

EVALUACIÓN DE LA DISMINUCIÓN EN LA CARGA ENERGÉTICA MEDIANTE
EL RE-DISEÑO DE UN EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO UTILIZANDO UNA
BOMBA CBM PARA UN POZO PETROLERO

MARÍA PAULA BEJARANO RODRIGUEZ
ALEJANDRA RIPE BETANCOURT

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C
2018

EVALUACIÓN DE LA DISMINUCIÓN EN LA CARGA ENERGÉTICA MEDIANTE
EL RE-DISEÑO DE UN EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO UTILIZANDO UNA
BOMBA CBM PARA UN POZO PETROLERO

MARÍA PAULA BEJARANO REODRIGUEZ
ALEJANDRA RIPE BETANCOURT

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

Director
JORGE LUIS DAVID GARCÍA
Ingeniero Civil

Orientador
YATNIELAH ISBEL PIRELA ROPERO
Ingeniera de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C
2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Juan David Rengifo

Ing. Adriana Ruiz León

Ing. Yatnielah Pirela Roperó

Bogotá D.C., Mayo de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vice-rector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vice-rectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingeniería

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Facultad de Ingeniería de Petróleos

Dr. JOSÉ HUMBERTO CANTILLO SILVA

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

A Dios, por brindarme las bendiciones y oportunidades, por acompañarme e iluminarme a cada momento y por la sabiduría proporcionada durante los años de estudio. Agradecerle a Él y al Señor Jesús por colocar las personas indicadas para ser soportes y guías.

A mis padres, por su inmenso amor, apoyo incondicional y paciencia infinita durante esta etapa académica, siendo mi mayor motivación y motor en la vida haciendo de esto algo posible.

A mi hermana, quien de manera creativa aportó su conocimiento, me levanto en momentos difíciles y me apoyo con su amor y comprensión durante este proceso.

A mi compañera Alejandra Ripe, por su dedicación, paciencia y sus valiosos aportes en el desarrollo de este proyecto, siendo un gran apoyo para mí con su constante trabajo, espero que tu futuro este lleno de éxitos.

A mis demás por su preocupación y apoyo, que de una u otra forma fueron mi compañía en este camino de formación.

María Paula Bejarano Rodríguez

A la vida por permitirme llegar hasta aquí y cumplir una de las metas más importantes para mí.

A mis padres, por creer siempre en mi cuando yo no pude hacerlo, por apoyarme siempre y confiar en lo que hacía durante mi carrera.

A mi hermana, por alentarme, escucharme y aconsejarme en los momentos difíciles.

A mi sobrina por ser la razón de querer ser una mejor persona, una mejor profesional y una mujer íntegra.

A mi tío, por lograr que este proyecto se lleve a cabo, sin él, esto no hubiera sido posible.

A mi compañera Paula, por su dedicación, por su paciencia, por su compromiso y por sus aportes académicos que lograron que este proyecto fuera finalizado.

A mis amigas de la universidad, por estar siempre para escucharme y ayudarme en lo que necesitara, por apoyarme y creer en mí.

A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron al desarrollo de mi carrera y de este proyecto.

Alejandra Ripe Betancourt

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente:

A TDA SUPPLY & SERVICE S.A, por permitirnos el desarrollo de este proyecto, facilitando sus instalaciones, equipos y personal durante el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero Jorge Luis David, por aceptar ser el director del proyecto y que con su conocimiento, experiencia y disponibilidad de tiempo nos brindó la asesoría necesaria para guiarnos en el desarrollo del trabajo de grado.

Al Ingeniero Mauricio Charry por permitirnos desarrollar el tema dentro de la empresa.

A nuestra asesora, la Ingeniera Yatnielah Pirela, por aportarnos su conocimiento, tiempo y dedicación en los aspectos técnicos del proyecto.

Al Ingeniero Juan David Rengifo, por su tiempo, información suministrada y por creer siempre en la finalidad de este proyecto.

Al asesor Yimy Parra, por el apoyo en los aspectos geológicos del proyecto.

Al asesor William Palacios y al Ingeniero Oscar González, por el apoyo en los aspectos financieros del proyecto.

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

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	28
OBJETIVOS	29
1. GENERALIDADES DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA	30
1.1 HISTORIA DE LA CUENCA	30
1.2 LOCALIZACIÓN	31
1.3 MARCO GEOLÓGICO	32
1.3.1 Geología estructural	32
1.3.2 Estratigrafía	34
1.3.2.1 Formación Girón	36
1.3.2.2 Formación Los Santos	36
1.3.2.3 Formación Cumbre	36
1.3.2.4 Formación Rosablanca	36
1.3.2.5 Formación Paja	36
1.3.2.6 Formación Tablazo	37
1.3.2.7 Formación Simití	37
1.3.2.8 Formación La Luna	37
1.3.2.9 Formación Umir	37
1.3.2.10 Formación Lisama	38
1.3.2.11 Formación Esmeralda	38
1.3.2.12 Formación Mugrosa	38
1.3.2.13 Formación Colorado	38
1.3.2.14 Grupo Real	38
1.3.2.15 Grupo Mesa	39
1.3.3 Geología del petróleo	39
1.3.3.1 Roca generadora	39
1.3.3.2 Roca reservorio	39
1.3.3.3 Roca sello	39
1.3.3.4 Trampa	39
1.3.3.5 Migración	39
2. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL	
BOMBEO MECÁNICO	40
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	40
2.2 MOTOR	42

2.2.1 Motores eléctricos	42
2.2.2 Motores a gas	43
2.3 UNIDADES DE BOMBEO	43
2.3.1 Diseño de la unidad	44
2.3.2 Geometría de las Unidades de superficie	44
2.3.2.1 Tipo Convencional	45
2.3.2.2 Tipo Mark II	45
2.3.2.3 Unidad Aerobalanceada	46
2.3.2.4 Unidad Hidráulica	47
2.3.2.5 Unidad Hidroneumática	48
2.3.2.6 Unidad Reverse Mark II	49
2.3.2.7 Unidad Rotaflex	50
2.3.2.8 Unidad Dynapump	51
3. ELEMENTOS DE FONDO DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO MECÁNICO	53
3.1 BOMBA DE SUBSUELO	53
3.1.1 Elementos principales	53
3.1.1.1 Barril	54
3.1.1.2 Pistón	54
3.1.1.3 Válvulas	55
3.1.1.4 Anclaje de fondo	55
3.1.2 Funcionamiento	55
3.1.3 Tipos	56
3.1.3.1 Bombas insertables	56
3.1.3.2 Bombas de Tubing	57
3.1.4 Designación API de las bombas	57
3.2 SARTA DE VARILLAS	58
3.2.1 Varillas convencionales	58
3.2.2 Varillas COROD	60
3.2.3 Varillas huecas	61
3.3 ACCESORIOS	61
3.3.1 Ancla de gas	61
3.3.2 Anlca de tubería	61
3.3.3 Asentamientos	62
3.3.4 Válvula antibloqueo de gas (VGA)	62
3.3.5 Barras de peso	62

4. DESCRIPCIÓN Y GENERALIDADES DE LA BOMBA CBM	63
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA BOMBA CBM	63
4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA BOMBA CBM	64
4.3 FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA CBM	68
5. RE-DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO USANDO LA BOMBA CBM	70
5.1 DISEÑO DE SARTA DE VARILLAS	70
5.1.1 Para una Sarta Doble	76
5.1.2 Para una Sarta Triple	77
5.2 MÉTODO API RP-11L	79
5.3. MÉTODO GOODMAN	86
5.4 CASO I	89
5.4.1 Longitudes de varilla para Caso I	90
5.4.2 Cargas mediante el Método API RP-11L para el Caso I	91
5.4.3 Método de Goodman para el Caso I	92
5.4.3.1 Esfuerzos para la sección A 3/4"	92
5.4.3.2 Esfuerzos para la sección B 7/8"	93
5.4.3.3 Esfuerzos para la Sección C 1"	93
5.5 CASO II	94
5.5.1 Longitudes de varilla para el Caso II	95
5.5.2 Cargas mediante Método API RP-11L para el Caso II	96
5.5.3 Método de Goodman para el Caso II	97
5.5.3.1 Esfuerzos para la Sección A 7/8"	97
5.5.3.2 Esfuerzos para la Sección B 1"	98
5.6 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO PROPUESTO PARA EL POZO A	99
5.6.1. Diseño de Bombeo Mecánico con Bomba Convencional, usando el Método API Rp-11L	100
5.6.2 Longitudes de varilla para el diseño con una Bomba Convencional	101
5.6.3 Cargas mediante el Método API RP-11L para el diseño con una Bomba Convencional	102
5.6.4 Método de Goodman para el diseño con Bomba Convencional	103
5.6.4.1 Esfuerzos para la Sección A 3/4"	103
5.6.4.2 Esfuerzos para la Sección B 7/8"	104
5.6.4.3 Esfuerzos para la Sección C 1"	104
6. SIMULACIÓN DEL RE-DISEÑO DEL EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO CON LA BOMBA CBM COMPARADO CON EL DISEÑO CONVENCIONAL	106
6.1 SIMULACIÓN BOMBA CONVENCIONAL	106

6.2 COMPARACIÓN DEL RE-DISEÑO DE BOMBEO MECÁNICO CON LA BOMBA CBM Y LA SIMULACIÓN REALIZADA DE BOMBEO MECÁNICO CON BOMBA CONVENCIONAL EN RODSTAR	109
6.2.1 Resultados arrojados por la plantilla "Unidades Hidráulicas HRP Hoja de Diseño- Single Well" para una Bomba Convencional	111
6.2.2 Resultados arrojadas por la plantilla "Unidades Hidráulicas HRP Hoja de Diseño- Single Well" para una Bomba CBM	114
6.2.3 Resultados de potencia requerida para cada Sistema (Bomba Convencional y Bomba CBM), usando los cálculos matemáticos presentados en el Método APi RP-11L	117
7. ANÁLISIS FINANCIERO	121
7.1 ANÁLISIS DE INVERSIÓN (CAPEX)	121
7.1.1 Escenario actual	121
7.1.2 Escenario nuevo	122
7.2 ANÁLISIS DE COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX)	123
7.2.1 Escenario actual	123
7.2.2 Escenario propuesto	124
7.3 EVALUACIÓN FINANCIERA	125
7.3.1 Flujos de caja	125
7.3.2 Valor Presente Neto (VPN)	125
7.3.2.1 Escenario actual	126
7.3.2.2 Escenario propuesto	126
7.3.3 Tasa de Interés de Oportunidad (TIO)	127
7.3.4 Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)	127
7.3.4.1 Escenario actual	128
7.3.4.2 Escenario propuesto	128
7.4 CONCLUSIÓN EVALUACIÓN FINANCIERA	129
8. CONCLUSIONES	130
9. RECOMENDACIONES	132
BIBLIOGRAFÍA	133
ANEXOS	136

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización geográfica Cuenca Valle Medio del Margdalena	32
Figura 2. Configuración estructural de la Cuenca Valle Medio del Magdalena	33
Figura 3. Corte estructural de la parte Sur del Valle Medio del Magdalena	34
Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Valle Medio del Magdalena	35
Figura 5. Sistema de Bombeo Mecánico	41
Figura 6. Designación Unidades de superficie	44
Figura 7. Unidad Convencional	45
Figura 8. Unidad Mark II	46
Figura 9. Unidad Aerobalanceada	47
Figura 10. Unidad Hidráulica	48
Figura 11. Unidad Hidroneumática	49
Figura 12. Unidad Reverse Mark II	50
Figura 13. Unidad Rotaflex	51
Figura 14. Unidad Dynapump	52
Figura 15. Partes de la bomba de Subsuelo	54
Figura 16. Funcionamiento de la Bomba de Subsuelo	56
Figura 17. Designación API 11B de las Bombas de Subsuelo	58
Figura 18. Ensamblaje mecánico y por copas	64
Figura 19. Válvula Fija Inferior de la CBM	65
Figura 20. Válvula Fija Superior de la CBM	65
Figura 21. Conector de descarga de la CBM	66
Figura 22. Cámara Superior de la CBM	67
Figura 23. Barril de la CBM	68
Figura 24. Funcionamiento de la Bomba CBM	69
Figura 25. Diagrama esquemático de sarta de varillas	72
Figura 26. Cartas dinamométricas de fondo y superficie Software Rodstar	108
Figura 27. Buckling en el Sistema de Bombeo Mecánico con una Bomba Convencional	109

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Varillas establecidas por el API	59
Tabla 2. Clasificación varillas especiales	60
Tabla 3. Datos de las varillas a usar respecto a sus diámetros	90
Tabla 4. Datos de la Bomba	90
Tabla 5. Datos de pozo y de fluido	90
Tabla 6. Resultados de los porcentajes de longitud para cada sección	90
Tabla 7. Resultados de longitudes para cada sección	91
Tabla 8. Resultados para pesos en cada sección, peso total en el aire y peso de la sarta de varillas en flotación	91
Tabla 9. Resultados adimensionales para carga máxima	91
Tabla 10. Resultados adimensionales para carga mínima	92
Tabla 11. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección A y carga del fluido	92
Tabla 12. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección A	93
Tabla 13. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección B y carga del fluido	93
Tabla 14. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección B	93
Tabla 15. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección C y carga del fluido	94
Tabla 16. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección C	94
Tabla 17. Datos de las varillas a usar respecto a sus diámetros	95
Tabla 18. Datos de la Bomba	95
Tabla 19. Datos de pozo y de fluido	95
Tabla 20. Datos de barra de peso	95
Tabla 21. Resultados de los porcentajes de longitud para cada sección	96
Tabla 22. Resultado longitudes para cada sección	96
Tabla 23. Resultado para pesos en cada sección, peso total de la sarta en el aire y peso de la sarta de varillas en flotación	96
Tabla 24. Resultados adimensionales para carga máxima	97
Tabla 25. Resultados adimensiopnales para carga mínima	97
Tabla 26. Resultados de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección A y carga de fluido	98
Tabla 27. Resultado de porcentaje de carga en la varilla en la Sección A	98
Tabla 28. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección B y carga del fluido	98

Tabla 29. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección B	98
Tabla 30. Datos de las varillas a usar respecto a sus diámetros	101
Tabla 31. Datos de la bomba	101
Tabla 32. Datos del pozo y del fluido	101
Tabla 33. Resultados de los porcentajes de longitud para cada sección	101
Tabla 34. Resultado de longitudes para cada sección	102
Tabla 35. Resultado para pesos en cada sección, peso total de la sarta en aire y peso de la sarta de varillas en flotación	102
Tabla 36. Resultados adimensionales para carga máxima	102
Tabla 37. Resultados adimensionales para carga mínima	103
Tabla 38. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección A, y carga del fluido	103
Tabla 39. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección A	104
Tabla 40. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección B y carga del fluido	104
Tabla 41. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección B	104
Tabla 42. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección C y carga del fluido	105
Tabla 43. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección C	105
Tabla 44. Consumo energético con el Método API RP-11L	120
Tabla 45. Inversión para la implementación de la Bomba Convencional	122
Tabla 46. Periodo de inversión Pozo A	122
Tabla 47. Inversión para la implementación de la Bomba CBM	123
Tabla 48. Periodo de inversión Pozo A	123
Tabla 49. Costos de mantenimiento con Bomba Convencional	124
Tabla 50. Costos de energía con Bomba Convencional	124
Tabla 51. Costos de mantenimiento Bomba CBM	124
Tabla 52. Costos de mantenimiento con Bomba CBM	125

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfica 1. Relación adimensional ($F1/SK_r$) para el cálculo de carga máxima en las varillas	84
Gráfica 2. Relación adimensional ($F2/SK_r$) para el cálculo de carga mínima en las varillas	85
Gráfica 3. Relación adimensional ($F3/SK_r$) para el cálculo de potencia requerida en el motor	119

