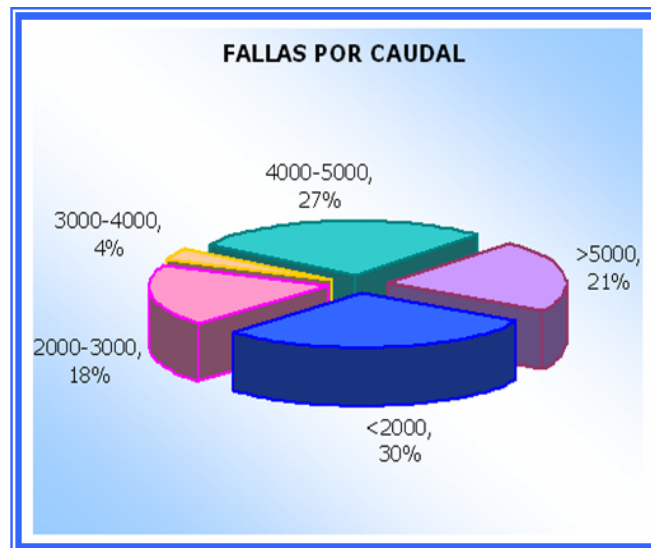
En el análisis de fallas a los equipos de bajo caudal que han funcionado durante los últimos diez años de producción del campo Caño Limón (Enero de 1996 a Diciembre de 2005), se encontró que de los 274 pozos que han fallado, hay 146 que manejan bajo caudal, lo cual representa el 53.28% del total de fallas en el Campo Caño Limón y dentro de esta población la mayor cantidad de fallas se han presentado en aquellos que tienen instalados equipos con capacidad de manejar caudales inferiores a 2000 BFPD.

En busca de soluciones para mejorar la rentabilidad de la extracción del crudo en los pozos de caudales inferiores a los 2,000 BFPD, que representan el 30% de las fallas en equipos de bajo caudal y optimizar la energía necesaria para este proceso, en la compañía se planearon la realización de pruebas de otros sistemas de bombeo.

Pruebas con el sistema PCP de varillas y las ESP-CP, mezcla de motor de electrosumergible con PCP, fueron realizadas extensamente en Caño Limón, pero dos factores no permitieron el éxito. El primero la profundidad a la que debían trabajar las PCP que hacían muy frágil la sarta de varillas y en el caso de las ESP-CP el elastómero de las bombas PCP no funcionó. En el segundo caso algo que

dificulta la instalación y prueba de este sistema es que solo una compañía ofrece los tres componentes principales: motor de ESP, reductor de velocidad y bomba PCP.

Figura 19. Fallas por Caudal.



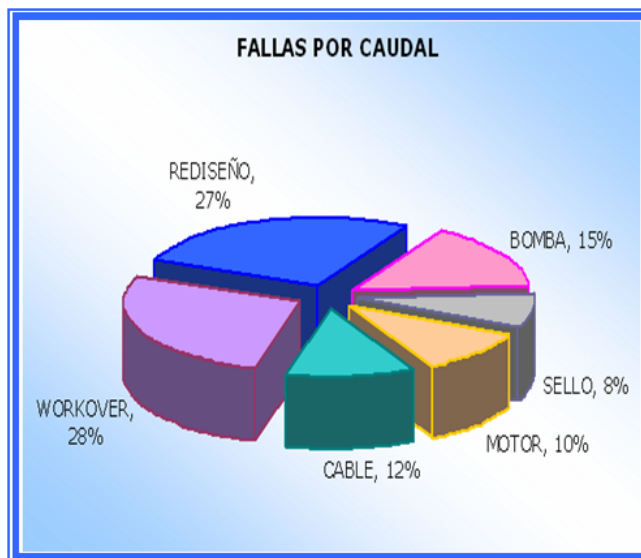
Fuente: MACHETE, E. Y.

Finalmente, después de estos ensayos se realizaron las primeras pruebas con el Bombeo Mecánico reemplazando el sistema de Bombeo Electrosumergible.

Al analizar las causas de las fallas de los pozos con caudales inferiores a 2,000 BFPD, como se muestra en la figura 20, el 45% de fallas son causadas por fallas eléctricas o mecánicas, las primeras generalmente en el motor y/o al cable y las segundas en la bomba o en el sello, sin descartar que también se puede presentar falla mecánica en el motor.

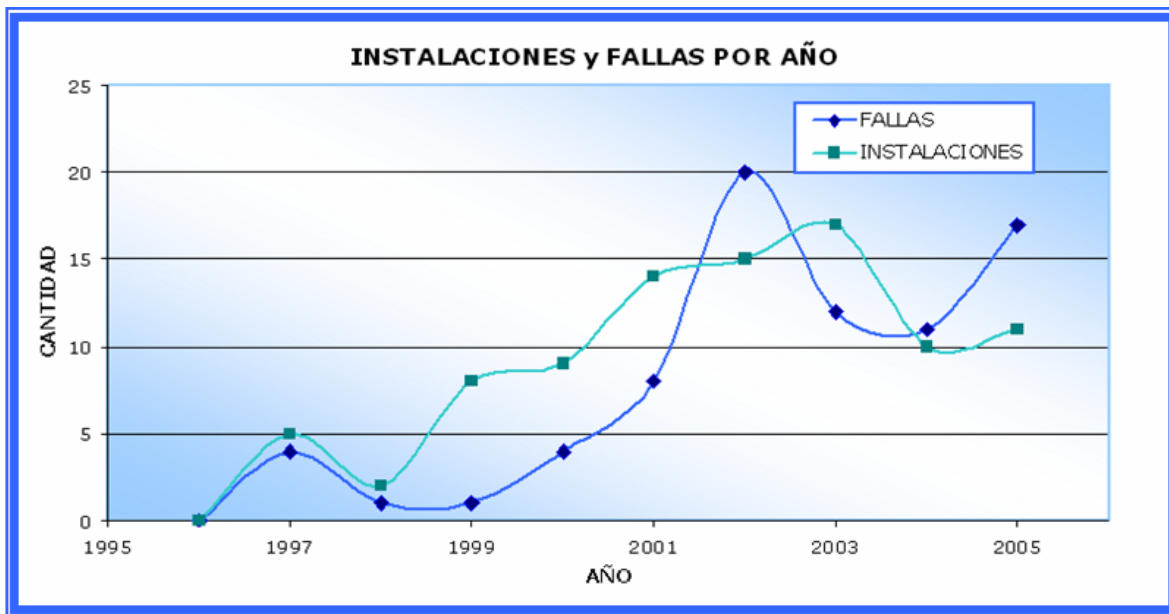
En la figura 21 se puede observar una tendencia de incremento en las instalaciones y fallas, lo cual demuestra la necesidad de implementar otro sistema de levantamiento artificial que de mejores tiempos de vida y resultados a los obtenidos mediante el uso del Sistema de Bombeo Electrosumergible.

Figura 20. Causas de fallas caudal menor a 2000 BFPD.



Fuente: MACHETE, E. Y.

Figura 21. Instalaciones y fallas caudales inferiores a 2000 bbls.



Fuente: MACHETE, E. Y.

2.2.3 Fallas en la bomba. Las fallas en la bomba generalmente ocurren por: bajo caudal que se maneja, producción de arena que genera desgaste abrasivos, o por el largo tiempo de funcionamiento. Específicamente se observa:

- Desgaste de la arandela de empuje descendente debido a la producción por debajo del máximo límite hidráulico de eficiencia de la bomba.
- Desgaste de las etapas a causa de la producción de material abrasivo como la arena.
- Taponamiento de las etapas por depósito de arena.
- Rotura del eje, por mala operación al tratar de desbloquear la bomba cuando se tiene “bomba pegada”.
- Rotura del eje por arranque de la bomba sin que la columna de fluido en la tubería se haya detenido después de una parada.
- Baja eficiencia debida al tiempo de vida de la bomba.

2.2.4 Fallas en el motor. Las fallas en el motor ocurren habitualmente por falla eléctrica causada generalmente por:

- Insuficiente fluido en movimiento para refrigerar el motor. La velocidad recomendada del fluido del pozo debe ser de 1 ft/sg.
- Mal dato de gravedad específica del fluido de pozo para el diseño, causando excesiva carga en el motor.
- Desgaste de la Bomba que causa vibración y genera fugas en el sello o protector permitiendo que los fluidos del pozo entren al motor.
- Fallas en los equipos de superficie que controlan el motor.

2.2.5 Fallas del sello o protector. Las fallas del sello o protector pueden ocurrir por las siguientes razones:

- Desgaste de los sellos mecánicos del sello por vibración de la bomba y/o rompimiento de las partes cerámicas de los mismos.
- Servicios inapropiados en la instalación de la unidad.
- Numerosos ciclos de trabajo del sello, haciendo que las cámaras se contaminen.

2.2.6 Fallas en el Cable de Potencia. Las fallas en los cables suceden por daño mecánico de su protección exterior causando corto eléctrico entre sus fases.

- Daño interior en los empalmes debido a la compresión o descompresión del pozo.
- Deformación debida a la sobre tensión del cable por mal manejo.
- Enroscamiento del cable.
- Ambientes a altas temperaturas.
- Equivocada escogencia de carga de amperaje en el cable.

2.2.7 Factores externos. Los problemas operaciones pueden ser causados también por factores que aunque no son parte del equipo de fondo, influyen en el funcionamiento del sistema de levantamiento artificial haciendo que se reduzca el tiempo de vida del equipo, estos factores son:

- Instalación defectuosa por malos procedimientos.
- Equipo Imperfecto o por debajo de las normas de calidad.
- Tormentas Eléctricas, ocasionando daños en los transformadores y el controlador del motor.
- Sistema Eléctrico defectuoso. El desfase entre la corriente no balanceada de las fases no debe exceder el 5%.
- Desaciertos en los parámetros de yacimientos que se emplearon para hacer el respectivo diseño.
- Condiciones de pozo como insuficiente fluido en movimiento o altas temperaturas.

2.3 SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

Como se ha explicado anteriormente la necesidad de implementar un nuevo sistema de extracción para pozos de bajo caudal, llevó a Occidental de Colombia, Inc. a realizar un estudio de mercado local, para conocer los sistemas alternativos que se podían obtener. Por medio de una licitación fueron invitadas las compañías que tenían estos productos, y finalmente se determinó usar un sistema nuevo o de poco desarrollo en nuestro medio. Este sistema es el de Bombeo Mecánico asistido por Hidrógeno llamado VSH2. A diferencia de las unidades convencionales su escogencia se hizo por: precio, facilidad de instalación y funcionamiento.

El sistema de Bombeo Mecánico VSH2 (Variable Speed Hydraulic 2) es un sistema de levantamiento artificial que ha utilizado ampliamente en Canadá con

muy buenos resultados y se esta implementando por primera vez en Colombia en el campo Caño Limón, desde diciembre del 2005, en pozos donde la declinación en la presión y la reducciones en su caudal son bastante notorias, lo cual limitan el uso del sistema de Bombeo Electrosumergible.

Este nuevo sistema de levantamiento artificial tiene como ventajas el manejar una mezcla de tecnología neumática (nitrógeno) con tecnología hidráulica, por medio de tres piezas móviles (Acumulador de presión, Cilindro hidráulico y Bomba Hidráulica). Capacidad para manejar mayores cargas en la barra que las unidades convencionales, rápidos cambios de Strokes por minuto (SPM), flexibilidad en su aplicación, reducción en consumo de energía, fácil preparación de la instalación y mantenimiento y funcionamiento con bajos niveles de fluido llegando hasta un flap de cero.

2.3.1 Equipo de Superficie. El principio de funcionamiento de la unidad VSH2, esta asociado con el empuje ascendente - descendente, generado por pistones hidráulicos. A diferencia de las unidades tradicionales que poseen varios elementos pesados y de difícil control.

El sistema de superficie de una unidad VSH2 tiene:

- Un sistema de Nitrógeno con alta presión.
- Un cilindro hidráulico No.1 cargado por la parte superior con nitrógeno. Su función es la de hacer de contrapesa, cuando la sarta de varillas vaya en carrera ascendente. Se llama Acumulador de presión.
- Bomba hidráulica que inyecta por debajo del pistón No.1 fluido hidráulico, solamente al momento del arranque y tiene como función servir de amortiguador de la sarta en la carrera descendente.

- Segundo pistón No.2 el cual es accionado directamente por la bomba hidráulica y suministra las fuerzas ascendentes y descendentes.

Su funcionamiento básico es así: el motor proporciona potencia de impulsión a la bomba hidráulica, la cual presiona el sistema con aceite hidráulico, llevando esta presión a los pistones.

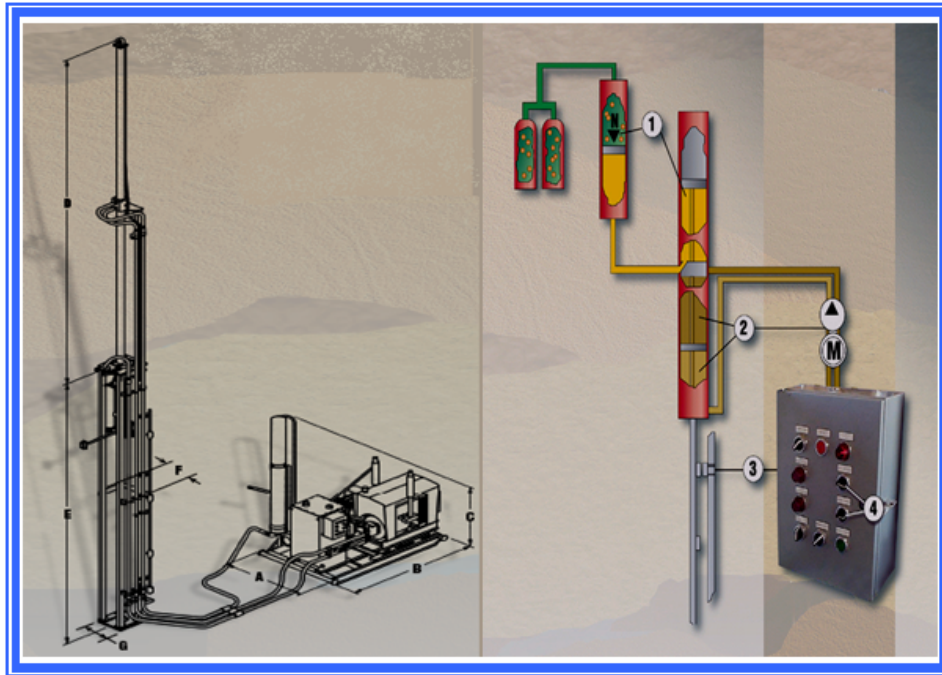
En el pistón No.1 se ingresa aceite y nitrógeno los que proporcionan el contrapeso necesario para el movimiento oscilante de la barra lisa, la sarta de varillas y la bomba.

El pistón No.2 conectado directamente a la bomba, es alimentado con aceite, por encima y por debajo del pistón por medio de mangueras de alta presión. Válvulas electromagnéticas cambia el sentido del aceite en el pistón No.2, lográndose que vaya en sentido ascendente y descendente.

Los recorridos y el número de viajes por minuto se calibran con los tiempos de cambio en las válvulas hidráulicas. Las carreras se gradúan en los topes de la barra lisa. La barra lisa y el cabezal aseguran una superficie de sellamiento, que se logra por medio de prensa estopas de fabricación especial.

Las unidades hidráulicas utilizadas en Caño Limón son modelo 150, las cuales manejan un stroke de mínimo 72 y máximo 150 pulgadas, un máximo de SPM de 7, tamaño del cilindro No.2, de 4 pulgadas y soportan hasta 40,000 libras de presión. Las distancias especificadas en la figura 2.19 para esta clase de unidad son: A=61"; B=102"; C=57" (para transporte), C=74" (para pozos desviados), C=115" (para pozos verticales); D=255"; E=254.5"; F=26" y G=18.5".

Figura 22. Unidad hidráulica VSH2.



Fuente: Weatherford Colombia Ltda.

El equipo de superficie está compuesto por: El motor eléctrico, que acciona el sistema de aceite hidráulico, el acumulador de presión, la bomba hidráulica, el tanque de aceite, la unidad de bombeo como tal y el cabezal de pozo.

2.3.1.1 Motor Eléctrico. La carga del motor es cíclica, es decir, la demanda de potencia es alta durante el recorrido ascendente, cuando la Sarta de Varillas y el peso del fluido han sido levantados y prácticamente no se requiere entrada de potencia durante el recorrido descendente, cuando las varillas caen por su propio peso.

La clase de motor utilizado en Caño Limón es el NEMA D, que tiene un deslizamiento alto del 5%-8% y un torque de arrancada del 275% del torque con carga total.

Figura 23. Motor Eléctrico.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

El parámetro más importante es el torque de salida el cual, a una velocidad de cero, debe ser suficiente como para arrancar la Unidad de Bombeo. La corriente de salida del motor se incrementa con torques de salida más grandes. La eficiencia eléctrica del motor varía en un gran intervalo y tiene su punto máximo a la velocidad nominal y disminuye a la velocidad sincrónica.

2.3.1.2 Acumulador de presión. Es un cilindro con un pistón interno, el cual en su parte superior contiene nitrógeno y en la parte inferior aceite hidráulico, el nitrógeno provee la presión necesaria para amortiguar el peso en la carrera descendente y aportar potencia hidráulica en la carrera ascendente, logrando con esto disminuir hasta en $2/3$ la energía requerida para levantar el peso sobre la barra pulida.

El acumulador se llena de nitrógeno colocando una de las botellas a la entrada para el suministro del mismo y manteniendo abierta la válvula hasta que cese el paso de gas, este procedimiento se debe repetir con todas las botellas y el acumulador hasta alcanzar una presión de 1,500 psi.

Si el acumulador tiene demasiado aceite, el cilindro no podrá completar la carrera descendente cuando la unidad esté en operación; pero si por el contrario, no tiene suficiente aceite hidráulico, el cilindro usará más presión en la carrera ascendente que en la descendente. La cantidad óptima de aceite es entre 15 y 18.75 galones.

Figura 24. Acumulador de presión.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

2.3.1.3 Botellas de Nitrógeno. Son cuatro recipientes para almacenar el nitrógeno que requiere la unidad para su funcionamiento.

Figura 25. Botellas de Nitrógeno.

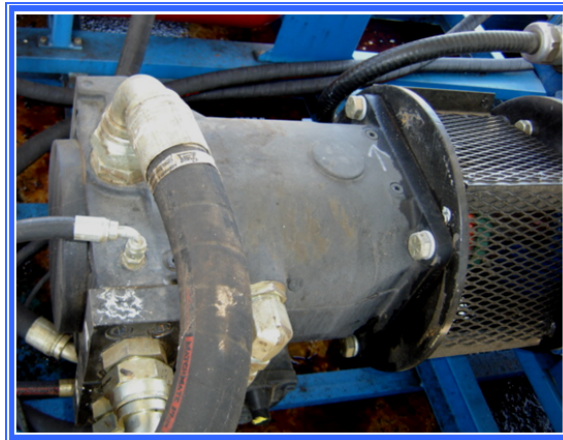


Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Para llenar las botellas de nitrógeno se deben cerrar las válvulas de los cilindros y el alimentador del acumulador, conectar la nueva fuente de nitrógeno a una de las botellas hasta su llenado, después se debe repetir este procedimiento con las botellas restantes y por último, abrir las cuatro válvulas para igualar las presiones alrededor de 1,500 psi.

2.3.1.4 Bomba hidráulica. Se encarga de aportar la potencia necesaria por debajo al segundo pistón No.2 en carrera ascendente y por encima en carrera descendente. El sentido de empuje del aceite hidráulico sigue la dirección que le indica la servo válvula ubicada en la bomba, la cual recibe señales de los sensores de proximidad ubicados en el mástil, cambiando con esto el sentido de la carrera.

Figura 26. Bomba Hidráulica.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

2.3.1.5 Tanque de aceite. En este recipiente se almacena el aceite que es el fluido hidráulico encargado de hacer el empuje necesario en la carrera ascendente y descendente. La temperatura de éste aceite nunca debe exceder los 150°F.

Figura 27. Tanque de aceite.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

2.3.1.6 Mástil o Unidad de Bombeo. Es un acople mecánico que guía el movimiento ascendente–descendente suministrado por el cilindro No.2 para operar la bomba de fondo que esta unida a la sarta de varillas y la barra pulida. Una unidad de bombeo diseñada apropiadamente tiene el tamaño exacto en su estructura y de carrera para producir el fluido que se desea obtener.

Las características deseables de la unidad de bombeo son: Recorrido ascendente lento y largo; el recorrido descendente puede ser más rápido, teniendo cuidado con la velocidad de caída libre de las varillas en los fluidos del pozo; bajos factores de torque en el recorrido ascendente que reducen el consumo de energía y bajas aceleraciones de la barra lisa el comenzar el recorrido ascendente originando cargas máximas bajas.

El Instituto Americano del Petróleo (API) ha desarrollado un método para designar las unidades de bombeo, así:

X – XXX – YYY – ZZZ

Donde,

Tabla 5. Nomenclatura API para Unidades de Bombeo Mecánico.

SÍMBOLO	NOMBRE	EJEMPLOS
X	Tipo de Unidad	C: Convencional M: Mark II A: Balanceada por aire
XXX	Capacidad de la caja de engranaje	En miles libras-plg
YYY	Capacidad de la estructura	En cientos de libras
ZZZ	Longitud máxima de la carrera	En pulgadas

Fuente: GONZALEZ, Henry. Bombeo Mecánico para Ingenieros. Bogotá, Colombia. 2006.

La compañía que presta éste servicio no tiene una descripción API para éstas unidades, las describen como: VSH2-150. Las principales partes de la unidad de bombeo son:

Guaya: Alambre de acero compacto que sirve de sostén al sistema de levantamiento (elevador y sarta de cabillas). Ver figura 28 (No.1).

Elevador: Es el encargado de sujetar la sarta de cabillas con el sistema de guayas conectado al cabezote. Ver figura 28 (No.2).

Espaciador: Espacio que existe desde la parte inferior del elevador y la placa de referencia en donde se ubica el equipo dinagráfico. Ver figura 28 (No.3).

Figura 28. Guaya, Elevador y Espaciador.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Barra Lisa: Es una barra de acero sólido que tiene conexiones en ambos extremos para las varillas de bombeo. Es la barra más fuerte de toda la sarta, por lo tanto es más grande que el tamaño de la sección superior de varillas. Sus funciones son transmitir el movimiento de bombeo a las varillas y permitir la formación de un sellamiento contra las fugas de los fluidos del pozo, por lo que su superficie externa es pulida.

Los componentes de las cargas en la Barra Lisa son: El peso de la Sarta de Varillas, la fuerza de flotación que hace disminuir el peso de las varillas, las fuerzas de fricción del fluido y mecánicas en toda la Sarta de Varillas, las fuerzas dinámicas que ocurren en la sarta y el peso del fluido sobre el émbolo de la bomba.

La suma del peso de la Sarta de Varillas y la Fuerza de Flotación es el “Peso Neto” de las Varillas. Los efectos de fuerzas de fricción son difíciles o imposibles de predecir por lo que generalmente no se tienen en cuenta. Las fuerzas

Dinámicas sobre la Barra Lisa se encuentran mediante la aplicación del modelo de la masa concentrada. Las Fuerzas Inerciales se calculan mediante el método del “Factor de Aceleración” de Mills que tiene en cuenta la masa y la aceleración de la barra lisa.

Figura 29. Barra Lisa.

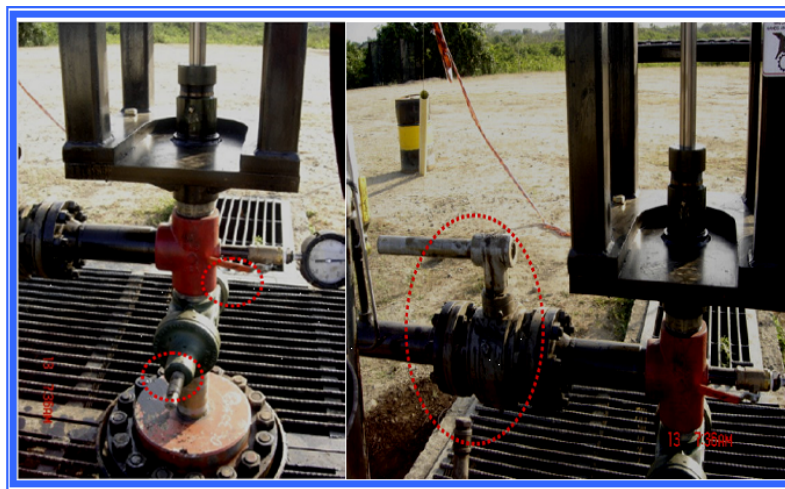


Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

2.3.1.7 Cabezal de Pozo. La Barra Lisa se mueve dentro del cabezal de la tubería de producción, sobre el cual se instala la tee de bombeo y ésta a su vez hacen que los fluidos producidos por la bomba vayan dentro de la línea de flujo, una válvula cheque se instala sobre ésta línea para evitar que los fluidos ya producidos se devuelvan al pozo.

Sobre la Barra Lisa se instala una abrazadera a una altura adecuada para permitir que la Barra Portavarillas levante la Sarta de Varillas. El Prensaestopas se instala justo por encima de la tee de bombeo y su objetivo es evitar la fuga de fluidos del pozo alrededor de la Barra Lisa, es importante ajustar periódicamente el hermetismo de los anillos de empaque para evitar la fuga y no apretarlos tanto para evitar las fuerzas de fricción que surgen en la Barra Lisa.

Figura 30. Cabezal de pozo Unidad Hidráulica.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

2.3.2 Equipo de fondo¹¹¹². El equipo de fondo del Sistema de Bombeo Mecánico VSH2 al igual que los Sistemas de Bombeo Mecánico tradicionales esta compuesto por: La sarta de varillas compuesta por las varillas de succión que proporciona el acople mecánico entre la bomba de subsuelo y el equipo de superficie, la bomba de subsuelo y el sistema de anclaje que permite mantener la tubería de producción en tensión.

¹¹ GONZALEZ, Henry. Bombeo Mecánico para Ingenieros. Bogotá, Colombia. 2006.

¹² TAKÁCS, Gábor. Bombeo Mecánico Moderno. Bucaramanga, Santander – Colombia. Consultarías y Servicios Integrados de Ingeniería Ltda.

2.3.2.1 Sarta de Varillas. Proporciona el vínculo entre la Unidad de Bombeo en superficie y la Bomba de Subsuelo, su función principal es transmitir el movimiento oscilatorio de la barra pulida a la bomba para proporcionarle la potencia necesaria para que ocurra la producción. La sarta de tiene un impacto mayor en el comportamiento del sistema, varillas afecta las cargas en la barra pulida y la caja de engranaje, consumo de energía, torque en la caja de engranaje, carrera de fondo y frecuencia de fallas en las varillas. Su resistencia, vida útil y fuerzas friccionales tiene gran impacto en la economía de un pozo.

Las varillas generalmente son fabricadas 100% acero. Existen sartas parcialmente en acero y fibra de vidrio, las cuales son utilizadas en locaciones con problemas de corrosión, para reducir cargas en la unidad de bombeo, para evitar comprar unidades excesivamente grandes o para incrementar la tasa de producción. La longitud de varillas más común en acero es 30 pies y en fibra de vidrio es 37.5 pies, por lo cual las segundas reduce el número de acoples y hace que la sarta sea más ligera.

Figura 31. Sartas de varillas en sus empaques.



Fuente: Weatherford Colombia Ltda.

Las varillas utilizadas en Caño Limón son tipo Electra debido que el empleo de varillas de fibra de vidrio se ve limitado por que la temperatura en el campo es de 210F y la máxima temperatura de diseño que admiten es de 200F. Las varillas Electra son fabricadas con acero de gran resistencia, debida a que la parte exterior es sometida a un proceso de tratamiento con calor (endurecimiento por inducción) y la parte interna a compresión obteniendo como resultado una varilla capaz de resistir hasta 50M Lpc, independientemente del rango de esfuerzo.

Para disminuir costos y cargas tensionales generalmente la sarta de varillas se diseña de forma telescópica (diámetros mayores son colocados en el tope), esta clase de diseño es la que se está utilizando actualmente. Otra opción de diseño son las barras de peso (varillas de diámetro mayor en el fondo de la sarta) utilizadas para contrarrestar la fuerza de flotación y minimizar la compresión de las varillas en la base de la sarta.

2.3.2.2 Bomba de subsuelo. Trabaja sobre el principio de desplazamiento positivo y son del tipo cilindro-pistón de la bomba.

Figura 32. Bomba de subsuelo.



Fuente: GONZALEZ, Henry. Bombeo Mecánico para Ingenieros. Bogotá, Colombia. 2006.

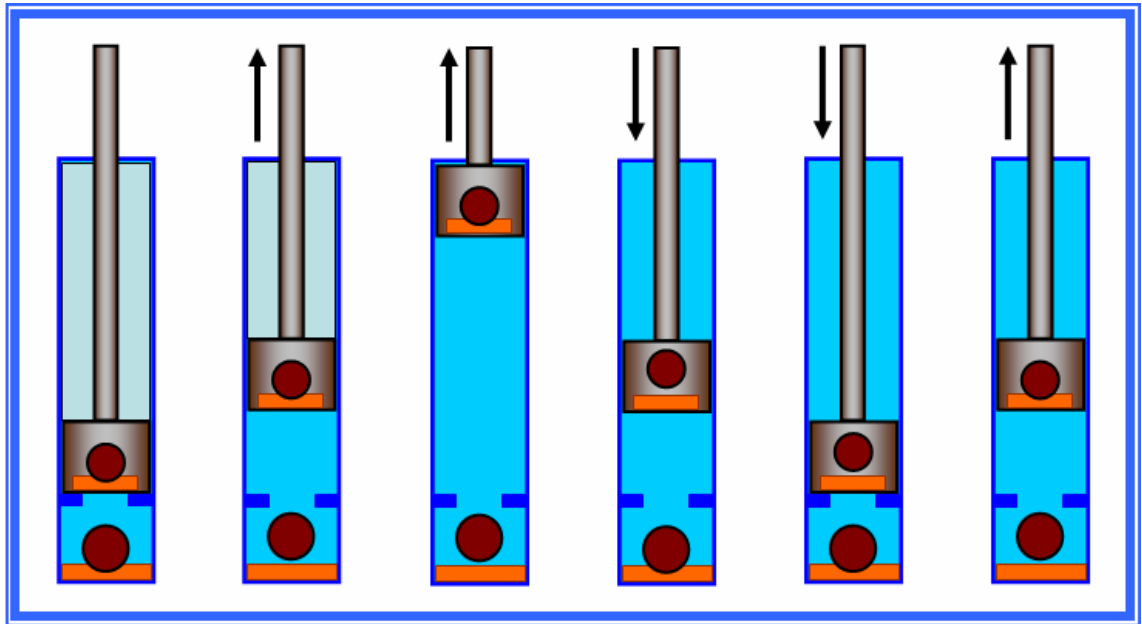
Sus partes básicas son el Barril de Trabajo (cilindro), el émbolo (pistón), las dos Válvulas de bola (la válvula viajera se encuentra en el pistón y la válvula fija a la entrada del cilindro) y la zapata (mecanismo de sello).

La operación de la bomba influye en las cargas sobre la sarta de varillas, la unidad de bombeo, la caja de engranaje y el motor. La selección de la bomba adecuada incrementa la eficiencia del sistema y extiende la vida útil del equipo, generalmente una bomba grande con velocidades de bombeo bajas incrementan la eficiencia del sistema.

La operación de una bomba mecánica, asumiendo que está llena de fluido incompresible tal como fluido muerto o agua, lleva los siguientes pasos:

- Para el caso ideal de bomba totalmente llena, en la carrera ascendente la válvula viajera se cierra debido a la presión hidrostática que ejerce el fluido que está dentro de la tubería, éste fluido es levantado hasta la superficie durante el movimiento ascendente del pistón, la presión cae en el espacio que existe entre las válvulas viajera y fija haciendo que ésta última se abra permitiendo que la presión en la cara del pozo haga que el fluido de la formación llegue al barril. Es importante notar que en esta parte todo el peso de la columna hidrostática es soportado por el cilindro y la sarta de varillas.
- Después de que el cilindro alcance su punto máxima, la sarta de varillas empieza a bajar, la válvula viajera se y la fija se cierra debido a la incompresibilidad del líquido contenido en el barril. Cuando se abre la válvula viajera ésta se libera de la carga de fluido y la presión del mismo se transfiere a la tubería a través de la válvula fija.
- Al final del recorrido descendente, la dirección del movimiento de la sarta de varillas se invierte y empieza otro ciclo de bombeo.

Figura 33. Ciclo de Bombeo.



Fuente: MACHETE, E. Y.

Básicamente existen tres tipos de bombas: De tubería, insertables y de revestidor, pueden ser pared gruesa o delgada. Las bombas de tubería son utilizadas para altas tasas de producción en pozos poco profundos, las insertables son las más populares debido a que son fáciles de instalar y reparar y las bombas de revestidor exigen pozos verticales.

El Instituto Americano del Petróleo (API) ha desarrollado un método para designar las bombas de subsuelo de doce caracteres de en la especificación API 11AX, así:

XX - XXX - X₁ X₂ X₃ X₄ X₅ - X - Y

Donde,

Tabla 6. Nomenclatura API para Bombas de Subsuelo Bombeo Mecánico.

SÍMBOLO	NOMBRE	EJEMPLOS
XX	Tubería de Producción.	15: 1,9 pulg OD 20: 2 3/8 pulg OD 25: 2 7/8 pulg OD 30: 3 1/2 pulg OD
XXX	Diámetro de la bomba	125: 1 ¼ pulg 150: 1 ½ pulg 175: 1 ¾ pulg 178: 1 25/32 pulg 200: 2.0 pulg 225: 2 ¼ pulg 250: 2 ½ pulg 275: 2 ¾ pulg
X ₁	Tipo de Bomba	R: De varillas T: De tubería
X ₂	Tipo de Barril	Bombas con pistón de metal: H: Pared Gruesa W: Pared Delgada Bombas de pistón de empaque suave: S: Pared Delgada P: Pared Gruesa
X ₃	Localización del anclaje	A: Tope B: Fondo T: Fondo, barril viajero
X ₄	Tipo de anclaje	C: Copas M: Metálico
X ₅	Longitud del barril	En pies
X	Longitud nominal del pistón	En pies
Y	Longitud total extensiones	En pies

Fuente: GONZALEZ, Henry. Bombeo Mecánico para Ingenieros. Bogotá, Colombia. 2006.

Las bombas utilizadas en Caño Limón son insertables de pared gruesa, dentro de las bombas insertables encontramos tres tipos: Bombas de barril estacionario ancladas en el fondo, Bombas de barril viajero ancladas en el fondo y Bombas de barril estacionario ancladas en el tope. El tipo de bomba utilizado en el campo Caño Limón es la de Barril estacionario anclada en el fondo debido a que el barril estacionario está agarrado a la tubería en la parte inferior del conjunto de la

bomba haciéndola especial para grandes profundidades como las de Caño Limón, aunque es recomendado no usar en pozos que produzcan arena debido a que la arena acumulada entre la bomba y la tubería puede atascar la bomba.

2.3.2.3 Sistema de anclaje. Es un niple de asentamiento que se ajusta al anillo de fricción o bronce de la bomba, formando un sello hermético entre el fluido del pozo y su función es impedir que la tubería de producción se estire y contraiga durante el ciclo de bombeo debido a la carga variable a la que está sometida. El estiramiento de la tubería reduce el recorrido del pistón disponible para levantar los fluidos dando como resultado la reducción en el desplazamiento de la bomba, además durante la carrera ascendente sufre un pandeo haciendo que la tubería se doble alrededor de las varillas, por debajo de cierta profundidad.

La cuña del ancla de la tubería de producción que se aparece en la figura 34 ofrece las ventajas de las anclas de tensión y compresión. Se coloca con una rotación a la izquierda y se recupera con una rotación opuesta. Cuando se coloca la cuña del ancla, permite un tensionamiento apropiado de la tubería para evitar completamente el pandeo. La fuerza requerida en superficie sobre la sarta de tubería se calcula a partir de la tensión que existiría entre la tubería de producción durante el recorrido descendente como si la tubería estuviera suspendida libremente en el pozo.

Figura 34. Ancla de tubería tipo copas.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

2.4 PROBLEMAS OPERACIONALES DEL SISTEMA BOMBEO MECÁNICO VSH2¹³

Como hasta el momento sólo se han realizado seis instalaciones es muy complicado hacer un análisis detallado de las causas de fallas en la utilización del Bombeo Mecánico VSH2 como método de levantamiento artificial porque no se tienen suficientes datos para hallar tiempo de vida medio antes de falla y hacer cálculos estadísticos. Sin embargo, analizando los inconvenientes que se han presentado hasta el momento en los pozos que tienen instalado éste método de Levantamiento artificial, se puede concluir que los problemas operacionales más frecuentes se presentan por causa del manejo de arena y problemas de operación. Los daños operacionales pueden ser los siguientes:

2.4.1 Fallas en la Unidad de Bombeo. Las fallas que presenta la Unidad de Bombeo a lo largo de su vida útil están relacionadas con problemas operacionales de fácil solución como:

- Alta presión en la carrera ascendente, como consecuencia de falta de nitrógeno o aceite en el acumulador.
- Alta presión en la carrera descendente, causada por mucho aceite en el acumulador o alta presión de nitrógeno en el acumulador.
- Pérdida de presión en el acumulador, debido a que la válvula de drenaje del acumulador se encuentre abierta, posibles pérdidas de nitrógeno, pérdidas de sello en el pistón superior del mástil o en el acumulador causadas por fugas en la línea de retorno del tope de la unidad al tanque o existencia de aceite hidráulico en las botellas de nitrógeno.

¹³ WEATHERFORD ARTIFICIAL LIFT SYSTEMS. VSH2 Set-Up & Operating Manual.

- Alta temperatura del aceite, por bajo nivel de aceite en el tanque o mal flujo de aire en el ventilador.
- El cilindro no cambia de dirección, a causa de fallas en los sensores de cambio de carrera, en el temporizador de carrera y/o en el tablero electrónico.
- El cilindro no es capaz de levantar la sarta debido a baja presión en el acumulador o a que la válvula de torque no está debidamente ajustada.
- No se pueda llenar el acumulador, ya que la presión en las botellas de nitrógeno es superior a la presión de operación de la bomba.

2.4.2 Fallas en las varillas. Las fallas en las varillas pueden ser ocasionadas fundamentalmente por:

- *Fatiga:* Son progresivas y empiezan como grietas pequeñas por esfuerzo que crecen bajo la acción de las fuerzas cíclicas y ocurren con esfuerzos más bajos que la fuerza de rotura del material.
- *Tensión:* Ocasionadas por excesivo esfuerzo de las varillas cuando se aplica gran fuerza de arrastre, ocurren generalmente en el cuerpo de las varillas debido a la reducción de su diámetro.
- *Mal manejo:* Diseño inadecuado, procedimientos incorrectos de preservación y manejo, procedimientos descuidados de enrosque y desenrosque, prácticas operativas desactualizadas o cualquier combinación de estos elementos.
- *Conexiones:* Lubricación inadecuada, enrosque inadecuado, demasiada fuerza de apriete y desgaste de golpeteo de tubería o cualquier combinación de estos elementos.

- Contacto con el tubing en pozos desviados o con alto dog-leg.

2.4.3 Fallas en la Bomba de Subsuelo. Las fallas en la Bomba de Subsuelo ocurren habitualmente por el manejo de arena y el bajo soporte de presión que tienen los pozos que manejan caudales pequeños, algunos casos son:

- Empaquetamiento de la Bomba de Subsuelo.
- Desgaste en la válvula fija o viajera a causa del manejo de arena.
- Golpe de fluido a causa del bajo soporte de presión del pozo.
- Mal llenado de la Bomba.

2.4.4 Factores externos. Para el sistema de Bombeo Mecánico VSH2 también los existen factores que influyen en el funcionamiento del sistema de levantamiento artificial sin ser parte del equipo de fondo, estos factores son:

- Instalación defectuosa debida a malos procedimientos de instalación.
- Equipo Imperfecto o por debajo de las normas de calidad.
- Tormentas Eléctricas causando daños en los equipos electrónicos como el motor, la bomba o el ventilador.
- Desaciertos en los parámetros de yacimientos que se emplearon para hacer el respectivo diseño.
- Condiciones de pozo como bajo nivel causando golpe de fluido.

3. FACTORES QUE AFECTAN EL DISEÑO DE LOS MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN

El petróleo en el caso del campo Caño Limón se encuentra en una roca de arena denominada arenisca, que consiste en granos de arena consolidados entre los cuales se encuentra el petróleo. Dentro de estos granos existen los denominados poros y es allí donde se encuentra el petróleo o crudo. Al hacer el diseño de cualquier método de levantamiento artificial se deben tener en cuenta parámetros de yacimiento y de la historia de producción del campo para garantizar que el funcionamiento del sistema empleado durante su producción del pozo sea el más óptimo posible. Las características de mayor influencia en el momento de hacer los diseños son:

3.1 PROPIEDADES DEL YACIMIENTO

Dentro de las propiedades del yacimiento que tiene gran influencia en el diseño del Sistema de Levantamiento Artificial, ya sea Bombeo Electrosumergible o Bombeo Mecánico VSH2 son:

3.1.1 Corte de Agua y gravedad API. El corte de agua es el porcentaje de agua del volumen total del fluido en la superficie del pozo no en el yacimiento, y está directamente relacionado con la densidad del fluido, pues entre mayor corte de agua, mayor densidad y por tanto mayor peso de la columna hidrostática que el sistema debe levantar hasta superficie. Es importante tener en cuenta que la densidad también es función de la temperatura y la presión.

La Gravedad API es función de la Gravedad Específica (relación entre la densidad del fluido y la del agua pura tomadas bajo condiciones estándar) que se utiliza para caracterizar los fluidos de yacimiento, así:

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{\gamma} - 131.5 \quad (3.1)$$

Para el sistema de Bombeo Electrosumergible el peso de la columna de fluido influye considerablemente en el diseño porque incrementa o disminuye el trabajo que debe hacer la bomba y por tanto el sistema para llevar el fluido a superficie. En el caso de Bombeo Mecánico VSH2 el peso de la columna hidrostática recae sobre el cilindro y las varillas en la carrera ascendente haciéndolo un factor de vital importancia para elegir el diseño de la sarta de varillas ya que por seguridad del sistema su carga no debe superar el 90% y poder de ésta forma asegurar una mayor vida útil.

3.1.2 Índice de productividad. Este es un factor que controla el paso de los fluidos desde el yacimiento hasta el pozo, e indica la capacidad del pozo para producir, depende de: la permeabilidad efectiva, espesor de producción, viscosidad del fluido, factor volumétrico del líquido, radio de drenaje y radio interno del pozo. Este dato se calcula de la siguiente manera.

$$q = PI(P_R - P_{wf}) \quad (3.2)$$

Se grafica como una línea recta sobre el diagrama Tasa contra Presión, en la cual los puntos finales de la línea PI representan la Presión Promedio del Yacimiento (P_R) a una capacidad de flujo de cero y el porcentaje potencial máximo a una presión de fondo de cero o AOF (Absolute Open Flow Potencial), que representa la tasa de flujo si la presión de fondo se puede reducir a cero.

El Índice de Productividad es un factor de gran importancia en el desarrollo de los diseños para cualquier sistema de levantamiento artificial, ya que de él y la presión depende la tasa de fluido que se puede sacar de la formación y por tanto el caudal de diseño.

3.2 PRESIONES DE FONDO

La Presión Promedio del Yacimiento se puede considerar como un valor constante durante largos periodos de tiempo y es la misma presión de fondo, medida en un pozo cerrado. La presión de fondo muestra la distribución de presión en el yacimiento alrededor de un pozo productor. La diferencia entre las dos presiones es conocida como Draw Down, si la presión estática es mayor que la presión de fondo fluyendo los fluidos salen de la tubería y entran a la roca.

Si el Draw Down es grande, el fluido sube con gran velocidad y arrastra con lo que encuentre en su camino, en este la arena del yacimiento ocasionando erosión en la bomba de cualquiera de los dos sistemas de levantamiento.

La presión es un factor de gran influencia en el diseño de los sistemas de levantamiento Artificial, ya que directamente de ésta depende la cantidad de sumergencia con que se pueda contar. Para el caso del sistema de Bombeo Electrosumergible, se requiere de bastante sumergencia para que el motor se mantenga refrigerado por el constante flujo periférico de fluido y de esta manera evitar la cavitación en las bombas al obtener la cantidad de extracción óptima. Para el caso del Bombeo Mecánico VSH2 la presión garantiza que no exista golpe de fluido y que el llenado de la bomba sea más eficiente, sin embargo, este sistema es capaz de operar hasta con una sumergencia de cero pies.

3.3 CONDICIONES DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

Cada uno de los dos sistemas de levantamiento artificial manejan características diferentes, determinadas especialmente por la presión del yacimiento, el corte de agua y la viscosidad. Por lo tanto, en el momento de hacer los diseños, se deben tener en cuenta otros factores de que afectan el funcionamiento del pozo:

Estado mecánico del pozo. El sistema de Bombeo Mecánico VSH2 opera en condiciones óptimas hasta ángulos de 60°, mientras que el de Bombeo Electrosumergible es capaz de manejar ángulos hasta de 90°.

Profundidad de asentamiento. Debido a que la profundidad promedio de los pozos en el campo Caño Limón es superior a 6.000ft el sistema de Bombeo Mecánico VSH2 puede manejar caudales únicamente hasta 500 BFPD, debido a la capacidad de carga del equipo.

Tubería de Producción. En el campo se utiliza tubería de 3.5", 4.5" y 5.5" de diámetro nominal lo cual limita el tamaño de la Bomba y varillas para el Bombeo Mecánico VSH2.

Frecuencia de operación. La frecuencia óptima de operación de las Bombas Electrosumergibles es de 60Hz, en tanto que el Bombeo Mecánico VSH2 opera dentro de los mejores parámetros a 7,5 SPM.

Presión de Yacimiento. El sistema de bombeo mecánico no necesita gran soporte de presión debido al sistema de succión de la bomba, en tanto que, el de Bombeo Electrosumergible necesita soporte de presión que permita tener una mínima presión de cabeza positiva, que impida la cavitación de la bomba por presencia de vacíos al dársele al fluido una gran velocidad.

Carga en los equipos. La máxima carga sobre la Unidad de Bombeo Mecánico VSH2 permitida es 40,000lbs, la carga sobre las varillas de máximo 95% y la

máxima longitud del stroke de 150in. Lo anterior limita la capacidad de trabajo a gran profundidad, y caudales grandes. Las cargas máximas para el sistema de Bombeo Electrosumergible son las permitidas desde el punto de vista de diseño mecánico. Generalmente se trabajan al 100% de su capacidad en busca del mejor rendimiento del equipo.

3.4 FACTORES EXTERNOS QUE AFECTAN DISEÑO DEL LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

Otros factores que afectan los dos Sistemas de Levantamiento Artificial, son:

Profundidad de la bomba. Que tiene relación directa con la sumergencia y la cantidad de fluido deseado. Para el caso del Bombeo Mecánico VSH2 limita la sarta de varillas a utilizar debido a la carga máxima permitida en la unidad. Ésta profundidad depende de la desviación del pozo, ya que no se debe sentar en partes donde el dog-leg sea mayor a 1.

Intervalo cañoneado. Es de vital importancia para asignar la profundidad de la bomba.

Diámetro nominal de la tubería de producción. Determina el diámetro de la bomba para el Bombeo Mecánico VSH2. Para el caso del Bombeo Electrosumergible esta limitante está determinada por el diámetro interno del casing del pozo y por las pérdidas de fricción requeridas para obtener una cabeza dinámica total acorde con la potencia disponible en el motor de fondo.

Presión de descarga en cabeza de pozo. Es la presión que debe colocar el sistema de levantamiento, cualquiera que sea, para vencer la presión del sistema de recolección en superficie, de tal manera que el fluido extraído pueda llegar a los tanques de almacenamiento.

Producción de sólidos. Campos como Caño Limón donde la producción de sólidos es importante, hacen que la frecuencia de operación de los sistemas, cualquiera que se utilice, sea un factor importante ya que si se opera con valores altos se puede arenar el pozo, y si por el contrario, se opera a frecuencias muy bajas se pueden dañar los equipos de bombeo electrosumergibles por baja lubricación o tener sistemas muy costosos que no producen lo esperado desde el punto de vista económico.

4. ANTECEDENTES OPERACIONALES DEL CAMPO CAÑO LIMÓN

Con la firma de la extensión del Contrato de Asociación Cavo Norte hasta el límite económico del yacimiento en el segundo trimestre del año pasado, la compañía Occidental de Colombia, Inc. inició una intensiva exploración sísmica y por con ésta una constante campaña de perforación.

Gracias a lo anterior, actualmente se cuentan con 353 pozos productores, de los cuales 148 se encuentran en el área La Yuca, 65 en Caño Yarumal, 51 en Matanegra, 36 en Caño Limón, 16 en Caño Verde, 13 en Rondón, 11 en Jiba, 9 Redondo y 4 en otras áreas secundarias.

La producción diaria promedio de crudo del campo asciende a 100,000 barriles de aceite, que corresponden aproximadamente a 2.8 millones de barriles de fluido diarios que implican un corte de agua promedio del 96.25%. Para el tratamiento del crudo se cuenta en con dos facilidades de producción PF-1 y PF-2 (Production Facilities 1 y 2). Ver figura 35.

La separación del crudo, sólidos y agua es natural no forzada y se lleva a cabo mediante tanques FWKOS, (Free Water Knock Out), que traduce tanques de agua libre. De allí el crudo libre de agua y un alto porcentaje de arena es llevado a unos equipos llamados WEMCOS (nombre del fabricante) que hacen una separación recircular del agua y el aceite, es decir, que se puede repetir varias veces hasta obtener las partes por millón de aceite en el agua aceptadas por las normas de control ambiental.

Este aceite es enviado a los tanques de almacenamiento para luego ser bombeados a través de la estación de bombeo PS-1 (Pump Station 1) por el

Oleoducto Caño Limón – Coveñas. Por otra parte el agua de producción separada, sigue su proceso de tratamiento para ser vertida a los esteros La Conquista y La Hermosa con un contenido aproximado de 5 a 10 ppm (partes de aceite por millón de crudo).

Figura 35. Facilidades de producción PF-2.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

4.1 ANTECEDENTES OPERACIONALES POZOS DE BAJO CAUDAL

Debido a los múltiples problemas presentados con el bombeo electrosumergible en los pozos que manejan caudales inferiores a los 1.000 barriles de fluido diario, se optó por el Bombeo Mecánico VSH2, ya que este modelo está acorde con los caudales donde se puede tener problemas potenciales con la utilización del

bombeo electrosumergible. Para analizar esto se hace necesario analizar los antecedentes operacionales de los pozos donde se han utilizado los dos sistemas.

Actualmente se encuentran en producción 32 pozos que manejan caudales entre 50 y 1.000 barriles de fluido diarios completados en la formación Carbonera Superior y distribuidos en los diferentes campos: 17 en La Yuca, 5 en Matanegra, 5 en Caño limón, 3 en Caño Yarumal y 2 en Rondón.

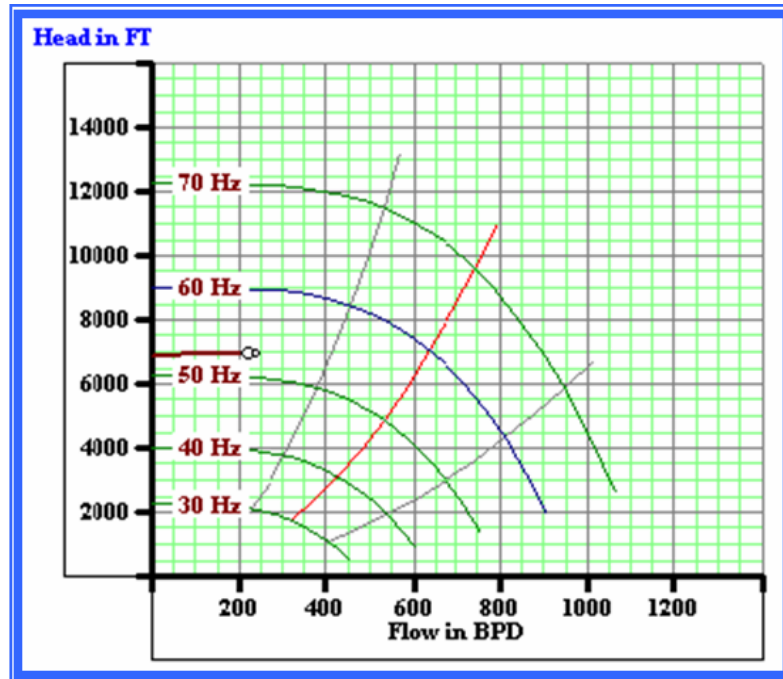
Si hacemos una distribución de los 32 pozos por el corte de agua, tenemos: 7 con corte de agua inferior a 10%, 9 entre 10 y 50%, 8 entre 50 y 80% y los 8 restantes por encima del 80%. Los 16 pozos que tiene corte de agua inferior a 50% son de gran interés por la alta producción de aceite, buscando un sistema de levantamiento con el que puedan funcionar de forma continua y no presentar fallas constantemente.

4.1.1 Sistema de Bombeo Electrosumergible. Los pozos de caudales inferiores a 1,000 BFPD generalmente tienen bajo soporte de presión, por lo tanto el uso del Sistema de Bombeo Electrosumergible se ve limitado en su aplicación por varias razones:

- Velocidad del fluido: los bajos caudales implican una baja refrigeración en el motor y la demanda de chaquetas de enfriamiento, lo cual hace los equipos de mayor diámetro restringiendo su uso de acuerdo al casing que esté instalado.
- Utilización obligatoria de bombas de series pequeñas (400 generalmente) las cuales tienen el diseño tipo “pancake” que no maneja bien los sólidos presentes en el campo y se atascan fácilmente.
- Escogencia de equipos en el área de diseño del empuje descendente que hace que el equipo se destruya con gran velocidad. La figura 4.2 muestra el punto de

operación de un equipo pequeño en empuje descendente fuera del rango de eficiencia, es decir, debido al sobre dimensionamiento del equipo.

Figura 36. Operación equipo de Bombeo Electrosumergible sobredimensionado.



Fuente: Baker Hughes - Centrilift.

Los pozos con caudales inferiores a 1.000 BFPD por el carácter inconsolidado de la formación Carbonera Superior y por las altas caídas de presión operadas han presentado tendencia a dos situaciones adversas para el bombeo electrosumergible: la producción de arena y acumulación de la misma en las bombas y a pobre refrigeración del motor por los bajos caudales manejados.

Estos factores representan un problema para la vida útil del equipo de Bombeo Electrosumergible, especialmente en los pozos que presentan bajos caudales de producción y bajas presiones de formación.

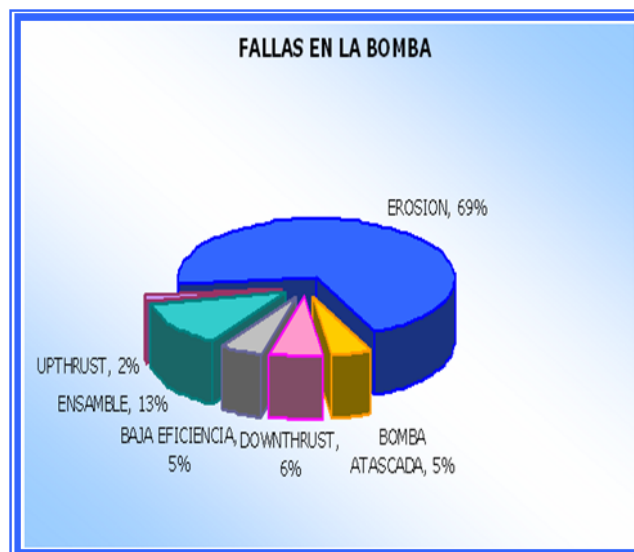
La producción de arena ha ocasionado desgaste axial y radial en las etapas de la bomba, produce vibraciones que afectan las unidas sellantes en las cámaras

permitiendo que el fluido del pozo entre al motor y provoque corto en el sistema eléctrico del mismo.

Como se pudo ver en el segundo capítulo y de acuerdo a los datos obtenidos de los FAR (Failure Analisis Report) sobre el estado de los equipos de Bombeo Electrosumergible recuperados en Caño Limón que han fallado manejando bajos caudales, la causa raíz de los daños es la bomba, aunque los elementos fallados en varias ocasiones hayan sido los motores o sellos.

En la figura 37 se puede observar que los daños en la bomba, durante el período de tiempo estudiado, se deben principalmente al desgaste erosivo ocasionado por la alta producción de arena. Se han utilizado bombas resistentes a la abrasión (AR), las cuales están estabilizadas por medio de bujes, que buscan evitar la vibración del cuerpo rotativo (impulsor) a medida que se va desgastando por acción abrasiva de la arena. Para estos bujes estabilizadores en las etapas se utilizan diferentes materiales de gran dureza como los Carburos de: Tungsteno, Silicon o Silicio.

Figura 37. Causas de fallas en la bomba.



Fuente: MACHETE, E. Y.

Para las compañías suministradoras de equipo electrosumergible, Caño Limón es uno de los campos donde mas se han utilizado las bombas AR, en todas las combinaciones de partes resistentes a la abrasión.

4.1.2 Sistema de Bombeo Mecánico VSH2. Desde diciembre de 2005 se han empezado a hacer instalaciones de Bombeo Mecánico ROTAFLEX y VSH2 para el manejo de los caudales bajos como se ha explicado.

Este sistema maneja muy bien las bajas presiones de fondo de estos pozos, ya que no es un sistema continuo sino que da un tiempo de aporte del yacimiento sin estar extrayendo. Además, el Bombeo Mecánico VSH2 que es el objeto de este estudio, tiene un re-time que permite en la carrera descendente y ascendente dar un tiempo extra de espera para mejorar el llenado de la bomba.

Como se explico en el segundo capítulo, en el corto periodo de tiempo que se ha utilizado este sistema de levantamiento las causas más frecuentes de problemas son el manejo de arena y los problemas de operación. La presencia de arena ha ocasionado desgastes en la válvula fija y la válvula viajera o arenamiento del pozo.

Los problemas de arena se han empezado a manejar tomando varias acciones:

- Utilizando la metalurgia apropiada en Carburo de Tungsteno.
- Colocando un Sand Top Packer protector encargado de evitar en el empaquetamiento de las bombas insertas.
- Implementación de doble válvula fija y viajera.
- Pistón combinado (Soft-Liso) para reducir la abrasión interna y la pegadura entre el cilindro y el pistón.

- Instalación de bombas tipo Tubing u Oversize de dos etapas.
- Guía cerrada para evitar la decantación de la arena en la cage top cuando el pozo deja de correr.

Como se puede observar en los dinagramas tomados a los pozos que han tenido instalaciones de Bombeo Mecánico VSH2, el llenado de la bomba es cercano al 100% en los pozos de Caño Limón, además no se presenta golpe de fluido. Con la utilización de Bombeo Mecánico VSH2 además del problema de la arena se ha atacado el de operación intermitente del bombeo electrosumergible.

Figura 38. Sand Protector Packer.



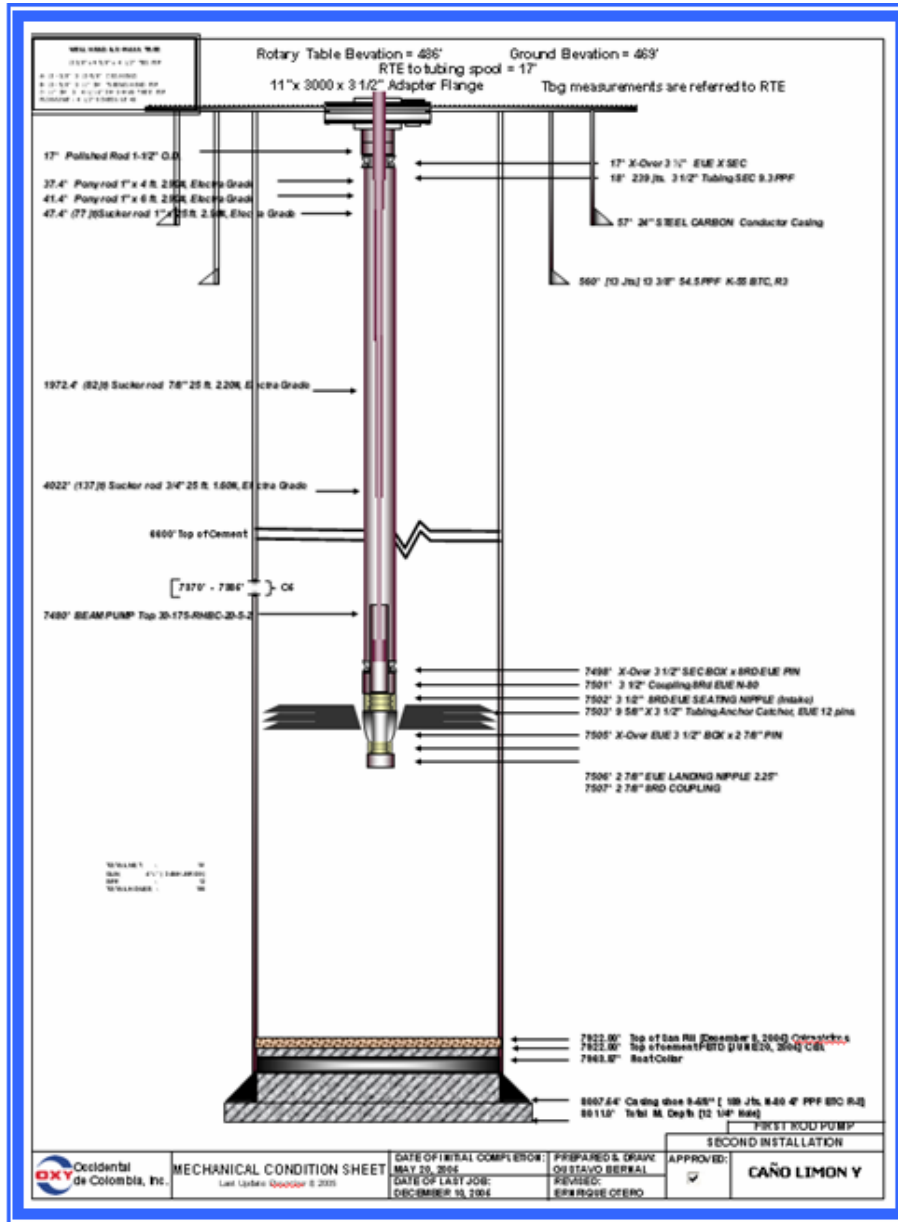
Fuente: Weatherford Colombia Ltda.

Para el manejo de gas y bajo aporte del pozo, que es igualmente inconveniente con el bombeo electrosumergible se ha utilizado la configuración de “Ancla Natural de Gas”, que consiste en sentar el intake de la bomba más abajo de las perforaciones.

Generalmente esta configuración se utiliza en pozos con presencia de gas para el manejo de este, pero en este caso lo que se busca es poder producir un pozo de baja afluencia pero con corte de agua bajo por lo que se hace muy atractivo.

La figura 39 muestra el estado mecánico del pozo CL-Y1.

Figura 39. Estado Mecánico CL-Y1.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

4.1.3 Estimación tasa de producción con los Sistemas de Levantamiento Artificial. Los pozos que tienen instalado Bombeo Mecánico VSH2, antes de instalarle este sistema de levantamiento artificial tuvieron Bombeo Electrosumergible, pero no se puede hacer una comparación en cuanto a

producción porque las condiciones de yacimientos a las que operaron los dos sistemas son diferentes.

Los dos sistemas de levantamiento tienen diferencias sustanciales tanto en el equipo de fondo como en el de superficie. Las principales diferencias se describen comparativamente en la tabla 7.

Tabla 7. Antecedentes operacionales de Caño Limón.

PARÁMETRO	BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	BOMBEO MECÁNICO VSH2
PRODUCCIÓN	Intermitente por necesitar espera de recuperación de nivel.	De forma continua, hasta lograr estabilización de caudal.
MANEJO DE ARENA	Etapas AR (Carburo de tungsteno y Silicon).	<ul style="list-style-type: none"> • Top Sand Packer Protector. • Carburo de Tungsteno. • Doble válvula fija y viajera. • Pistón combinado (Soft-Liso). • Bombas tipo Tubing u Oversize dos etapas. <ul style="list-style-type: none"> • Guía cerrada.
RUN LIFE	199 días en promedio, 8 instalaciones.	307 días en promedio, 5 instalaciones.
BAJO SOPORTE DE PRESIÓN	Produce alto calentamiento del motor, debido a baja refrigeración.	No se han presentado problemas operacionales.

Fuente: MACHETE, E. Y.

Para los pozos donde se instaló Bombeo Mecánico VSH2 en Diciembre de 2.005, se observaron diferentes situaciones en el comportamiento de la producción.

- Con el sistema de Bombeo Electrosumergible no se logro una estabilización de caudal, en tanto que después de cambiar a Bombeo Mecánico VSH2 se logro

producir los pozos sin necesidad de operarlos de forma intermitente. Con esto se disminuyen las opciones de fallas en los equipos de fondo.

- La disminución en la presión a lo largo de la historia de producción de los pozos causaba problemas en el Bombeo Electrosumergible por la baja velocidad del fluido, mientras que el Bombeo Mecánico VSH2 es capaz de operar de forma continua aún teniendo presiones más bajas. El Bombeo Mecánico ha sido capaz de ajustarse a las bajas tasas de producción que aporta el yacimiento.
- El Run Life en dos de los cinco pozos direccionales en estudio bajo condiciones de operación con Bombeo Electrosumergible fue inferior al periodo de tiempo que actualmente llevan corriendo con Bombeo Mecánico VSH2. Con esto se disminuye la cantidad de servicios que se deben realizar a los pozos de bajo caudal. Uno de éstos dos pozos en la corrida con bombeo mecánico presentó problemas en la válvula fija y pérdida de fluido en la carrera ascendente después de 263 días de operación, pero debido al corte de agua tan alto fue enviado a servicio de Workover.
- Las condiciones actuales de los tres pozos son: Llenado de la bomba superior al 80%, varillas cargadas a menos del 55% y menos de 3,5 SPM. Con lo anterior, se puede afirmar que el sistema puede seguir operando por más tiempo, aún estando sobredimensionado para el caudal actual.
- Los tres pozos presentan cortes de agua inferiores al 10% por lo que el Bombeo Mecánico VSH2 fue una buena opción para disminuir la diferida diaria y generar mayor ingresos a la Compañía.

Y el comportamiento de los pozos instalados en el transcurso del 2.006 muestra:

- Un pozo operando desde Septiembre de forma continua. Se logró estabilizar el caudal de producción y se evitó la operación intermitente del pozo y actualmente se encuentra corriendo. Por lo reciente de la instalación no se puede comparar con el Run Life de Bombeo Electrosurgible. Las condiciones actuales del pozo son: Llenado de la bomba del 98%, carga sobre las varillas del 45,2%, 3,24 SPM, flap de 41ft, 75 BFPD y 16% de corte de agua.
- Al segundo pozo se le realizó un pulling para realizar trabajo de Workover por baja afluencia del pozo y arenamiento del mismo. Luego de la inspección de la bomba de subsuelo se verificó que el sistema de levantamiento artificial no presentó falla.