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Porcentajes de longitud	71
Ecuación 2. Carga de la Sección A	72
Ecuación 3. Esfuerzo en la Sección A	73
Ecuación 4. Carga en la Sección B	73
Ecuación 5. Esfuerzo en la Sección B	74
Ecuación 6. Carga en la Sección C	74
Ecuación 7. Esfuerzo en la Sección C	75
Ecuación 8. Igualación de esfuerzos	75
Ecuación 9. Igualación de los esfuerzos reemplazando Ecuaciones 3 y 5 para una sarta doble	75
Ecuación 10. Igualación de los esfuerzos reemplazando Ecuaciones 3 y 6	76
Ecuación 11. Porcentajes de longitud para la Sección B	76
Ecuación 12. Porcentaje de longitud para la Sección A	77
Ecuación 13. Porcentaje de longitud para la Sección B	78
Ecuación 14. Porcentaje de longitud para la Sección C	78
Ecuación 15. Porcentaje de longitud para la Sección A	78
Ecuación 16. Peso muerto de la sarta de varillas	79
Ecuación 17. Peso unitario de varilla	80
Ecuación 18. Peso de varillas flotación	80
Ecuación 19. Carga de fluido sobre la bomba	81
Ecuación 20. Recíproco de la constante de estiramiento	81
Ecuación 21. Relación adimensional de estiramiento	82
Ecuación 22. Carrera del pistón	82
Ecuación 23. Velocidad de bombeo adimensional	83
Ecuación 24. Frecuencia Natural de la sarta de varillas con diferentes secciones de diámetro	83
Ecuación 25. Carga máxima	84
Ecuación 26. Carga mínima	86
Ecuación 27. Esfuerzo máximo permisible	87
Ecuación 28. Esfuerzo mínimo	87
Ecuación 29. Esfuerzo máximo	87
Ecuación 30. Carga de fluido	88
Ecuación 31. Rango de esfuerzo permitido	88
Ecuación 32. Porcentaje de carga en la varilla	89
Ecuación 33. Potencia requerida	118

Ecuación 34. Determinación del Valor Presente Neto (VPN)	125
Ecuación 35. Valor Presente Neto escenario actual	126
Ecuación 36. Valor Presente Neto escenario propuesto	127
Ecuación 37. Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)	128
Ecuación 38. Costo Anual Uniforma Equivalente escenario actual	128
Ecuación 39. Costo Anual Uniforme Equivalente escenario propuesto	128
Ecuación 40. Ahorro total costos de energía	128

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Ventajas y Desventajas del Bombeo Mecánico	42
Cuadro 2. Datos de entrada del Simulador Rodstar	107
Cuadro 3. Resultados simulación diseño del Sistema de Bombeo Mecánico convencional	108
Cuadro 4. Resultados comparativos de variables de diseño para el Bombeo Mecánico	110

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Plantilla de diseño TDA (Hydraulic Unit Input Data) Convencional	112
Imagen 2. Plantilla de diseño TDA (RODSTAR Input Data) Convencional	112
Imagen 3. Plantilla de diseño TDA (Max. Operation Settings) Convencional	113
Imagen 4. Plantilla de diseño TDA (Surface Unit Calculated Operation Condition) Convencional	114
Imagen 5. Plantilla de diseño TDA (Hydraulic Unit Input Data) CBM	115
Imagen 6. Plantilla de diseño TDA (RODSTAR Input Data) CBM	115
Imagen 7. Plantilla de diseño TDA (Max. Operation Settings) CBM	116
Imagen 8. Plantilla de diseño TDA (Surface Unit Calculated Operation Condition) CBM	117

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Estado mecánico Pozo A	137
Anexo B. Survey Pozo A	138
Anexo C. Resultados de la simulación Pozo A a condiciones actuales con el Simulador Rodstar	142
Anexo D. Tablas de varillas para constantes elásticas y factores de frecuencia	143

GLOSARIO

AMBIENTE FLUVIAL: este tipo de ambiente es definido por las corrientes activas de agua (manantiales, ríos, canales, etc), el transporte y deposición de sedimentos en el mismo ambiente.

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

BOMBA: es una máquina que absorbe energía mecánica que puede provenir de un motor eléctrico, térmico, etc., y la transforma en energía que la transfiere a un fluido como energía hidráulica la cual permite que el fluido pueda ser transportado de un lugar a otro, a un mismo nivel y/o a diferentes niveles y/o a diferentes velocidades.

BORDES PASIVOS: se producen cuando las placas deslizan una con respecto a otra lo hacen a lo largo de fallas denominadas transformantes, sin que se produzca creación ni destrucción de la corteza.

BUCKLING O PANDEO: es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos del tipo pilares o columnas y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos transversales.

COLUMNA ESTRATIGRAFICA: es una representación utilizada en geología y sus subcampos de estratigrafía para describir la ubicación vertical de unidades de roca en un área específica.

CUENCA SEDIMENTARIA: es una zona deprimida de la corteza terrestre con origen tectónico donde se acumulan sedimentos, formando mantos o capas sucesivas de arenas, arcillas, limo, entre otros.

DEPRESIÓN TECTONICA: conocida con el nombre de graben o fosa tectónica, el cual es un conjunto de dos fallas normales paralelas con inclinación opuesta.

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

ESTRATIGRAFÍA: es la rama de la Geología que trata del estudio e interpretación, así como de la identificación, descripción y secuencia tanto vertical como horizontal de las rocas estratificadas; también se encarga de la cartografía y correlación de estas unidades de roca, determinando el orden y el momento de los eventos en un tiempo geológico determinado, en la historia de la Tierra.

ESTRUCTURA MONOCLINAL: los estratos presentan una disposición inclinada en una única dirección. Este buzamiento puede deberse a un basculamiento de origen tectónico a uno de adaptación de los sedimentos a la pendiente del sustrato.

FACIES: suma total de caracteres, tales como tipo de roca, contenido mineral, estructuras sedimentarias, rasgos de estratificación, contenido fósil, que caracterizan al sedimento como depositado en un medio determinado.

FALLA GEOLOGÍCA: es una fractura en la corteza terrestre a lo largo de la cual se mueven los bloques rocosos que son separados por ella.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL: es la disciplina científica que se ocupa del estudio de la deformación de la corteza tanto a escala pequeña como a gran escala. Su alcance es vasto, cubriendo desde el estudio de los defectos en los arreglos atómicos de los cristales hasta la estructura de las fallas y sistemas de pliegues en la corteza de La Tierra.

GEOMORFOLOGÍA: corresponde el estudio del relieve de la Tierra, que incluye las formas y estructuras de todas las dimensiones, desde continentes y cuencas oceánicas a estrías y alveolos.

INTRAMONTANO: que está situado en el interior de un macizo montañoso o de una cordillera.

LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL: sistema de equipos utilizados para asegurar la producción de fluidos desde el fondo del pozo hasta la superficie cuando esta no es suficiente para que el pozo fluya por sí solo.

MIGRACIÓN: movimiento de los hidrocarburos generados, desde la roca generadora hasta las rocas reservorio.

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

ROCA GENERADORA: una roca rica en contenido de materia orgánica que, si recibe calor en grado suficiente, generará petróleo o gas.

ROCA RESERVORIO: son rocas que poseen la capacidad de almacenar fluidos y permitir su paso a través de ella.

ROCA SELLO: es una roca relativamente impermeable, normalmente lutita, anhidrita o sal, que forma una barrera o una cubierta sobre y alrededor de la roca

yacimiento, de manera que los fluidos no pueden migrar más allá del yacimiento. Un sello es un componente crítico de un sistema petrolero completo.

SEDIMENTOS: todo aquel material formado por partículas o granos sin consolidar que hay sobre la superficie terrestre y que es consecuencia de un conjunto de procesos naturales.

TÉCTÓNICA: es la especialidad de la geología que estudia las estructuras geológicas producidas por deformación de la corteza terrestre, las que las rocas adquieren después de haberse formado, así como los procesos que las originan.

TRAMPA: una configuración de rocas adecuadas para contener hidrocarburos, selladas por una formación relativamente impermeable a través de la cual los hidrocarburos no pueden migrar.

ABREVIATURAS

”	Pulgadas
%	Por Ciento
°	Grados
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
ACPM	Aceite Combustible para Motores
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
API	<i>American Petroleum Institute</i> -Unidad calidad del crudo
BFPD	Barriles de fluido por día
BM	Bombeo Mecánico
BOPD	Barriles de petróleo por día
BPD	Barriles por día
BSW	Porcentaje de Agua libre y Sedimentos
CAPEX	Costos de Inversión
CAUE	Costo Anual Uniforme Equivalente
C.C	Cordillera Central
CHP	Presión en el Casing
Cp	Centipoise
C.P.G	Cinturón plegado de Girardot
COROD	Varilla Continua
E	Este
ft	Pies
HP	<i>Horse power</i> (Caballos de fuerza)
ID	Diámetro interno
Kw	kilowatts
lb	Libra
Lbs	Libras
m	Metros
md	Milidarcy
mm	Milímetros
MPRL	Minima carga en la barra pulida
N	Norte
OD	Diámetro externo
OPEX	Gastos de operación
PPRL	Carga máxima en la barra pulida
psi	<i>Pound Square Inch</i>
pulg	Pulgadas
Pwf	Presión de fondo fluyente
S.A	Sociedad Anonima
SCF	<i>Standard Cubic Feet</i>
S.F.B.L.S	Sistema de falla Butuima- La Salina
S.F.E.S	Sistema de fallas Espíritu Santo
S.F.E.S.M	Sistema de fallas Bucaramanga- Santa Marta
S.I	Serranía de San Lucas

STB	<i>Stock Tank Barrels</i>
TIO	Tasa interna de oportunidad
TIR	Tasa interna de retorno
VGA	Válvula antibloqueo de gas
VIM	Valle Inferior del Magdalena
VMM	Valle Medio del Magdalena
VPN	Valor presente neto
VSM	Valle Superior del Magdalena
USD	Dólar estadounidense
W	Oeste

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA DISMINUCIÓN EN LA CARGA ENERGÉTICA MEDIANTE EL RE-DISEÑO DE UN EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO UTILIZANDO UNA BOMBA CBM PARA UN POZO PETROLERO.

DESCRIPCIÓN:

Actualmente, el Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico es uno de los métodos de producción más usados en algunos campos en Colombia, en particular, el pozo petrolero de estudio ubicado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, presenta diversas problemáticas que generan una elevada cantidad de potencia en el motor.

En este proyecto se busca una disminución en la carga energética generada por las bombas convencionales usadas en el Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico mediante el uso de la Bomba CBM en un pozo petrolero en particular. Para lograr lo planteado, se tiene en cuenta el diseño propuesto por la Empresa soporte para realizar el re-diseño del sistema teniendo en cuenta el Método API 11-L. Posteriormente, se evalúa el re-diseño del equipo de Bombeo Mecánico utilizando la bomba CBM mediante la comparación con un diseño convencional simulado en Rodstar, de este modo se podrá determinar el consumo energético generado por una bomba convencional y el generado por una Bomba CBM.

Finalmente, se realiza la evaluación de la viabilidad financiera del proyecto por medio de la metodología del Valor Presente Neto y del Costo Anual Uniforme Equivalente que permite analizar la reducción de los costos de inversión y operativos asociados al consumo energético en el pozo petrolero.

PALABRAS CLAVE:

Bombeo Mecánico
Bomba CBM
Carga Energética
Cuenca Valle Medio Magdalena

INTRODUCCIÓN

El siguiente proyecto tiene como objetivo general realizar una evaluación de la disminución en la carga energética mediante el re-diseño de un equipo de Bombeo Mecánico utilizando una Bomba CBM para un pozo petrolero, se realiza con el fin de evaluar si el uso de la Bomba CBM permite un menor consumo de energía y por ende una reducción en los costos.

La empresa TDA SUPPLY & SERVICE S.A busca reducir los costos de producción durante la operación del Sistema de Bombeo Mecánico, teniendo en cuenta que el alto consumo energético genera un aumento en el mantenimiento de los motores de la unidad de superficie, una baja eficiencia productiva y pérdidas de producción. Con la finalización de este proyecto se buscó darle solución a estos problemas evaluando el funcionamiento de la Bomba CBM, para ello, fue necesario realizar el re-diseño de la sarta de varillas y la determinación de las diferentes cargas generadas durante el funcionamiento del Sistema de Levantamiento Artificial, posteriormente este re-diseño fue evaluado mediante la comparación con el diseño convencional simulado en el simulador Rodstar, comparación que permitió determinar si la bomba estaba cumpliendo con el objetivo principal de este proyecto, y corroborar el correcto funcionamiento de todo el sistema en el pozo.

Por último, la evaluación financiera se realiza a partir del análisis de los costos de inversión (CAPEX), de los costos de operación (OPEX) y los ingresos de la bomba convencional y de la Bomba CBM, con el fin de realizar el flujo de caja propuesto para un periodo de 3 años evaluado anualmente, bajo el indicador financiero del Valor Presente Neto (VPN) y del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) determinando así la viabilidad financiera del proyecto.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la disminución en la carga energética mediante el re-diseño de un equipo de Bombeo Mecánico utilizando una Bomba CBM para un pozo petrolero

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir las generalidades y geología de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.
2. Explicar el funcionamiento del Sistema de Bombeo Mecánico y de las diferentes unidades de superficie usadas en este.
3. Describir el diseño propuesto para el Sistema de Bombeo Mecánico del pozo petrolero ubicado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.
4. Explicar las características y funcionamiento de la Bomba CBM.
5. Realizar el re-diseño del equipo de Bombeo Mecánico utilizando la Bomba CBM teniendo en cuenta el Método API 11L.
6. Evaluar el re-diseño del equipo de Bombeo Mecánico utilizando la Bomba CBM, mediante la comparación con un diseño Convencional.
7. Evaluar la viabilidad financiera del proyecto por medio del indicador de Valor Presente Neto (VPN).

1. GENERALIDADES DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

En ese capítulo se presenta la historia, la ubicación y el marco geológico de la cuenca de estudio.

1.1 HISTORIA DE LA CUENCA

El Valle del Río Magdalena está constituido como una de las regiones más estudiadas en el país debido a los intereses geológicos y económicos, ya que en ella se encuentran yacimientos productores de hidrocarburos y varios prospectos potenciales de los mismos.

La Cuenca del Valle del Magdalena es un rasgo geomorfológico intramontano entre las cordilleras Central y Oriental colombianas. Esta Cuenca ha sido subdividida en Valle Superior del Magdalena (VSM), en Valle Medio del Magdalena (VMM) y Valle Inferior del Magdalena (VIM). La división se ha realizado enfocada hacia el sector petrolero, debido a la importancia de la definición de las cuencas sedimentarias para el desarrollo de la exploración y producción de hidrocarburos.¹

La Cuenca del Valle Medio del Magdalena ha sido la más relevante en cuanto a exploración petrolera, la cual se remonta al año 1916, cuando por primera vez se perforo el Pozo Infantas-1, a través de la Tropical Oil Company, en el territorio de la Concesión de Mares, más adelante en el año 1918 se encontró producción comercial en el Pozo Infantas-2 hallando de esta manera uno de los primeros campos más extensos del país.²

Esta cuenca cubre un área aproximada de 32.000 Kilómetros cuadrados y comprende los departamentos de Boyacá, Santander, Cundinamarca, Antioquia, Bolívar, Cesar, Caldas y Tolima, entre otros. Además, es una cuenca madura, con alta producción de hidrocarburos y en variada gama de densidades de crudos (13-45°API). En esta Cuenca se han descubierto aproximadamente 63 campos comerciales, de los cuales los más importantes son: La Cira Infantas, La Salina, Casabe, Yariguí-Cantagallo, Aguas Blancas, Palagua, Colorado, Opón, Cristalina, Gala, Lisama, Provincia, Nutria, Teca, Llanito, Peñas Blancas, entre otros.

En la mayoría de estos campos la perforación de los pozos ha sido vertical, sin embargo, en los últimos años la utilización de la perforación horizontal y otras

¹ SARMIENTO PÉREZ, Gustavo; et.al. Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena. [Consultado en Diciembre 18, 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/wMtc7g>

²MOJICA, Jairo; et.al. Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena, Colombia. [En línea]. Colombia. 1990. Pág. 42. [Consultado en Diciembre 18, 2017]. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/viewFile/30633/30756>

técnicas, han permitido obtener una mayor producción por parte de los yacimientos fracturados, produciendo actualmente 116.160 BOPD.³

1.2 LOCALIZACIÓN

La Cuenca del Valle Medio del Magdalena se encuentra ubicada a lo largo de la porción central del valle atravesado por el Río Magdalena como se puede observar en la Figura 1, entre las Cordilleras Central y Oriental, y limitando al este por el piedemonte occidental de la Cordillera Oriental, al sureste con un sistema de Fallas de la Salina y Bituima, al noroeste con el sistema de Falla de Santa Marta-Bucaramanga, al norte limita con las fallas de Espíritu Santo, al oeste con la secuencia de sedimentos de las rocas metamórficas de la Cordillera Central y la Serranía de San Lucas, y finalmente al sur con la Falla de Ibagué.⁴

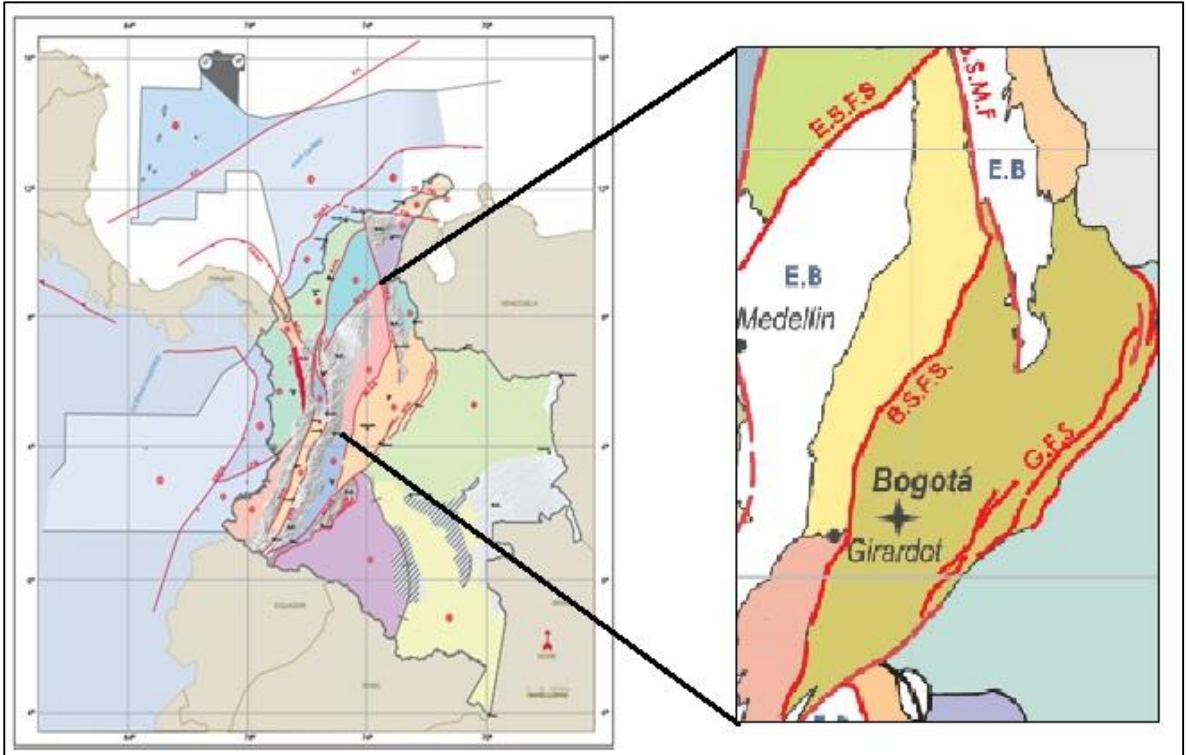
La Cuenca Valle Medio del Magdalena presenta una altitud, a nivel del Río Magdalena, que fluctúa entre 150 metros y 50 metros sobre el nivel del mar, aproximadamente. La Cuenca Valle Medio del Magdalena es bien estrecha al norte y sur de Honda, pero se ensancha bastante entre La Dorada y El Banco.⁵

³ ANH, Agencia Nacional de Hidrocarburos. Cuenca Valle Medio del Magdalena: Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. p. 21.

⁴SUÁREZ RUEDA, Carlos Orlando. Arenas basales del Cretáceo inferior, potencial roca hidrocarburífera en la región central de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia. [En línea]. Bogotá, Colombia. 2016. p. 3. [Consultado en Diciembre 19, 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/R268Fd>

⁵ MOJICA. Op.Cit. p. 16

Figura 1. Localización geográfica Cuenca Valle Medio del Magdalena (En color amarillo en la figura de la derecha).



Fuente: Colombian Sedimentary Basins, Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos). p. 28.

1.3 MARCO GEOLÓGICO

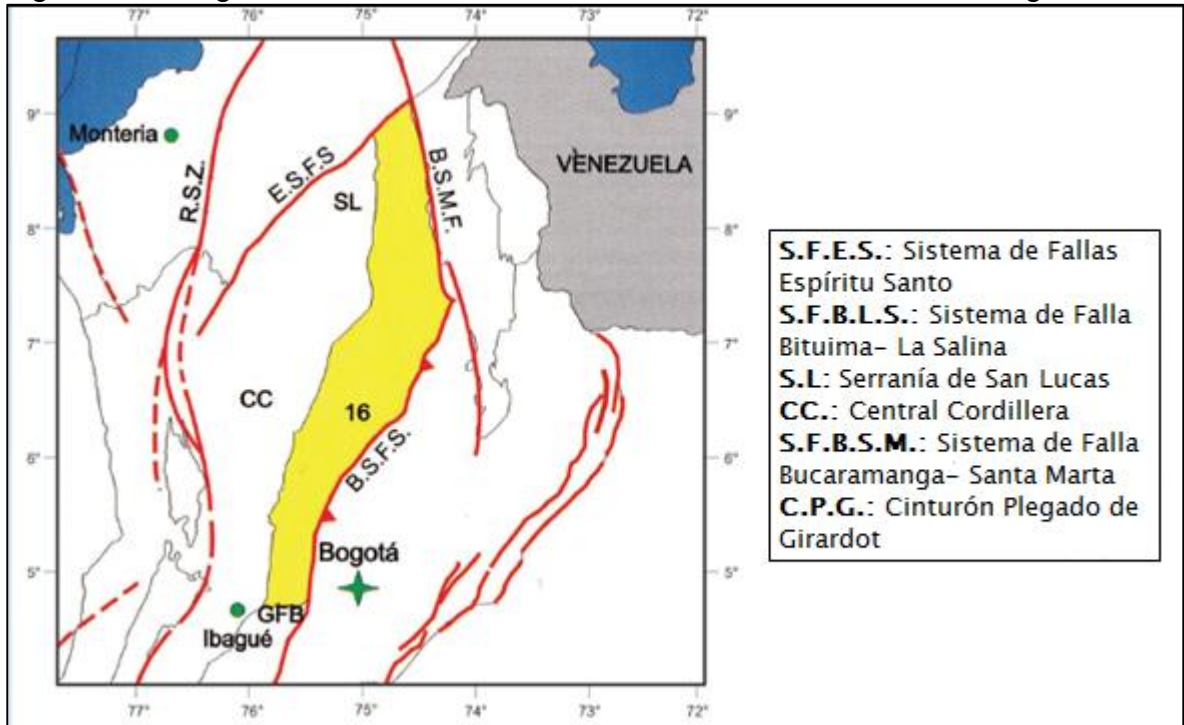
En este segmento, se presenta y describe la columna estratigráfica de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, la geología estructural y geología del petróleo de esta.

1.3.1 Geología estructural. La Cuenca del Valle Medio del Magdalena, se ubica a lo largo de los tramos centrales del valle del Rio Magdalena entre la Cordillera Central y Oriental de los andes colombianos; esta cuenca tiene tres fases de deformación: la fase de empuje, dislocación y desgarre; las cuales son responsables de todas las geometrías estructurales presentes en la cuenca.

El desarrollo de estructuras en esta cuenca se llevó a cabo en diferentes etapas vinculadas a los eventos tectónicos de América del Sur, durante los periodos: Triásico Tardío, Cretáceo Medio, Paleógeno Temprano y Neógeno Medio. Esta cuenca está limitada al norte y al sur por los sistemas de fallas de Espirito Santo y por las Falla de Ibagué y el cinturón plegado de Girardot, respectivamente; al noreste se encuentra limitada por el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta y

al sureste por el sistema de fallas Bituima y La Salina⁶. El sistema de fallas que presenta la Cuenca del Valle Medio del Magdalena se puede observar en la Figura 2.

Figura 2. Configuración estructural de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.



Fuente: SUÁREZ RUEDA, Carlos Orlando. Arenas basales del Cretáceo inferior, potencial roca hidrocarburífera en la región central de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Disponible en: <https://goo.gl/R268Fd>.

Geológicamente la Cuenca del Valle Medio del Magdalena es variada en cuanto a estilos estructurales como resultado de varios eventos geológicos, principalmente por movimientos tectónicos. “En la edad del Paleoceno Tardío hasta el Oligoceno la sedimentación que se presentó fue netamente controlada por pulsos tectónicos del levantamiento de la Cordillera Central, generando un espacio y un aporte de materiales en ambientes de carácter fluvial, así mismo generando un desarrollo de facies clásticas arenosas en las áreas cercanas al oeste de la cuenca y desde el Oligoceno Medio hasta el presente se lleva a cabo el levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia”.⁷

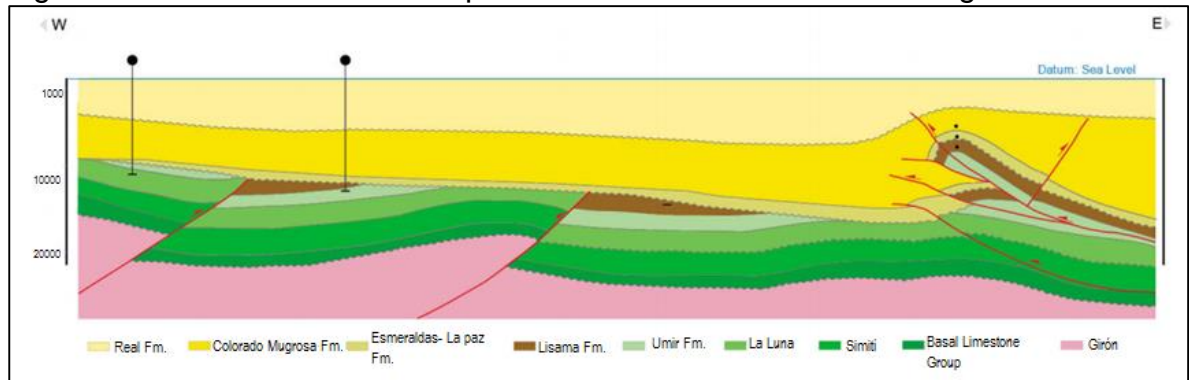
Esta cuenca constituye una depresión tectónica asimétrica con dos márgenes diferentes. Al occidente se tiene un borde pasivo, que se caracteriza por una

⁶ ANH, Agencia Nacional de Hidrocarburos. Cuenas sedimentarias colombianas: Nomenclatura, límites y geología del petróleo, una nueva propuesta, p.45.

⁷ ANH, Agencia Nacional de Hidrocarburos. Op. cit., p. 27.

geometría monoclinas con notables truncamientos de las formaciones cretácicas, que se desaparecen en dirección a la Cordillera Central bajo un progresivo recubrimiento de los sedimentos terciarios, con interrupciones causadas por flexuras y fallas; hacia la Cordillera Oriental se presenta un complicado margen compresional⁸. En la figura 3 se podrá detallar el corte estructural asociado a la cuenca, y apreciar la depresión tectónica con la geometría monoclinas.

Figura 3. Corte estructural de la parte Norte del Valle Medio del Magdalena.

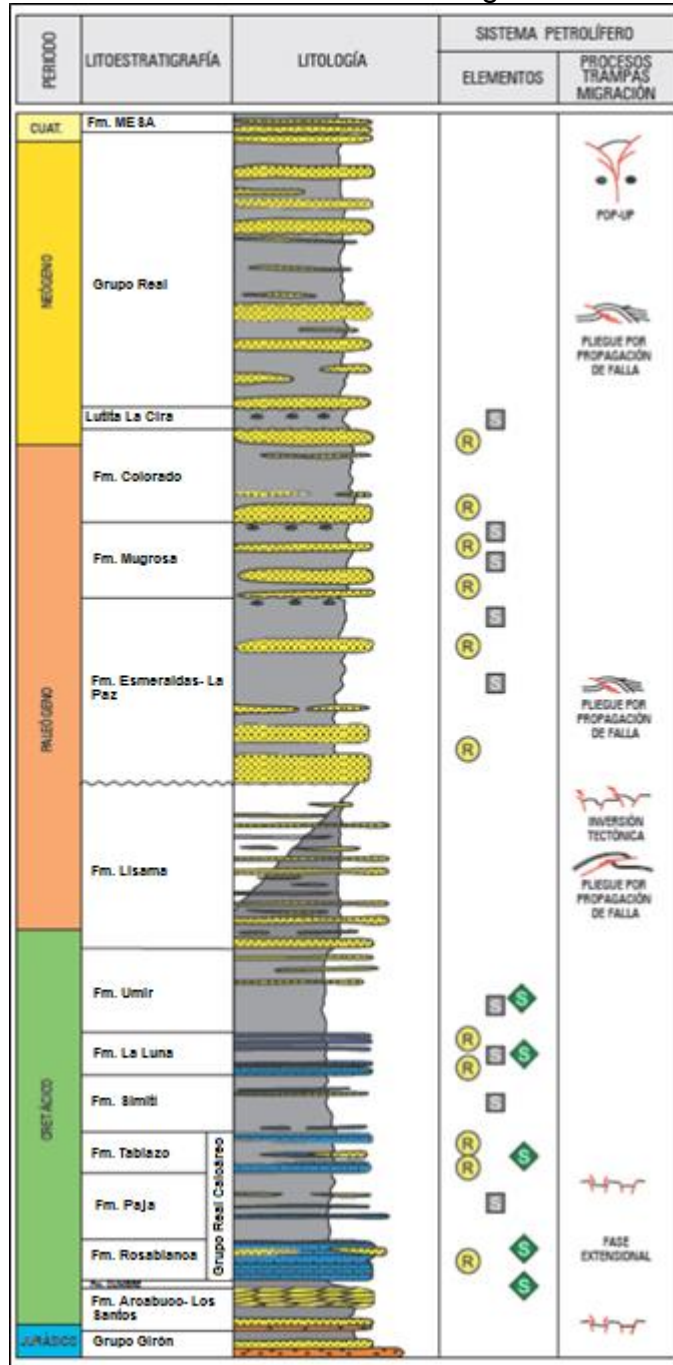


Fuente: Middle Magdalena Valley MMV BASIN. 2005-2006. Modificado por los autores.

1.3.2 Estratigrafía. A continuación, se describe la estratigrafía generalizada de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, de acuerdo con la columna estratigráfica presentada en la figura 4, esta está compuesta por rocas desde el Pre-Cretáceo hasta el más reciente. Teniendo en cuenta dichos intervalos, las formaciones de la columna estratigráfica más relevantes de la Cuenca, serán descritas de la más antigua a la más reciente.

⁸ ARDILA ZIPA, Cesar Augusto y BARRERA GONZÁLEZ, Cristian David. Evaluación técnico-financiera de compatibilidad de secuestrantes de H₂S en fluidos de perforación y completamiento en operaciones del Campo Jazmín mediante pruebas de laboratorio. Bogotá D.C, 2016, p. 46. Proyecto integral de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos. Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías.

Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Valle Medio del Magdalena



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos, Cuenca Valle del Magdalena. Bogotá, 2012. Modificado por los autores.

1.3.2.1 Formación Girón. Esta formación se ubica en una edad de Jurásico Superior a Cretáceo Inferior, esta formación fue descrita por varios autores, sin embargo, uno de ellos describió su espesor en un promedio de 4650 m (CEDIEL, 1968)⁹ siendo el estudio más detallado. El ambiente de depositación se considera continental fluvial a lacustre-fluvial, y está compuesta por areniscas de grano medio, grueso, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, con una estratificación cruzada, en capas gruesas, con algunas interestratificaciones de limolitas y lodolitas, y algunos niveles delgados de conglomerados.