4.2 POTENCIAL DE PRODUCCIÓN

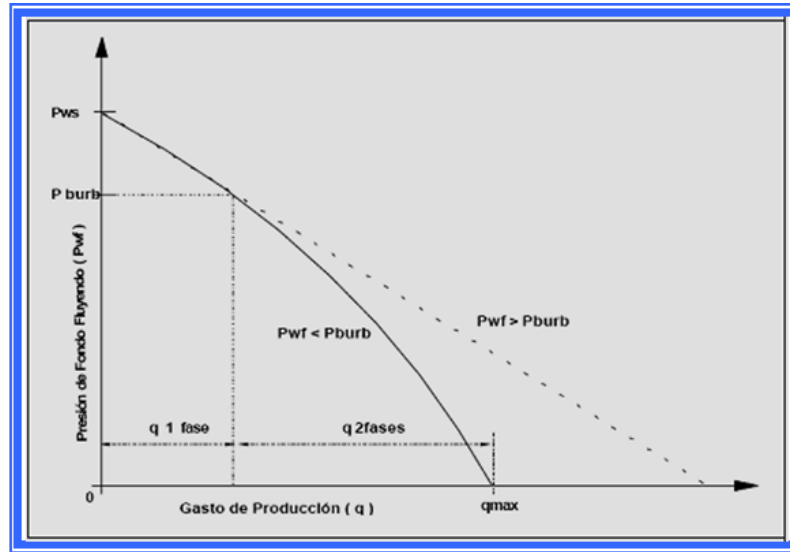
El potencial de producción es propio de cada formación productora y hace referencia a la relación existente entre el caudal y la presión de fondo para cada pozo en dicha formación.

El índice de productividad (IP) es el indicador de la capacidad o habilidad para producir fluido de un pozo. Se expresa como la relación entre el caudal producido en tanque (Q) y la caída de presión del yacimiento.

Cuando la presión dinámica de fondo de pozo (P_{wf}) es más grande que la presión del punto de burbuja (P_b), como es el caso de los pozos de Caño Limón, el flujo de fluido es similar al flujo monofásico.

Por lo tanto, la curva que describe el comportamiento de afluencia de un pozo o IPR (Inflow Performance Relationships) se representa como una línea recta:

Figura 40. Representación de las curvas de producción.



AUTOR: SALAS, Guillermo. Dinagramas: Manual de Interpretación. Zulia, Venezuela, 1976.

Representada por la siguiente relación:

$$IP = \frac{Q}{P_{WS} - P_{wf}} \quad (4.1)$$

Donde,

IP = Índice de productividad

Q = Caudal del fluido

P_{ws} = Presión estática promedio del yacimiento

P_{wf} = Presión dinámica del yacimiento a un caudal conocido.

W. E. Gilbert (1.954) encontró que el índice de productividad varía con respecto al tiempo. Esto se debe a que la presión en el yacimiento disminuye con la explotación del mismo, lo cual se traduce en un incremento en la saturación de gas y en la resistencia a fluir del aceite. Para una caída constante de presión, el IP también dependerá del mecanismo de empuje del yacimiento.

Para un yacimiento con empuje asociado a un acuífero activo como el que se tiene en Caño Limón, el IP permanece casi constante por la producción por encima del punto de burbuja, debido a que no existe grandes cantidades de gas liberado en el yacimiento que pueda afectar las permeabilidades relativas del aceite y del agua.

En Caño Limón los índices de productividad de los pozos productores se determinan con base en los registros de producción Production Logging Tool (PLT), cuyo análisis presenta los barriles de fluido (agua y aceite) producidos por día por cada intervalo, la formación productora correspondiente, el corte de agua y el porcentaje en volumen de los fluidos producidos en el pozo; o mediante pruebas multitasa (MRT), las cuales permiten calcular además del índice de productividad, la presión de la formación.

Es necesario mencionar que no a todos los pozos productores se les ha realizado pruebas de este tipo, sin embargo, como se mantiene un constante monitoreo de la producción y de la caída de presión de cada pozo, es posible calcular el índice de productividad mediante analogía usando datos de pozos cercanos.

A uno de los pozos de bombeo mecánico se le realizó un PLT en Septiembre de 2.001 con el cual se obtuvo el valor de IP que se utilizó en este estudio, pero para los otros seis pozos fue necesario calcularlo por medio de correlación con pozos cercanos completados en la misma arena debido a la falta de pruebas que verifiquen ese IP.

Para realizar esa correlación fue necesario hacer un estudio sobre los pozos completados en el C5 y en M1B1 que son las zonas productoras de los pozos en estudio. Se localizaron seis pozos que se están analizando en el mapa del Campo Caño Limón, escogiéndose este nivel de la formación, debido a que es la unidad de mayor continuidad en la estructura realizada con la sísmica, lo cual permite tener mayor seguridad en las fallas.

Para cada pozo de estudio se ubicaron los pozos cercanos a los que se les había realizado una prueba de presión en el momento en que fueron completados en la misma arena. Se escogieron los que no tuvieran barreras de flujo para garantizar que las propiedades del yacimiento pudiesen ser correlacionadas con buena precisión.

Esta correlación se hace para el Índice de Productividad Específico, que es el índice de productividad base de la zona por cada pie de Net Sand, este valor de índice de productividad base se multiplica por un factor de corrección que es función del corte de agua y se puede obtener el valor del Índice de Productividad imaginario para cada pozo.

Figura 41. Mapa de Caño Limón de los pozos productores del C5.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

La fórmula para calcular el factor de corrección es:

$$FC = (2,339 * \%WC^3) + (0,125 * \%WC^2) + (1,046 * \%WC) + 1 \quad (4.2)$$

Esta correlación no se hizo para LY-X2 debido a que a este pozo se le realizó una prueba de Draw Down en Julio de 2.002 y para este análisis se tomó el valor de PI obtenido en esa prueba.

El índice de productividad de CY-X1 calculados es superior al real porque este pozo tiene un trabajo de control de arena el cual disminuye el valor del IP de forma considerable, por lo tanto el valor de IP utilizado es de 13 PFBP/psi que es similar al que se presentó en el tiempo de operación del pozo.

Tabla 8. Cálculo de IP a partir de SPI.

POZOS	SIP	Net Sand	BPI	%WC	FC	PI
CL-Y1	0,17	14	2,38	3,5	1,0369	2,47
CY-X1	0,23	37	8,51	88	3,6112	30,73
LY-X1	0,53	10	5,30	6	1,0637	5,63
LY-X3	0,56	11	6,16	5	1,0529	6,49
LY-X4	0,26	12	3,12	17	1,1929	3,72

Fuente: MACHETE, E. Y.

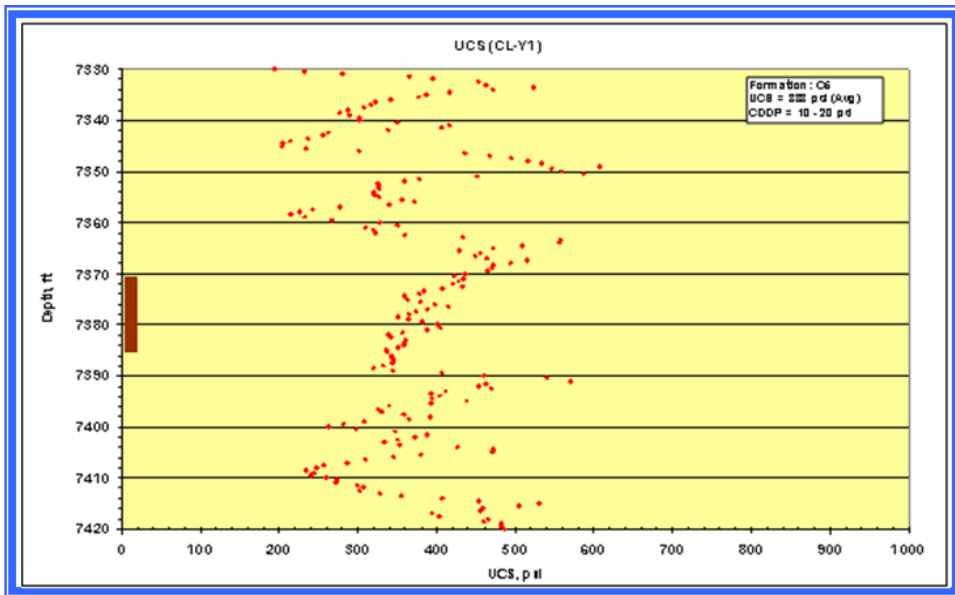
La diferencia de presiones $\overline{P}_{ws} - P_{wf}$, es conocida como "Draw Down", la cual es la encargada de hacer que el pozo fluya. La Presión Estática y es la presión de los fluidos en la formación, es fija para un tiempo determinado y se puede determinar por medición directa en el campo, por pruebas de presión o utilizando simuladores. La Presión de fondo fluyendo y es la presión de los fluidos en el fondo del pozo.

Para hacer el cañoneo es necesario calcular una presión de underbalance. En Caño Limón este valor se toma del cálculo de UCS que es la máxima presión que puede soportar la formación sin que ocurra arenamiento.

Para este estudio se tomo como referencia el arenamiento del pozo, por lo que se tomó el underbalance como máximo Draw Down que se puede aplicar a la formación. Este Underbalance se calcula con las gráficas de presión y con el cálculo del UCS (Unconsolid Compressive Strength) ¹⁴, que es el parámetro que da la presión a la que empieza el arenamiento del yacimiento.

En la figura 41 se muestran los puntos de UCS para diferentes profundidades, los datos se calcularon con base en los registros o la petrofísica con la que se halla los datos de porosidad pozo. Teniendo la porosidad, se tiene una correlación para el cálculo del UCS. De la gráfica se toman los puntos que están ubicados dentro del intervalo perforado y la tendencia de estos se asume como el valor del UCS a tener en cuenta.

Figura 42. Mapa de UCS para CL-Y1.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

¹⁴ Las gráficas de USC generadas para cada pozo se encuentran en el Anexo A.

Calculando de la forma descrita los valores de índice de productividad y draw down máximo que se puede generar para producir la formación, se calcula el potencial de producción o máximo caudal así $Q_{\text{máx}}=IP*DD_{\text{máx}}$. Para los pozos que tienen instalado Bombeo Mecánico VSH2, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Potencial de producción con DD=P. Underbalance.

POZOS	IP	DD_{máx}	Q_{máx}	%W	BOPD
CL-Y1	2,47	383	946	3,5	913
CY-X1	13,00	346	4.498	88	475
LY-X1	5,63	325	1.829	6	103
LY-X2	4,80	439	2.107	4	2.022
LY-X3	6,49	592	3.842	5	3.650
LY-X4	3,72	787	2.928	17	2.430

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Los valores obtenidos de caudal máximo o potencial de producción son bastante superiores a las condiciones actuales de los pozos. Lo anterior se debe al rápido depletamiento del yacimiento que conlleva a que la presión de underbalance sea mayor que la presión actual de yacimiento, que es realmente la máxima presión con que podría operar el pozo.

Lo anterior generó que los cálculos se basaran en el concepto de que el máximo Draw Down que se le puede aplicar a un pozo se presenta cuando $P_{wf}=0$, es decir, cuando el Draw Down que se aplica a la formación es igual a la presión de yacimiento.

La presión promedio de yacimiento que se tomó es la presión a la cual se estabilizó el comportamiento del pozo desde que está produciendo de la actual arena.

Bajo estas condiciones los datos de potencial de producción para los pozos en estudio son:

Tabla 10. Potencial de producción con DD=Pws.

POZOS	IP	DD_{máx}	Q_{máx}	%WC	BOPD
CL-Y1	2,47	120	296	3,5	286
CY-X1	13,00	300	3.900	88	468
LY-X1	5,63	200	1.126	6	1.058
LY-X2	4,80	250	1.200	4	1.152
LY-X3	6,49	190	1.233	5	1.171
LY-X4	3,72	820	3.050	17	2.531

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Lo anterior muestra que el potencial de producción de estos seis pozos asciende a 10.805 BFPD que equivalen a 5.495 BOPD por los bajos cortes de agua que manejan. Esto demuestra la importancia de operar de forma continua estos pozos para disminuir en la producción diferida diaria.

Estos pozos por estar produciendo de canales pequeños tienen un soporte de presión demasiado bajo, lo cual ha hecho que el Draw Down que se les aplique sea bajo y por lo tanto la producción real del pozo sea inferior al potencial de producción.

Debido al bajo soporte de presión que manejan los pozos en estudio, la producción diaria es menor que el potencial de producción calculado además de los problemas operacionales potenciales como interferencia con pozos cercanos o insuficiente profundidad del intake para manejar disminución del nivel de fluido.

Hasta la fecha, el sistema de Bombeo Mecánico VSH2 por su gran versatilidad ha sido el único sistema de levantamiento artificial capaz de manejar los cambios de presión de los pozos, haciendo posible la extracción de estas reservas sin

necesidad de operación intermitente, que pasado un tiempo de operación bajo estas condiciones ocasiona la necesidad de realizar pulling al equipo de fondo.

5. EVALUACIÓN TÉCNICA

5.1 COMPARACIÓN TÉCNICA¹⁵

Para realizar una comparación técnica de los dos sistemas de levantamiento artificial que actualmente están funcionando en Caño Limón, Bombeo Electrosumergible y Bombeo Mecánico VSH2 es necesario ver el comportamiento de los dos sistemas bajo condiciones de operación similares.

En la tabla 11 se compara el funcionamiento de los dos sistemas de Bombeo, en las diferentes condiciones de operación que se pueden presentar.

Tabla 11. Comparación funcionamiento dos Sistemas de Levantamiento Artificial.

PARÁMETRO	BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	BOMBEO MECÁNICO VSH2
Manejo de bajo caudal	Pierde eficiencia y eleva los costos de operación para < de 400BFPD.	Excelente para caudales inferiores a 500 BFPD.
Limitaciones de profundidad	Limitado por la máxima presión de inyección, hasta 20.000 ft.	Limitado por la sarta de varillas, máxima operación hasta 10.000 ft.
Sumergencia	Requiere grandes sumergencias para poder refrigerar el motor	El re-time le permite operar hasta con sumergencia nula.
Pozos desviados	Pocos problemas operacionales. Opera hasta pozos horizontales.	Acepta ángulos de inclinación hasta de 60°.
Flexibilidad (Cambio de caudal).	Don opciones: velocidad fija con arrancador o velocidad variable con VSD.	Se puede variar la longitud de carrera o los strokes por minuto.

¹⁵ PAEZ, Ruth. Diplomado en producción. Universidad Industrial de Santander. Abril de 2001.

Eficiencia	A tasas bajas la eficiencia < a 50%.	Eficiencia superior al 80%.
Presión de entrada a la bomba	Mayor a 300 psi.	Menor a 30 psi.
Manejo de sólidos y arena	Para larga duración Requiere < de 200 ppm de sólidos y materiales resistentes a la abrasión.	Buen manejo de arena con bombas especiales y accesorios adecuados.
Limitación de temperatura	Temperaturas < a 325°F. Con motor y cable especial hasta 550°F.	Temperaturas hasta de 550°F.
Control de producción	Seguimiento de niveles, cartas amperométricas y creación de match.	Toma de dinagramas y niveles.

Fuente: MACHETE, E. Y.

Tabla 12. Condiciones operacionales en instalaciones Bombeo Mecánico VSH2.

PARAMETRO	BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	BOMBEO MECÁNICO VSH2
Manejo de bajo caudal	Pérdida rápida de eficiencia.	Excelente.
Limitaciones de profundidad	Bueno.	Bueno.
Flexibilidad	Excelente pero costosa	Excelente
Eficiencia	< a 70%.	> a 80%.
Pozos desviados	Bueno.	Bueno.
Presión de entrada a la bomba	Mayor a 300 psi.	Menor a 30 psi.
Manejo de sólidos y arena.	Bueno. Depende del modelo de bomba.	Bueno.
Control de producción	Seguimiento de niveles, cartas amperométricas, sensores de fondo y creación de match.	Toma de dinagramas y niveles.
Sumergencia	Malo.	Excelente.
Limitación de temperatura.	Bueno.	Bueno.

Fuente: MACHETE, E. Y.

En la tabla 12 se muestra como han operado cada uno de los dos sistemas de levantamiento artificial, Bombeo Mecánico VSH2 y Bombeo Electrosumergible, en los pozos de bajo caudal en Caño Limón.

Con base en las anteriores tablas comparativas, las ventajas que presenta el Bombeo Mecánico VSH2 frente al Sistema de Bombeo Electrosumergible, demuestran que el primero, es el más apropiado para ser implementado en los pozos que manejan caudales inferiores a 500 BFPD. Las principales ventajas del Sistema de Bombeo Mecánico VSH2 frente al Bombeo Electrosumergible son:

- Producción del pozo de forma constante, sin necesidad de flujo de forma intermitente, ya que no requiere una mínima velocidad de fluido para poder garantizar el estado de las partes.
- Capacidad para operar bajo presión de formación baja y variable, debido a que con solo reducir la longitud de la corrida o los strokes por minuto es capaz de disminuir drásticamente la tasa de extracción.
- La opción de re-time hace que sea capaz de operar hasta con una sumergencia de cero. Ya que da un espacio en la carrera ascendente y/o descendente para mejorar el llenado de la bomba.
- Al no tener necesidad de trabajar con un mínimo de sumergencia, se pueden convertir los pies de flap del Bombeo Electrosumergible a producción con el Bombeo Mecánico VSH2.
- La opción de velocidad variable hace que se incremente la utilidad en estos pozos, porque se puede alargar el tiempo e corrida en la carrera ascendente o descendente, según lo amerite cada unidad.

- Las bombas han operado con una eficiencia de llenado superior al 80%, mientras que bajo estas condiciones de operación, la bomba ESP tendría una eficiencia inferior al 70%.
- El control de producción de los pozos es más práctico, ya que tan solo con la toma de dinagramas se puede saber el estado del equipo de subsuelo.
- La más importante desde el punto de vista operativo, es el menor consumo de energía, el cual hace que la explotación de los pozos de bajo caudal sea más rentable.

5.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE Y BOMBEO MECÁNICO VSH2

Las cinco instalaciones que se han hecho hasta el momento y las dos que están próximas a hacerse de Bombeo Mecánico VSH2, se han hecho en pozos que inicialmente tenían instalado Bombeo Electrosumergible.

En Occidental de Colombia, Inc. los datos que se utilizan para hacer los diseños son expedidos por parte del grupo de yacimientos (Figura 43), estos parámetros de diseño proporcionan los datos de presión al datum en FT-TVSS, el índice de productividad y el corte de agua, para las condiciones a las que se va a colocar el pozo en producción y para 15 meses después de realizada la instalación.


Los datos de presiones deben ser llevados a las condiciones del pozo en “Profundidad Vertical”, es decir, se debe hallar Punto Medio de Perforaciones y Presiones Estáticas a este punto medio de perforaciones. Para pasar esa presión de TVSS a TVD se deben desarrollar las siguientes fórmulas:

$$Pr of . @ P. estática de fondo = TVSS + Elevación de la mesa rotaria \quad (5.1)$$

$$\Delta P = (PMP - Prof. @ P. estática de fondo) * (((\%WC/100) * 0,416) + (1 - (\%WC/100) * 0,364)) \quad (5.2)$$

$$Pr esión estática corregida = Pr esión estática + \Delta P \quad (5.3)$$

Figura 43. Parámetros de diseño LY-X1.

 PUMP DESIGN RESERVOIR DATA	
DATE: <u>NOVEMBER 15, 2006</u>	WELL: <u>LA YUCA X1</u> <u>OPEN SANDS_C5</u>
CURRENT CONDITIONS STATIC PRESSURE: <u>225</u> PSIA AT <u>7,100</u> FT-TVSS STATIC PRESSURE: <u>121</u> PSIA AT PMP <u>6,817</u> FT-TVSS PRODUCTIVITY INDEX: <u>5,6</u> BFPD/PSIA WATER CUT: <u>5</u> %	
IN 15 MONTHS STATIC PRESSURE: <u>175</u> PSIA AT <u>7,100</u> FT-TVSS PRODUCTIVITY INDEX: <u>6,9</u> BFPD/PSIA WATER CUT: <u>25</u> %	
REMARKS: Y- TOOL: <u>NO</u> PACKER: <u>NO</u>	RECOMMENDED RATE: <u>150 BFPD</u>
RECOMMENDATIONS: <ul style="list-style-type: none"> • To set pump intake as deep as possible. • To design Sucker Rod Pumping with a surgency equals to zero. 	
PERFORMED BY: <u>XXXXX</u>	

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Luego de hacer las correcciones a las presiones, con estos nuevos datos se corre el diseño. Al realizar los cálculos y la escogencia del equipo a instalar se debe

tener en cuenta la disponibilidad del inventario en el campo para la fecha de la instalación, el punto de operación dentro del control de funcionamiento y que responda a las expectativas de producción del pozo a los quince meses posteriores al arranque.

Los datos que necesita el software para realizar los diseños se obtienen de la hoja de parámetros de diseño¹⁶, el survey del pozo para revisar si es direccional o totalmente vertical y el estado mecánico para ver las condiciones actuales de operación. Ver figura 43.

Estos datos mezclados con la experiencia del operador, permiten escoger la mejor configuración para completar el pozo desde el punto de vista de cada uno de los dos sistemas de levantamiento artificial.

Para el diseño de los dos sistemas se tuvieron en cuenta las consideraciones anteriores y se utilizaron los programas de diseño siguientes:

- AutographPC, para Bombeo Electrosumergible que es el software que maneja la compañía Baker Hughes – Centrilift.
- Rodstar-3D. V3.0, para Bombeo Mecánico VSH2 que es un software genérico producido por la compañía Theta Internacional y que bajo licencia utiliza la compañía Weatherford Colombia Limitada.

Luego de tener el equipo seleccionado, es importante analizar el comportamiento del pozo en cuanto a la producción de material abrasivo para instalar la mejor configuración para el manejo de éste. Como se observó en la tabla 5, los dos

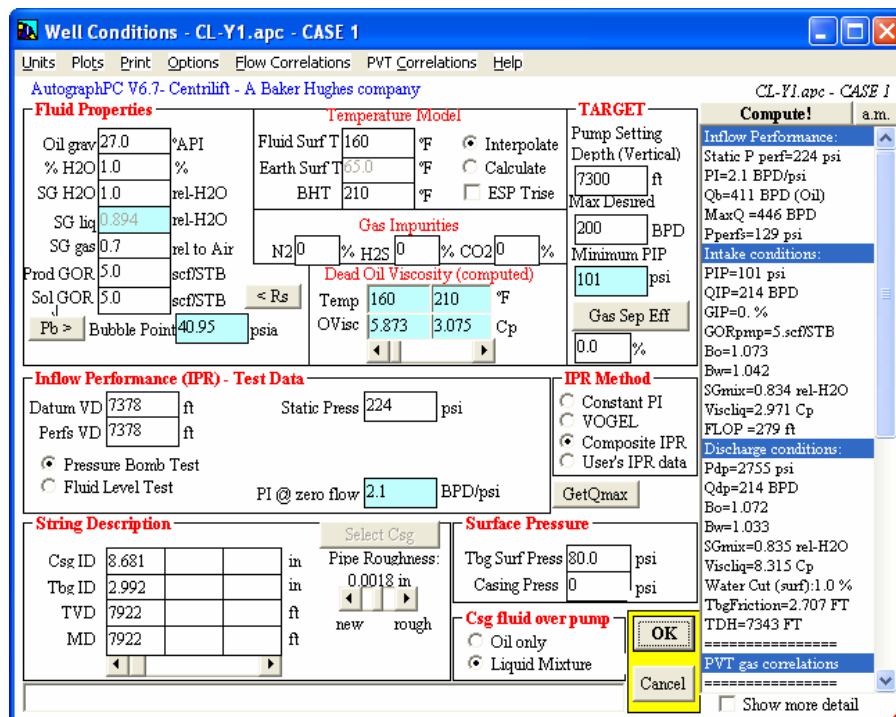
¹⁶ Los parámetros de diseño mas recientes para cada pozo y por tanto con los cuales se corrió cada diseño se muestran en el Anexo B.

sistemas de levantamiento artificial ofrecen configuraciones especiales para el manejo de arena.

5.2.1 Diseño sistema de Bombeo Electrosumergible¹⁷. El diseño para el Sistema de Bombeo Electrosumergible de estos pozos se realizó en AutographPC. Los pasos para la creación del diseño y los pantallazos del software se presentan a continuación:

1. *Relacionar los datos de pozo.*

Figura 44. Condiciones de pozo - Diseño de Bombeo Electrosumergible.



Fuente: Software AutographPC - Centrilift.

Los datos de pozo a seleccionar son: Índice de productividad, porcentaje de agua, profundidad a la que se quiere sentar el intake, presión en cabeza, caudal

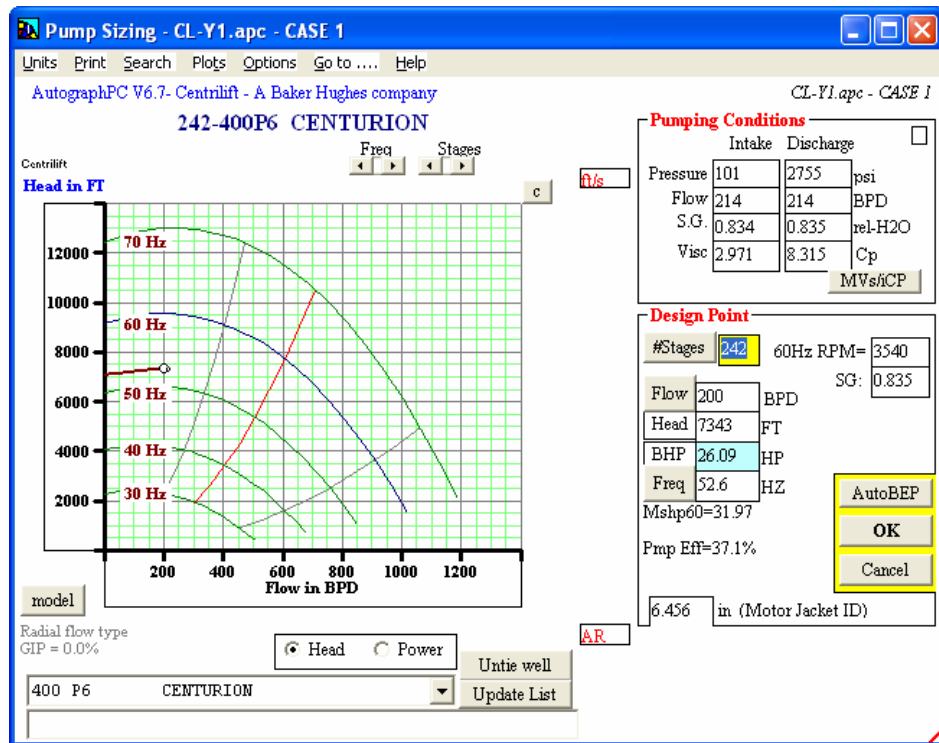
¹⁷ Los pantallazos de la curva de la bomba que arroja el programa AutographPC para cada pozo se muestran en el Anexo C.

requerido, presión estática, tamaño del casing y del tubing, profundidad del pozo y especificaciones de si el pozo es vertical o direccional. También se deben llenar datos del yacimiento como: Gravedad API, densidades, punto de burbuja, viscosidad y temperatura.

En este paso el software calcula el valor de FLAP o sumergencia el cual se busca que en condiciones iniciales este por el orden de los 1.000ft y en las condiciones a 15 meses de 500ft.

2. *Selección de la bomba de subsuelo*, el software sugiere una serie de bombas a usar, de la cual se debe elegir la más adecuada teniendo como referencia el caudal a producir, el número de etapas y la frecuencia con la que se lograrán estas condiciones de operación.

Figura 45. Tornado de la bomba de Bombeo Electrosumergible.

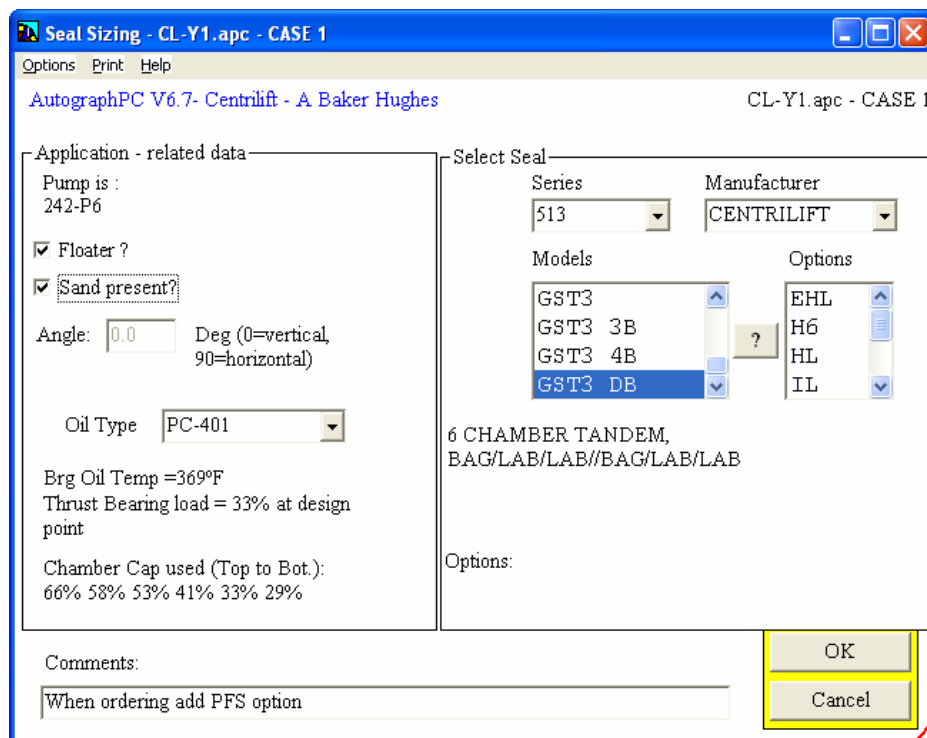


Fuente: Software AutographPC - Centrilift.

El resultado de los cálculos anteriores es una pantalla del comportamiento de la bomba dentro de la curva de desempeño de la bomba escogida, donde se pueden observar cómo trabajaría el equipo de subsuelo para la tasa deseada, observándose si la bomba es la más adecuada o está sobredimensionada para manejar el caudal deseado. Igualmente se puede ver el valor calculado de potencia requerida (HP).

3. *Escogencia del sello*, que depende básicamente de la carga que debe soportar de acuerdo al modelo de bomba que se escogió. Para los casos que se están estudiando la serie de bomba a usar es 400, por lo tanto, la carga de la misma será baja y el sello no requiere ninguna configuración especial.

Figura 46. Selección de Sello para Bombeo Electrosumergible.

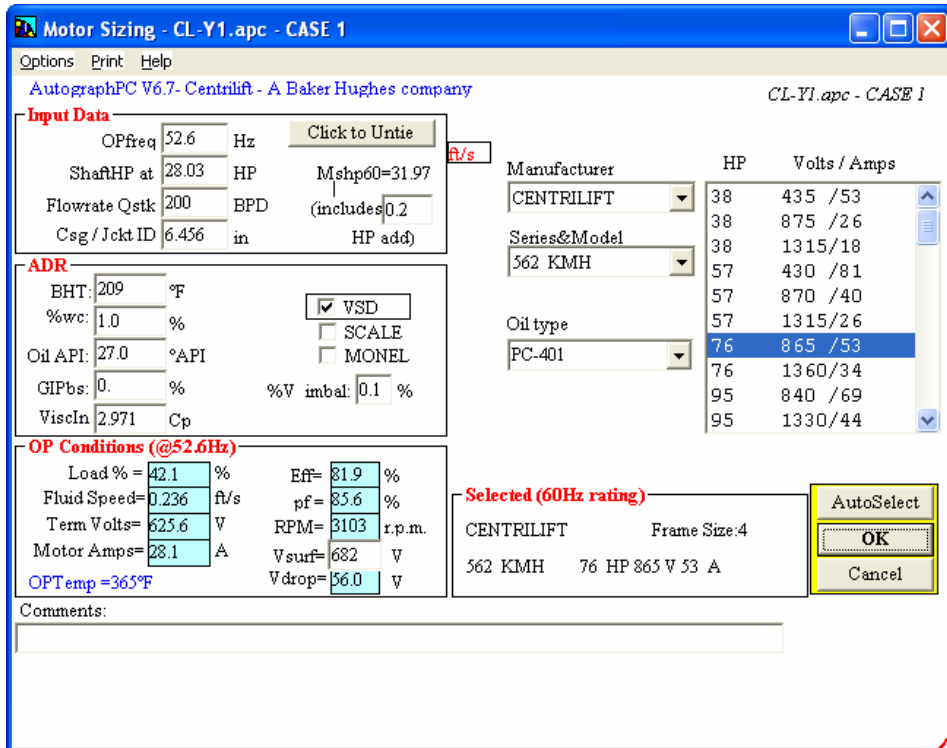


Fuente: Software AutographPC - Centrilift.

En Occidental de Colombia los sellos se han estandarizado para todos los tipos de bomba de cualquier serie como 513. Por esta razón en la pantalla se indica esta serie de sello en la ventana "Series".

4. *Selección del motor*, este equipo se debe elegir de acuerdo con la potencia que necesita el sistema, indicada preliminarmente en la primera pantalla, de tal manera que sea capaz de llevar el fluido hasta superficie. Los pozos que se están analizando son de baja producción, por lo tanto la potencia requerida para colocar el fluido en superficies es baja.

Figura 47. Selección del motor para Bombeo Electrosumergible.



Fuente: Software AutographPC - Centrilift.

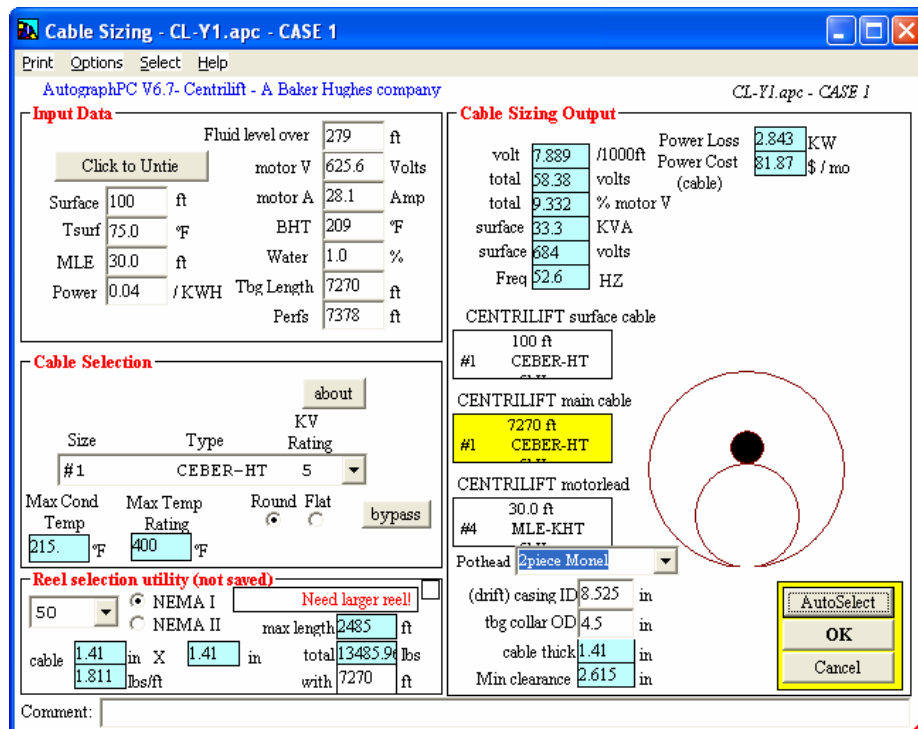
Al escoger el motor del sistema de Bombeo Electrosumergible se debe tener en cuenta que la velocidad del fluido debe ser superior a 1ft/seg para garantizar la refrigeración del motor y la temperatura máxima para la cual esta hecho cada

clase de motores. Este factor es muy importante en el Bombeo Electrosumergible, pues la vida del motor depende de su refrigeración que se logra por el paso del fluido en la parte externa del motor.

Si la velocidad no se logra, es necesario tomar la opción de usar chaqueta de refrigeración alrededor del motor con el fin de reducir el espacio entre el casing y el motor para que el paso del fluido tenga mayor velocidad. Para los seis pozos analizados, sería necesario incluir chaqueta en la instalación y aún así la temperatura del motor excedería los límites permitidos.

5. *Elección del cable de potencia*, esta parte se debe seleccionar de forma similar a las otras partes con base en su capacidad de transportar corriente. Dentro del cable que alimenta eléctricamente al motor, existe una configuración especial por las dimensiones del cable.

Figura 48. Selección del cable para Bombeo Electrosumergible.



Fuente: Software AutographPC - Centrilift.

Partiendo del motor estará primero el Motor Lead Extension (MLE) que es cable plano, especialmente diseñado para que no interfiera en la refrigeración del motor el cual se une mediante un empalme al resto de cable redondo hasta la superficie. La configuración típica es cable redondo #1 CEBER-HT de 5KV y el motor lead #4 MLE-KHT de 5KV. Las siglas significan: C = Centrilift E = Epóxica, B = Barrier, E = EPDM, R= Round, HT= High Temperatura.

El MLE va desde el motor hasta por lo menos 6 pies por encima de la descarga evitando de esta forma que la conexión con el cable redondo quede justo al lado de un coupling, sino que sea en el cuerpo del primer tubo de producción. La pantalla del cable indica la distribución del cable dentro del casing y la posición teórica que tendría respecto a la tubería de producción.

6. Escogencia del equipo de superficie.

Figura 49. Selección del Controlador para Bombeo Electrosumergible.

The screenshot shows the 'Motor Sizing - CL-Y1.apc - CASE 1' window. It contains several sections:

- Input Data:** OPfreq: 52.6 Hz, ShaftHP at: 28.03 HP, Flowrate Qstk: 200 BPD, Csg / Jckt ID: 6.456 in. Includes a 'Click to Untie' button and 'Mshp60=31.97'.
- ADR:** BHT: 209 °F, %wc: 1.0 %, Oil API: 27.0 °API, GIPbs: 0.0 %, ViscIn: 2.971 Cp. Includes checkboxes for VSD, SCALE, and MONEL.
- OP Conditions (@52.6Hz):** Load % = 42.1 %, Fluid Speed = 0.236 ft/s, Term Volts = 625.6 V, Motor Amps = 28.1 A, OPTemp = 365°F. Includes values for Efficiency (81.9 %), Power Factor (85.6 %), RPM (3103 r.p.m.), Vsurf (682 V), and Vdrop (56.0 V).
- Motor Selection Table:**

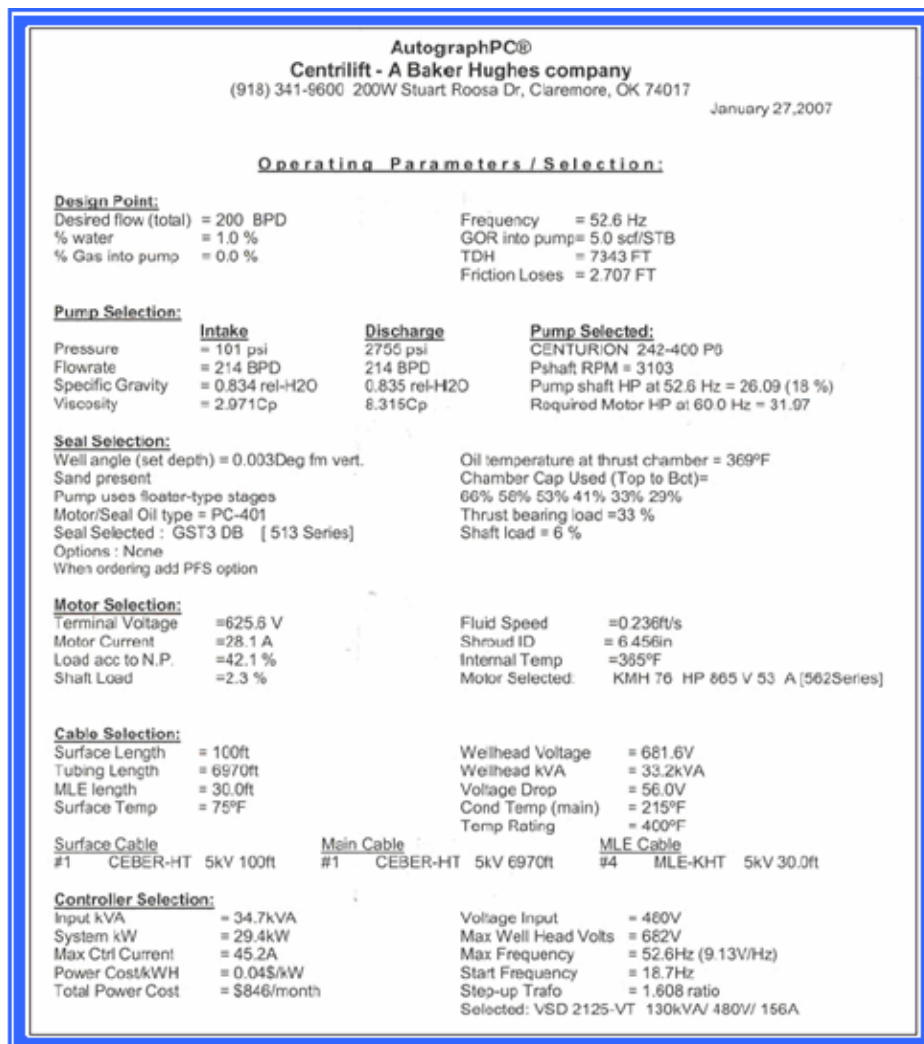
Manufacturer	HP	Volts / Amps
CENTRILIFT	38	435 / 53
	38	875 / 26
	38	1315 / 18
562 KMH	57	430 / 81
	57	870 / 40
	57	1315 / 26
PC-401	76	865 / 53
	76	1360 / 34
	95	840 / 69
	95	1330 / 44
- Selected (60Hz rating):** CENTRILIFT, Frame Size: 4, 562 KMH, 76 HP 865 V 53 A.
- Buttons:** AutoSelect, OK, Cancel.

Fuente: Software AutographPC - Centrilift.

El controlador que requiere la instalación depende del motor que se eligió para la misma y de la proyección que se haga de la producción a largo término. La capacidad de KVA del controlador debe ser superior a la potencia del motor, con esto se garantiza que el equipo de superficie sea capaz de mantener en funcionamiento el equipo de subsuelo.

7. *Análisis de los reportes de los resultados:* El reporte de resultados que presenta el AutographPC es:

Figura 50. Reportes de AutographPC - Diseño Bombeo Electrosumergible.



Fuente: Software AutographPC - Centrilift.

Se pueden verificar tanto los datos de entrada como de salida y las condiciones de operación de la bomba. En el reporte final es importante revisar el porcentaje de carga con que quedará trabajando los ejes, el motor, la zapata del sello, la temperatura a la que estará sometido el cable, la máxima frecuencia a la que se puede operar el sistema y el consumo de energía entre otras.

El procedimiento anterior se realizó para los seis pozos estudiados, con los equipos disponibles o las partes para ser ensamblados. El equipo que mejor se desempeña con bajos caudales es la bomba P6, el sello GST3, motor de 76HP/865V/53A y controlador de 130KVA. Las especificaciones de cada bomba, frecuencia y observaciones se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13. Instalaciones Sistema de Bombeo Electrosumergible.

POZOS	BOMBA	Hz	CONSUMO	PROBLEMAS
CL-Y1	242-P6 SSD	52,6	29,5	Velocidad.
CY-X1	242-P6 SND	51,9	28,8	-
LY-X1	185-P6 SND	60,3	32,2	Temperatura.
LY-X2	185-P6 SSD	56,1	27,9	Velocidad.
LY-X3	252-P6 SND	52,0	26,8	Temperatura y velocidad.
LY-X4	76-P6 SSD	54,7	15,5	Velocidad.

Fuente: MACHETE, E. Y.

Los resultados muestran que para éstos caudales la operación del Sistema de Bombeo Electrosumergible sería en Down Thrust para todos los casos. Además, se presentaría baja velocidad de refrigeración y altas temperaturas que podrían ocasionar falla eléctrica en el motor de fondo.

Bajo las condiciones de operación, realizar una instalación de Bombeo Electrosumergible en estos pozos sería arriesgar de manera innecesaria el equipo de fondo, generando mayor cantidad de servicios y mayores costos de mantenimiento.

5.2.2 Diseño sistema de Bombeo Mecánico VSH2¹⁸. El diseño para el Sistema de Bombeo Mecánico VSH2 para los mismos pozos que en el caso anterior se realizó utilizando el software Rodstar-d 3.0 que es el programa utilizado por la compañía Weatherford Colombia Ltda. para la creación de sus diseños. Los pasos a seguir para la creación del diseño se numeran a continuación y se presentan cada uno de los pantallas del software:

1. *Especificar los datos de pozo:* Eficiencia de la bomba, profundidad del intake, presión de tubing y casing, corte de agua, gravedad específica del agua y del aceite y fricción en libras en el stuffing box. Con estos datos el software calcula el valor de la gravedad específica del fluido, el cual utiliza para calcular las cargas sobre la barra lisa a causa de la columna de fluido.

Figura 51. Información de pozo - Diseño de Bombeo Mecánico.

Well Information	
Company name:	OXY
Well name:	LY-X1
User name:	fvz
Comment:	VSH2 CASO2. OXY RECOMIENDA SENTAR ANCLA A 7650
Date:	16-Jan-07
Pump depth (ft):	7645
Run time (hrs/day):	24
Stuffing box friction (lbs):	100
Pump condition:	
<input checked="" type="radio"/> Full pump	
<input type="radio"/> Fluid pound	
<input type="radio"/> Gas interference	
<input type="radio"/> Calculate pump condition and fillage	
Pump efficiency (%):	95
Pump fillage (%):	
Tubing pressure (psi):	60
Casing pressure (psi):	5
Water cut (%):	25
Water specific gravity:	1
Oil gravity (API °):	29
Fluid specific gravity:	0.9112
	<input type="checkbox"/> Calculate

Fuente: Software Rodstar-d 3.0 - Weatherford Colombia Ltda.

2. *Ingresar la información de producción:* Punto medio de perforaciones, presión estática de fondo, presión del punto de burbuja, producción esperada y se escoge el método para el cálculo del IPR (Vogel).

Para que el programa genere la curva de comportamiento del IPR se toma el índice de productividad que proporciona yacimientos en los parámetros de diseño,

¹⁸ Los datos del diseño final que arroja el programa Rodstar-3.0 se muestran en el Anexo D.

la presión estática corregida en TVD que se calcula como se explicó en el numeral 5.2 y tres datos diferentes de caudal para calcular así el valor de la presión de fondo fluyendo para cada caso. Este cálculo se hace despejando de la fórmula de Índice de Productividad la P_{wf} , así:

$$P_{wf} = P_{ws} - \left(\frac{Q}{IP} \right) \quad (5.4)$$

Basado en los anteriores datos el software calcula los máximos valores de producción de fluido total, aceite y agua y el valor de la presión sobre el intake de la bomba.

Figura 52. Información de producción - Diseño de Bombeo Mecánico VSH2.

The screenshot shows the 'Production Information' window with the following data:

- Radio buttons:**
 - Enter fluid level (unselected)
 - Enter pump intake pressure (selected)
 - Calculate pump intake pressure from target production and IPR data (unselected)
 - Enter pumping speed (unselected)
 - Enter target production (selected)
 - Calculate production from inflow performance data (unselected)
- Input fields:**
 - Pump intake pressure (psi): 104.994
 - Target production (BFPD): 150
 - IPR calculation method: Vogel
 - Value of 'n' (Fetkovich corr.): [empty]
 - Mid-perf. depth (ft): 7300
 - Static b'hole pressure (psi): 128
 - Bubble point pressure (psi): 200
 - Pressure measured at: Mid. Perforation
- Buttons:** IPR Data, IPR Plot., Update prod., Calculate 'n', Producing below bubble point
- Calc. max. production (BPD) table:**

Oil:	Water:	Fluid:
371.7	205	576.7
- Production test points table:**

Pressure (psi)	Fluid production (bfpd)
113	100
99	200
84	300

Fuente: Software Rodstar-d 3.0 - Weatherford Colombia Ltda.

3. *Relacionar la información de la bomba y tubería a instalar.* Tamaño de la tubería de producción (depende del caudal de producción y el tamaño del casing), tipo de bomba a correr (como los caudales son pequeños y las profundidades altas generalmente se usa tipo inserta), asentamiento del ancla (para bombas insertas puede ser al final de la bomba, pero para bombas de

tubería debe ser en el tope de la bomba ya que la bomba no puede quedar en tensión), fricción en la bomba y tamaño del pistón (de acuerdo a la rata de fluido que se desea producir).

Figura 53. Información Bomba y Tubería - Diseño de Bombeo Mecánico VSH2.

Fuente: Software Rodstar-d 3.0 - Weatherford Colombia Ltda.

4. *Selección de la sarta de varillas*: Está directamente relacionada con el diámetro de la bomba que se escogió en el paso anterior ya que junto con la barra lisa son las encargadas de sostener el peso de la bomba y la columna de fluido.

Figura 54. Selección Sarta de Varillas - Diseño de Bombeo Mecánico VSH2.

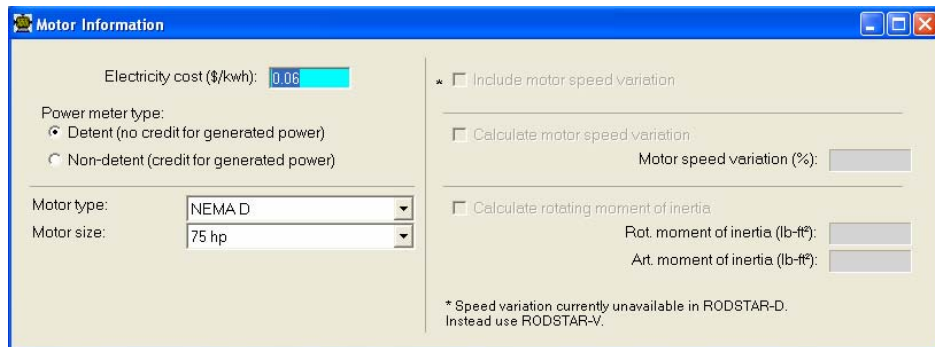
#	Rod Grade	Rod Size (in)	Actual diam. (in)	Length (ft)	* Fric Coeff
1	Weatherford EL	7/8"	0.875	4200	0.2
2	Weatherford EL	3/4"	0.75	3445	0.2

Fuente: Software Rodstar-d 3.0 - Weatherford Colombia Ltda.

Para esta unidad que se selecciona en el programa de diseño la máxima carga sobre la barra lisa es de 36.500Lbs y la longitud máxima del stroke es de 144 pulgadas, datos muy similares a las 40.000Lbs y 150 pulgadas del sistema de Bombeo Mecánico VSH2.

6. *Selección del motor.* En Caño Limón para este tipo de unidades se tiene estandarizado utilizar Motor Nema D de 75hP. Aunque el diseño pueda ofrecer otras opciones, se escoge este motor por ser de una potencia muy estable en Caño Limón para equipos de superficie.

Figura 56. Selección del motor - Diseño Bombeo Mecánico VSH2.



Fuente: Software Rodstar-d 3.0 – Weatherford Colombia Ltda.

7. *Análisis de los reportes:* En el reporte se pueden verificar tanto los datos de entrada como de salida y la gráfica del IPR que generó el software para evaluar el comportamiento del sistema.

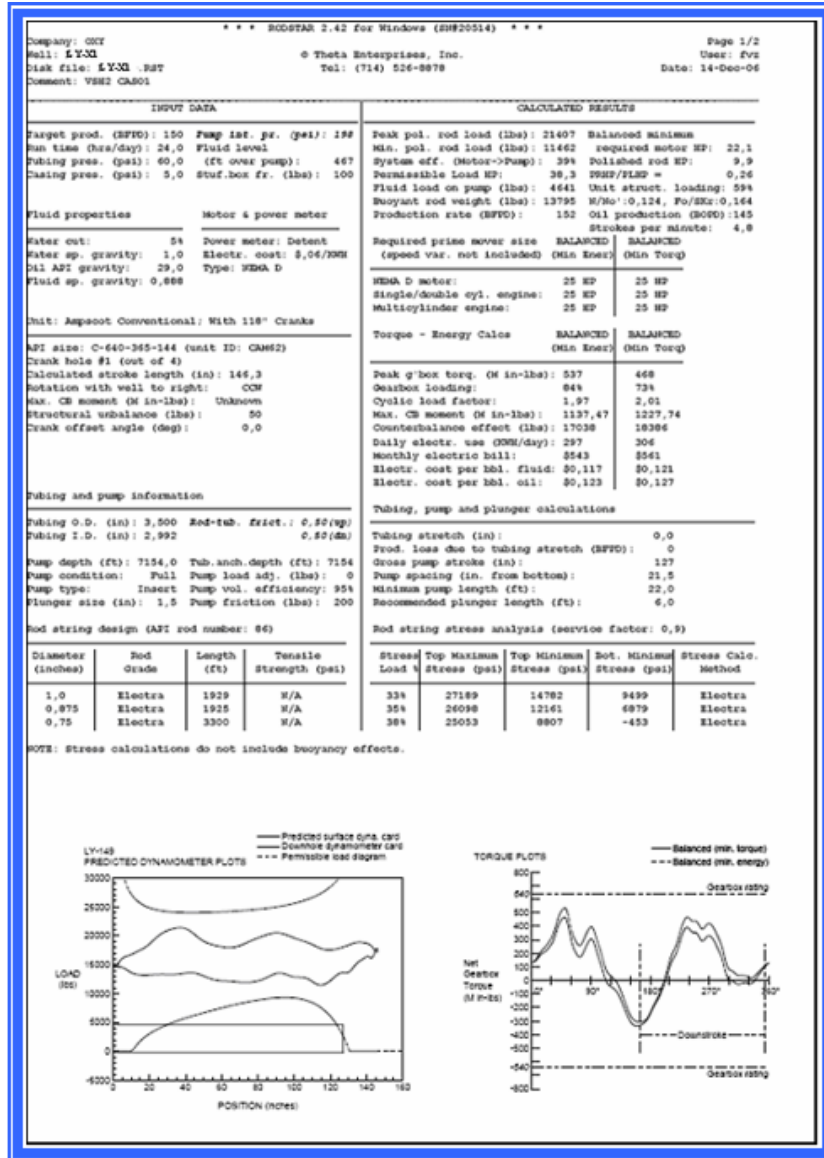
Es importante revisar el porcentaje de carga con que quedará trabajando las varillas, el motor, la barra lisa, la unidad, el nivel de fluido y consumo de energía entre otras.

En este sistema se busca que las cargas sobre las varillas y sobre la barra lisa sean lo mas altas posibles y cercanas al límite permitido para aprovechar el

sistema lo mayor posible. Esto no se tenía en cuenta para la creación de diseños, pero ya se implementó.

El reporte de resultados que presenta el Rodstar es:

Figura 57. Reporte de Rodstar - Diseño Bombeo Mecánico VSH2.



Fuente: Software Rodstar-d 3.0 – Weatherford Colombia Ltda.

El procedimiento anterior se realizó para los seis pozos analizados y las especificaciones de cada bomba, sarta de varillas y velocidad en strokes por minuto que se obtuvieron para cada pozo, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 14. Bomba, varillas y SPM Bombeo Mecánico VSH2.

POZOS	BOMBA	SARTA DE VARILLAS	SPM
CL-Y1	30-175-RHBC-30-5-4	77 varillas de 1"x 25ft 82 varillas de 7/8"x25ft 137 varillas de 3/4"x25ft	5,71
CY-X1	30-150-RHBC-20-5-4	92 varillas de 1"x 25ft 74 varillas de 7/8"x25ft 127 varillas de 3/4"x25ft	4,99
LY-X1	30-150-RHBC-20-5-4	67 varillas de 7/8"x25ft 207 varillas de 3/4"x25ft	5,1
LY-X2	30-175-RHBC-30-5-4	83 varillas de 1"x 25ft 91 varillas de 7/8"x25ft 112 varillas de 3/4"x25ft	4,82
LY-X3	30-175-RHBC-30-5-4	83 varillas de 1"x 25ft 90 varillas de 7/8"x25ft 112 varillas de 3/4"x25ft	6,76
LY-X4	30-175-RHBC-30-5-4	64 varillas de 1"x 25ft 150 varillas de 7/8"x25ft	6,55

Fuente: MACHETE, E. Y.

Tabla 15. Cargas y consumo de Bombeo Mecánico VSH2.

POZOS	CARGAS VARILLAS (%)	CARGA UNIDAD (%)	CARGA BARRA LISA (Lbs)	CONSUMO ENERGIA (Kwh)
CL-Y1	52	85	26.057	17,04
CY-X1	44	64	23.454	17,00
LY-X1	51	59	21.702	14,38
LY-X2	51	82	24.873	18,75
LY-X3	51	72	26.147	23,79
LY-X4	57	79	28.746	25,79

Fuente: MACHETE, E. Y.

Estos diseños son los que actualmente tienen instalados los pozos y cuando estaban operando presentaban las siguientes cargas sobre las varillas, unidad y barra lisa y consumo de energía mostradas en la tabla 15.

De acuerdo a los resultados expuestos en las tablas anteriores la longitud del barril, la nominal del pistón y la total de las extensiones es la misma en todas las instalaciones realizadas, esto se debe a que los caudales para los que se ha diseñado son similares.

5.3 COMPARACIÓN SOFTWARE DE SEGUIMIENTO

Para realizar el seguimiento del funcionamiento de un sistema de levantamiento artificial es necesario tener en constante monitoreo parámetros relevantes para representar de las condiciones operativas del pozo.

Los parámetros que en Caño Limón se tienen constantemente en monitoreo y a los que se les hace seguimiento son:

- Nivel de fluido.
- Caudal y corte de agua.
- Presencia de arena.
- Frecuencia de funcionamiento y consumo de energía.
- Presión en cabeza.
- Y en algunos pozos la presión y temperatura de fondo.

En el Bombeo Mecánico VSH2 se agregan el funcionamiento de las válvulas y llenado de la bomba mediante la toma de dinagramas.

La medición de estos parámetros se realiza en forma distinta para los pozos que están operando con Bombeo Electrosumergible y los de Bombeo Mecánico VSH2 como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 16. Medición de parámetros del funcionamiento de pozos.

PARÁMETRO	BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	BOMBEO MECÁNICO VSH2
Caudal	Medida del N.O.C.	Medida del N.O.C.
Nivel de fluido	Echometer - Sonolog.	Echometer - Sonolog.
Corte de Agua	Muestras de laboratorio o Seraphin.	Muestras de laboratorio o Seraphin.
Contenido de arena	Muestras de Laboratorio o Clampon.	Muestras de Laboratorio o Clampon.
Frecuencia o SPM	Variador.	Tablero electrónico de la unidad.
Consumo energía	Medidas eléctricas o variador.	Medidas eléctricas o tablero electrónico de la unidad.
Funcionamiento de la bomba	Elaboración de Match.	Echometer - Dinagramas
Funcionamiento de válvulas	No aplica.	Echometer - Dinagramas.
Presión en Cabeza	Manómetro.	No se evalúa.
Presión en fondo	Sensor de fondo.	No se evalúa.
Temperatura de fondo	Sensor de fondo.	No se evalúa.

Fuente: MACHETE, E. Y.

De los anteriores parámetros algunos evalúan el comportamiento del pozo más que el sistema de levantamiento artificial como tal, pero son determinantes para evaluar el funcionamiento del equipo. Dentro de estos están:

Medida del caudal de pozo. La mayoría de las veces muestra su comportamiento, más no del sistema de levantamiento. El equipo utilizado para

hacer esta medición en Caño Limón es el Net Oil Computer (N.O.C.), un medidor másico instalado en cada pozo el cual mide el flujo másico y transmite los valores obtenidos a la sala de control. Con esta información se emplean las densidades y constantes con que se calibró el equipo para realizar el cálculo de flujo, corte de agua y contenido de arena.

Corte de agua. Es medido con el N.O.C., se ratifica por medio de muestras que se llevan al laboratorio donde por medio de centrifugación se separan los dos componentes y se calcula el respectivo BSW.

Para los pozos que presentan cortes de agua muy elevados (superiores al 99,5%) estos valores se verifican por medio de una prueba realizada en Seraphin debido a que en la prueba de laboratorio se utiliza una muestra puntual, mientras que con este sistema se hacen tres pruebas diferentes para poder determinar el corte de agua real. En cada prueba se coloca un tanque aforado de 30 barriles en línea, se gradúa el flujo de entrada al tanque y se deja llenar (aproximadamente durante 10 horas), luego se toman medidas de las cantidades de fluido, agua y aceite con cinta y en el tanque aforado.

Contenido de arena. Se calcula por medio de muestras y análisis de laboratorio o por la prueba del Clampon que es una especie de registro sónico que se coloca en la línea del pozo y registra los golpes de los granos de arena en las paredes de la tubería por cada minuto y con esto evalúa el contenido de la misma.

Nivel del fluido. Se mide con el sonolog (incorporado en el Echometer), es un instrumento que por medio de acústica genera una onda de energía en superficie la cual viaja a través del gas y va reflejando los cambios en el área seccional del anular, revestimiento-tubería, incluyendo cuellos de tubería, liner, nivel de fluido, etc. El software procesa automáticamente esta data acústica para determinar la profundidad del nivel de fluido.

Por medio de una pistola de gas conectada al pozo y un transductor de presión y con la válvula del casing cerrada, se genera un disparo con la pistola cargada a 100 o 150 psi por encima de la presión del casing y se espera el cómputo generado por el software que incluye datos como la frecuencia, presión en el tubing, datos de la unidad, del motor y presión del cilindro. Se pueden obtener los siguientes resultados: tope y porcentaje del fluido en el anular, presión del casing en superficie, flujo de gas por el anular, presiones de entrada a la bomba, de fondo fluyendo y del yacimiento y el número de juntas calculadas mediante el número de uniones de tubería hasta la profundidad del nivel.

Para tener el control de cada sistema de levantamiento y conocer los parámetros que evalúan directamente el funcionamiento de cada uno de los sistemas de levantamiento artificial, cada uno de ellos tienen elementos de control:

Frecuencia de funcionamiento: Para el Bombeo Electrosumergible se obtiene del tablero electrónico del variador de frecuencia, en tanto que para el Bombeo Mecánico la cantidad de strokes por minuto VSH2 se obtienen del tablero electrónico que esta en la caja de control.

Consumo de energía. Para los dos casos puede ser hallado mediante medidas eléctricas del voltaje consumido por cada equipo, que se puede leer en la caja de venteo o por lectura del variador en el sistema de Bombeo Electrosumergible y en el tablero electrónico para el sistema de Bombeo Mecánico VSH2.

Funcionamiento de la bomba. Para el sistema de Bombeo Electrosumergible se obtiene mediante la creación de match con las condiciones actuales del pozo en AutographPC. Un match se hace de forma similar a un diseño, pero para este caso se debe seleccionar el equipo que se tiene instalado y la información del pozo con la que está operando actualmente el sistema.

Para el sistema de Bombeo Mecánico VSH2 se hace mediante la creación de dinagramas que muestren el funcionamiento del pozo utilizando el Echometer (opción Dynamometer Sensor), generalmente se toman después de la lectura de niveles. Antes de iniciar la toma de dinagramas se debe parar la unidad y conectar el transductor de la barra lisa (PRT) a una distancia mínima de 6 pulgadas con la grapa fija.

La prueba se inicia colocando nuevamente en funcionamiento el sistema, buscando que el sensor móvil este siempre entre los sensores fijos y se toman las cargas ascendentes y descendentes vs. tiempo por un minuto donde se obtienen la carta de superficie y la de la bomba, strokes por minuto, desplazamiento de la bomba y el porcentaje de fatiga de las varillas.

*Análisis de Dinagramas*¹⁹: Para poder explicar el procedimiento para el análisis de dinagramas es necesario revisar teoría sobre dinagramas. Como se explicó anteriormente, los dinagramas utilizados en Caño Limón son tomados en superficie registrando las cargas de la barra lisa durante el ciclo de bombeo donde se registran las cargas y los desplazamientos de la barra lisa como una función del tiempo. Estas cargas son causadas por variación en las cargas de la bomba, peso del fluido y aceleración entre otras.

Inicialmente se van a explicar los dinagramas de superficie teniendo en cuenta algunas condiciones simplificadas como el concepto de sarta de varillas elástica, velocidad de bombeo suficientemente baja como para eliminar las fuerzas dinámicas, eficiencia de llenado de la bomba de 100%, bombeo de un líquido incompresible y sin pérdidas de energía en la sarta de varillas.

Para que una bomba de desplazamiento positivo como la utilizada en el sistema de Bombeo Mecánico VSH2 trabaje con máxima eficiencia se debe cumplir que:

¹⁹ GONZALEZ, Op. Cit.

No exista deslizamiento (slippage) de fluido entre el cilindro y el pistón, la acción de las válvulas sea positiva e inmediata cuando el pistón cambia de dirección, el cilindro se llene completamente en cada ciclo de bombeo y el fluido bombeado sea incompresible.

Un dinagrama se representa por un paralelogramo similar al de la anterior figura. En el eje de las Y se indica la carga que se está teniendo en la barra lisa, la cual incluye el peso de las varillas, columna del fluido y rozamientos ocurridos en la bomba. En el eje X se indica el recorrido o desplazamiento del pistón.

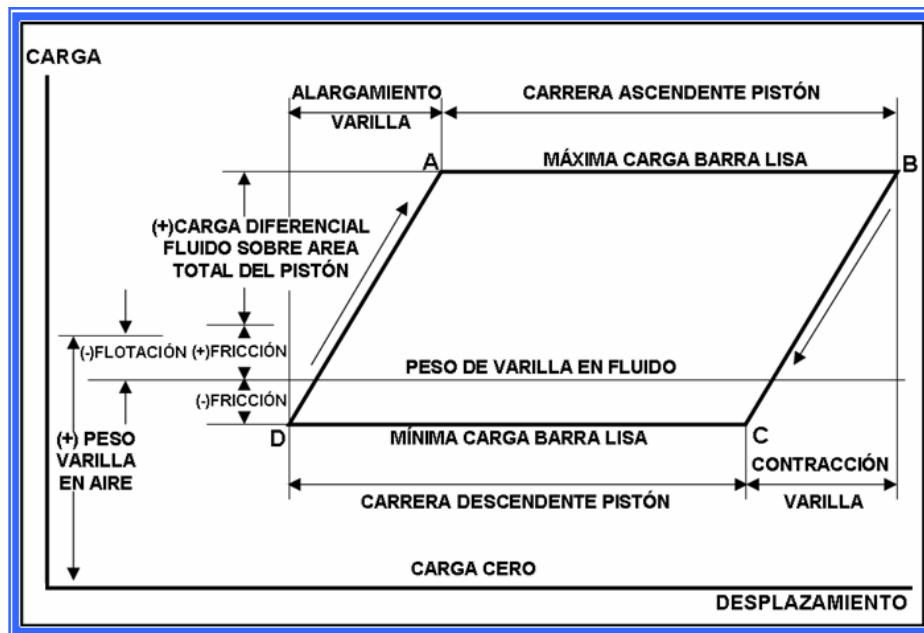
En el punto D empieza la carrera ascendente y la válvula viajera se cierra inmediatamente. La carga en la varilla se incrementa gradualmente hasta alcanzar su máximo valor ya que la carga de fluido es transferida desde la válvula fija hasta la válvula viajera en el punto A, donde el desplazamiento mostrado desde D - A significa el alargamiento que sufren las varillas por efecto de la carga aplicada. Aún no se mueve el pistón. El cilindro y la barra lisa se mueven al mismo tiempo hasta alcanzar el punto B manteniendo la carga constante, que es la carrera ascendente del pistón.