1.3.2.2 Formación Los Santos. La edad de esta Formación, considerada con base en la posición estratigráfica, ha sido datada del Berrisiano al Hauteriviano. Presenta un espesor de aproximadamente 300 m y su ambiente de depositación es continental a marino, por corrientes trenzadas. Está compuesta por areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo grisáceas y cuarzoareniscas amarillentas, con espesores variables de capas tabulares.

1.3.2.3 Formación Cumbre. Se asigna este nombre a un conjunto de areniscas grisáceas oscuras, cuarzosas de grano fino, con cemento silíceo, limolitas y arcillolitas blancas y negras, y limolitas rojas, que presentan estratificación entrecruzada (RENZONI, 1969). Su edad se considera, con base a su contenido faunístico, entre el Berriasiano superior Valanginiano inferior. Su ambiente de depositación es de dominio marino marginal en una llanura costera aluvial. Adicionalmente, esta formación presenta un espesor promedio de 215 m.¹⁰

1.3.2.4 Formación Rosablanca. Se trata de una unidad fosilífera como: lamelibranchios, cefalópodos, gasterópodos, anélidos y equinidos, de ahí su apreciable dureza, con intercalaciones menores de margas, shales y calcáreos. Su edad data de Cretáceo Inferior Hauteriviano – Barremiano, y con un ambiente de depositación en medio marino somero con condiciones neríticas. El espesor reportado de esta Formación en la localidad es de aproximadamente 450 m, el cual disminuye sensiblemente en los bordes E y W del sector norte de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.¹¹

1.3.2.5 Formación Paja. La Formación Paja deriva su nombre de la Quebrada La Paja afluente del Río Sogamoso (Morales et al. 1958)¹², en el flanco E del Sinclinal de Nuevo Mundo (vía a San Vicente de Chucurí). Está constituida por shales grises oscuros a azulosos, fosilíferos, laminados con intercalaciones de areniscas

⁹CEDIEL, Fabio. 1968. El Grupo Girón, una molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental. Servicio Geológico Nacional Boletín Geológico No. 16 (1-3). Bogotá. p. 5.

¹⁰ ROYERO, José María., CLAVIJO, Jairo. Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander: Escala 1:400.000. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear Ingeominas. Bogotá. p.26.

¹¹ SUÁREZ RUEDA. Op. cit., p. 9.

¹² MORALES, Luis, et al., General geology & oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia: Habitat of Oil. Symposium, America Association of Petroleum Geologists. 1958. p. 643

grises amarillentas de grano fino o de calizas fosilíferas grises, localmente arenosas. Esta formación se ubica en la edad del Barremiano Tardío - Aptiano Temprano, y se estima que su depositación tuvo lugar en un ambiente epicontinental. Adicionalmente esta formación presenta un espesor variable entre 125 y 625 m.¹³

1.3.2.6 Formación Tablazo. Se define como un conjunto de capas de calizas grises a negras, con niveles intercalados de arcillolitas grises a gris azulado, calcáreas, fosilíferas masivas, en capas medianas a gruesas. Se estima que el ambiente de depositación corresponde a condiciones neríticas, poco profundas. Tiene una ubicación de edad en el Cretáceo Aptiano Superior a Albiano Inferior y está conformada por un espesor de aproximadamente 150 m.¹⁴

1.3.2.7 Formación Simití. Esta formación agrupa el conjunto de afloramientos expuestos en la Ciénaga de Simití. La edad de esta formación data del Cretáceo Albiano, y presenta un ambiente de depósito nerítico bajo a medio. La unidad está compuesta por shales grises a negros, carbonosos y levemente calcáreos, con intercalaciones de areniscas y calizas grises. El espesor presenta variabilidad de 250 m a 650 m.¹⁵

1.3.2.8 Formación La Luna. Esta formación se ubica en una edad de Turoniano a Santoniano (GARNER, 1926). La unidad está compuesta por calizas arcillosas, lutitas calcáreas, en capas delgadas y concreciones de calizas con fósiles. La Formación la Luna se subdivide en tres miembros: el inferior, denominado Salada, que está compuesto por calizas de color marrón a negra con intercalaciones lutíticas a calcáreas con trazas de piritas; el intermedio, conocido como Pujamana, compuesto por lutitas de color marrón a gris oscuro; y el Superior, designado Galembo, su composición se basa en calizas de color marrón claro a oscuro con intercalaciones de areniscas y cuerpos lutíticos. Se depositó en un ambiente marino de aguas poco profundas, con poca ventilación y presenta un espesor entre 275 a 575 m.¹⁶

1.3.2.9 Formación Umir. Está se compone generalmente de shales grises a negros, carbonosos, micáceos, con concreciones ferruginosas, lutitas grises a gris oscuras, carbonosas, con nódulos ferruginosos, e intercalaciones de areniscas y limolitas, grises, carbonosas y micáceas. Se depositó en un ambiente transicional, de marino a continental, con una edad que data del Campaniano al Maastrichtiano Tardío. Esta formación presenta un espesor calculado de 1.000 a 1.400 m.¹⁷

¹³ SARMIENTO PÉREZ. Op. cit., p. 65

¹⁴ *Ibíd.*, p. 65

¹⁵ *Ibíd.*, p. 66

¹⁶ GARNER, A. H., 1926 citado por Julivert, M. *Léxico Estratigráfico Internacional*. Volumen V. Fascículo 4a. Colombia. 1968. p.30

¹⁷ROYERO. Op. cit., p.35.

1.3.2.10 Formación Lisama. Está unidad data del Cretáceo Tardío al Paleoceno. Su composición presenta una secuencia de lutitas abigarradas, alternadas con areniscas grises, verdosas y pardas, de grano fino a medio y unas pocas capas delgadas de carbón. Presenta un ambiente de depositación en condiciones lagunares deltáicas y su espesor en promedio es de 1.225 m.¹⁸

1.3.2.11 Formación Esmeralda. La composición de la formación se basa en areniscas de grano fino, con intercalaciones de limolitas y shales con algunas capas de carbón. El ambiente de deposición sucedió bajo condiciones lagunares deltaicos. La edad de esta unidad es del Terciario -Eoceno-, y presenta un espesor promedio de 1.200 m.¹⁹

1.3.2.12 Formación Mugrosa. Se caracteriza por tener en su parte inferior areniscas gris verdosas, de grano fino a medio, con intercalaciones de lodolitas y algunas capas de areniscas conglomeráticas. El medio consta de shales con intercalaciones de arenisca y su parte superior consta de lodolitas fosilíferas. Es una de las unidades reservorio más importantes de la cuenca. Presenta un ambiente de depositación continental fluvial, con un espesor variable de 500 a 800 m. La edad de esta formación se considera del Eoceno Superior – Oligoceno Inferior.

1.3.2.13 Formación Colorado. Esta formación data del Oligoceno superior al Mioceno inferior, y está compuesta por arcillolitas con intercalaciones de areniscas, de grano grueso a conglomeráticas, en capas de espesores variable, en su parte inferior. Su parte superior está compuesta de arcillolitas gris oscuras a negras, carbonosas, fosilíferas, con intercalaciones de areniscas, de grano medio. El espesor es variable de 1.200 a 2.500 m y su ambiente de depositación es de condiciones fluviales.²⁰

1.3.2.14 Grupo Real. Es denominado de esta manera debido a que se establece en las inmediaciones de la desembocadura de la Quebrada Real en el Río Opón. Es una unidad que data del Mioceno medio al Plioceno, y que está subdividida en cinco formaciones, las cuales son: Formación Lluvia, su composición es de conglomerados polimícticos; Formación Chontorales, compuesta de arcillolitas y areniscas conglomeráticas; Formación Hiel, compuesta por arcillolitas grises y areniscas; la Formación Enrejado, su composición es de arcillolitas con alternancia de areniscas y finalmente la Formación Bagre, compuesta de areniscas conglomeráticas. El espesor de este Grupo en total es de 3.600 m, y se generó en un ambiente de depositación fluvial.²¹

¹⁸ WHEELER, O. C. 1935, citado por De Porta, J. Léxico Estratigráfico Internacional. Volumen V. Fascículo 4a. Colombia. 1968. p. 327

¹⁹ *Ibíd.*, p. 198

²⁰ ROYERO. *Op. cit.*, p. 39

²¹ *Ibíd.*, p. 41

1.3.2.15 Grupo Mesa. Este grupo está caracterizado por areniscas de grano grueso, tobas andesíticas, aglomerados e intercalaciones de arcillas, limos conglomerados y depósitos piroclásticos. La edad de este Grupo varía del Plioceno al Pleistoceno. Adicionalmente, presenta un espesor variable de 150 a 575 m.²²

1.3.3 Geología del petróleo. A continuación se describe la geología del petróleo de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.

1.3.3.1 Roca generadora. La Formación La Luna, se considera la principal roca generadora de la cuenca. En la parte norte de la cuenca se han alcanzado valores medios a maduros para la generación de hidrocarburos líquidos y en la parte sur se registran valores correspondientes a la ventana de gas.

1.3.3.2 Roca reservorio. En el Cretáceo cuatro formaciones pueden considerarse como rocas almacenadoras potenciales: Los Santos, Rosablanca, Tablazo y La Luna. En el Cenozoico, las rocas almacén están conformadas por los niveles de areniscas presentes de la Formación La Paz hasta las formaciones Mugrosa-Colorado.

1.3.3.3 Roca sello. Estas son encontradas en los niveles arcillosos intra-formacionales de las unidades terciarias y las unidades arcillosas del Cretáceo, siendo las últimas las mejores debido a su espesor y extensión regional. Fallas inversas y normales actúan como sello cuando ponen en contacto rocas almacén con rocas sello. Dentro de la secuencia cretácea los shales de las formaciones Paja y Simití pueden construir el sello de los intervalos de calizas fracturadas.

1.3.3.4 Trampa. Estructuras anticlinales asociadas a fallas inversas y normales reactivadas por la tectónica andina. Pliegues extensos que involucren grandes espesores de roca, asociados a fallas.

Las variaciones laterales de facies o la presencia de fallas en la secuencia Cenozoica, se pueden asociar con barreras de permeabilidad.

1.3.3.5 Migración. La migración de hidrocarburos en la Cuenca Valle Medio del Magdalena se genera principalmente por la discordancia del Eoceno, haciendo que se separe el principal reservorio de dicha cuenca, de las rocas generadoras dando lugar a la migración oportuna del petróleo.

²² SARMIENTO PÉREZ. Op. cit., p. 72-73

2. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL BOMBEO MECÁNICO

El Bombeo Mecánico es uno de los Métodos de Levantamiento Artificial más usados en el mundo, debido a su antigüedad, su facilidad para operar en diferentes condiciones y a que es relativamente económico. En este capítulo se describe el principio de funcionamiento de la Unidad Motriz y las diferentes Unidades de Superficie del Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico, en cumplimiento del segundo objetivo correspondientes al trabajo de grado.

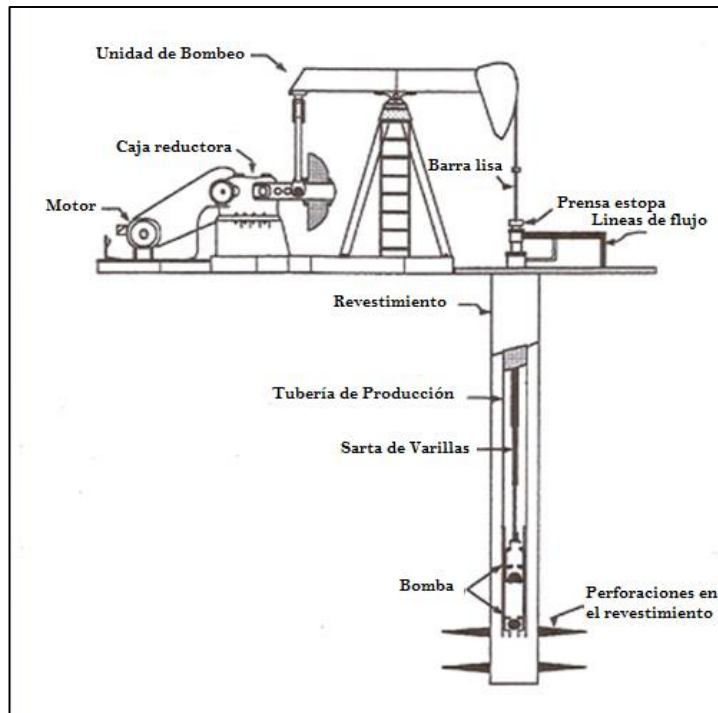
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El Sistema de Bombeo Mecánico consiste fundamentalmente en una bomba de subsuelo de acción recíproca, abastecida de energía a través de una sarta de varillas. La energía proviene de un motor eléctrico, o de combustión interna, el cual moviliza la unidad de superficie mediante un sistema de engranajes y correas, para que ocurra la acción de bombeo²³.

Tal y como se muestra en la figura 5 este sistema cuenta un equipo de fondo y un equipo de superficie. El equipo de fondo está compuesto principalmente por el motor, la caja reductora, la unidad de bombeo, barra pulida, prensa estopa, cabezal y líneas de flujo. El equipo de fondo incluye el revestimiento, la tubería de producción la bomba de fondo, sarta de varillas y válvulas.

²³ ESPINDOLA, Marcelo. Sistemas de elevación artificial- “Bombeo Mecánico”. [En línea]. 2016. p. 2. [Consultado 26 de Diciembre de 2017]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/marceloespindola4/sistema-de-bombeo-mecanico-proyecto2>

Figura 5. Sistema de Bombeo Mecánico



Fuente: Agru. PE-Xa tubing inliner for oil production. [En línea]. 2015. Disponible desde internet en: <https://bit.ly/2FJcWDu>. Modificado por los autores.

Tal y como se muestra en el Cuadro 1 el Bombeo Mecánico cuenta con sus ventajas y desventajas, dentro de las cuales se puede encontrar la geometría del pozo, la profundidad, la acumulación de sólidos, los costos de equipo y de funcionamiento, entre otros. Factores que deben ser tenidos en cuenta al momento de la elección del Sistema de Levantamiento Artificial para no generar mayores costos y baja productividad.

Cuadro 1. Ventajas y Desventajas del Bombeo Mecánico

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de operar y de hacer mantenimiento • Costos de mantenimiento relativamente bajos • Unidades de superficie intercambiables • Levantamiento de crudos de alta viscosidad y temperatura • Puede utilizar gas o electricidad como fuente de poder • Disponibilidad de diferentes tamaños de unidades • Facilidad de ajuste de tasa en superficie 	<ul style="list-style-type: none"> • Unidad de superficie pesada y ocupa mucho espacio • Mal funcionamiento por acumulación de sólidos • Limitación a altas profundidades • Problemas en pozos desviados • Baja eficiencia volumétrica en pozos con alta producción de gas • Caudales de bombeo relativamente bajos • Poca resistencia al contenido de H₂S

2.2 MOTOR

Su función principal es suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del balancín; para lograr esto, el motor produce un movimiento rotatorio con un bajo torque y una alta frecuencia; dicho movimiento es transformado por la unidad de bombeo a un movimiento reciprocante. Su fuente de abastecimiento o funcionamiento puede ser por medio de gas, ACPM o energía eléctrica; varía según la disponibilidad en el pozo. Los motores de baja velocidad (de 200 a 800 revoluciones por minuto) pueden ser de uno o más cilindros de dos o tres ciclos, el tipo más popular dentro de la categoría es el motor horizontal de dos ciclos y un solo cilindro con un volante grande, la inercia del volante se utiliza para amortiguar las variaciones de velocidad durante la operación, los motores de alta velocidad (de 750 a 2000 revoluciones por minuto) usualmente son motores Diesel de 4 ciclos, desarrollando menos torque que los motores de baja velocidad y son más complejos, son menos costosos, y su vida de servicio es reducida en virtud a altas velocidades operacionales; la norma que rige los motores es la API 7B-11C²⁴. Para la selección del motor, se deben tener en cuenta diversos aspectos como las condiciones de trabajo, la potencia necesaria, disponibilidad de cada motor, ubicación de los pozos y la economía del mismo, entre otros.

2.2.1 Motores Eléctricos. El uso de este tipo de motores facilita al análisis del comportamiento de la Unidad de Bombeo en dos aspectos: permite medir con un

²⁴ ALVAREZ LACAYO, Francisco Antonio y VEGA CASTRO, Jose Manuel. Análisis de falla en los Sistemas de Bombeo Mecánico del Campo Cantagallo. Bucaramanga, 2008, p.44. Trabajo de investigación para optar el título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas

amperímetro de gancho el rango de trabajo y así observar cuando existe una pérdida o sobrecarga del peso en la sarta de varillas sin interferir con la operación del pozo, además, tienen un bajo costo inicial, menor costo de mantenimiento y es más fácil de ajustar a un sistema automático.

Para bombas de varillas son principalmente motores de inducción de tres fases, NEMA D (National Electrical Manufacturers Association) clasifica los motores según el deslizamiento y las características de torque durante el arranque. “NEMA D” es el motor para la Unidad de Bombeo Mecánico más ampliamente reconocido. Su rango de deslizamiento es de 5% a 13%. Otros motores en el campo petrolero incluyen “NEMA C”, con un máximo deslizamiento de 5% y “NEMA B” con un máximo deslizamiento de 3%.

Los caballos de fuerza para el motor eléctrico dependen de²⁵:

- La carga a levantar por la bomba (profundidad en donde está ubicada y diámetro de la misma)
- Nivel de fluido
- La velocidad de bombeo
- La unidad o balancín

2.2.2 Motores a Gas. Existen dos tipos de motores a gas: los motores de baja velocidad con uno o dos cilindros, y motores multicilindros de alta velocidad.

Los motores de baja velocidad tienen una velocidad de 700 revoluciones por minuto (o menores) y un alto torque. Los motores multicilindros pueden tener altas variaciones de velocidad (hasta un 35%) más que los motores de baja velocidad.

Los motores de gas son generalmente más económicos de operar que los motores eléctricos, sin embargo, los costos de capital y el mantenimiento son usualmente más altos que para motores eléctricos. Estos son usados en locaciones remotas sin disponibilidad de electricidad²⁶.

2.3 UNIDADES DE BOMBEO

La función de la unidad de bombeo es convertir el movimiento rotacional de la unidad motriz al movimiento ascendente- descendente de la barra pulida. Una

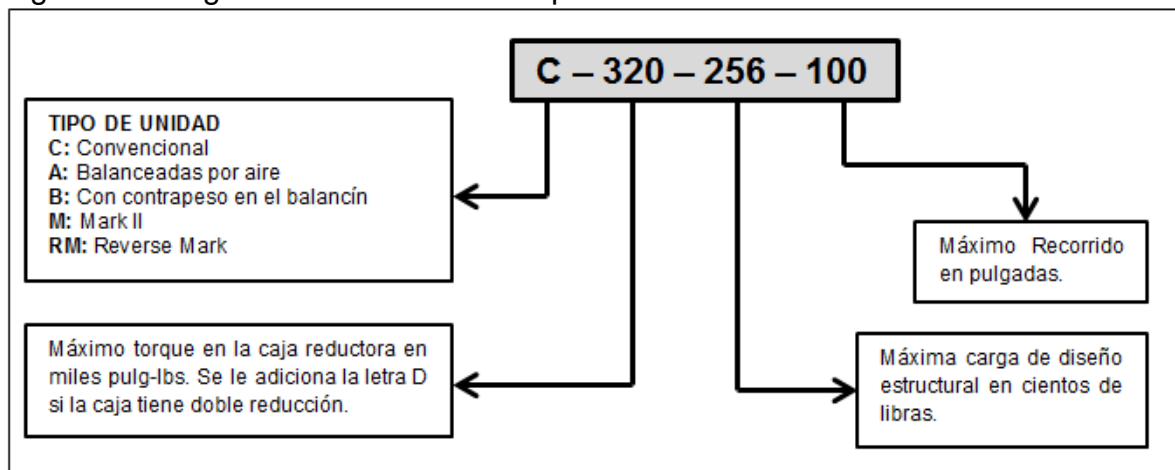
²⁵ MARTINEZ MACIAS, Izanami Vidblain. Diagnóstico de fallas y optimización del Bombeo Mecánico. México D.F, 2013, p.16. Tesis individual para obtener el título de Ingeniero Petrolero. Instituto Politécnico Nacional

²⁶ *Ibid.*, p.17

unidad de bombeo apropiadamente diseñada tiene el tamaño exacto de la caja de engranaje y estructura. También tiene suficiente capacidad de carrera para producir el fluido que se desea²⁷.

2.3.1 Diseño de la unidad. El American Petroleum Institute (API) identifica de acuerdo con la geometría y forma de la estructura, tres clases de unidades de Bombeo Mecánico: Convencional, Neumático y Mark III. De la misma manera el API ha desarrollado un método estándar para describir las unidades de bombeo según el tipo por medio de letras, en donde: la letra C describe si es una unidad convencional, la B si su contrapeso está en el balancín, la A si es una unidad balanceada por aire y la M si es una unidad Mark II. Esta nomenclatura es seguida por números que indicaran el máximo torque de diseño en el reductor en miles de pulgadas por libra (se adiciona una letra D si al reductor que tiene doble reducción), la máxima carga de diseño estructural en cientos de libras y el máximo recorrido que suministra la unidad²⁸. En la figura 6 se puede apreciar un ejemplo de designación de unidades de superficie.

Figura 6. Designación Unidades de Superficie



Fuente: ESPINDOLA, Marcelo. Sistemas de elevación artificial- “Bombeo Mecánico”. [En línea]. 2016. p. 22. Disponible desde internet en: <https://www.slideshare.net/marceloespindola4/sistema-de-bombeo-mecanico-proyecto2>

2.3.2 Geometría de las Unidades de Superficie. A continuación, se nombrarán las diferentes Unidades de Superficie de Bombeo Mecánico, nombrando para cada una de ellas sus principales características y una imagen ilustrativa de cada una.

²⁷ ESCALANTE, Sharon. Módulo III Bombeo Mecánico. [En línea]. 2016. p.1. [Consultado 29 de Diciembre de 2017]. Disponible en: <http://blogs.unellez.edu.ve/sharon/files/2014/01/Guia-3.-BMC-JUL-2016.pdf>

²⁸ ESPINDOLA, Op. cit., p. 2

2.3.2.1 Tipo Convencional. Es más conocido y popular en todos los campos, es de fácil operación y está impulsado por bandas. Es un sistema de palanca con el contrapeso del cigüeñal. Es de bajo mantenimiento, menos costoso que otras unidades y gira en dos direcciones (sentido horario y anti-horario). Una de sus desventajas es que requiere de caja de engranajes de mayor dimensión en comparación a otros.

El movimiento rotativo del motor es transmitido por medio de bandas a la caja de transmisión, en el cual reduce la velocidad a través de un sistema de engranes. Este movimiento es transmitido a la varilla²⁹. En la figura 7 se puede apreciar la estructura real de este tipo de unidad.

Figura 7. Unidad Convencional



Fuente: SOCORRO, Gabriel. Producción 2 “Bombeo Mecánico”. [En línea]. 2012. Disponible desde internet en: <https://goo.gl/CmgKke>

2.3.2.2 Tipo Mark II. Estas unidades basan su geometría en tres características, reduciendo el torque y la carga con respecto a una unidad convencional. Estas características son: Ubicación de la caja reductora, un punto de apoyo en el extremo de la unidad y una manivela desfasada. Independientemente de estos factores, las unidades Mark II producen un torque uniforme trabajando en forma conjunta, reduciendo un 35% del torque en la caja reductora. Adicionalmente el costo de electricidad y tamaño de motor se reduce.

²⁹ MARTINEZ, Op. cit., p. 12

El movimiento rotativo en el cual cambia la posición de los brazos y el poste maestro para obtener un movimiento unitorsional con la finalidad de reducir el torque en caja de engranes. Esta unidad soporta más fluido³⁰. En la figura 8 se puede apreciar la estructura real de este tipo de unidad.

Figura 8. Unidad Mark II



Fuente: SOCORRO, Gabriel. Producción 2 “Bombeo Mecánico”. [En línea]. 2012. Disponible desde internet en: <https://goo.gl/hySZ1x>

2.3.2.3 Unidad Aerobalanceada. El uso del aire comprimido en vez de pesadas manivelas y contrapesos permite un control del contrabalanceo en forma manual. Como resultado, el tamaño de la unidad se reduce, minimizando los costos de traslado y de montaje. Las unidades balanceadas con aire tienen la ventaja de tener un tamaño mayor con largas carreras, donde con un sistema convencional o Mark II son prácticamente imposibles. Dentro de sus ventajas, se encuentra que es una unidad más compacta, de fácil balanceo y de bajo costo. En cuanto a las desventajas de este equipo son que, requiere mayor mantenimiento, y la condensación del cilindro de aire puede causar problemas, y son menos eficientes que el resto de las unidades.

El movimiento rotativo del motor es transmitido por medio de bandas de caja de transmisión; este movimiento es transmitido a la varilla y por medio de un sistema de engranes permite reducir la velocidad. Este motor, es más resistente a altas

³⁰ *Ibíd.*, p. 12-13

cargas y suministra mayores carreras (de 64 a 240 pulgadas)³¹. En la figura 9 se puede apreciar la estructura real de este tipo de unidad.

Figura 9. Unidad Aerobalanceada



Fuente: SOCORRO, Gabriel. Producción 2 “Bombeo Mecánico”. [En línea]. 2012. Disponible desde internet en: <https://goo.gl/m2bhnC>

2.3.2.4 Unidad Hidráulica. Utiliza la fuerza hidráulica para transferir energía a la bomba de subsuelo a través de las varillas. Su geometría es diferente a la de las Unidades Convencionales, ya que en sustitución de la caja de engranes de utiliza la Bomba Hidráulica. En la mayoría de estas unidades se hace el contrabalanceo mediante fluido presurizado. Su aplicación óptima es en crudos pesados, donde es necesario carreras descendentes lentas y carreras ascendentes rápidas.

El diseño ofrece la facilidad de realizar cualquier tipo de combinación de longitud de carrera y velocidad de bombeo mediante un sistema de control. Su diseño permite accionar cualquier tipo de longitud de pistón³². En la figura 10 se puede apreciar la estructura real de este tipo de unidad.

³¹ *Ibíd.*, p. 13

³² *Ibíd.*, p. 14

Figura 10. Unidad Hidráulica



Fuente: Serinpet. UHBM 220 (UNIDAD HIDRAULICA DE BOMBEO MECÁNICO). [Video]. 2014. Color, 2:48 min, sonido. Disponible desde internet en: <https://www.youtube.com/watch?v=nbnbOHOmOw>

2.3.2.5 Unidad Hidroneumática. Consta de un cilindro de efecto simple, tanques de Nitrógeno, un cilindro hidroneumático de efecto doble (acumulador), válvula maestra de control direccional de cuatro vías y una bomba auxiliar de engranes. Este balanceo funciona con base a dos magnitudes: una constante y otra variable.

La magnitud constante es la cantidad de fluido hidráulico necesario para ocupar la mitad de los dos cilindros, por debajo de cada émbolo y el tubo que los comunica. Mientras la magnitud variable es la cantidad de Nitrógeno que aplica a los tanques y a la parte superior del acumulador, la cual será proporcional al peso de la sarta de varillas de succión, junto con la columna de crudo³³. En la figura 11 se puede apreciar la estructura real de este tipo de unidad.

³³ *Ibíd.*, p. 14

Figura 11. Unidad Hidroneumática



Fuente: “Bombeo Mecánico Sistemas Artificiales de Producción”. [En línea]. 2016. Disponible desde internet en: <https://bit.ly/2rkQcEA>

2.3.2.6 Unidad Reverse Mark II. Esta unidad ofrece una alternativa mejorada de diseño y geometría de las Unidades Convencionales. A pesar de sus similitudes con la geometría de las Unidades Reverse Mark II, estas pueden reducir el torque y los requerimientos de potencia en muchas aplicaciones de bombeo³⁴. En la figura 12 se puede apreciar la estructura real de este tipo de unidad.

³⁴ SOCORRO, Gabriel. Bombeo Mecánico, presentación. [En línea]. 2012. P. 38. [Consultado 29 de Enero de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/gabosocorro/bombeo-mecanico-presentacion>

Figura 12. Unidad Reverse Mark II



Fuente: SOCORRO, Gabriel. Producción 2
“Bombeo Mecánico”. [En línea]. 2012.
Disponible desde internet en: <https://goo.gl/m2bhnC>

2.3.2.7 Unidad Rotaflex. Este sistema utiliza tecnología probada e innovación en el diseño para proveer una eficiencia excelente y eficacia en los costos para pozos profundos, problemáticos y de alto potencial.

Esta unidad cumple casi a la perfección con la situación ideal para el Bombeo Mecánico: carrera larga y baja velocidad. Esta combinación asegura un mejor llenado de la bomba y cargas parásitas muy bajas (aceleración, fricción mecánica y viscosa), por esta razón, la carta de superficie de una instalación con Rotaflex es casi parecida a la ideal³⁵. En la figura 13 se puede apreciar la estructura real de este tipo de unidad.

³⁵ *Ibíd.*, p. 41

Figura 13. Unidad Rotaflex



Fuente: SOCORRO, Gabriel. Producción 2 “Bombeo Mecánico”. [En línea]. 2012. Disponible desde internet en: <https://goo.gl/m2bhnC>

2.3.2.8 Unidad Dynapump. Es un sistema de Unidad de Bombeo computarizado. Utiliza sensores electrónicos, equipamiento hidráulico y sistemas de monitoreo computarizado con el propósito de extraer petróleo lo más eficientemente posible tanto para pozos profundos como para pozos someros.

Esta consiste en dos componentes principales que son la unidad de bombeo y la unidad de potencia. La unidad de potencia maneja la unidad de bombeo y es el control central del sistema. Este consiste en una computadora controlada con un sistema de modem radio, electrónica sólida, controladores de motor y bombas hidráulicas³⁶. En la figura 14 se puede apreciar la estructura real de este tipo de unidad.

³⁶ *Ibíd.*, p. 44

Figura 14. Unidad Dynapump



Fuente: Gelahar. Bombeo Mecánico Unidad Dynapump. [Video]. 2008. Color, 1:08 min, sonido. Disponible desde internet en: <https://bit.ly/2HWUfxG>

3. ELEMENTOS DE FONDO DEL SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO MECÁNICO

En este capítulo se describen los diferentes elementos de fondo empleados en el Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico, como lo son, las bombas de subsuelos y sus tipos, la sarta de varillas y los diferentes accesorios usados durante la operación.

3.1 BOMBAS DE SUBSUELO

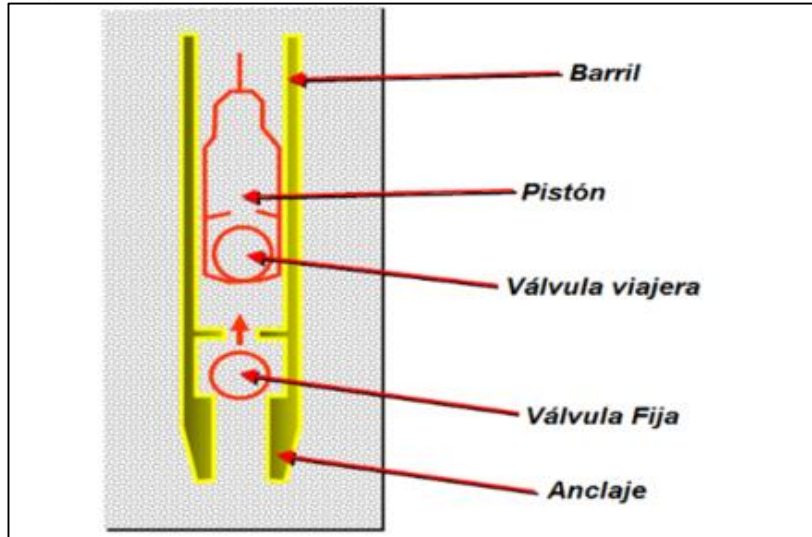
La función de la bomba de subsuelo es levantar el fluido desde el nivel del pozo hasta la superficie impulsarlo por la línea de flujo hasta el punto de recolección. Básicamente las bombas de subsuelo utilizadas son bombas de barril y se dispone de muchas variaciones en los diseños de los elementos de las mismas. De acuerdo con las condiciones de cada pozo se utilizara alguno de los tipos de bombas disponibles³⁷.