En el punto B se alcanza el fin de la carrera ascendente y empieza la carrera descendente con la inmediata apertura de la válvula viajera. La carga en la varilla desciende gradualmente hasta el punto C ya que la carga de fluido no es transportada durante más tiempo por la válvula viajera y la sarta de varillas se contrae hasta su posición original. La sarta de varillas, con la válvula viajera abierta, cae en los fluidos del pozo desde C hasta D, mientras la carga de la barra lisa es igual al peso de flotación de la sarta de varillas. Luego empieza un nuevo ciclo de bombeo.

A partir de esta descripción del ciclo de bombeo se concluye que, la carga máxima de la barra lisa es igual a la carga medida durante la prueba de la válvula viajera,

mientras que la carga mínima es igual a la válvula fija y la trayectoria del cilindro es inferior a la longitud del recorrido de la barra lisa debido al alargue de la sarta de varillas.

Figura 58. Dinagrama bajo condiciones ideales.



AUTOR: SALAS, Guillermo. Dinagramas: Manual de Interpretación. Zulia, Venezuela, 1976.

En un pozo real, el dinagrama que suele mostrarse es bastante diferente a las condiciones ideales explicadas, pues la presencia de cargas dinámicas, ondas de esfuerzo, compresibilidad de los fluidos o gas y problemas en fondo hacen que rara vez se cumplan las condiciones ideales.

El software utilizado en Caño Limón es el Total Well Manager (TWM), el cual basándose en los datos obtenidos del dinagrama de superficie construye también el dinagrama de fondo, permitiendo así obtener las condiciones de operación de la bomba de subsuelo debido a que refleja todas las fuerzas estáticas y dinámicas que ocurren desde la bomba hasta la sarta de varillas.


Los dinagramas de fondo ofrecen una observación más directa del funcionamiento de la bomba ya que son calculados a la misma profundidad en donde se encuentra ubicada la bomba. Las condiciones de superficie y de la sarta de varillas no afectan las cargas, por lo tanto, reflejan las cargas y desplazamientos en este punto.


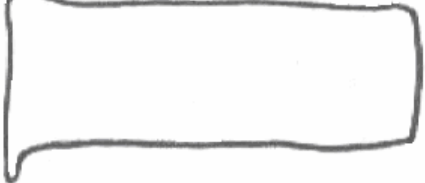
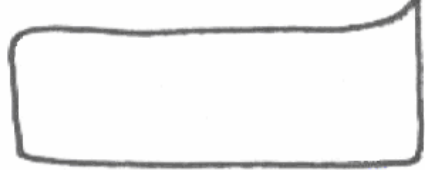
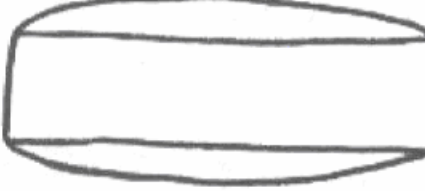


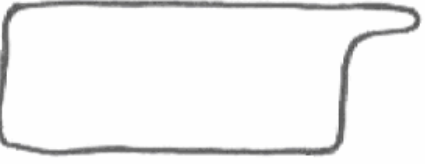
La interpretación de dinagramas puede ser de forma cualitativa o cuantitativa. La interpretación cualitativa proporciona información sobre las condiciones de bombeo en subsuelo. Con la interpretación cuantitativa se pueden valorar las cargas sobre la unidad de bombeo y del motor con respecto a caballaje y eficiencia de bombeo.








Con la interpretación de dinagramas es posible detectar problemas tales como: Varillas sueltas o rotas, bomba bloqueada por gas, bomba desanclada, golpe de fluido, bomba dañada, fuga de válvulas, golpe de fluido, etc.

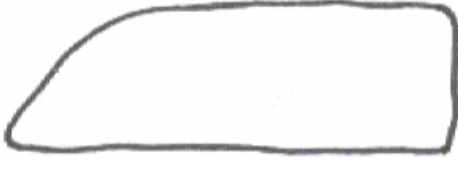
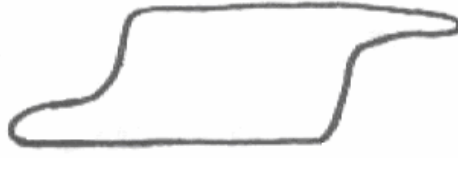





En este estudio el análisis del funcionamiento del sistema se hizo con base en los dinagramas de fondo debido a que tienen formas más características y más consistentes que los de superficie. En la tabla 17 se muestran algunas de las formas básicas de dinagramas de fondo, para tubería de producción anclada y no anclada.






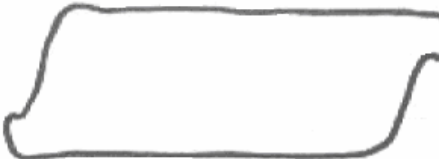

Tabla 17. Dinagramas típicos de fondo.

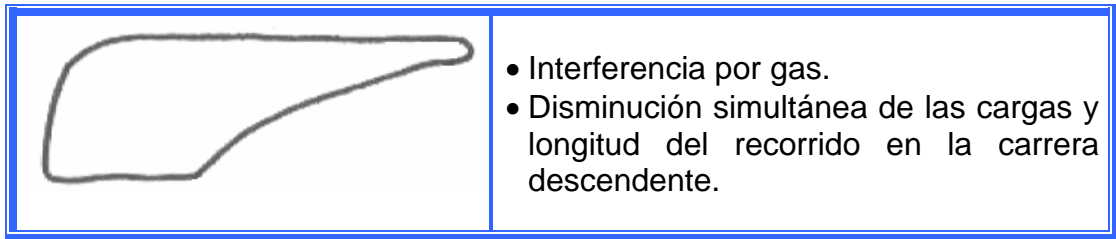
DINAGRAMA DE FONDO	DIAGNÓSTICO
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba llena. • Tubería anclada. • Alargamiento y compresión son nulos.

	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba llena. • Tubería desanclada o ancla no sujeta. • Alargamiento de varillas.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba llena. • Golpe de bomba. • Incremento de carga en el recorrido ascendente y disminución inmediatamente antes de empezarlo.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba llena. • Golpe de bomba. • Incremento de carga al final del recorrido ascendente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba llena. • Fricción de fluido alta. • Incremento de carga al llenarse y desocuparse la bomba.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba llena. • Fricción somera (prensa estopa muy apretado). • Disminución de carga al final de carrera ascendente y a lo largo de la carrera descendente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba llena. • Excesiva fricción en prensa estopa. • Disminución de carga al final de recorrido ascendente y aumento al final del descendente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Ligero golpe de fluido. • Tubería anclada. • Mantenimiento de carga al inicio de la carrera descendente por corto tiempo, hasta que el pistón encuentra el tope del fluido.

	<ul style="list-style-type: none"> • Golpe de fluido severo. • Tubería anclada. • Mantenimiento de carga al inicio de la carrera descendente por largo tiempo, hasta que el pistón encuentra el tope del fluido.
	<ul style="list-style-type: none"> • Golpe de fluido ligero. • Tubería desanclada. • Alargamiento de varillas. • Mantenimiento de carga al inicio de la carrera descendente por corto tiempo, hasta que el pistón encuentra el tope del fluido.
	<ul style="list-style-type: none"> • Golpe de fluido severo. • Tubería desanclada. • Alargamiento de varillas. • Mantenimiento de carga al inicio de la carrera descendente por largo tiempo, hasta que el pistón encuentra el tope del fluido.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba completamente sin nivel. • Tubería anclada. • La carga se mantiene constante tan pronto empieza la carrera descendente. • Tope de fluido prácticamente al inicio de la carrera ascendente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga en la válvula fija. • El periodo de mantenimiento de carga en la carrera descendente es muy corto.
	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga en la válvula viajera o en el pistón. • El periodo de mantenimiento de carga en la carrera ascendente es muy corto.
	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga severa en la válvula viajera. • El periodo de mantenimiento de carga en la carrera ascendente es muy casi nulo.

	<ul style="list-style-type: none"> • Combinación: tubería desanclada y fuga en la válvula viajera. • El periodo de mantenimiento de recorrido en la carrera ascendente es casi nulo.
	<ul style="list-style-type: none"> • Combinación: golpe de fluido y cierre tardío de la válvula viajera. • Mantenimiento de carga al empezar la carrera ascendente y descendente por corto tiempo, hasta posición del pistón
	<ul style="list-style-type: none"> • Cierre tardío de la válvula viajera causado por fluido emulsionado de la bomba. • Pequeño mantenimiento de carga al empezar la carrera ascendente, hasta donde la válvula viajera cierra totalmente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Llenado incompleto de la bomba por cierre tardío en la válvula viajera. • Largo mantenimiento de carga al empezar la carrera ascendente, hasta donde la válvula viajera cierra totalmente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Barril golpeado. • Incremento de carga en recorrido ascendente y disminución de la misma en el descendente, volviendo a la normalidad casi inmediatamente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Barril de la bomba desgastado o rajado. • Disminución de carga en el recorrido ascendente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Pistón de la bomba atascado. • Disminución e incremento de cargas, pero sin mantenimiento de las mismas (no existe recorrido).

	<ul style="list-style-type: none"> • Pistón atascado en la carrera ascendente. • Incremento de carga brusco en el recorrido ascendente, sin lograra mantener la misma.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba desgastada. • No existe mantenimiento de recorrido tanto ascendente como descendente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba severamente dañada. • Varillas partidas o pozo flumping. • No existe incremento o disminución de cargas.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba dañada. • No existe mantenimiento de longitud de recorrido
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba severamente dañada. • Poco mantenimiento de longitudes de recorrido y de carga soportada.
	<ul style="list-style-type: none"> • Mal funcionamiento del ancla de tubería. • Alargamiento de varillas. • Pequeño mantenimiento de carga al empezar la carrera ascendente y descendente por corto tiempo, hasta encontrar posición del pistón constante.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba bloqueada por gas. • No existe mantenimiento de cargas ni de longitudes de recorrido.



Fuente: GONZALEZ, Henry. Bombeo Mecánico para Ingenieros. Bogotá, Colombia. 2006.

Funcionamiento válvulas de la bomba. Es de vital importancia porque la capacidad de levantamiento de la bomba puede disminuir considerablemente con un ligero escape en cualquiera de las válvulas. Este parámetro es único del sistema de Bombeo Mecánico ya que el Bombeo Electrosumergible maneja una bomba centrífuga y no de succión.

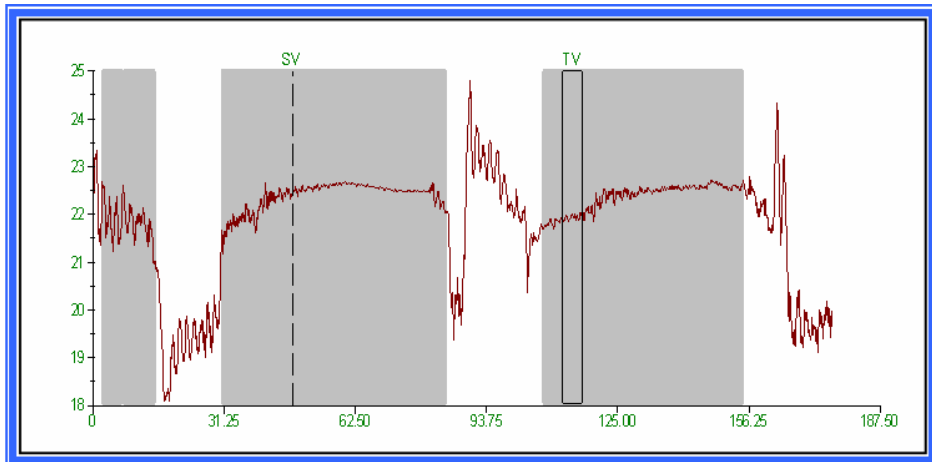
La condición de las válvulas se obtiene por medio Echometer, antes de tomar la prueba se deben esperar que la unidad realice varios ciclos completos para asegurar una acción apropiada de bomba. A continuación se explicará la prueba que se hace a cada válvula:

- *Válvula viajera:* Se debe detener la unidad en la carrera ascendente, aplicando el freno muy suavemente y dejándola detenida entre 5 y 10 segundos. Si las cargas permanecen constantes entonces tanto la válvula viajera como el pistón están en buenas condiciones, pero si por el contrario ocurre una caída de cargas constante o repentina se evidencia daño en la válvula viajera o el pistón. Esta operación se debe repetir deteniendo la unidad en posiciones diferentes de la carrera ascendente debido a que si el cilindro estuviese dañado se mostrarían fugas solo cuando el pistón se detenga en el área dañada del cilindro.
- *Válvula fija:* Se debe detener la unidad en la carrera descendente al menos un medio o dos tercios del final para asegurar que las cargas del fluido han sido

transferidas desde el pistón hacia la tubería. Al igual que para la válvula viajera una línea recta es indicativa de un buen estado de la válvula. Si la válvula fija está fugando la presión en el cilindro de la bomba podría caer y la válvula viajera podría recoger las cargas de fluido haciendo que las cargas sobre la barra lisa se incrementen. Si el pozo está presentado golpe de fluido debe detenerse suficientemente abajo para asegurar que las cargas de fluido están fuera de la válvula viajera.

Los resultados típicos de una prueba de válvulas son:

Figura 59. Resultados típicos de prueba de válvulas.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Presión en cabeza. Se le hace seguimiento por medio del manómetro ubicado en el arbolito de navidad de cada pozo completado con Bombeo Electrosumergible. Esta lectura se realiza paralelamente a la medida del nivel de fluido de los pozos.

Presión en fondo. Es un parámetro importante para la determinación del desempeño de Bombeo Electrosumergible, se obtiene por medio del sensor de fondo, el cual está ubicado en la parte inferior del motor y transmite este valor a un tablero electrónico en superficie, utilizando el cable de potencia que alimenta el

motor. Cabe notar que no a todos los pozos se les instala este sensor de fondo, únicamente se instala en pozos que necesitan mantener en permanente evaluación las condiciones del yacimiento.

Temperatura de fondo. También es importante para garantizar el buen funcionamiento del equipo de fondo y los datos se transmiten de forma similar que la presión de fondo. En el bombeo mecánico este parámetro no se mide, ya que no hay necesidad de hacer refrigeración de ninguna de sus partes.

6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para realizar una evaluación económica de los dos sistemas de Levantamiento Artificial en los pozos con caudales inferiores de 500 BFPD, es necesario tener en cuenta que tanto el sistema de Bombeo Electrosumergible como el Bombeo Mecánico VSH2 necesitan un transformador reductor (SDT) en superficie para regular la corriente de entrada al sistema, por lo tanto el costo de este equipo de superficie no se tuvo en cuenta para el cálculo de la inversión inicial. Los costos de cada Well Services se calcularon con dos días de RIG en cada pozo.

Con el fin de evaluar económicamente los sistemas de Levantamiento Artificial, Bombeo Electrosumergible y Bombeo Mecánico VSH2 en Caño Limón, se tuvieron en cuenta los costos causados por: Inversión inicial, costos de mantenimiento, costo de consumo de energía y pérdidas por diferida.

6.1 INVERSION INICIAL

Para la implementación de cualquiera de los dos sistemas de Levantamiento artificial en estudio se requiere adquirir equipos nuevos y realizar un Well Services que significan un capital que incluye desembolsos para la compra de equipos e instalación de los mismos. Como se explicó anteriormente el SDT (Step Down Transformer) no se tuvo en cuenta para éste cálculo.

6.1.1 Sistema de Bombeo Electrosumergible. Los costos de inversión inicial para el caso del Bombeo Electrosumergible están constituidos por: Bomba, sello, motor, intake, descarga, cable, MLE, SUT, variador y well services. En la siguiente tabla se muestra el valor del equipo en dólares:

Tabla 18. Costo Instalación Inicial Bombeo Electrosumergible.

EQUIPO	CL-Y1	CY-X1	LY-X1
BOMBA	23.000 US\$	6.000 US\$	4.000 US\$
SELLO	6.500 US\$	6.500 US\$	6.500 US\$
MOTOR	9.500 US\$	9.500 US\$	9.500 US\$
INTAKE	600 US\$	600 US\$	600 US\$
DESCARGA	100 US\$	100 US\$	100 US\$
CHAQUETA	3.700 US\$	3.700 US\$	3.700 US\$
MLE	1.500 US\$	1.500 US\$	1.500 US\$
CABLE	31.000 US\$	30.000 US\$	32.000 US\$
SUT	35.000 US\$	35.000 US\$	35.000 US\$
VARIADOR	150.000 US\$	150.000 US\$	150.000 US\$
WELL SERVICES	120.000 US\$	120.000 US\$	120.000 US\$
TOTAL	380.900 US\$	362.900 US\$	362.900 US\$

EQUIPO	LY-X2	LY-X3	LY-X4
BOMBA	18.000 US\$	7.500 US\$	8.500 US\$
SELLO	6.500 US\$	6.500 US\$	6.500 US\$
MOTOR	9.500 US\$	9.500 US\$	9.500 US\$
INTAKE	600 US\$	600 US\$	600 US\$
DESCARGA	100 US\$	100 US\$	100 US\$
CHAQUETA	3.700 US\$	3.700 US\$	3.700 US\$
MLE	1.500 US\$	1.500 US\$	1.500 US\$
CABLE	30.000 US\$	30.000 US\$	21.000 US\$
SUT	35.000 US\$	35.000 US\$	35.000 US\$
VARIADOR	150.000 US\$	150.000 US\$	150.000 US\$
WELL SERVICES	120.000 US\$	120.000 US\$	120.000 US\$
TOTAL	374.900 US\$	364.400 US\$	356.400 US\$

Fuente: Archivos de pagos Occidental de Colombia, Inc.

Con éstos precios tenemos como inversión inicial en los pozos en estudio para instalar Bombeo Electrosumergible en los pozos en estudio, teniendo en cuenta el equipo de superficie es de 2.202.400,00 US\$, con un costo promedio por instalación de 367.100 US\$.

6.1.2 Sistema de Bombeo Mecánico VSH2. Los costos de inversión inicial para el caso del Bombeo Mecánico VSH2 están constituidos por: Bomba, sarta de varillas, unidad de superficie y well services. En la siguiente tabla se muestra el valor del equipo en dólares:

Tabla 19. Costo Instalación Inicial Bombeo Mecánico VSH2.

EQUIPO	CL-Y1	CY-X1	LY-X1
BOMBA	5.600 US\$	2.600 US\$	2.600 US\$
VARILLAS 3/4"	16.000 US\$	15.000 US\$	25.000 US\$
VARILLAS 7/8"	10.000 US\$	9.500 US\$	8.500 US\$
VARILLAS 1"	10.500 US\$	12.700 US\$	-
UNIDAD SUPERFICIE	150.000 US\$	150.000 US\$	150.000 US\$
WELL SERVICES	120.000 US\$	120.000 US\$	120.000 US\$
TOTAL	312.100 US\$	309.800 US\$	306.100 US\$

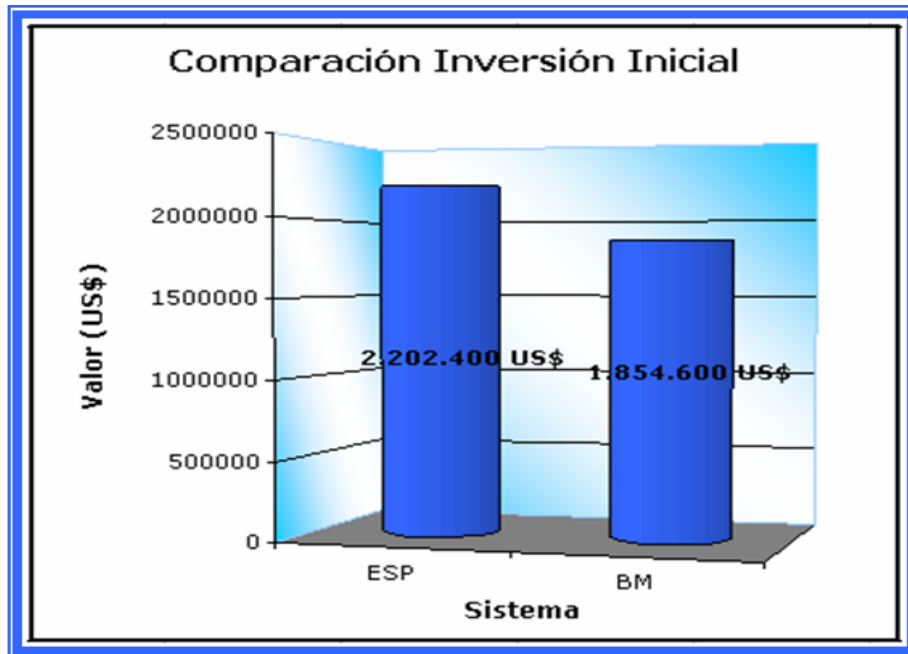
EQUIPO	LY-X2	LY-X3	LY-X4
BOMBA	5.600 US\$	5.600 US\$	5.600 US\$
VARILLAS 3/4"	13.000 US\$	13.000 US\$	-
VARILLAS 7/8"	11.500 US\$	11.500 US\$	19.000 US\$
VARILLAS 1"	11.500 US\$	11.500 US\$	8.800 US\$
UNIDAD SUPERFICIE	150.000 US\$	150.000 US\$	150.000 US\$
WELL SERVICES	120.000 US\$	120.000 US\$	120.000 US\$
TOTAL	311.600 US\$	311.600 US\$	303.400 US\$

Fuente: Archivos de pagos Occidental de Colombia, Inc.

Con los anteriores precios estimados la inversión inicial para instalar Bombeo Mecánico VSH2 en los pozos en estudio fue de 1.854.600 US\$, con un costo promedio por instalación de 309.100 US\$.

6.1.3 Comparación Inversión Inicial. En la siguiente gráfica se muestra la comparación de costos de inversión inicial, en donde se puede observar que el costo de la instalación del Sistema de Bombeo Electrosumergible es 16% más elevado que el de Bombeo Mecánico VSH2.

Figura 60. Comparación Costos de Inversión Inicial.



Fuente: MACHETE, E. Y.

6.2 COSTOS DE MANTENIMIENTO

Dentro de estos costos están incluidos los causados por mantenimiento al equipo de superficie, ya que generalmente el equipo de fondo en ambos sistemas no tiene mantenimiento preventivo, sino que se espera su falla para ser intervenido. El tiempo de vida promedio de los pozos analizados, calculado con base en la curva de declinación individual²⁰, es de: 3 años CL-Y1, 4 años CY-X1, 8 años LY-X1, 8.5 años LY-X2 y LY-X3 y 11 años LY-X4.

6.2.1 Sistema de Bombeo Electrosumergible. El Run Life promedio para este sistema en los pozos de estudio fue de 199 días, es decir aproximadamente 6,5 meses al cabo de los cuales será necesario reparar los equipos de subsuelo o colocar uno nuevo.

²⁰ Los cálculos y las curvas de declinación de cada pozo se encuentran en el Anexo E.

El equipo de fondo se podría recuperar cada instalación intermedia obteniendo los siguientes valores:

- Bombas, sellos, motores se podrían recuperar y con una reparación podrían volver a ser instalados costando así solo un porcentaje del valor del equipo nuevo. Para Bombas 80%, sellos 60% y motores 70% porcentajes que se han estimado de la información que se posee.
- Descargas, intakes, cable, SUT y Variador podrían instalarse nuevamente con una simple revisión, eliminando así el costo causado por estos equipos.
- El Motor Lead Extensión (MLE) e intake siempre se desechan por ser las piezas del equipo de fondo menos costosas y que sufren grandes daños durante la operación.
- El mantenimiento del equipo de superficie esta representado en el cambio de tarjetas electrónicas en los variadores de velocidad, que se efectuaría cada vez que se cambia el equipo de fondo.

Los costos de cada instalación con equipo de fondo reparado por pozo serían:

Tabla 20. Costo por instalación equipo reparado Bombeo Electrosumergible.

EQUIPO	CL-Y1	CY-X1	LY-X1
BOMBA	18.400 US\$	4.800 US\$	14.400 US\$
SELLO	3.900 US\$	3.900 US\$	3.900 US\$
MOTOR	6.650 US\$	6.650 US\$	6.650 US\$
INTAKE	600 US\$	600 US\$	600 US\$
MLE	1.500 US\$	1.500 US\$	1.500 US\$
TARGETAS	7.000 US\$	7.000 US\$	7.000 US\$
WELL SERVICES	120.000 US\$	120.000 US\$	120.000 US\$
TOTAL	158.050 US\$	144.450 US\$	142.850 US\$

EQUIPO	LY-X2	LY-X3	LY-X4
BOMBA	14.400 US\$	6.000 US\$	6.800 US\$
SELLO	3.900 US\$	3.900 US\$	3.900 US\$
MOTOR	6.650 US\$	6.650 US\$	6.650 US\$
INTAKE	600 US\$	600 US\$	600 US\$
MLE	1.500 US\$	1.500 US\$	1.500 US\$
TARGETAS	7.000 US\$	7.000 US\$	7.000 US\$
WELL SERVICES	120.000 US\$	120.000 US\$	120.000 US\$
TOTAL	154.050 US\$	145.650 US\$	146.450 US\$

Fuente: Archivos de pagos Occidental de Colombia, Inc.

Y los costos de cada instalación con equipo de fondo nuevo por pozo serían:

Tabla 21. Costo por instalación equipo nuevo Bombeo Electrosumergible.

EQUIPO	CL-Y1	CY-X1	LY-X1
BOMBA	23.000 US\$	6.000 US\$	4.000 US\$
SELLO	6.500 US\$	6.500 US\$	6.500 US\$
MOTOR	9.500 US\$	9.500 US\$	9.500 US\$
INTAKE	600 US\$	600 US\$	600 US\$
MLE	1.500 US\$	1.500 US\$	1.500 US\$
WELL SERVICES	120.000 US\$	120.000 US\$	120.000 US\$
TOTAL	168.100 US\$	151.100 US\$	149.100 US\$

EQUIPO	LY-X2	LY-X3	LY-X4
BOMBA	18.000 US\$	7.500 US\$	8.500 US\$
SELLO	6.500 US\$	6.500 US\$	6.500 US\$
MOTOR	9.500 US\$	9.500 US\$	9.500 US\$
INTAKE	600 US\$	600 US\$	600 US\$
MLE	1.500 US\$	1.500 US\$	1.500 US\$
WELL SERVICES	120.000 US\$	120.000 US\$	120.000 US\$
COSTO TOTAL	163.100 US\$	152.600 US\$	153.600 US\$

Fuente: Archivos de pagos Occidental de Colombia, Inc.

El número de instalaciones necesarias a lo largo de la vida útil de cada pozo, sin contar la instalación inicial son: 5 para CL-Y1, 7 para CY-X1, 14 para LY-X1, 15

para LY-X2, 15 para LY-X3 y 20 para LY-X4. De las anteriores la mitad son con equipo reparado y la otra mitad con equipo nuevo, dando los siguientes costos de mantenimiento a lo largo a la vida útil de cada pozo:

Tabla 22. Costos totales por mantenimiento Bombeo Electrosumergible.

POZO	EQUIPOS REPARADOS	EQUIPOS NUEVOS	TOTAL POR POZO
CL-Y1	474.150 US\$	336.200 US\$	810.350 US\$
CY-X1	577.800 US\$	453.300 US\$	1.031.100 US\$
LY-X1	999.950 US\$	1.043.700 US\$	2.043.650 US\$
LY-X2	1.232.400 US\$	1.141.700 US\$	2.374.100 US\$
LY-X3	1.165.200 US\$	1.068.200 US\$	2.233.400 US\$
LY-X4	1.464.500 US\$	1.536.000 US\$	3.000.500 US\$
TOTAL	5.914.000 US\$	5.579.100 US\$	11.493.100 US\$

Fuente: Archivos de pagos Occidental de Colombia, Inc.

Como se puede observar en la anterior figura, los costos de mantenimiento de equipo de superficie y de nuevas instalaciones para equipo de fondo tendría un costo total de 11.493.100,00 US\$.

6.2.2 Sistema de Bombeo Mecánico VSH2. El Run Life promedio para este sistema en los pozos de estudio fue de 307 días, es decir aproximadamente 10,2 meses al cabo de los cuales será necesario cambiar o reparar los equipos de subsuelo. Se consideró que la bomba de subsuelo se cambiaría en cada instalación, mientras que la sarta de varillas se reutilizaría por su larga vida útil.

El mantenimiento del equipo de superficie esta calculado en 1.100 US\$ para los 10 meses de Run Life de cada pozo, este mantenimiento comprende:

- Cambio de filtro de aceite hidráulico: Se debe realizar cada 5 meses.
- Cambio de aceite hidráulico: Se debe hacer cada tres meses.

- Engrase de Stuffing-Box: Se debe hacer cada 15 días.
- Engrase del motor: Se debe hacer cada 5 meses.

Bajo estas condiciones los costos de cada instalación, sin contar la inicial para éste sistema serían:

Tabla 23. Costos totales por mantenimiento Bombeo Mecánico VSH2.

POZO	BOMBA	MANT. SUPERFICIE	WELL SERVICES	TOTAL POR POZO
CL-Y1	5.600 US\$	1.100 US\$	120.000 US\$	126.700 US\$
CY-X1	2.600 US\$	1.100 US\$	120.000 US\$	123.700 US\$
LY-X1	2.600 US\$	1.100 US\$	120.000 US\$	123.700 US\$
LY-X2	5.600 US\$	1.100 US\$	120.000 US\$	126.700 US\$
LY-X3	5.600 US\$	1.100 US\$	120.000 US\$	126.700 US\$
LY-X4	5.600 US\$	1.100 US\$	120.000 US\$	126.700 US\$
TOTAL	27.600 US\$	6.600 US\$	720.000 US\$	754.200 US\$

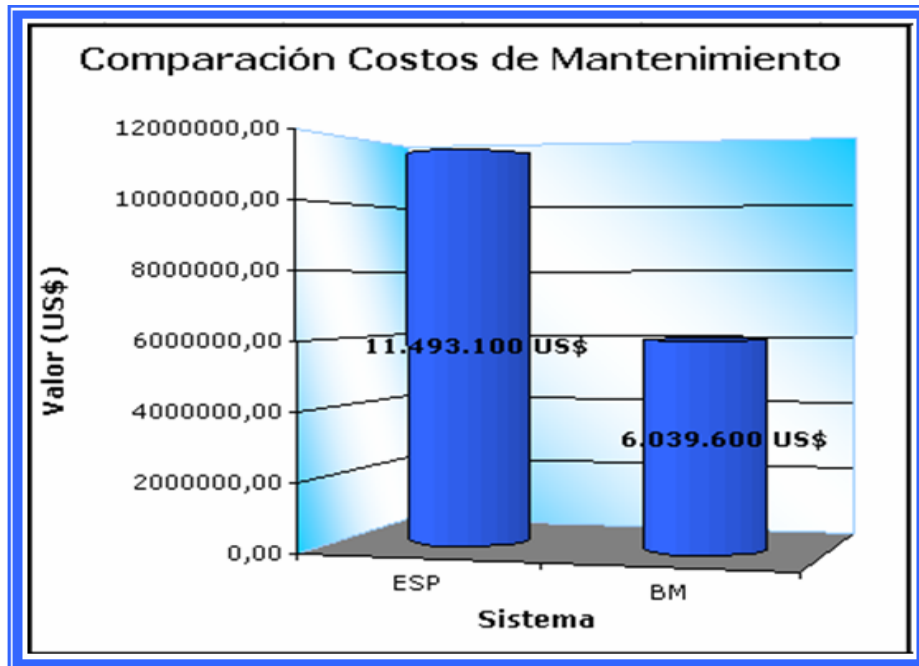
Fuente: Archivos de pagos Occidental de Colombia, Inc.

El número de instalaciones necesarias a lo largo de la vida útil de cada pozo, sin contar la instalación inicial son: 3 para CL-Y1, 5 para CY-X1, 9 para LY-X1, 9 para LY-X2, 9 para LY-X3 y 13 para LY-X4.

Por lo tanto, los costos totales de mantenimiento de equipo de superficie y nuevas instalaciones a lo largo de la vida útil de los pozos en estudio serían de 6.039.600 US\$.

6.2.3 Comparación Costos de Mantenimiento. La siguiente gráfica muestra la gran diferencia que existe entre los costos de mantenimiento de los dos Sistemas de Levantamiento Artificial, siendo el del Bombeo Electrosumergible 47% más costoso que el Bombeo Mecánico VSH2.

Figura 61. Comparación Costos de Mantenimiento.



Fuente: MACHETE, E. Y.

6.3 CONSUMO DE ENERGÍA

El consumo de energía es un parámetro de gran importancia en cualquier sistema de levantamiento Artificial, en primer lugar por el alto costo, y en segundo lugar por la disponibilidad de la misma, bien sea comprada o generada como sucede en Caño Limón.

Para el caso de Caño Limón, los dos sistemas de suministro de la energía (comprada y generada) en la actualidad están totalmente cargadas. Y es ahí donde se observa la gran importancia de este recurso debido a la necesidad de apagar los pozos en las horas pico de consumo (noche) ya que la línea Nacional se ve afectada por el consumo nocturno de las ciudades.

Los diferentes programas de cálculo de los equipos de levantamiento artificial calculan los valores de la energía consumida y el costo de MWh en Occidental de Colombia, Inc. es de 53,5 US\$, tanto para la energía comprada como generada.