3.1.1 Elementos principales. Como se observa en la figura 15 los elementos básicos que conforman una bomba de subsuelo son:

- Barril
- Pistón
- Válvula fija
- Válvula viajera
- Anclaje de fondo

³⁷ REY BOTTO, Blas Octavio. Optimización de la operación del Sistema de Bombeo Mecánico de la sección 67 de los campos petroleros "Gustavo Galindo Velasco". Bucaramanga, 2004, p. 30. Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-químicas

Figura 15. Partes de la Bomba de Subsuelo



Fuente: MONCADA DELGADO, Davian Augusto. Caracterización del sistema de levantamiento artificial Bombeo Mecánico en pozos de crudo pesado. [En línea]. 2016. Disponible desde internet en: <https://bit.ly/2HNeC4G>

3.1.1.1 Barril. Existen diferentes tipos de barriles para bombas de subsuelo, estos pueden ser estacionarios o móviles, de paredes delgadas para pozos someros a medianamente profundos o paredes gruesas para mayores profundidades, con anclaje de fondo o anclaje superficial, barriles tipo cámara (tubing) o tipo camisa (liner)³⁸.

3.1.1.2 Pistón. Los pistones para bombas de subsuelo pueden ser, de acuerdo con su configuración, lisos, de copa, de sucesión de anillos, estriados, entre otros. Y de acuerdo con el material, se clasifican en metálicos y no metálicos. Algunas características importantes son: Los pistones metálicos son de redondez precisa en la superficie exterior y pueden ser de acero, cromo o níquel plateado y metal pulverizado (aleación de Boro, Cromo y Silicio). Estos últimos son recomendados para problemas de ácido sulfúrico.

Los pistones de la copa comúnmente se utilizan en barriles con bombas de tubería de producción. Comúnmente se fabrican las copas de lona impregnada de brea, caucho o plástico. La aplicación de estos pistones está restringida a poca profundidad y ha ido desapareciendo del mercado.

Los pistones de composición de anillos consisten en un número grande de anillos de tela y caucho en ranuras individuales cortadas en un barril de metal. Tampoco

³⁸ *Ibíd.*, p. 31

son muy recomendables a menos que sea para poca profundidad. La longitud de un pistón puede determinarse fácilmente aplicando una regla empírica que determina un pie de pistón por cada 1000 pies de profundidad. Una longitud de 6 pies es satisfactoria para más de 6000 pies³⁹.

3.1.1.3 Válvulas. Las válvulas en una bomba de subsuelo son partes críticas; cada válvula debe operar con cada carrera de la bomba, alternadamente, así la válvula fija permite el llenado del barril y la válvula viajera la descarga del fluido, abriendo con la restricción mínima de fluido y cerrando para no permitir pérdidas. Fallas en las válvulas son la causa más común de fallas en las bombas. La especificación 11AX del API para válvulas de bola y asiento no especifica los materiales de manufactura, sin embargo, solo se controlan las tres dimensiones.

La bola y el asiento son hechos como un par, y la bola y asiento de una válvula no debe ser intercambiada con la bola y asiento de otra válvula. El diseño API para válvulas de bola es el más comúnmente utilizado en bombas de subsuelo.

Para prematuro desgaste de válvulas en pozos con problemas de arena se recomienda utilizar válvulas y asientos de mayor dureza como son los de Carburo de tungsteno o también un doble juego de válvulas y de esta manera aunque se deposite arena en una de las válvulas, el cierre serpa asumido por la otra, evitando una violenta descarga de fluido a través de la primera incrementando la vida útil de la bomba⁴⁰.

3.1.1.4 Anclaje de fondo. Otro elemento que puede considerarse como parte constitutiva adicional de las bombas de subsuelo es el anclaje de fondo. Su función es anclar y sellar la bomba a la tubería de producción y puede ser del tipo copas y del tipo mecánico. El primero utiliza plástico o un material similar para que funcione como sello y el segundo se utiliza para condiciones extremas de temperatura donde el de copas no es recomendable⁴¹.

3.1.2 Funcionamiento. Tal y como se puede observar en la figura 16 en la carrera ascendente el peso del fluido en el tubing cierra la válvula viajera, siendo el fluido almacenado en el barril desplazado por el pistón hacia la superficie; creando una depresión sobre la válvula fija, ocasionando la apertura de la misma y por consiguiente el ingreso de fluido desde el revestimiento al interior del barril. En la carrera descendente el fluido contenido en el barril ejerce una presión contra el pistón que baja, provocando la apertura de la válvula viajera y el cierre de la válvula fija, pasando el fluido contenido en el barril hacia la parte superior del

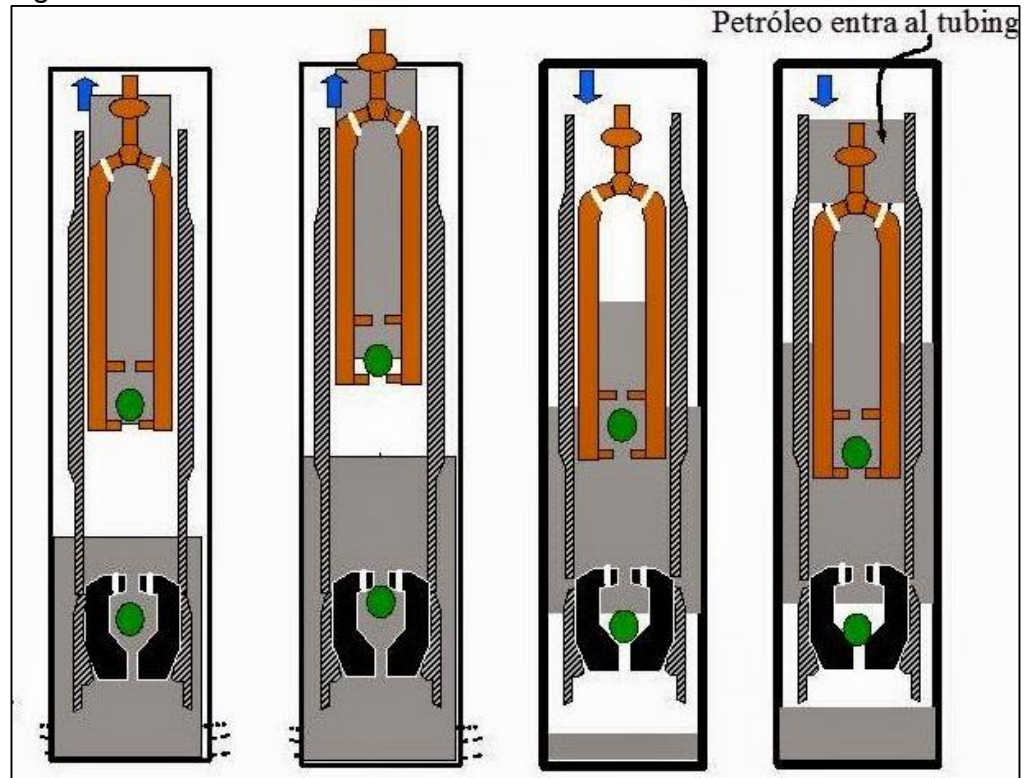
³⁹ *Ibíd.*, p. 31-32

⁴⁰ *Ibíd.*, p. 32

⁴¹ *Ibíd.*, p. 32-33

pistón, hasta llegar al punto muerto inferior. En ese momento comienza la carrera ascendente volviendo a cumplirse el ciclo⁴².

Figura 16. Funcionamiento de la Bomba de Subsuelo



Fuente: Métodos de producción de petróleo. [En línea]. 2014.

Disponible desde internet en: <https://goo.gl/QYifAz>. Modificado por los autores.

3.1.3 Tipos. Se pueden clasificar en dos grupos principales, que son las bombas insertables y las bombas de tubería de producción.

3.1.3.1 Bombas insertables. Son aquellas que van introducidas en la tubería de producción y conectadas a la sarta de varillas, usualmente el barril, el pistón y las válvulas se fabrican en un solo ensamblaje y la bomba se ancla en el niple de asiento. Se clasifican asimismo de acuerdo con el barril:

- Barril estacionario y anclaje superior: Se usa en pozos con problemas de arena o bajo nivel de fluido, pozos con gas. Debido a que el pozo está anclado a tope, solo una pequeña cantidad de arena podría acumularse alrededor de la bomba. Debido a esta característica, esta bomba es recomendada por encima de la de barril viajero cuando la producción de arena es un gran problema.

⁴² Ibid., p. 30

- Barril estacionario y anclaje inferior: Se usa en pozos con bajo nivel de fluido, pozos con gas o pozos con bajo nivel estático. Esta bomba con un pistón móvil y carrera metal-metal es también recomendada para pozos profundos y cuando el pozo produce yeso o bario. Esta es la más común de las bombas.
- Barril viajero y anclaje inferior: Este tipo de bombas se usa en pozos con problemas de arena, pozos que utilizan temporizadores o controladores de bombeo y en pozos que presenta una frecuencia alta de fallas del barril. Esta bomba es también recomendada en pozos con problemas de corrosión⁴³.

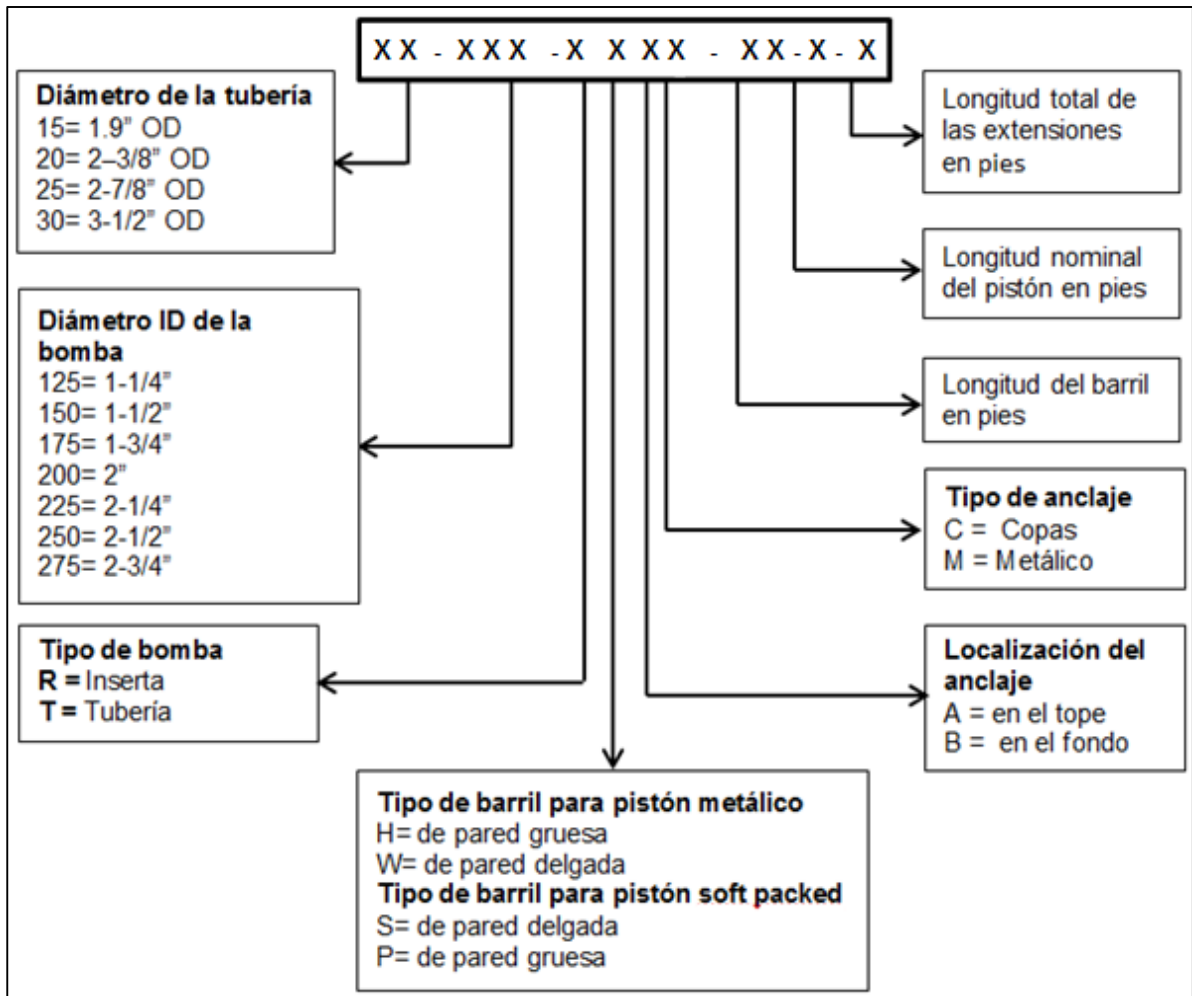
3.1.3.2 Bombas de Tubing. El barril de la bomba se instala como una parte integral de la sarta: el embolo se corre y se recupera mediante un dispositivo que se encuentra instalado en la parte inferior del pistón. Tienen la ventaja de poseer mayor desplazamiento para cualquier diámetro específico de tubing. Adicionalmente, en caso de problemas con la bomba es necesario sacar completamente la tubería de producción⁴⁴.

3.1.4 Designación API de las Bombas. El API ha desarrollado un método para designar las bombas de subsuelo, esta proporciona una manera concisa para descripción de las mismas. La figura 17 se observa la definición de la bomba con relación a la designación que esta tenga.

⁴³ SVINOS G, John. Software Avanzado de Optimización para Bombeo por Cabillas Consultaría y Entrenamiento. Theta Enterprise, Inc. 2005. p. 67-69

⁴⁴ REY BOTTO. Op. cit. p. 33

Figura 17. Designación API 11B de las Bombas de Subsuelo



Fuente: ESPINDOLA, Marcelo. Sistemas de elevación artificial- "Bombeo Mecánico". [En línea]. 2016. p. 32. Disponible desde internet en: <https://www.slideshare.net/marceloespindola4/sistema-de-bombeo-mecanico-proyecto2>

3.2 SARTA DE VARILLAS

Es usada para transmitir el movimiento y la potencia de la unidad de bombeo de la bomba de subsuelo, son fabricadas de acero y en fibra de vidrio y las combinadas, que conservan la propiedad del material de fabricación⁴⁵. Existen diferentes varillas de succión, dentro de las cuales se destacan: las convencionales y la COROD.

3.2.1 Varillas convencionales. Dentro de las convencionales existen las varillas clasificadas por la norma API 11B en cinco grados, además de la Norma AISI/SAE

⁴⁵ Ibid., p. 35

que determina los principales elementos aleantes Níquel, Cromo y Molibdeno, también se encuentran las varillas de servicio especial: No API, dependiendo de cada fabricante y las varillas de fibra de vidrio. A continuación en la tabla 1 se describen cada una de las varillas establecidas por el API como lo son⁴⁶:

Tabla 1. Varillas establecidas por el API

GRADO	CLASIFICACIÓN DE ACERO	MINÍMO LÍMITE DE ELASTICIDAD (psi)	MINÍMO DE FUERZA EXTENSIBLE (psi)	MÁXIMO DE FUERZA EXTENSIBLE (psi)
C	AISI 1536 con aleación de carbón-manganeso	85.000	115.000	140.000
K	AISI 4623 de acero con aleación de níquel-molibdeno	60.000	90.000	115.000
D	AISI 1541MV con aleación de carbón-manganeso	85.000	115.000	140.000
Aleación D	AISI 4142 de acero de aleación de cromo-molibdeno	85.000	115.000	140.000
Especial D	AISI 4720SR de acero con aleación níquel-cromo-molibdeno	85.000	115.000	140.000

En la tabla 2 se muestra la clasificación de otras varillas convencionales que se encuentran en la industria, son las varillas especiales⁴⁷:

⁴⁶ WEATHERFORD. Documento de power point: Varillas de bombeo. p. 31.

⁴⁷ *Ibíd.*, p. 44.

Tabla 2. Clasificación varillas especiales

GRADO	CLASIFICACIÓN DE ACERO	MINÍMO LÍMITE DE ELASTICIDAD (psi)	MINÍMO DE FUERZA EXTENSIBLE (psi)	MÁXIMO DE FUERZA EXTENSIBLE (psi)
S88 Templado y revenido	AISI 3130 con aleación de níquel-cromo	130.000	140.000	155.000
XD Normalizado y templado	AISI 4138M de acero con aleación de cromo-molibdeno	115.000	140.000	150.000
HD	AISI 4332RX especial con aleación de níquel-cromo-molibdeno	115.000	140.000	150.000
EL	AISI 4138M con aleación de cromo-molibdeno	-	-	-

El mejor diseño de la sarta de producción evitara en gran medida las fallas tempranas de las varillas, la norma API Std 11 B “Varillas de Bombeo”, enseñan las dimensiones de varias varillas API, también especifican las dimensiones de los acoples de varillas, la longitud estándar de estas esta entre 25 y 30 pies, las cajas de las varillas son usualmente manufacturadas sin dislocar los planos, las varillas de bombeo son elaboradas de acero y en su totalidad son tratadas al calor para dar combinaciones apropiadas de fuerza, ductilidad y propiedades de impacto y resistencia a la fatiga, las varillas de bombeo modernas son granallados después de la forja y del tratamiento al calor para remover escamas o capas de óxido y para proveer el recubrimiento fuerte del material⁴⁸.

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

⁴⁸ ALVAREZ LACAYO. Op. cit., p. 52

debido a un contacto más uniforme entre los tubos y las varillas de bombeo. También se ocupa de muchos desgastes prematuros de la tubería, especialmente en pozos direccionales y horizontales. Su aplicación especial está dirigida a pozos altamente desviados con producción de petróleo pesado, es decir, de alta viscosidad, son excelentes oportunidades debido a su alta capacidad de resistencia y torque en el sistema⁴⁹.

3.2.3 Varillas huecas. Este tipo de varillas fueron diseñadas para mejorar la confiabilidad de las operaciones de bombeo y reducir costos operativos. Estas reducen las fallas tempranas por rotura del pin de la varillas, aumentan la eficacia de la inhibición contra la corrosión y reducen los problemas de maniobra, dado que su instalación no requiere herramientas especiales⁵⁰.

3.3 ACCESORIOS

Generalmente, para el correcto funcionamiento y operación de los equipos de fondo se necesitan accesorios. Dentro de los cuales se encuentran el ancla de gas, el ancla de tubería los asentamientos, la válvula antibloqueo de gas y las barras de peso que serán descritas a continuación.

3.3.1 Ancla de gas. Las anclas de gas son extensiones de bombas diseñadas para separar el gas libre del líquido producido antes que este entre en la bomba. Estas operan con el principio de que el gas es más ligero que el petróleo y por lo tanto se mueve hacia arriba, mientras el crudo lo hace hacia abajo. El gas pasa hacia arriba por el anular revestidor- tubería permitiendo que más líquido entre a la bomba. Este mejora la eficiencia volumétrica y aumenta la producción⁵¹.

3.3.2 Ancla de tubería. Está diseñado para ser utilizado en pozos con el propósito de eliminar el estiramiento y compresión de la tubería de producción, la cual roza la sarta de varillas y ocasiona el desgaste de ambos. Normalmente se utiliza en pozos de alta profundidad. Se instala en la tubería de producción, siendo este el que absorbe la carga de la tubería⁵².

3.3.3 Asentamientos. Es un acople de tubería especialmente diseñado que es internamente ahusado (estrechamiento) y permite asentar la bomba con un fuerte sello⁵³.

⁴⁹ WEATHERFORD., ALS7501.01 sucker rods brochure. 2003. p. 3.

⁵⁰ TENARIS. Varillas Huecas HolloRod. [En línea].2015. [Consultado en Mayo 5, 2018]. Disponible en: <https://bit.ly/2ljRjyE>

⁵¹ CAMPOS MONTAÑO, Orlando Nahim. Estudio para el cambio de sistema de levantamiento artificial a bombeo mecánico en el campo Lago Agrío operado por EP- Petroecuador. Quito, 2011, 224p. Proyecto previo a la obtención del título de ingenieros en petróleos. Escuela politécnica nacional. Facultad de ingeniería en geología y petróleos

⁵² *Ibíd.*, p. 39

⁵³ *Ibíd.*, p. 40

3.3.4 Válvula antibloqueo de gas (VGA). Dispositivo que elimina el bloqueo por gas, disminuye el golpe de fluido y evita el atascamiento por sólidos en las bombas de subsuelo⁵⁴.

3.3.5 Barras de peso. Son accesorios de gran diámetro diseñadas para añadir peso al final de la sarta de varillas y mantenerlas en tensión durante la carrera descendente. Los diámetros de estas barras van desde 1-1/4" a 2", siendo limitada su selección de diámetro máximo al tamaño de la tubería. Además, estas son usadas para reducir el desgaste de la varilla y tubería al mantenerlas en tensión y para evitar problemas de pandeo o buckling al final de la sarta⁵⁵.

⁵⁴ Válvula cheque anti bloqueo por gas. Inventor: A. DE GUEVARA LADRON. Fecha solicitud: 10, agosto, 2015. WO2016024210 A3. 28, abril, 2016

⁵⁵ WEATHERFORD. Varillas de bombeo. Op cit., p. 49

4. DESCRIPCIÓN Y GENERALIDADES DE LA BOMBA CBM

La Bomba CBM fue diseñada inicialmente para la producción de gas en yacimientos con capa de carbón, ya que esta permite la extracción de las grandes cantidades de agua presentes en estos ambientes, evitando así el atascamiento por gas y permitiendo la producción continua del fluido presente en el yacimiento.

Adicionalmente, la bomba ayuda a contrarrestar las partículas de carbón que se generan en los pozos, las cuales producen atascamiento en las empaaduras y en la unión en una Bomba Convencional. El diseño está particularmente enfocado hacia campos de gas con capa de carbón, sin embargo, esta puede usada como una bomba insertable para el Sistema de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA BOMBA CBM

En el Bombeo Mecánico Convencional, para levantar el fluido desde el fondo del pozo, la bomba realiza una carrera ascendente y descendente. Cuando se realiza la carrera ascendente el motor debe proporcionar la energía suficiente para levantar el peso de la sarta de varillas y el peso del fluido a producir.

La Bomba CBM no levantara el peso del fluido sino que en la carrera descendente lo empujara aprovechando el peso de la sarta de varillas, es decir, que en la carrera ascendente el motor solo levantará el peso de dicha sarta. Teniendo en cuenta esto, la eficiencia del motor mejorara notablemente, reduciendo así costos de energía.

Dentro de las ventajas que presenta la bomba, se encuentran las siguientes:

- Combatir la producción de gas en yacimientos de carbón, eliminando el agua de los pozos para que el gas fluya libremente.
- Ideal para pozos con producción de sólidos, previniendo el arenamiento de la bomba.
- Menos partes móviles que se pueden atascar.
- Menores reemplazos de partes y disminución de costos de reparación.
- La bomba puede ser instalada con cualquier anclaje convencional.
- Disminución en el uso de energía del motor.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA BOMBA CBM

La composición de la Bomba CBM es muy simple, esta puede reemplazar cualquier bomba estándar sin necesidad de ningún procedimiento especial. El ensamblaje a la unidad puede ser de tipo API estándar, mecánico o por copas, como se observa en la figura 18. Este ensamblaje, está hecho de acero un material no corrosivo, que se conecta a la cámara inferior, y que se conoce como la jaula para la Válvula Fija Inferior.

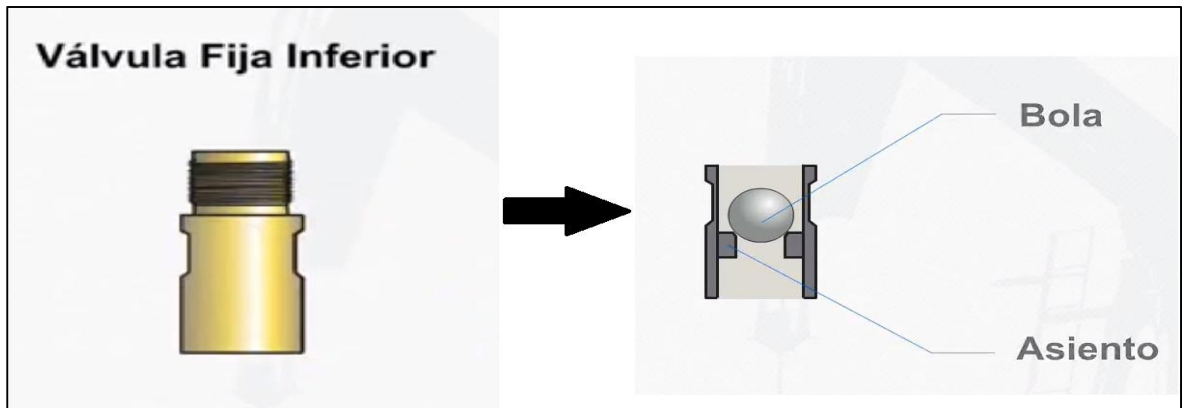
Figura 18. Ensamblaje mecánico y por copas



Fuente: UPC Global. Bomba Mecánica Insertable CBM [Video]. 2014. Color. 3:40 min. Disponible desde internet en: <https://goo.gl/asjorf>. Modificado por los autores.

La Válvula Fija Inferior está diseñada para permitir el máximo flujo de fluidos, además esta consta de una bola y asiento de carburo para garantizar máxima durabilidad, tal y como se puede apreciar en la figura 19.

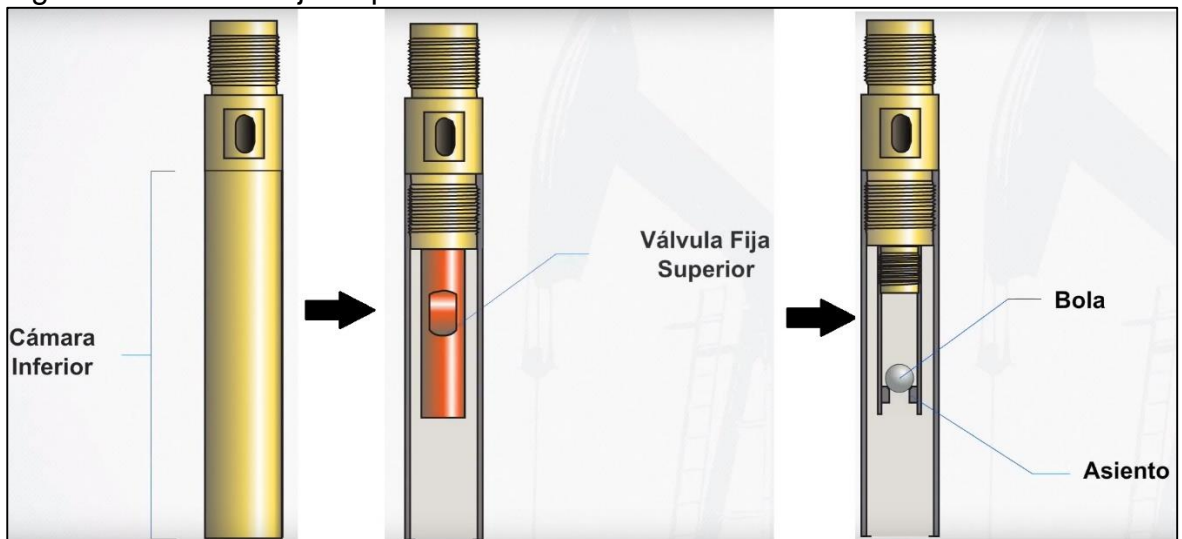
Figura 19. Válvula Fija Inferior de la CBM



Fuente: UPC Global. Bomba Mecánica Insertable CBM [Vídeo]. 2014. Color. 3:40 min. Disponible desde internet en: <https://goo.gl/asjorf>. Modificado por los autores.

En la jaula de la cámara inferior se encuentra la Válvula Fija Superior, que es otra de las partes importantes de la Bomba CBM esto debido a que ambas Válvulas son de asiento (es decir, fijas). En la figura 20, se puede observar la composición de la cámara inferior junto a la Válvula Fija superior.

Figura 20. Válvula Fija Superior de la CBM

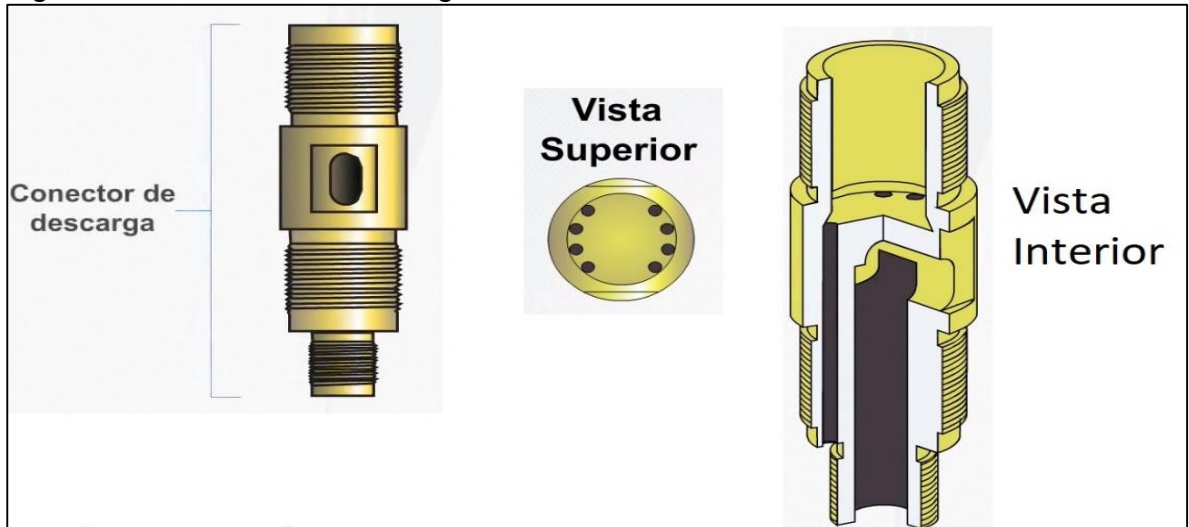


Fuente: UPC Global. Bomba Mecánica Insertable CBM [Vídeo]. 2014. Color. 3:40 min. Disponible desde internet en: <https://goo.gl/asjorf>. Modificado por los autores.

Adjunto a la cámara superior y a la cámara inferior se encuentra el conector de descarga, el cual está diseñado para que el flujo fluya alrededor del orificio de descarga desembocando a la cámara superior para después regresar y salir hacia la tubería, en el momento que el fluido sale por la parte inferior este limpia el mecanismo del asiento de manera que, si la bomba está detenida por un periodo

de tiempo prolongado, su primera embolada limpiará cualquier residuo sólido del asiento. A continuación, se observa la Figura 21, donde se encuentra el conector de descarga con vista superior y con vista recortada.

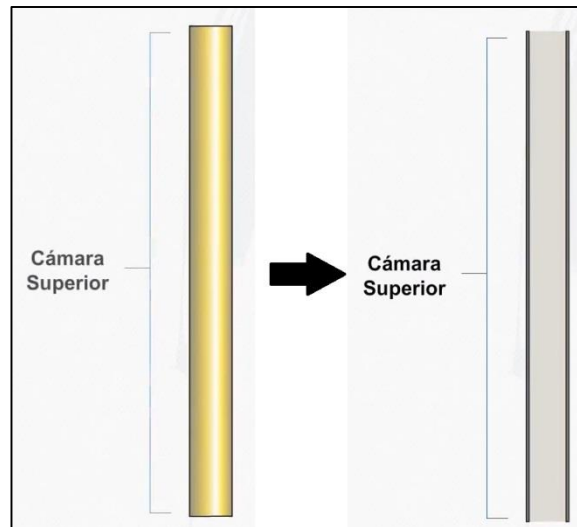
Figura 21. Conector de descarga de la CBM



Fuente: UPC Global. Bomba Mecánica Insertable CBM [Vídeo]. 2014. Color. 3:40 min. Disponible desde internet en: <https://goo.gl/asjorf>. Modificado por los autores.

La cámara superior es donde el fluido se acumula durante la carrera ascendente del pistón como se puede observar la figura 22, la extensión del mecanismo es determinada por la longitud de carrera de la unidad utilizada.