6.3.1 Sistema de Bombeo Electrosumergible. En siguiente tabla se muestra, el consumo de energía teórico en MWh/día calculado por el software AutographPC, el consumo anual calculado con base en este valor, los años de vida útil de cada pozo de acuerdo a la curva de declinación y el costo causado por este concepto a lo largo de su vida útil.

Tabla 24. Consumo de Energía Bombeo Electrosumergible.

POZO	CONSUMO DIARIO (MWh/día)	CONSUMO ANUAL (MWh/año)	CONSUMO TOTAL (MWh)	COSTO CONSUMO
CL-Y1	0,70	255,50	766,5	41.008 US\$
CY-X1	0,70	255,50	1.022,0	54.677 US\$
LY-X1	0,77	281,05	2.248,4	120.289 US\$
LY-X2	0,67	244,55	2.078,7	111.209 US\$
LY-X3	0,64	233,6	1.985,6	106.230 US\$
LY-X4	0,37	135,05	1.485,6	79.477 US\$
TOTAL	3,85	1.405,25	9586,7	512.890 US\$

Fuente: MACHETE, E. Y.

6.3.2 Sistema de Bombeo Mecánico VSH2. En la siguiente tabla se puede ver el consumo de energía en MWH/día calculado por el Software Rodstar-d 3.0, el consumo anual calculado con base en este valor, los años de vida útil de cada pozo de acuerdo a la curva de declinación y el costo causado por este concepto a lo largo de su vida útil.

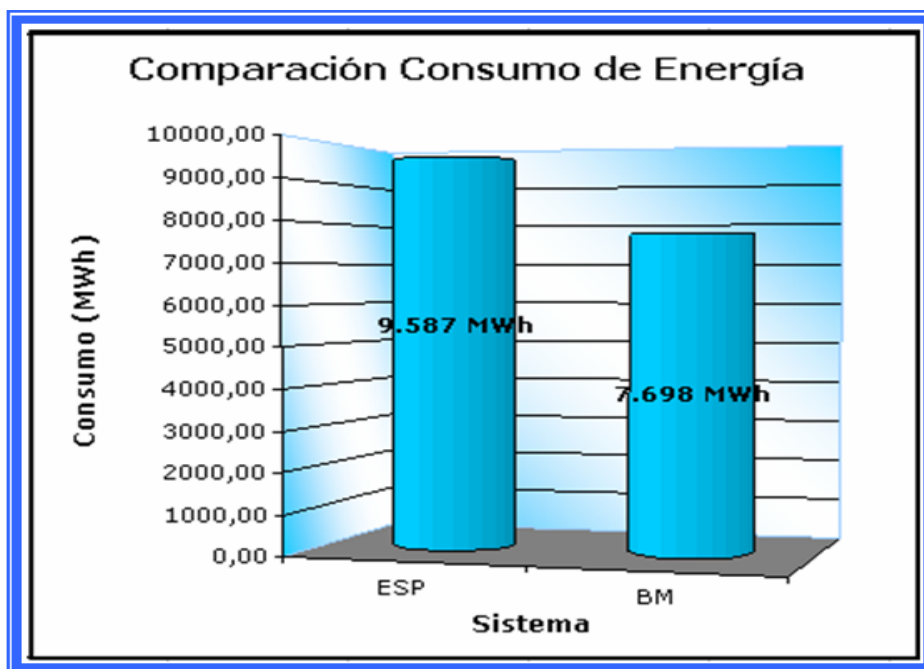
Tabla 25. Consumo de Energía Bombeo Electrosumergible.

POZO	CONSUMO DIARIO (MWh/día)	CONSUMO ANUAL (MWh/año)	CONSUMO TOTAL (MWh)	COSTO CONSUMO
CL-Y1	0,40	146,00	438,0	23.433 US\$
CY-X1	0,40	146,00	584,0	3.1244 US\$
LY-X1	0,35	127,75	1.022,0	54.677 US\$
LY-X2	0,45	164,25	1.396,1	74.693 US\$
LY-X3	0,57	208,05	1.768,4	94.611 US\$
LY-X4	0,62	226,30	2.489,3	133.178 US\$
TOTAL	2,79	1.018,35	7.697,9	411.835 US\$

Fuente: MACHETE, E. Y.

6.3.3 Comparación Consumo de Energía. En la siguiente gráfica se muestra la comparación de consumo de energía de los pozos en estudio a lo largo de su vida útil en MWh, observando que el consumo del Bombeo Mecánico VSH2 es 20% menor que el requerido por el Bombeo Electrosumergible.

Figura 62. Comparación Consumo de Energía.

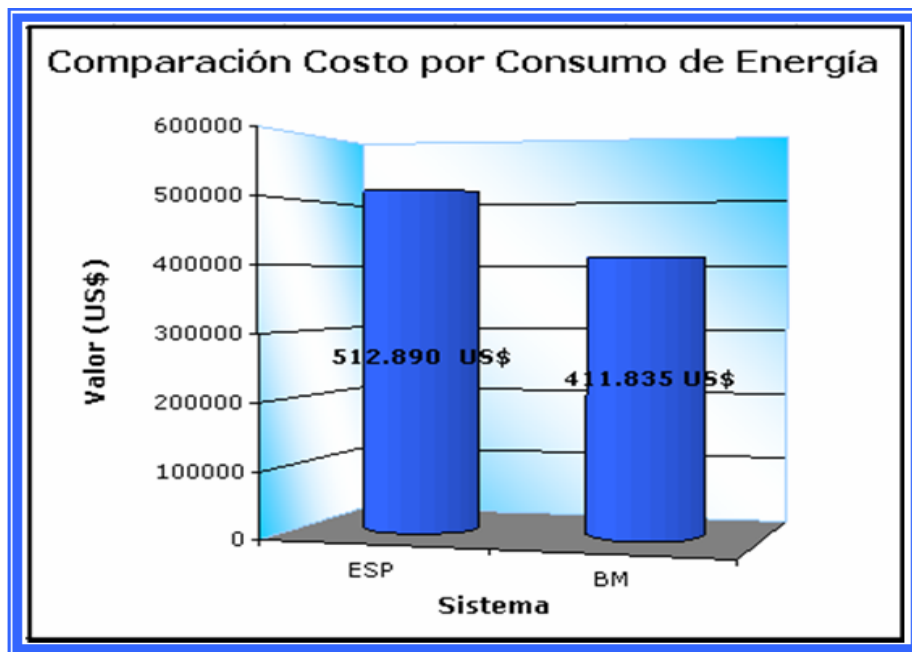


Fuente: MACHETE, E. Y.

La anterior figura muestra que el uso de Bombeo Mecánico VSH2 permite liberar energía para ser utilizada en otros pozos de bombeo Electrosumergible, bien para subir la frecuencia de operación y obtener más producción, o mantener pozos trabajando durante las horas de consumo máximo.

La siguiente figura muestra la gráfica de comparación de costos causados por el consumo de energía donde se puede ver que se obtiene menores costos por barril producido en los pozos con sistema de Bombeo Mecánico VSH2.

Figura 63. Comparación Costos por Consumo de Energía.



Fuente: MACHETE, E. Y.

6.4 PÉRDIDAS POR PRODUCCIÓN DIFERIDA

Cuando un pozo deja de correr genera pérdidas por producción diferida que son importantes para la compañía. Cualquier daño en el equipo de fondo de un pozo implica la asignación de taladro para realizar cambio del equipo, cuya asignación está condicionada a la producción de aceite del pozo.

Para pozos con caudal de aceite inferior a 150 BOPD no es inmediata, por lo tanto, estos pozos pueden tener largos períodos de producción diferida. Se asumió un tiempo aproximado de 10 días de producción diferida y se trabajo con 60 US\$ de costo del Barril de Aceite.

6.4.1 Sistema de Bombeo Electrosumergible. Los cálculos se hicieron tomando los caudales de producción de cada pozo esperada para el tiempo de falla, de acuerdo a la curva de declinación. Bajo estas condiciones las pérdidas por diferida causada a lo largo de la vida útil de cada pozo operando con el sistema de Bombeo Electrosumergible son:

Tabla 26. Pérdidas por diferida Bombeo Electrosumergible.

POZO	PÉRDIDAS ACEITE	COSTO DIFERIDA
CL-Y1	3.740	224.400 US\$
CY-X1	6.820	409.200 US\$
LY-X1	18.810	1.128.600 US\$
LY-X2	21.340	1.280.400 US\$
LY-X3	21.160	1.269.600 US\$
LY-X4	48.340	2.900.400 US\$
TOTAL	120.210	7.212.600 US\$

Fuente: MACHETE, E. Y.

6.4.2 Sistema de Bombeo Mecánico VSH2. El sistema de Bombeo Mecánico VSH2 también requiere nuevas instalaciones y los cálculos se efectuaron teniendo en cuenta los caudales dados según la curva de declinación en el momento de las fallas del Bombeo Mecánico VSH2, dando los siguientes resultados:

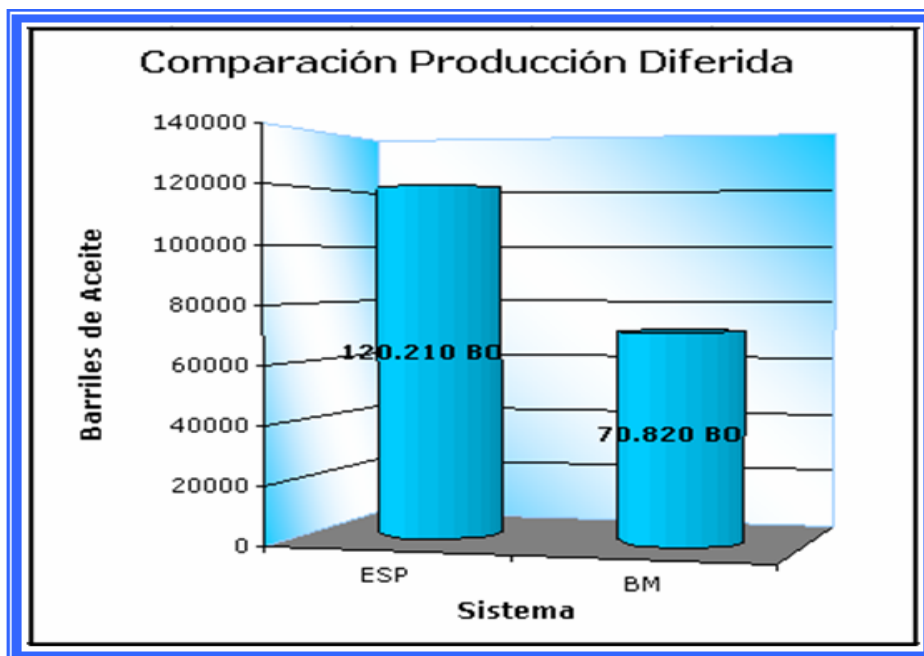
Tabla 27. Pérdidas por diferida Bombeo Mecánico VSH2.

POZO	PÉRDIDAS ACEITE	COSTO DIFERIDA
CL-Y1	2.210	132.600 US\$
CY-X1	4.140	248.400 US\$
LY-X1	11.060	663.600 US\$
LY-X2	12.210	732.600 US\$
LY-X3	12.350	741.000 US\$
LY-X4	28.850	1.731.000 US\$
TOTAL	70.820	4.249.200 US\$

Fuente: MACHETE, E. Y.

6.4.3 Comparación Pérdidas por Producción Diferida. En la siguiente gráfica se muestra la comparación de pérdidas por producción diferida que se presenta debido a la necesidad de realizar cambios en el equipo de fondo en cada uno de los sistemas, observando que las pérdidas con el Bombeo Mecánico VSH2 son inferiores en un 41% a las que se presentan al utilizar Bombeo Electrosumergible.

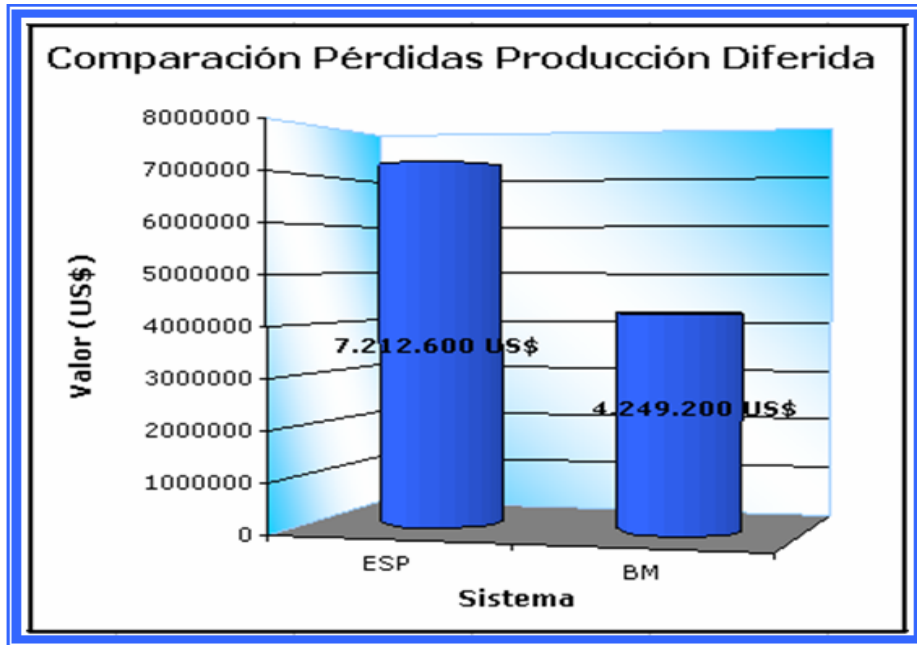
Figura 64. Comparación Producción Diferida.



Fuente: MACHETE, E. Y.

Por lo tanto, las pérdidas por producción diferida tienen el mismo comportamiento como se puede observar en la figura 65.

Figura 65. Comparación Pérdidas por Producción Diferida.



Fuente: MACHETE, E. Y.

6.5 EVALUACIÓN FINANCIERA²¹

Se presenta el análisis financiero del proyecto, en base a Valor Presente Neto (VPN), Dólar por Inversión (DPI) y Pay Back, que son los utilizados por Occidental de Colombia, Inc. para la evaluación de proyectos. Para realizar los cálculos se tuvieron en cuenta los costos generados por inversión inicial, cambios de equipo de fondo y consumo de energía.

Los índices económicos fueron calculados mediante el recurso informático utilizado por la compañía para la evaluación de proyectos, basados en el contrato

²¹ Los pantallazos de los resultados obtenidos en el software de OXY se muestran en el Anexo E.

Cravo Norte, Tasa de oportunidad de 15%, Regalías de 20%, Precio del crudo de 60 US\$ y la curva de producción acorde a la declinación individual.

6.6.1 Inversión. Los dos sistemas de levantamiento artificial necesitan una inversión, la cual sin tener en cuenta los costos por producción diferida fue estimada en:

Tabla 28. Comparación Inversión.

ASPECTO	BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	BOMBEO MECÁNICO VSH2
CL-Y1	1.158.000 US\$	564.000 US\$
CY-X1	1.348.000 US\$	678.000 US\$
LY-X1	1.895.000 US\$	1.042.000 US\$
LY-X2	2.044.000 US\$	940.000 US\$
LY-X3	1.931.000 US\$	940.000 US\$
LY-X4	3.371.000 US\$	1.559.000 US\$
TOTAL	11.747.000 US\$	5.723.000 US\$

Fuente: MACHETE, E. Y.

La diferencia que se observa entre los costos de inversión inicial para los dos Sistemas de Levantamiento Artificial es muy representativa para la economía de la compañía, con una diferencia de 6.024.000 US\$, siendo superior para el Bombeo Electrosumergible.

6.6.2 Valor Presente Neto (VPN). El Valor Presente Neto de implementación de Bombeo Electrosumergible y/o Bombeo Mecánico VSH2 para cada pozo y las diferencias producidas por los respectivos costos se muestran en la tabla 29.

En la siguiente tabla se puede observar que el Valor Presente Neto que se obtiene con el Sistema de Bombeo Mecánico VSH2 en todos los pozos es superior al del Bombeo Electrosumergible hasta en un 29%, con un promedio de 185.000 US\$ por pozo.

Tabla 29. Comparación Valor Presente Neto.

ASPECTO	BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	BOMBEO MECÁNICO VSH2
CL-Y1	428.000 US\$	603.000 US\$
CY-X1	933.000 US\$	1.125.000 US\$
LY-X1	2.705.000 US\$	2.983.000 US\$
LY-X2	3.011.000 US\$	3.243.000 US\$
LY-X3	3.097.000 US\$	3.258.000 US\$
LY-X4	7.544.000 US\$	7.614.000 US\$
TOTAL	17.718.000 US\$	18.826.000 US\$

Fuente: MACHETE, E. Y.

La diferencia de 1.108.000 US\$ a favor del Bombeo Mecánico VSH2 demuestra la importancia de la implementación de éste sistema, pues a pesar de tener una inversión más baja proporciona mayores ingresos representados en Valor Presente Neto.

6.6.3 Dólar por Inversión (DPI). Esta representa la cantidad de dólares recibidos por cada dólar invertido. Se obtuvo que el DPI de instalación de Bombeo Electrosumergible y/o Bombeo Mecánico VSH2 para cada pozo y las diferencias son:

Tabla 30. Comparación Dólar por Inversión.

ASPECTO	BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	BOMBEO MECÁNICO VSH2
CL-Y1	2,20	4,16
CY-X1	3,44	6,33
LY-X1	6,85	12,36
LY-X2	7,08	13,84
LY-X3	7,59	13,89
LY-X4	13,50	25,60
TOTAL	40,66	76,18

Fuente: MACHETE, E. Y.

Al igual que los ítems anteriores, el Dólar por Inversión favorece al Bombeo Mecánico VSH2 porque es aproximadamente el doble para cada pozo y en el proyecto total tiene 35,52 puntos más que el Bombeo Electrosumergible.

6.6.4 Tiempo de Pago de la Inversión (Pay Back). La inversión para este cada caso, tanto para Bombeo Mecánico VSH2 como para Bombeo Electrosumergible, se pagara 1 mes después de iniciada la producción, que corresponde a un periodo de tiempo bastante corto tratándose de proyectos de este tipo.

6.6.5 Tasa Interna de Retorno (TIR). La tasa interna de retorno para cada pozo es superior al 300% con cualquiera de los dos Sistemas de Levantamiento Artificial.

CONCLUSIONES

El sistema de Bombeo Mecánico VSH2 por ser de desplazamiento positivo y tener un re-time que permite ajustar un tiempo extra de llenado de la bomba en la carrera ascendente y/o descendente según sea el caso, logrando la estabilización de la producción en los pozos con caudales inferiores a 500 BFPD, además, la implementación de tecnología para el manejo de la arena como el Top Sand Packer Protector, doble válvula fija y viajera, pistón combinado y guía cerrada, ha traído excelentes resultados en el desarrollo del campo.

El Sistema de Bombeo Mecánico VSH2 se ajusta a la disminución y cambios de presión del yacimiento, disminuyendo su velocidad y longitud de recorrido y trabajando con sumergencia casi nula, con una eficiencia superior al 80%, convirtiéndose en una excelente opción para la explotación de los pozos con bajo caudal y bajo corte de agua.

La instalación de Bombeo Mecánico VSH2 como sistema de Levantamiento Artificial en seis pozos, ha disminuido un 27% del consumo de energía permitiendo así, utilizar más energía en otros pozos de bombeo Electrosumergible para subir la frecuencia de operación y obtener más producción o para incrementar el número de pozos trabajando durante las horas de consumo máximo.

El Bombeo Mecánico VSH2 ha incrementado en un 55% el Run Life de los pozos con bajo caudal disminuyendo de forma sustancial las pérdidas por producción diferida y los costos de mantenimiento de los pozos, que sumado a la diferencia económica en la inversión inicial y el consumo de energía muestran la viabilidad económica de la implementación de éste nuevo sistema de Levantamiento Artificial.

RECOMENDACIONES

Debido al comportamiento de producción, mantenimiento de producción y operación intermitente de los pozos LY-X1 y LY-Y1, se recomendó la instalación inmediata de Bombeo Mecánico VSH2 obteniendo excelentes resultados para la estabilización de su producción e incremento en la producción diaria del campo.

Se recomienda la adquisición de otras 10 unidades de Bombeo Mecánico VSH2 con el fin de hacer un estudio a los pozos con producción inferior a 500 BFPD y realizar un cambio de sistema de Levantamiento Artificial permitiendo la disminución del consumo de energía por éstos pozos.

Se recomienda continuar con la implementación de tecnología para el manejo de la producción de arena y realizar seguimiento a éstos pozos con el fin de estandarizar el uso de alguna de estas tecnologías que permita minimizar el problema e incrementar el Run Life del sistema de Levantamiento.

Hacer un seguimiento a los diseños futuros para Bombeo Mecánico VSH2 para evitar el sobredimensionamiento del sistema, sobre todo de las varillas y bomba de subsuelo y la disminución de costos de inversión inicial para el proyecto.

BIBLIOGRAFIA

AMOROCHO, Diana M. Análisis Técnico-Económico del retiro de válvulas de seguridad de fondo y panel OTIS en pozos del Campo Caño Limón. Bucaramanga, 2006, 95 p. Trabajo de Grado (Ingeniera de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

BAKER HUGHES COMPANY - CENTRILIFT. Handbook for Electrical Submersible Pumping Systems. Claremore, Oklahoma. 1997.

BROOKBANK, E. B. y BEBAK, K. Dando Sentido al Tiempo Medio Antes de la Avería (MTBF, sigla en inglés) y otras estadísticas de Vida Útil. Baker Hughes-Centrilift. 2003.

CLEVELAND, M.N y MOLINA, J. Deltaic Reservoir of the Caño Limon Field, Colombia, South América. Casebook in Easth Science, 1990.

GABELA, Victor H. Asociación ECOPETROL-Occidental Campo Caño Limón. Llanos Orientales de Colombia. En: II SIMPOSIO EXPLORACIÓN DE CUENCAS SUBANDINAS. Ponencias II Simposio Exploración de cuencas Subandinas. Bogotá, Agosto de 1985.

GONZALEZ, Henry. Bombeo Mecánico para Ingenieros. Bogotá, Colombia. 2006.

LANDMARK GRAPHICS CORPORATION. Drilling Information Mangement systems, DIMS. Base de Datos. Occidental de Colombia, Inc. Caño Limón, 2005.

LANDMARK GRAPHICS CORPORATION. Introduction to Dynamyc Surveillance System (DSS). November, 2002.

LASTRA, Rafael y RUEDA, Armando. Estimating MTBF Using Survival Analysis Techniques. En: 1997 ELECTRICAL SUBMURGIBLE PUMA WORKSHOP. Houston, Texas. 1997.

MARTINEZ, Gina y SANDOVAL, Angélica. Factibilidad de Implementación del Sistema de Bombeo Hidráulico en pozos de la formación Carbonera Superior del Campo Caño Limón. Santafé de Bogotá, 1999. Trabajo de Grado (Ingenieras de Petróleos). Universidad América.

OCCIDENTAL DE COLOMBIA, INC. Operation Systems: Artificial Lift System, Field Data Gathering System, Production Reporting, Production Geology, Production Graphics. Base de Datos Corporativa. Caño Limón-Arauca-Colombia, 2005.

OCCIDENTAL DE COLOMBIA, INC. Artificial Lift Failures. Base de datos Corporativa. Bogotá.

PAEZ, Ruth. Diplomado en producción. Universidad Industrial de Santander. Abril de 2001.

PERTUZ, Gustavo. Evaluación técnico-económica de la utilización de Bombeo Electrosumergible como Sistema de Levantamiento Artificial en los campos de la Superintendencia de Operaciones Orito de ECOPETROL S.A. Bucaramanga, Santander, 2005, 185 p. Trabajo de Grado (Ingeniero de Petróleos). Universidad Industrial de Santander.

RAMIREZ, Diego. Revisión del Mean Time to Failures (MTF) y determinación de nuevos indicadores para el control de Bombeo Electrosumergible aplicado al Campo Caño Limón. Medellín-Antioquía, 2005, 92 p. Trabajo de Grado (Ingeniero de Petróleos). Facultad de minas. Universidad Nacional de Medellín.

RIVERO R. T. y DOMINGUEZ J. G. Caño Limon Field Colombia: The Latest Giant Oil Reservoir in South America. SPE N° 15153, 1988.

SALAS, Guillermo. Dinagramas: Manual de Interpretación. Zulia, Venezuela, 1976.

SAWARYN, S. J. and ZIEGEL, E. Statical Assessment and Management of Uncertainty in the Number of Electrical Submersible Pump Failures in a Field. August, 2003.

TAKÁCS, Gábor. Bombeo Mecánico Moderno. Bucaramanga, Santander – Colombia. Consultarías y Servicios Integrados de Ingeniería Ltda.

TAKÁCS, Gábor. Sucker-Rod Pumping Manual. Oklahoma-USA, 2003. PennWell.

WEATHERFORD ARTIFICIAL LIFT SYSTEMS. Cronograma de Mantenimiento Unidad VSH2. Caño Limón, 2006.

WEATHERFORD ARTIFICIAL LIFT SYSTEMS. Operación Unidad VSH2. Unidades Hidráulicas de Velocidad Variable. Caño Limón, 2005.

WEATHERFORD ARTIFICIAL LIFT SYSTEMS. VSH2 Nitrogen-Over-Hidraulic Pumping Unit. U.S.A., 2002.

WEATHERFORD ARTIFICIAL LIFT SYSTEMS. VSH2 Set-Up & Operating Manual.

ANEXOS

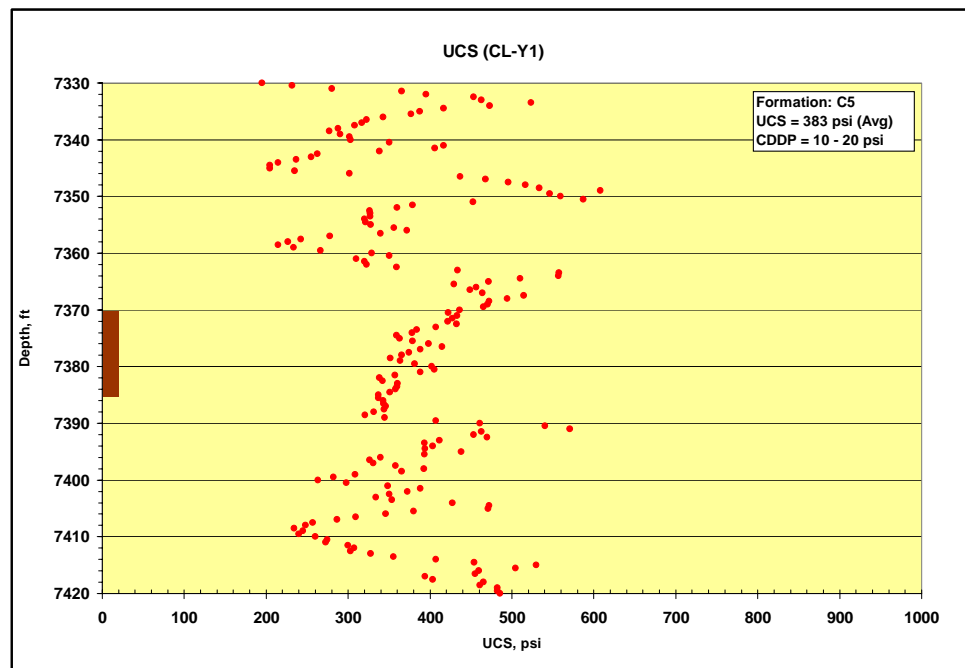
ANEXO A: GRÁFICAS UNCONSOLID COMPRESSIVE STRENGTH

El Unconsolid Compressive Strength (UCS) es el parámetro que da la presión a la que empieza el arenamiento del yacimiento. En cada gráfica se muestran los puntos de UCS para diferentes profundidades, los datos se calcularon con base en los registros o la petrofísica con la que se halla los datos de porosidad pozo.

Teniendo la porosidad, se tiene una correlación para el cálculo del UCS con la cual se pueden calcular cada uno de los puntos. De la gráfica se toman los puntos que están ubicados dentro del intervalo perforado y la tendencia de estos se asume como el valor del UCS a tener en cuenta.

A.1 Pozo CL-Y1

Figura A.1. Gráfica UCS pozo CL-Y1.

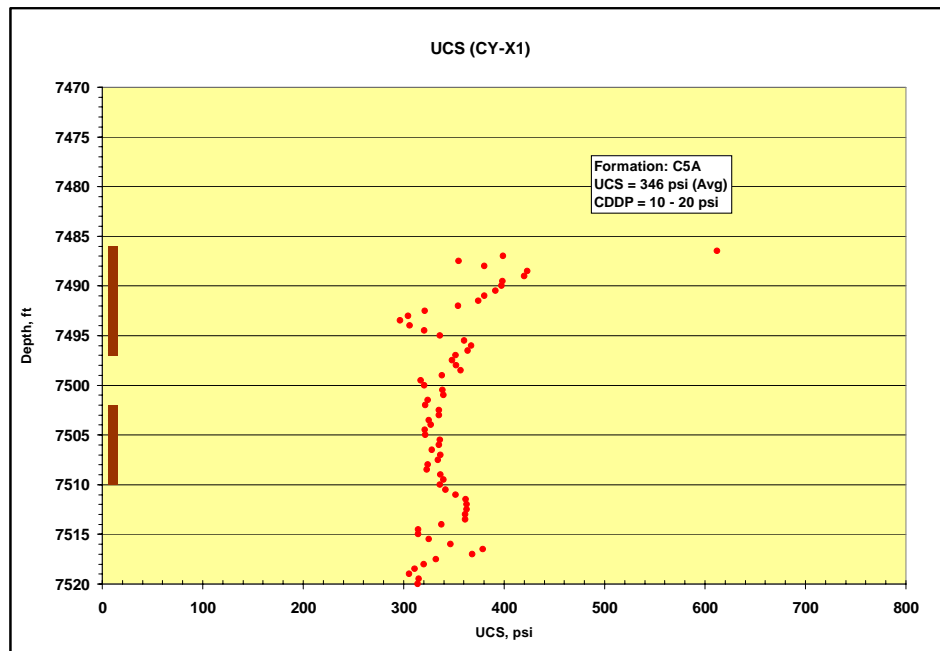


Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

El valor de UCS promedio según la gráfica es de 383 psi, por lo tanto este es el valor de DD utilizado para calcular el potencial de producción.

A.2 Pozo CY-X1

Figura A.2. Gráfica UCS pozo CY-X1.



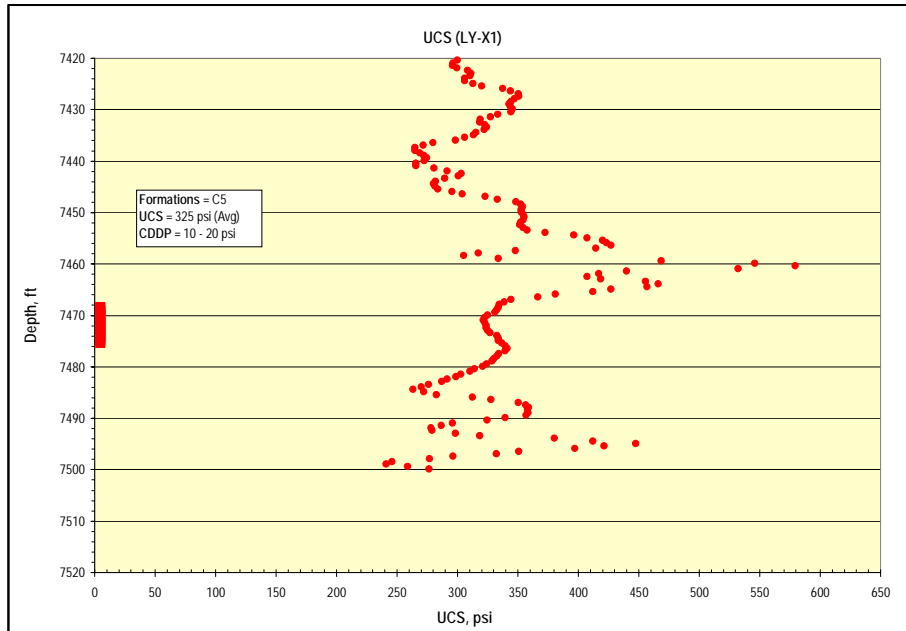
Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

El valor de UCS promedio según la gráfica es de 346 psi, por lo tanto este es el valor de DD utilizado para calcular el potencial de producción.

A.3 Pozo LY-X1

El valor de UCS promedio según la gráfica es de 383 psi, por lo tanto este es el valor de DD utilizado para calcular el potencial de producción.

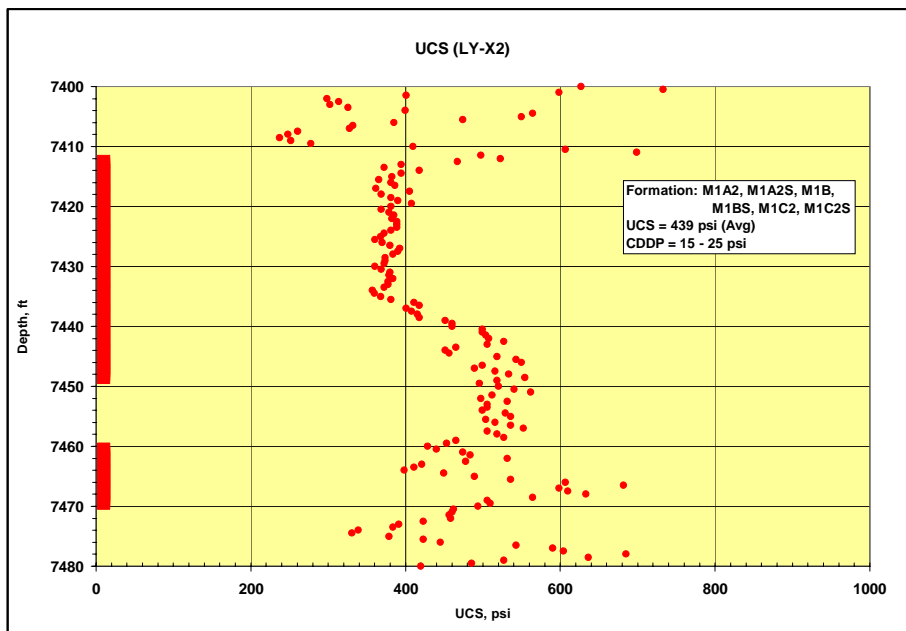
Figura A.3. Gráfica UCS pozo LY-X1.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

A.4 Pozo LY-X2

Figura A.4. Gráfica UCS pozo LY-X2.

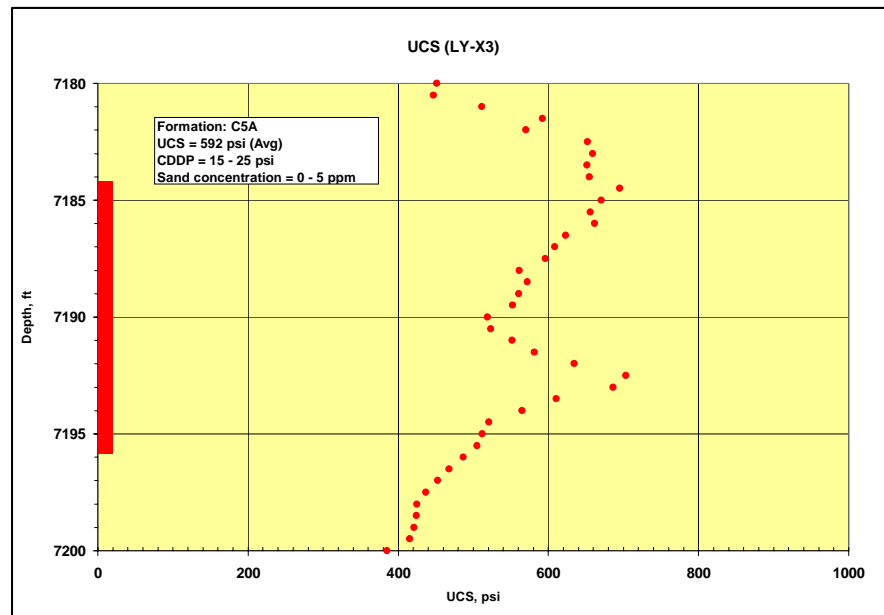


Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

El valor de UCS promedio según la gráfica es de 439 psi, por lo tanto este es el valor de DD utilizado para calcular el potencial de producción.

A.5 Pozo LY-X3

Figura A.5. Gráfica UCS pozo LY-X3.



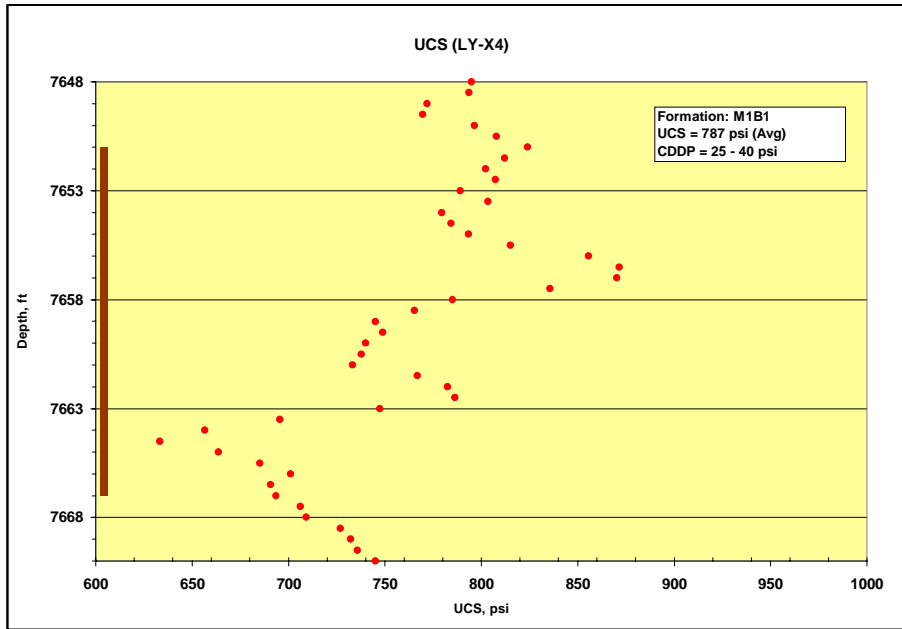
Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

El valor de UCS promedio según la gráfica es de 592 psi, por lo tanto este es el valor de DD utilizado para calcular el potencial de producción.

A.6 Pozo LY-X4

El valor de UCS promedio según la gráfica es de 787 psi, por lo tanto este es el valor de DD utilizado para calcular el potencial de producción.

Figura A.6. Gráfica UCS pozo LY-X4.




Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

ANEXO B: PARAMETROS DE YACIMIENTOS

Para cada uno de los pozos se realizo el respectivo diseño para Bombeo Electrosumergible y para Bombeo Mecánico VSH2 basados en los parámetros de yacimientos mas recientes, los cuales se muestran a continuación para cada pozo.

B.1 Pozo CL-Y1


Figura B.1. Parámetros de Diseño CL-Y1.

	PUMP DESIGN RESERVOIR DATA
DATE: <u>OCTOBER 20, 2005</u>	WELL: <u>CAÑO LIMÓN Y1</u>
	OPEN SAND: <u>C5</u>
CURRENT CONDITIONS	
STATIC PRESSURE: <u>300</u> PSIA AT <u>7,100</u> FT-TVSS	
STATIC PRESSURE: <u>222</u> PSIA AT PMP <u>6,896</u> FT-TVSS	
PRODUCTIVITY INDEX: <u>2.1</u> BFPD/PSIA	
WATER CUT: <u>1</u> %	
IN 15 MONTHS	
STATIC PRESSURE: <u>150</u> PSIA AT <u>7,100</u> FT-TVSS	
PRODUCTIVITY INDEX: <u>2.9</u> BFPD/PSIA	
WATER CUT: <u>30</u> %	
REMARKS:	RECOMMENDED
Y-TOOL: <u>YES</u>	PACKER: <u>NO</u>
	RATE: <u>200 BFPD</u>
PERFORMED BY: <u>XXXXXXXX</u>	

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

B.2 Pozo CY-X1


Figura B.2. Parámetros de Diseño CY-X1.

	PUMP DESIGN RESERVOIR DATA
	DATE: <u>FEBRUARY 17, 2004</u> WELL: <u>CAÑO YARUMAL X1</u> OPEN SANDS: <u>C5</u>
CURRENT CONDITIONS	
STATIC PRESSURE: <u>300</u> PSIA AT <u>7,100</u> FT-TVSS	
STATIC PRESSURE: <u>204</u> PSIA AT <u>6,858</u> FT-TVSS	
PRODUCTIVITY INDEX: <u>19</u> BFPD/PSIA	
WATER CUT: <u>65</u> %	
IN 15 MONTHS	
STATIC PRESSURE: <u>100</u> PSIA AT <u>7100</u> FT-TVSS	
PRODUCTIVITY INDEX: <u>20.8</u> BFPD/PSIA	
WATER CUT: <u>70</u> %	
REMARKS:	
Y-TOOL: <u>NO</u>	PACKER: <u>NO</u>
RECOMMENDED RATE: <u>200 BFPD</u>	
PERFORMED BY: <u>XXXXXXXX</u>	

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

B.3 Pozo LY-X1


Figura B.3. Parámetros de Diseño LY-X1.

	PUMP DESIGN RESERVOIR DATA	
	DATE: <u>NOVEMBER 15, 2006</u>	WELL: <u>LA YUCA X1</u> <u>OPEN SANDS C5</u>
CURRENT CONDITIONS		
STATIC PRESSURE: <u>225</u> PSIA AT <u>7,100</u> FT-TVSS		
STATIC PRESSURE: <u>121</u> PSIA AT PMP <u>6,817</u> FT-TVSS		
PRODUCTIVITY INDEX: <u>5,6</u> BFPD/PSIA		
WATER CUT: <u>5</u> %		
IN 15 MONTHS		
STATIC PRESSURE: <u>175</u> PSIA AT <u>7,100</u> FT-TVSS		
PRODUCTIVITY INDEX: <u>6,9</u> BFPD/PSIA		
WATER CUT: <u>25</u> %		
REMARKS:		
Y-TOOL: <u>NO</u>	PACKER: <u>NO</u>	RECOMMENDED
		RATE: <u>150 BFPD</u>
RECOMMENDATIONS:		
•To set pump intake as deep as possible.		
•To design Sucker Rod Pumping with a surmergency equals to zero.		
PERFORMED BY: <u>XXXXX</u>		

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

B.4 Pozo LY-X2


Figura B.4. Parámetros de Diseño LY-X2.

	PUMP DESIGN RESERVOIR DATA
DATE: <u>DECEMBER 22, 2004</u>	WELL: <u>LA YUCA X2</u>
	OPEN SANDS: <u>C5B</u>
CURRENT CONDITIONS	
STATIC PRESSURE: <u>701</u> PSIA AT <u>7100</u> FT-TVSS	
STATIC PRESSURE: <u>562</u> PSIA AT PMP <u>6718</u> FT-TVSS	
PRODUCTIVITY INDEX: <u>1.31</u> BFPD/PSIA	
WATER CUT: <u>1%</u>	
IN 15 MONTHS	
STATIC PRESSURE: <u>100</u> PSIA AT <u>7100</u> FT-TVSS	
PRODUCTIVITY INDEX: <u>1.8</u> BFPD/PSIA	
WATER CUT: <u>30%</u>	
REMARKS:	RECOMMENDED
Y-TOOL: YES	PACKER: NO
	RATE: 100 - 200 BFPD
To install permanent pressure sensor.	
PERFORMED BY: <u>XXXXXX</u>	

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

B.5 Pozo LY-X3


Figura B.5. Parámetros de Diseño LY-X3.

	PUMP DESIGN RESERVOIR DATA
	DATE: <u>MAY 10th, 2008</u> WELL: <u>LA YUCA X3</u> OPEN SANDS: <u>C5A</u>
CURRENT CONDITIONS	
STATIC PRESSURE: <u>197</u> PSIA AT <u>7,100</u> FT-TVSS	
STATIC PRESSURE: <u>48</u> PSIA AT <u>6,693.3</u> FT-TVSS	
PRODUCTIVITY INDEX: <u>4.13</u> BFPD/PSIA	
WATER CUT: <u>3%</u>	
IN 15 MONTHS	
STATIC PRESSURE: <u>150</u> PSIA AT <u>7,100</u> FT-TVSS	
PRODUCTIVITY INDEX: <u>4.67</u> BFPD/PSIA	
WATER CUT: <u>15%</u>	
REMARKS: RECOMMENDED	
Y-TOOL: <u>NO</u> PACKER: <u>NO</u> RATE: <u>30</u> BFPD	
PERFORMED BY: <u>XXXXXXXX</u>	

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

B.6 Pozo LY-X4

Figura B.6. Parámetros de Diseño LY-X4.

	PUMP DESIGN RESERVOIR DATA
	DATE: <u>MAY 09th, 2006</u> WELL: <u>La Yica-X3</u> OPEN SANDS : <u>M1B1</u>
CURRENT CONDITIONS	
STATIC PRESSURE: <u>1,997</u> PSIA AT <u>7,100</u> FT-TVSS	
STATIC PRESSURE: <u>1,851</u> PSIA AT PMP <u>6,725</u> FT-TVSS	
PRODUCTIVITY INDEX: <u>14.0</u> BFPD/PSI	
WATER CUT: <u>15</u> %	
IN 15 MONTHS	
STATIC PRESSURE: <u>900</u> PSIA AT <u>7,100</u> FT-TVSS	
PRODUCTIVITY INDEX: <u>16.7</u> BFPD/PSI	
WATER CUT: <u>30.0</u> %	
REMARKS:	RECOMMENDED
Y-TOOL: <u>NO</u> PACKER: <u>NO</u>	RATE: <u>200</u> BFPD
•Flowing Conditions, P= <u>900</u> psi	
•Shut in Condition, P= <u>2000</u> psi	
PERFORMED BY: <u>XXXXXXXX</u>	

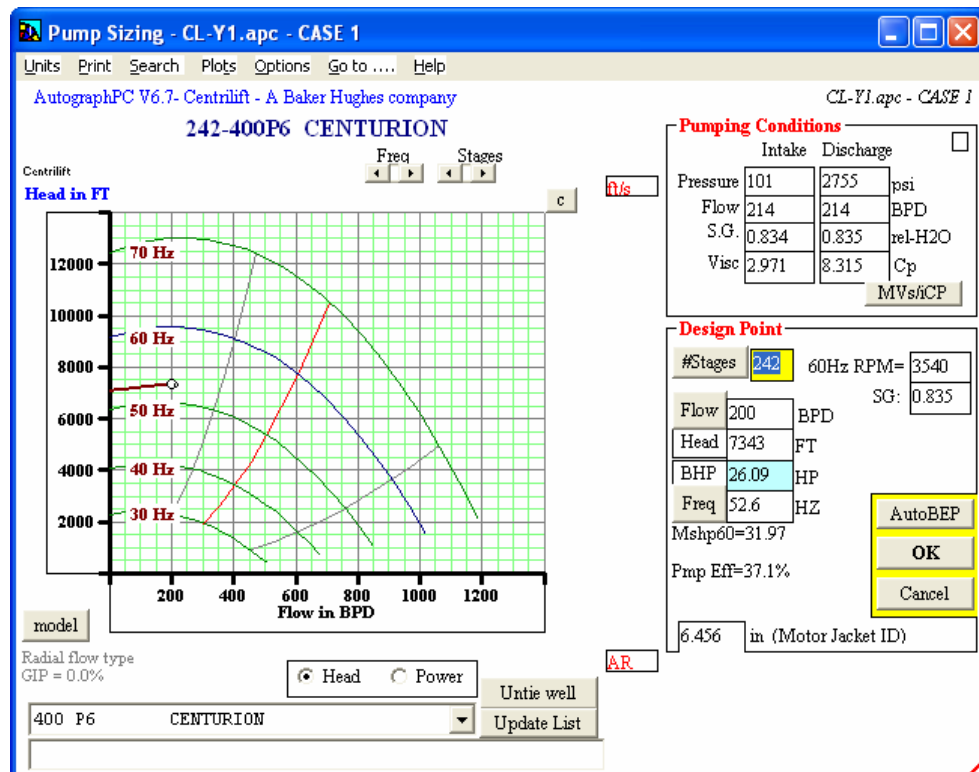
Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

ANEXO C: DISEÑOS BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

Al realizar el respectivo Diseño para Bombeo Electrosumergible se obtuvieron las siguientes graficas de la bomba, donde se puede observar la forma como quedaría trabajando el sistema.

C.1 Pozo CL-Y1

Figura C.1. Gráfica Bombeo Electrosumergible pozo CL-Y1.

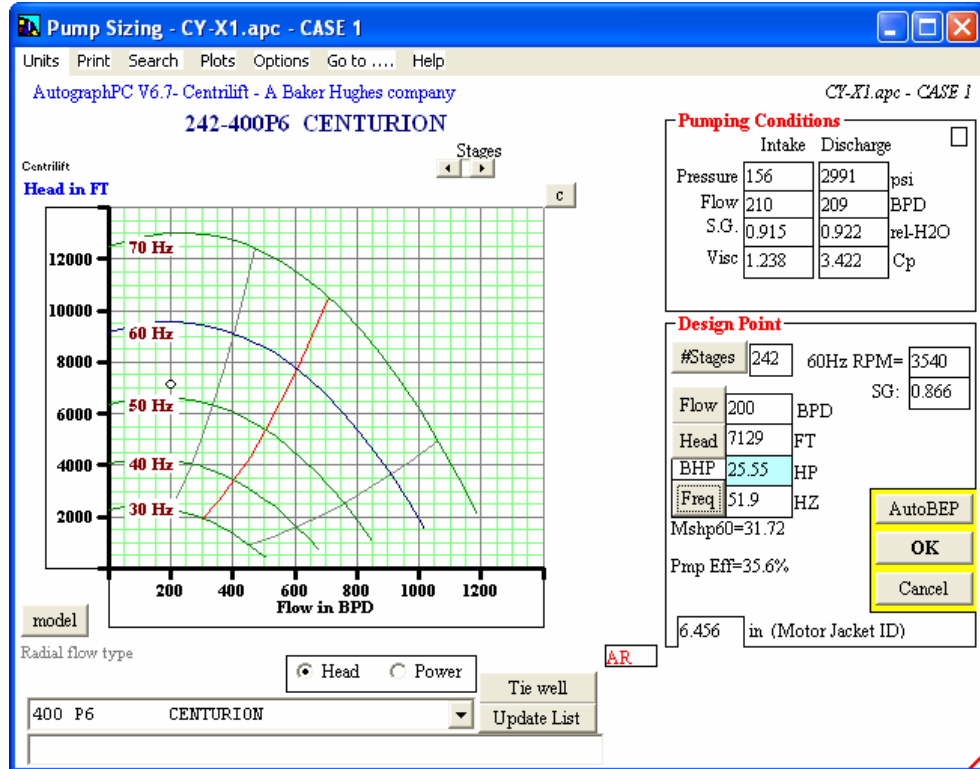


Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Se puede observar que el Sistema quedaría trabajando en la parte de Down Thrust, aun tomando como referencia el caso 1 y sería necesario colocarle chaqueta al motor y etapas resistentes a la abrasión a la bomba.

C.2 Pozo CY-X1

Figura C.2. Gráfica Bombeo Electrosumergible pozo CY-X1.



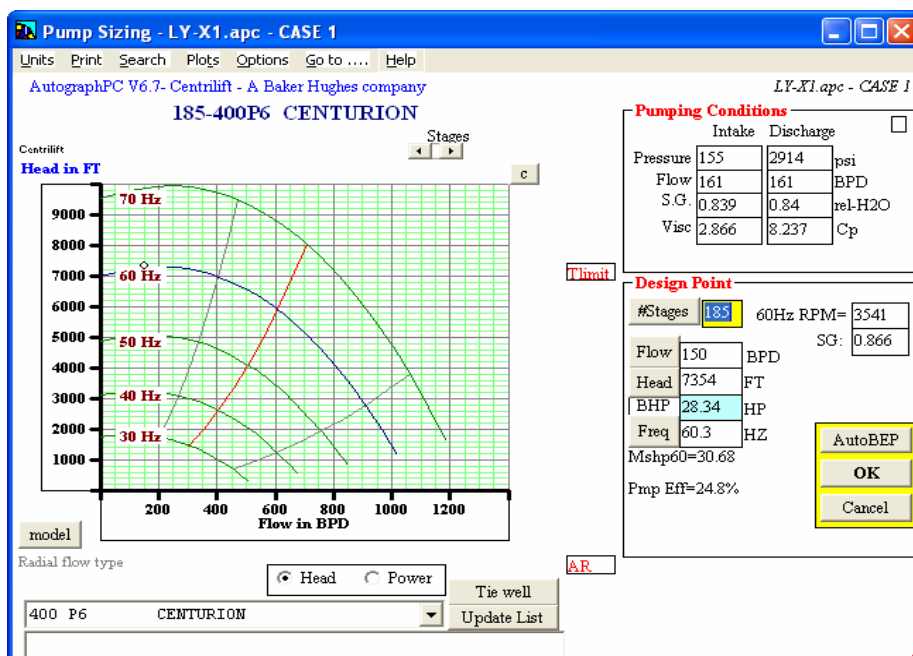
Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Se puede observar que el Sistema quedaría trabajando en la parte de Down Thrust, aun tomando como referencia el caso 1 y seria necesario colocarle tapas resistentes a la abrasión a la bomba.

C.3 Pozo LY-X1

Se puede observar que el Sistema quedaría trabajando en la parte de Down Thrust, aun tomando como referencia el caso 1, la temperatura sobrepasa el valor máximo permitido por el sistema y seria necesario colocarle etapas resistentes a la abrasión a la bomba.

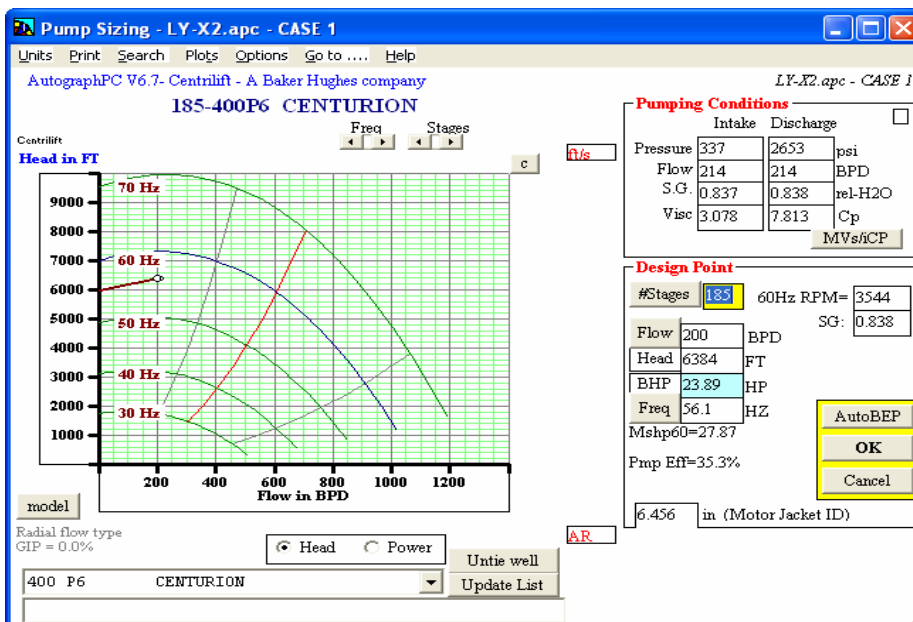
Figura C.3. Gráfica Bombeo Electrosumergible pozo LY-X1.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

C.4 Pozo LY-X2

Figura C.4. Gráfica Bombeo Electrosumergible pozo LY-X2.

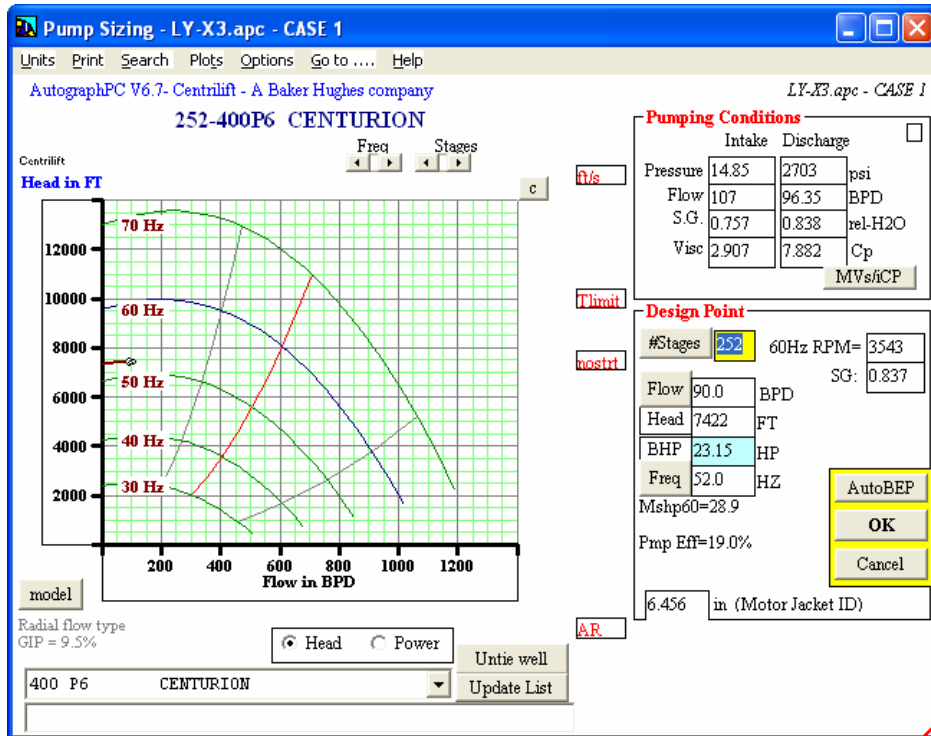


Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Se puede observar que el Sistema quedaría trabajando en la parte de Down Thrust, aun tomando como referencia el caso 1 y seria necesario colocarle etapas resistentes a la abrasión a la bomba.

C.5 Pozo LY-X3

Figura C.5. Gráfica Bombeo Electrosumergible pozo LY-X3.

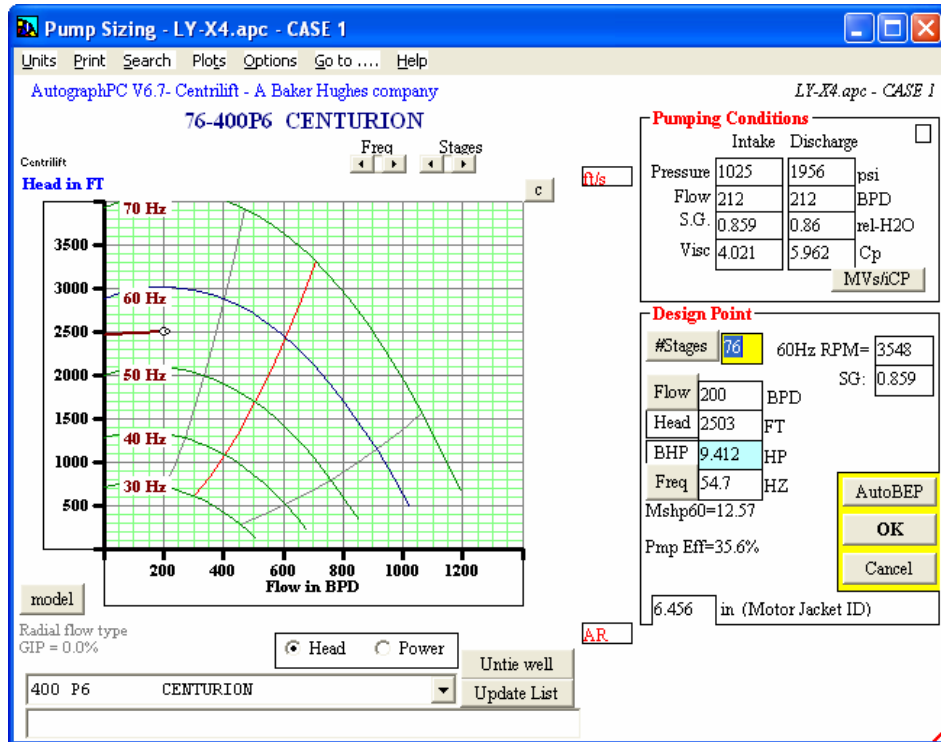


Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Se puede observar que el Sistema quedaría trabajando en la parte de Down Thrust, aun tomando como referencia el caso 1, la temperatura sobrepasa el valor máximo permitido por el sistema de trabajo y seria necesario colocarle etapas resistentes a la abrasión a la bomba y chaqueta al motor. Es decir, seria demasiado arriesgado trabajar el sistema bajo estas condiciones.

C.6 Pozo LY-X4

Figura C.6. Gráfica Bombeo Electrosumergible pozo LY-X4.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

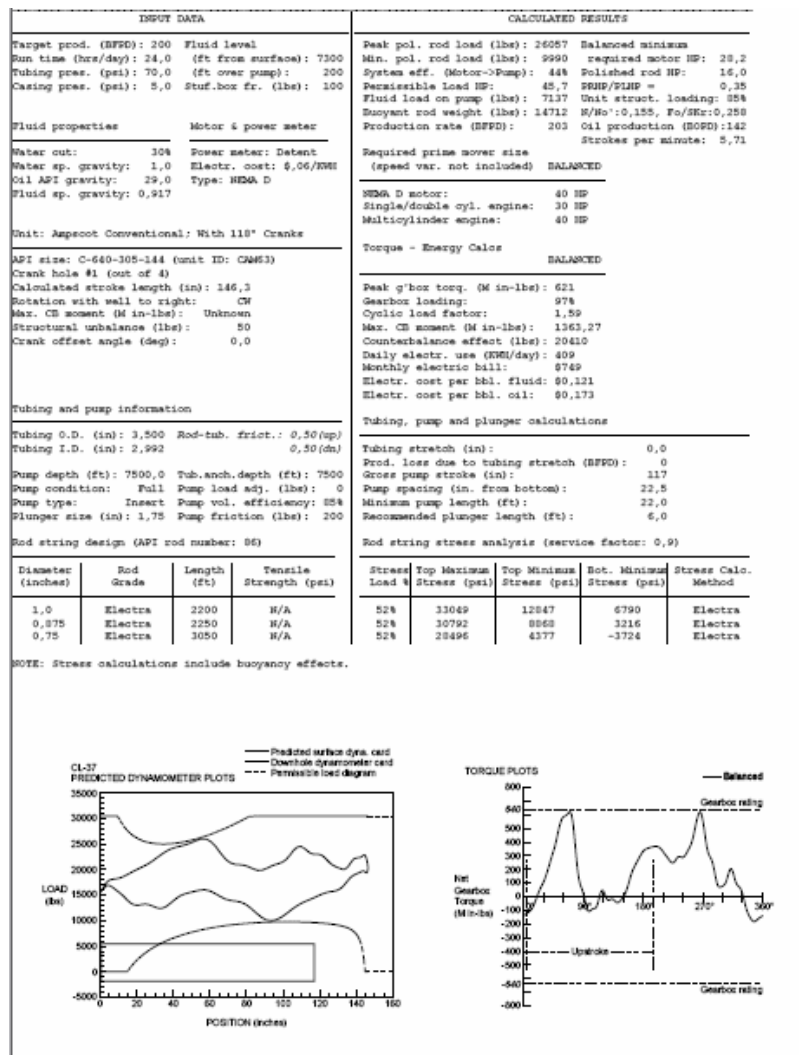
Se puede observar que el Sistema quedaría trabajando en la parte de Down Thrust, aun tomando como referencia el caso 1 y sería necesario colocarle etapas resistentes a la abrasión a la bomba y chaqueta al motor.

ANEXO D: DISEÑOS BOMBEO MECANICO VSH2

Al realizar el respectivo Diseño para Bombeo Mecánico VSH2 se obtuvieron los siguientes resultados, donde se puede observar como trabajaría el sistema.

D.1 Pozo CL-Y1

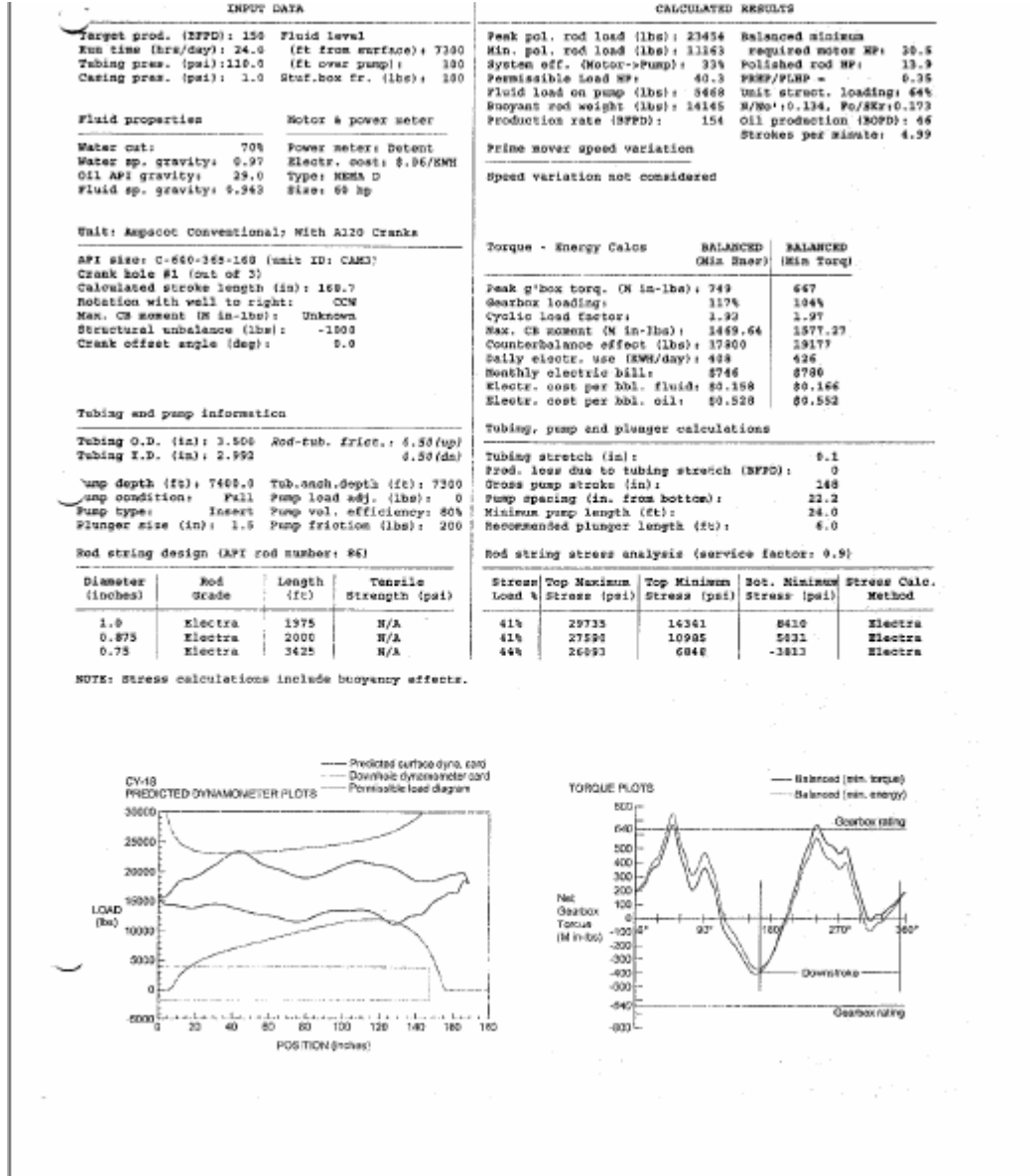
Figura D.1. Gráfica Bombeo Mecánico VSH2 CL-Y1.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

D.2 Pozo CY-X1

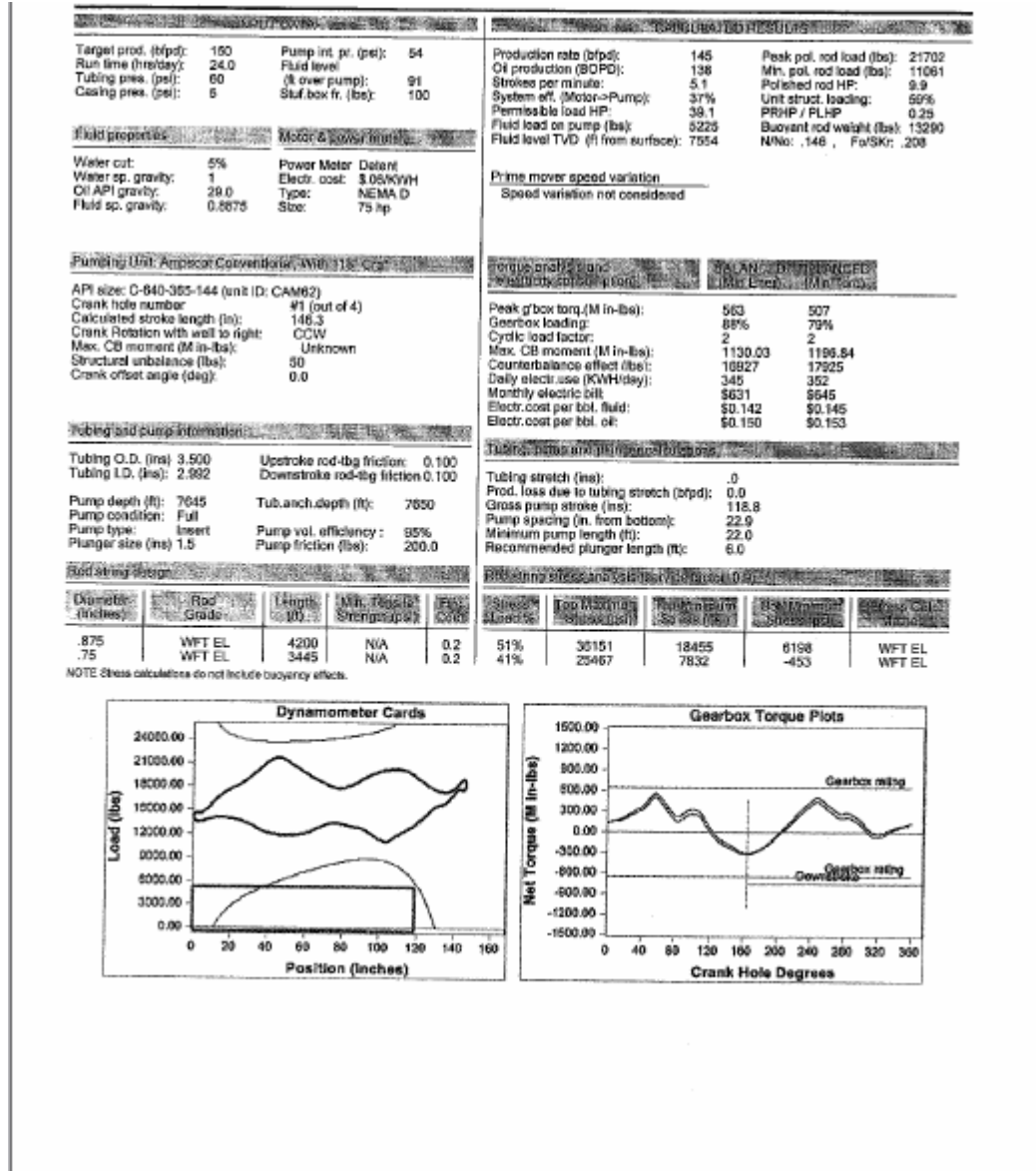
Figura D.2. Gráfica Bombeo Mecánico VSH2 CY-X1.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

D.3 Pozo LY-X1

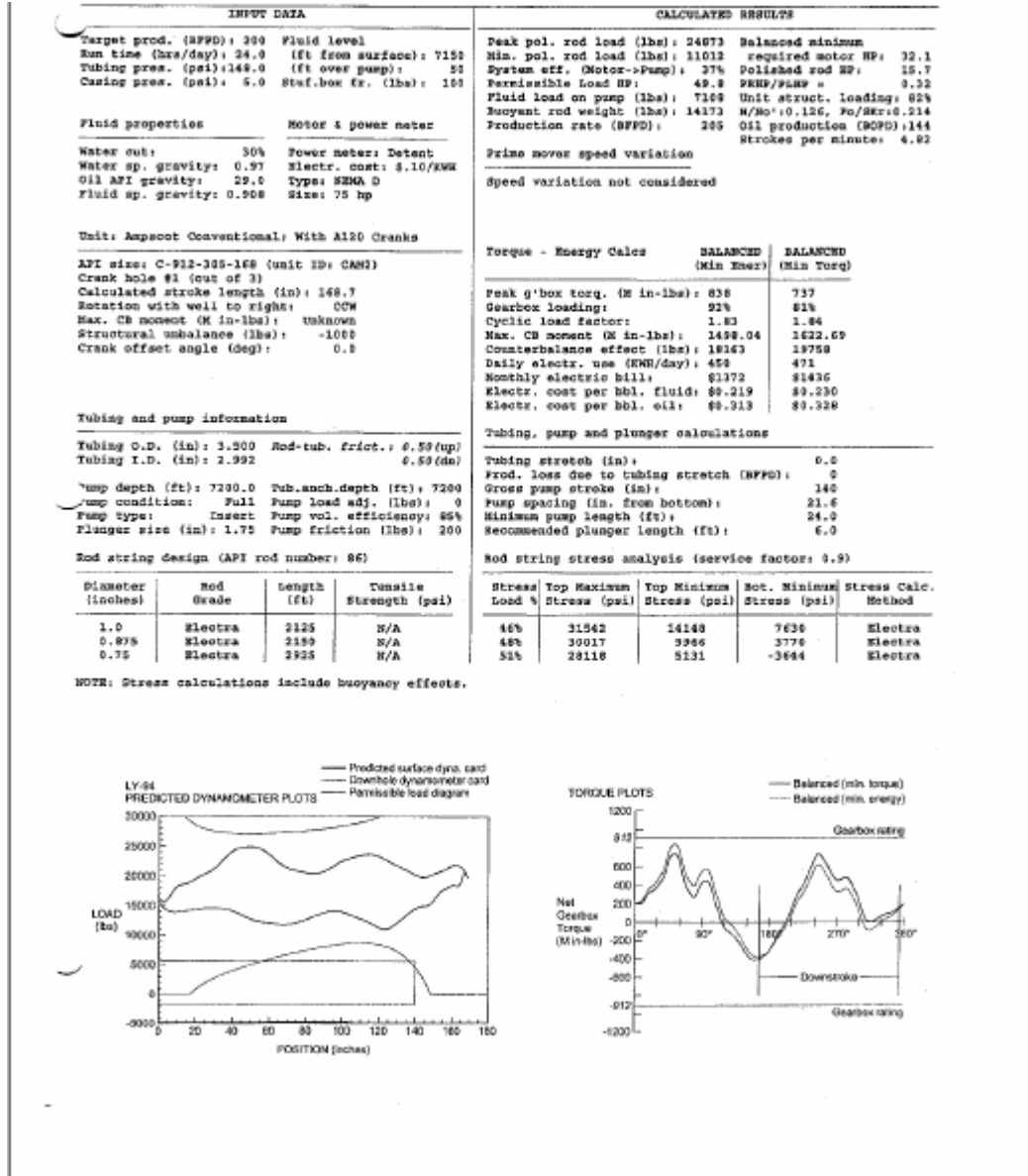
Figura D.3. Gráfica Bombeo Mecánico VSH2 LY-X1.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

D.4 Pozo LY-X2

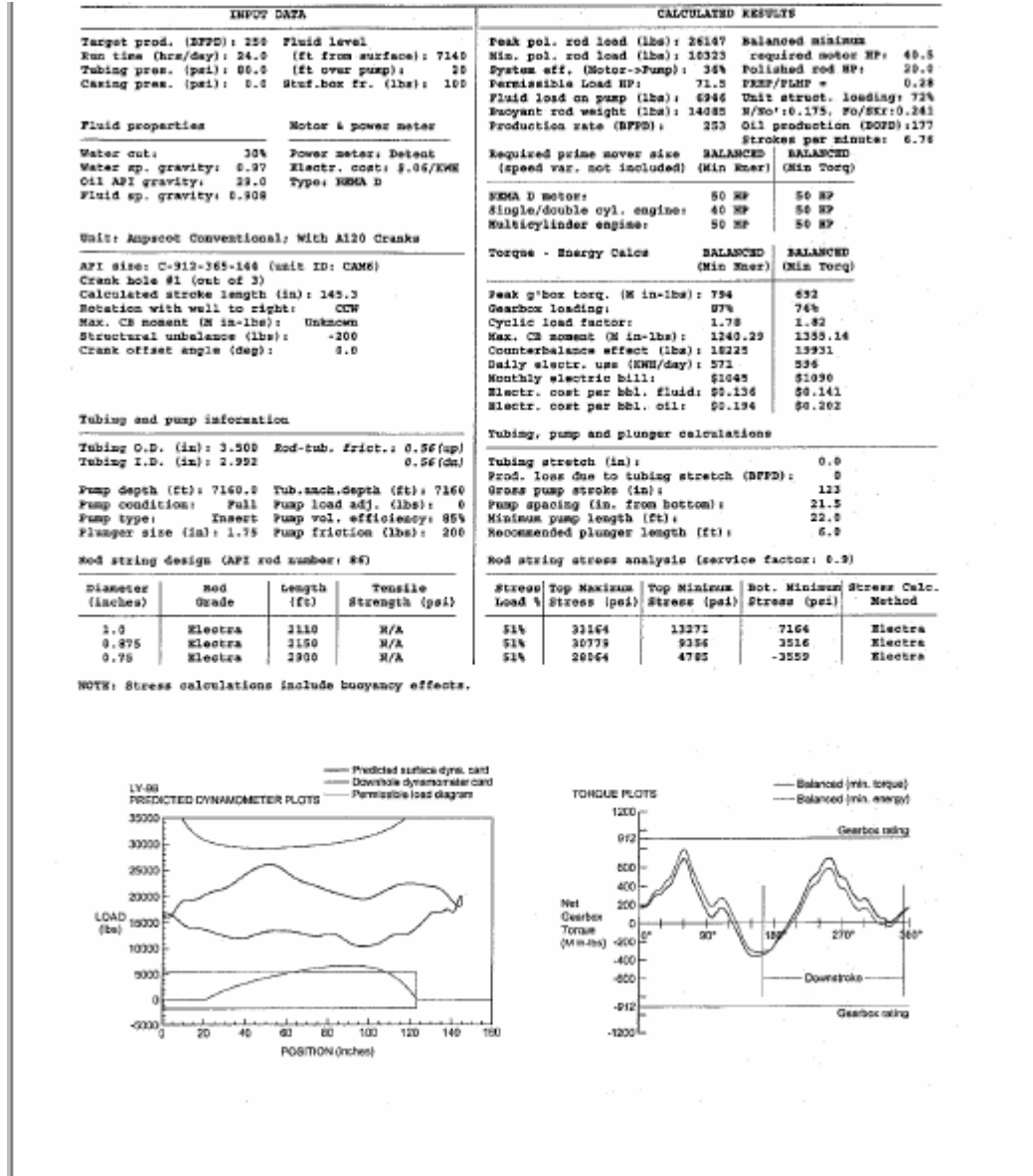
Figura D.4. Gráfica Bombeo Mecánico VSH2 LY-X2.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

D.5 Pozo LY-X3

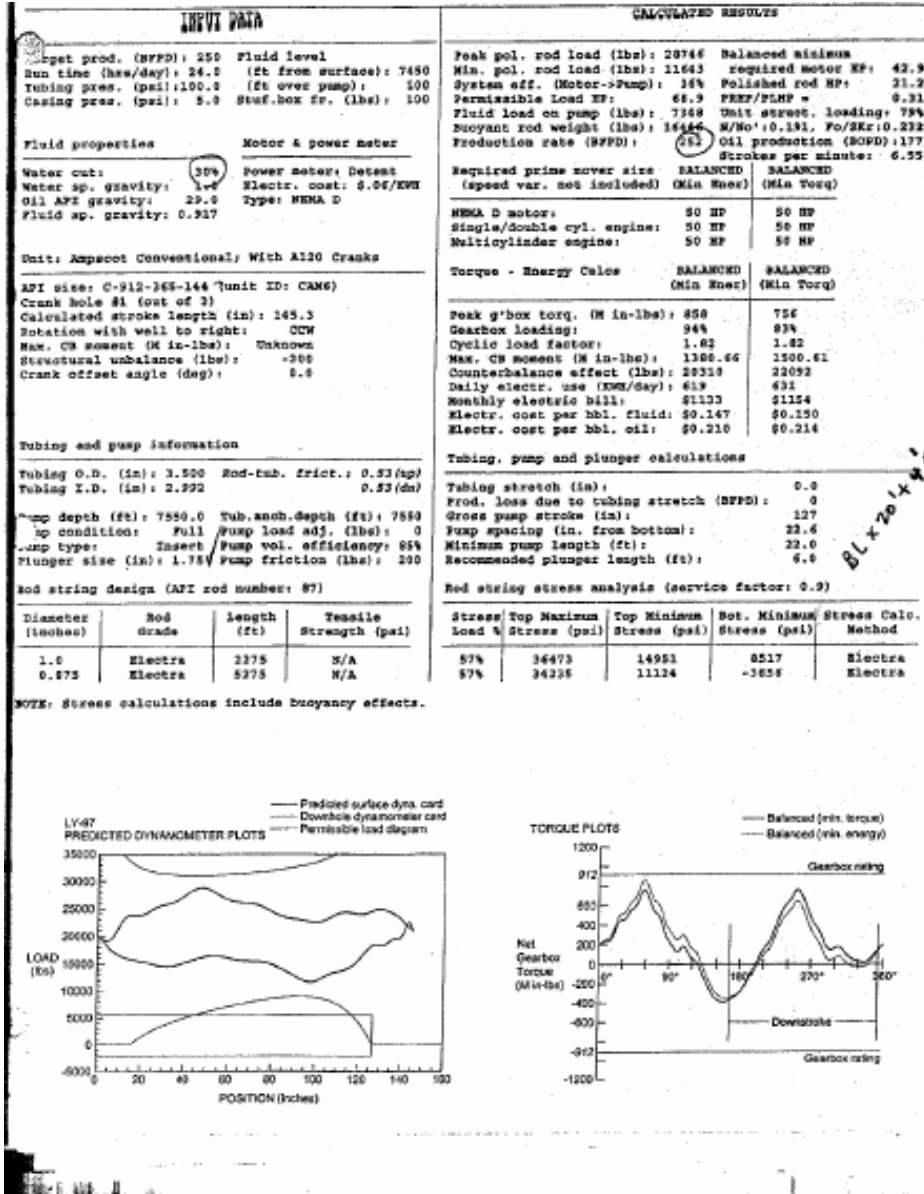
Figura D.5. Gráfica Bombeo Mecánico VSH2 LY-X3.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

D.6 Pozo LY-X4

Figura D.6. Gráfica Bombeo Mecánico VSH2 LY-X4.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

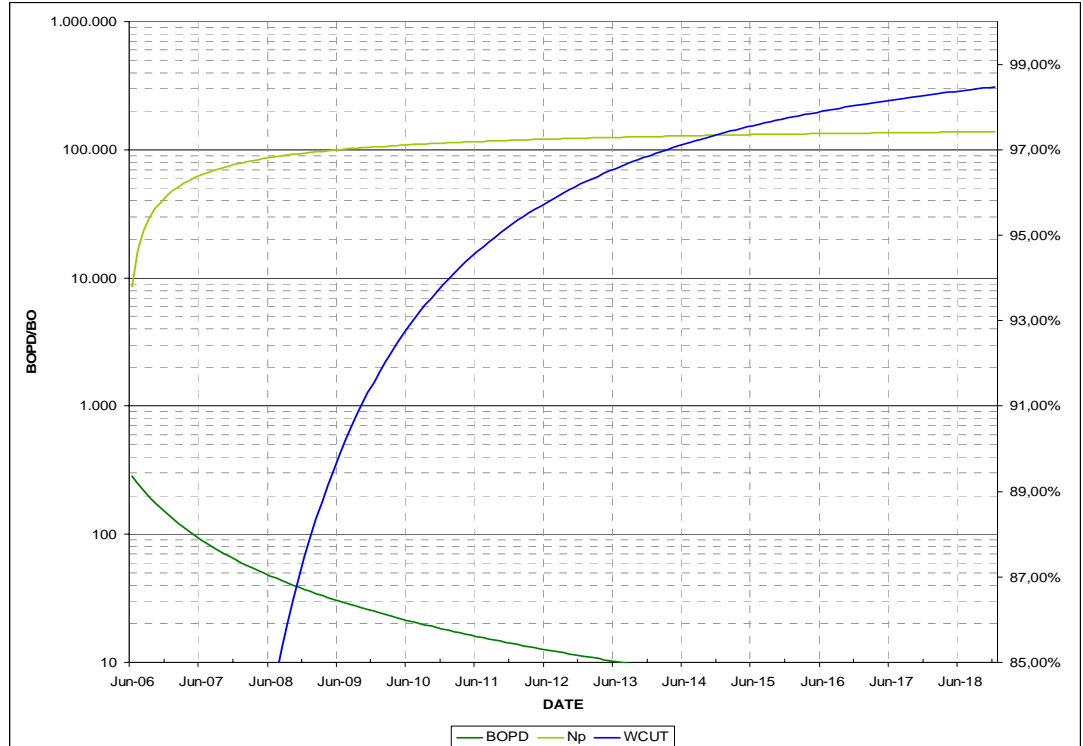
ANEXO E: CALCULOS ANALISIS FINANCIERO

Para el Análisis Financiero se trabajo con el programa que tiene OXY para tal fin, en este programa es necesario crear las curvas de declinación de la presión con respecto al tiempo para cada pozo para poder determinar los respectivos parámetros financieros a evaluar.

E.1 Curvas de declinación de la presión con respecto al tiempo

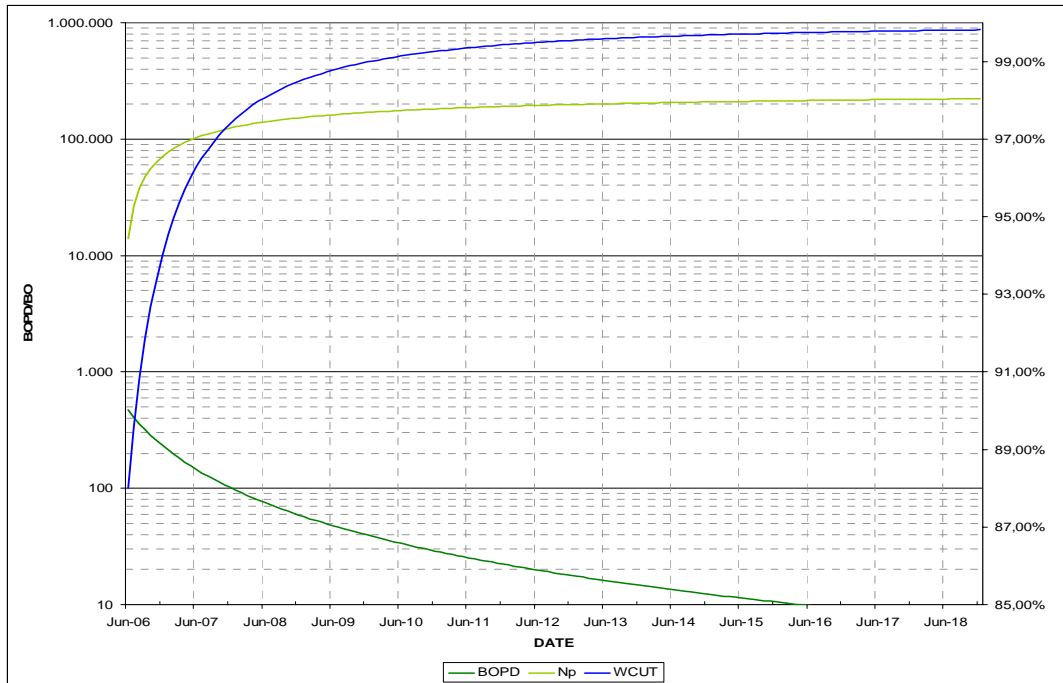
Cada una de las respectivas curvas se hizo basada en los datos de producción de cada pozo, los cuales se obtuvieron del Operations System.

Figura E.1.1. Gráfica Declinación de la Presión pozo CL-Y1.



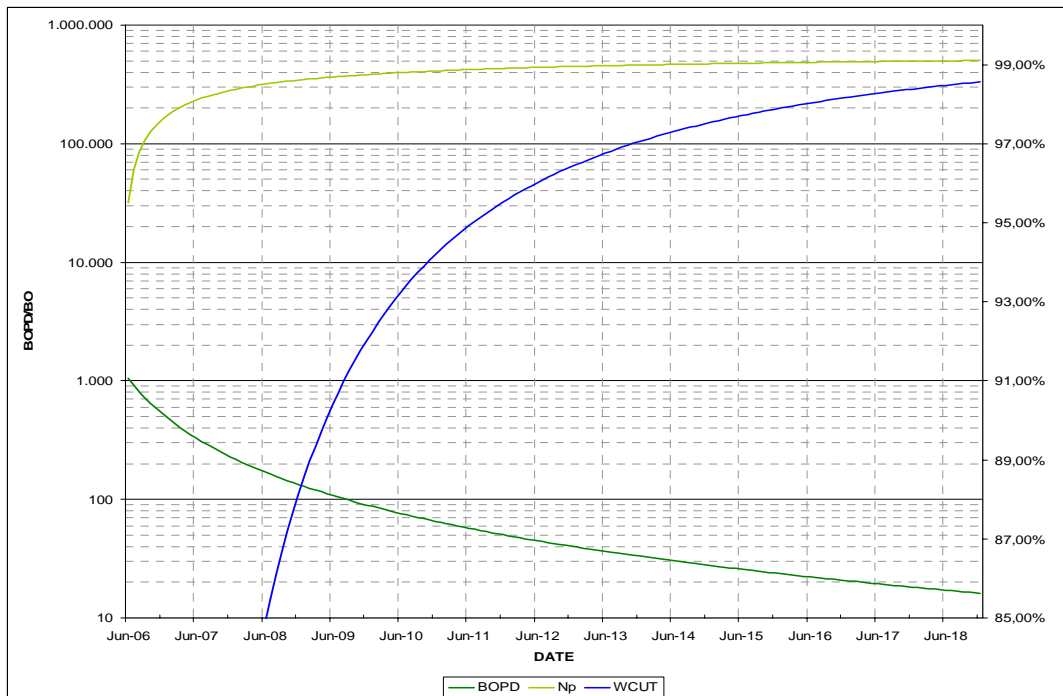
Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.1.2. Gráfica Declinación de la Presión pozo CY-X1.



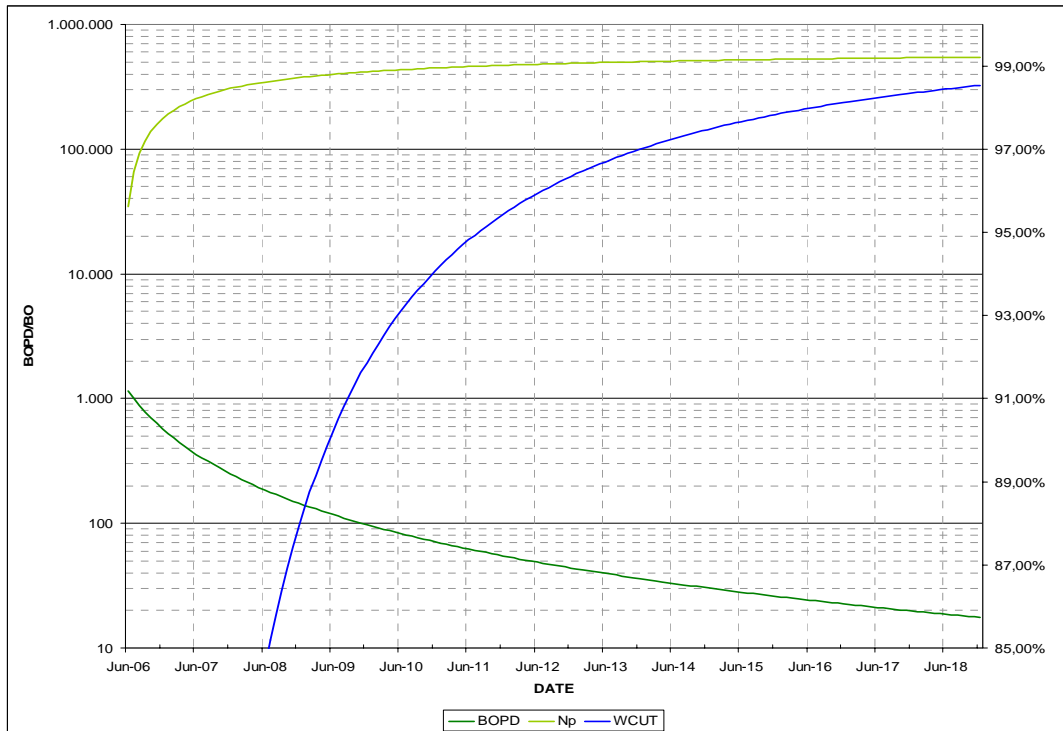
Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.1.3. Gráfica Declinación de la Presión pozo LY-X1.



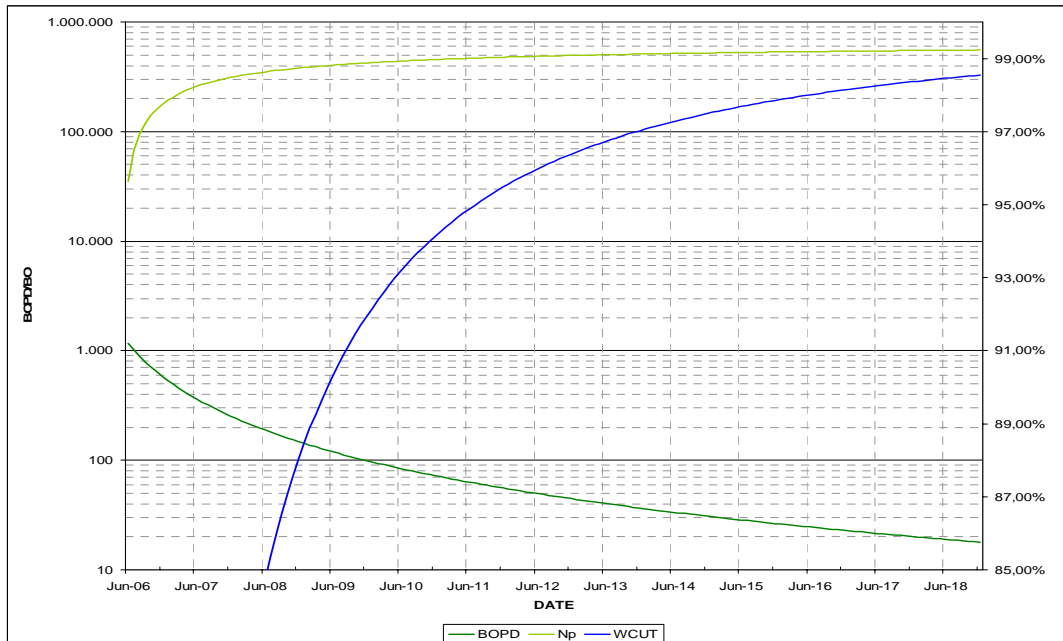
Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.1.4. Gráfica Declinación de la Presión pozo LY-X2.



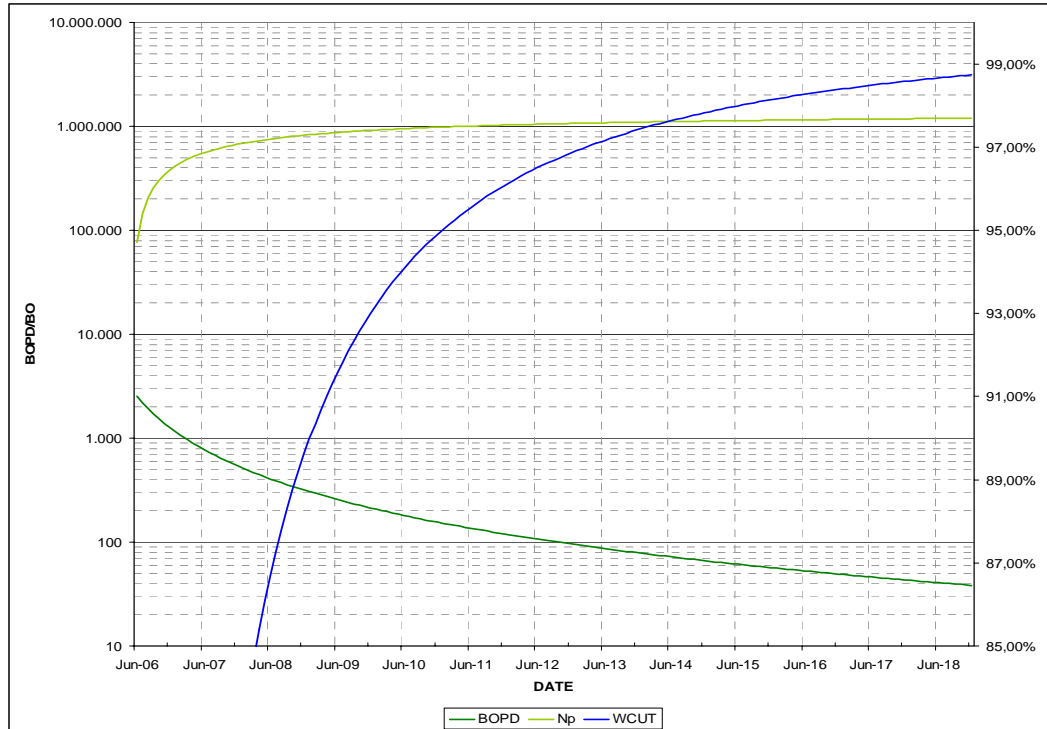
Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.1.5. Gráfica Declinación de la Presión pozo LY-X3.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.1.6. Gráfica Declinación de la Presión pozo LY-X4.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

E.2 Resultados Cálculos Análisis Financiero Bombeo Electrosumergible.

Los valores arrojados por el programa para Valor Presente Neto, Pay Back y DPI para cada pozo con la instalación de Bombeo Electrosumergible se muestran a continuación:

Figura E.2.1. Análisis Financiero BES pozo CL-Y1.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 428
DPI@15%	2.20
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 1,158
GROSS PRODUCTION (MSTB)	99

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.2.2. Análisis Financiero BES pozo CY-X1.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 933
DPI@15%	3.44
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 1,348
GROSS PRODUCTION (MSTB)	175

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.2.3. Análisis Financiero BES pozo LY-X1.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 2,705
DPI@15%	6.85
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 1,895
GROSS PRODUCTION (MSTB)	438

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.2.4. Análisis Financiero BES pozo LY-X2.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 3,011
DPI@15%	7.08
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 2,044
GROSS PRODUCTION (MSTB)	477

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.2.5. Análisis Financiero BES pozo LY-X3.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 3,097
DPI@15%	7.59
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 1,931
GROSS PRODUCTION (MSTB)	485

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.2.6. Análisis Financiero BES pozo LY-X4.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 7,544
DPI@15%	13.50
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 3,371
GROSS PRODUCTION (MSTB)	1172

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

E.3 Resultados Cálculos Análisis Financiero Bombeo Mecánico VSH2.

El programa que maneja OXY para el cálculo de datos financieros muestra los siguientes valores de Valor Presente Neto, Pay Back y DPI para las instalaciones de Bombeo Mecánico VSH2.

Figura E.3.1. Análisis Financiero BM VSH2 pozo CL-Y1.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 603
DPI@15%	4.16
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 564
GROSS PRODUCTION (MSTB)	99

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.3.2. Análisis Financiero BM VSH2 pozo CY-X1.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 1,125
DPI@15%	6.33
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 678
GROSS PRODUCTION (MSTB)	175

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.3.3. Análisis Financiero BM VSH2 pozo LY-X1.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 2,983
DPI@15%	12.36
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 1,042
GROSS PRODUCTION (MSTB)	438

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.3.4. Análisis Financiero BM VSH2 pozo LY-X2.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 3,243
DPI@15%	13.84
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 940
GROSS PRODUCTION (MSTB)	477

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.3.5. Análisis Financiero BM VSH2 pozo LY-X3.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 3,258
DPI@15%	13.89
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 940
GROSS PRODUCTION (MSTB)	485

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.

Figura E.3.6. Análisis Financiero BM VSH2 pozo LY-X4.

SUMMARY - ECONOMIC INDICATORS	
ATCF - ROR	> 300%
NPV@15%	M\$ 7,614
DPI@15%	25.60
Payback from Initial Investment	1.00 Months
INVESTMENT	M\$ 1,559
GROSS PRODUCTION (MSTB)	1172

Fuente: Occidental de Colombia, Inc.