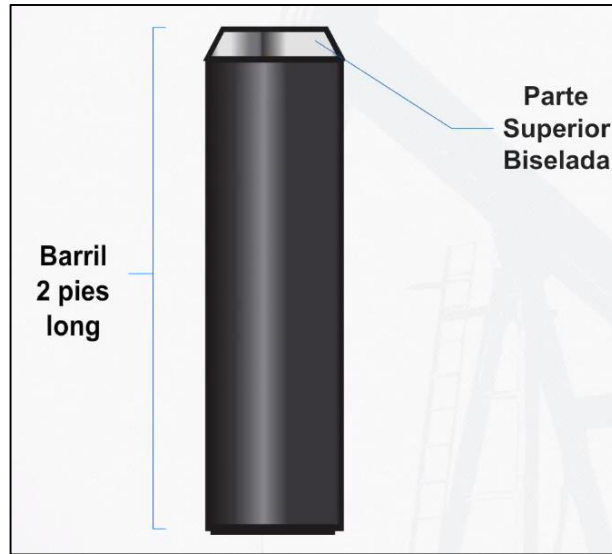
Figura 22. Cámara Superior de la CBM



Fuente: UPC Global. Bomba Mecánica Insertable CBM [Vídeo]. 2014. Color. 3:40 min. Disponible desde Internet en: <https://goo.gl/asjorf>. Modificado por los autores.

El barril está diseñado para limpiarse a sí mismo, la parte superior tiene una parte biselada, como se observa en la figura 23, que funciona como limpiador con una longitud de dos pies que permite tener un costo de reparación bajo. El pistón es de metal y está mecanizado con una precisión de tolerancia de dos milésimas de pulgada menos que el diámetro interno del barril.

Figura 23. Barril de la CBM



Fuente: UPC Global. Bomba Mecánica Insertable CBM [Vídeo]. 2014. Color. 3:40 min. Disponible desde internet en: <https://goo.gl/asjorf>. Modificado por los autores.

4.3 FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA CBM

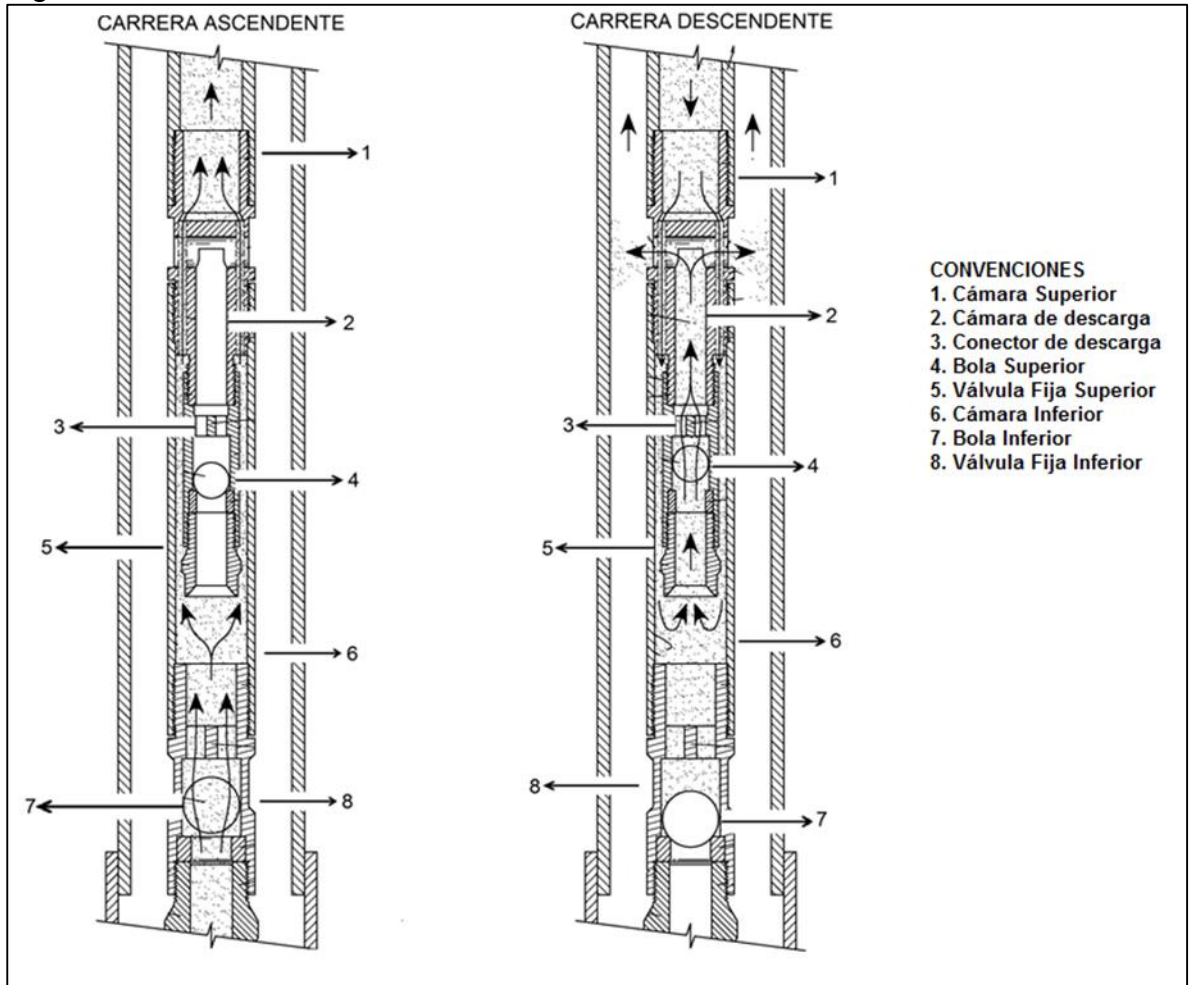
El funcionamiento de la Bomba CBM se describirá teniendo en cuenta que esta posee dos válvulas fijas, es decir, que ninguna presenta desplazamiento; a diferencia de la Bomba Convencional, en donde una válvula llamada viajera realiza un desplazamiento en la carrera ascendente.

Durante la carrera ascendente la válvula fija inferior se abre y el fluido entra a la cámara, este fluye a través del conector de descarga y finalmente llega a la cámara superior. Durante la carrera descendente la presión del pistón obliga al cierre de la válvula fija inferior y hace que la válvula fija superior se abra; el fluido fluye hacia abajo a través de la válvula y sale hacia la cámara inferior. Debido a que la válvula inferior está cerrada, el fluido invierte la dirección y fluye hacia arriba encontrando la válvula fija superior abierta, este seguirá su dirección y saldrá por el conector de descarga.

El fluido fluye por las aberturas laterales y dentro del espacio interior del tubing por encima del zapato de asiento y entre la sarta de varillas y el tubing. Las sucesivas carreras del pistón forzarán cada vez más el fluido a través de las salidas y del interior de la tubería, logrando así que esté llegue en su totalidad a superficie para su extracción.

A continuación, se observa la figura 24, en la cual se muestra la carrera ascendente del pistón y la carrera descendente con la dirección del fluido durante estos dos momentos.

Figura 24. Funcionamiento de la Bomba CBM



Fuente: Google Patents [En línea]. Disponible en internet: <https://goo.gl/c1N8eG>. Modificado por los autores.

5. RE-DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO USANDO LA BOMBA CBM

En este capítulo se presentará el diseño correspondiente a la Sarta de Varillas, teniendo en cuenta las cargas en esta, debido a que con la Bomba CBM las cargas en la sarta serán diferentes a las de una Bomba Convencional por lo tanto, se diseñara con los fundamentos básicos para desarrollar un criterio de diseño eficiente para este sistema de levantamiento.

Comúnmente, en el Bombeo Mecánico con bomba en fondo convencional, las posibles cargas que soportan las varillas durante el ciclo de bombeo, pueden ser⁵⁶:

- Peso de varillas, siendo una carga positiva tanto ascendente como descendentemente.
- Las Fuerzas de Flotación, cuya fuerza es opuesta al peso de las varillas y es debido a la fuerza que ejerce el fluido sobre la varilla cuando es sumergida.
- Carga del Fluido, esta fuerza es debido al fluido manejado en la carrera ascendente. La cual es positiva.
- Fuerzas dinámicas, son resultantes de los cambios de aceleración y de movimiento durante el ciclo de bombeo.
- Fuerzas de fricción, existe la fricción por fluido y la fricción mecánica.

En el rediseño del Sistema de Bombeo Mecánico con la bomba CBM, la Carga del Fluido será igual a cero, debido a que la sarta de varillas empujará este, en vez de levantarlo, por lo tanto no existirá peso de fluido.

5.1 DISEÑO DE SARTA DE VARILLAS.

Es uno de los elementos más importantes del Bombeo Mecánico, debido a que transmite energía desde la superficie, hasta la bomba del subsuelo. En este caso, usando la Bomba CBM este diseño se tendrá en cuenta para el empuje de fluidos, ya que esta Sarta no estará relacionada propiamente con el levantamiento de los mismos. Por ello, es importante un apropiado diseño para obtener excelentes condiciones de operación.⁵⁷

⁵⁶ PDVSA, CIED. Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. Instituto de Desarrollo Profesional y Técnico. 2001. Venezuela. p. 61

⁵⁷ *Ibíd.*, p. 62

Los diseños de sarta de varillas pueden ser de diámetro uniforme o combinado, siendo este último el más utilizado, conocido como sarta de varillas telescópicas ideales para profundidades mayores a 3500ft, para su bombeo.⁵⁸ Al existir dicha combinación, se presenta una reducción en el peso total de la sarta.

A continuación se presenta un método de ensayo y error, para hallar el porcentaje de longitudes óptimas de cada tramo de varilla, mediante el uso de una sarta telescópicas, está consiste en varillas de dos o tres diámetros, con los tamaños más grandes hacia la superficie, teniendo en cuenta que los esfuerzos son iguales en cada tope. Adicionalmente, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Gravedad específica del fluido de trabajo.
- Profundidad de asentamiento de la bomba.

Las ecuaciones que intervienen para el cálculo del porcentaje de cada sección de varilla, son las mostradas a continuación. La ecuación 1 muestra la forma de hallar los porcentajes de longitud.

Ecuación 1. Porcentajes de longitud

$$\%Ra + \%Rb + \%Rc = 1$$

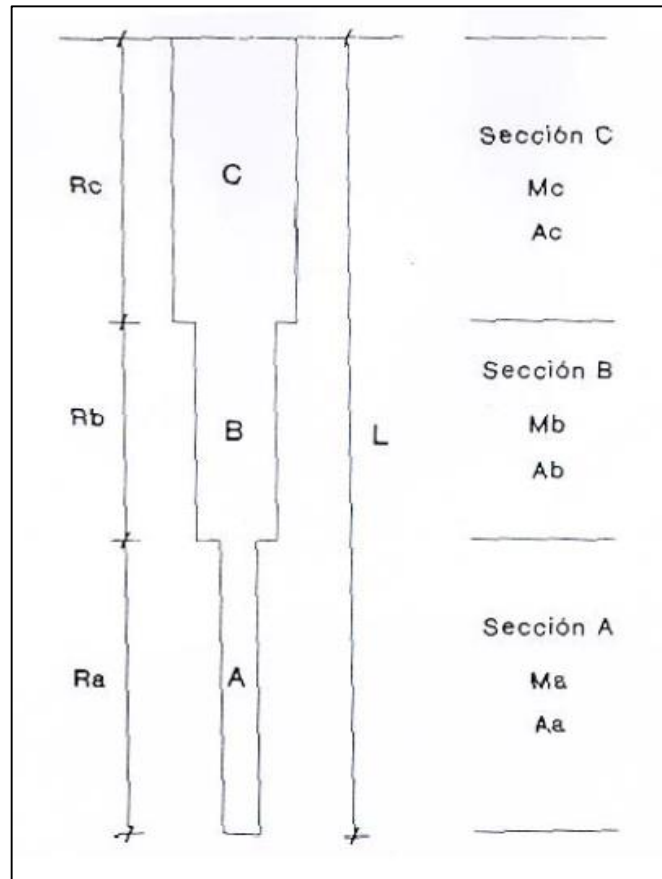
Fuente: PDVSA, Diseño de
Instalaciones de Levantamiento
Artificial por Bombeo Mecánico. p. 62

Siendo %Ra, %Rb y %Rc, los porcentajes en longitud de cada sección en particular.

En la figura 25, se puede observar un Diagrama Esquemático de una Sarta de Varillas telescópicas del cual se obtienen las siguientes ecuaciones:

⁵⁸ ARIAS TRUJANO, Edgar. Propuesta de diseño para el reacondicionamiento de Bombeo Mecánico con equipo TRP. México, D. F. 2014. p. 39. Tesina para obtener el título de Ingeniero Petrolero. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.

Figura 25. Diagrama esquemático de Sarta de Varillas



Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 63

En la sección inferior la carga viene dada por la ecuación 2.

Ecuación 2. Carga de la Sección A.

$$W_a = W_p + (M_a * \%R_a * L)$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 63

Dónde:

Wa= Carga de la sección A, (Lb)

Wp= Carga sobre el pistón (Wp=Wf) (Lb)

Ma= Peso unitario de varilla de la sección A, (Lb/ft)

%Ra= Porcentaje fraccional de la sección A de la varilla, (%)
L= Longitud de la sarta de varillas, (ft)

De esta manera, W_f , viene a ser la carga del fluido, con la CBM no existe trabajo de levantamiento de fluido, sino de empuje, por lo cual esta variable se tomaría como cero.

De igual manera con la sección A, se obtiene el cálculo para el esfuerzo, que será mostrado en la ecuación 3.

Ecuación 3. Esfuerzo en la Sección A.

$$Ea = \frac{Wa}{Aa}$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 63

Dónde:

Ea = Esfuerzo en la sección A de la varilla, (Lb/in²)
 Aa = Área de la sección transversal en A, (in²)
 Wa =Carga de la sección A, (Lb)

Y de esta manera, las anteriores ecuaciones se aplican para cada sección, por tanto, la carga en la sección inmediata (B) está dada por la ecuación 4.

Ecuación 4. Carga en la Sección B.

$$Wb = Wa + (Mb * \%Rb * L)$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 63

Dónde:

Wb = Carga de la sección B, (Lb)
 Wa = Carga de la sección A, (Lb)
 Mb = Peso unitario de la varilla de la sección B, (Lb/ft)
 $\%Rb$ = Porcentaje fraccional de la sección B de la varilla, (%)
L= Longitud de la sarta de varillas (ft)

Y el esfuerzo respectivo para la sección B, que está dado por la ecuación 5.

Ecuación 5. Esfuerzo en la Sección B.

$$Eb = \frac{Wb}{Ab}$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 63

Dónde:

Eb= Esfuerzo en la sección B de la varilla, (Lb/in²)

Ab= Área de la sección transversal en B, (in²)

Wb=Carga de la sección B, (Lb)

Y finalmente, la carga en la sección C está dada por la ecuación 6.

Ecuación 6. Carga en la Sección C.

$$Wc = Wb + (Mc * \%Rc * L)$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 63

Dónde:

Wc= Carga de la sección C, (Lb)

Wb= Carga de la sección B, (Lb)

Mc= Peso unitario de la varilla de la sección C, (Lb/ft)

%Rc= Porcentaje fraccional de la sección C de la varilla, (%)

L= Longitud de la sarta de varillas (ft)

Para la sección C también se tendrá en cuenta el esfuerzo correspondiente mostrado en la ecuación 7.

Ecuación 7. Esfuerzo en la Sección C.

$$E_c = \frac{W_c}{A_c}$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 63

Dónde:

E_c = Esfuerzo en la sección C de la varilla, (Lb/in²)

A_c = Área de la sección transversal en C, (in²)

W_c =Carga de la sección C, (Lb)

Para hallar los porcentajes de longitud en cada sección de la sarta de varillas, inicialmente se realiza una igualación de esfuerzos de cada tope de varillas, de esta manera se obtiene la ecuación 8.

Ecuación 8. Igualación de los Esfuerzos

$$E_a = E_b \text{ y } E_a = E_c$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 64

Dónde:

E_a = Esfuerzo en la sección A de la varilla, (Lb/in²)

E_b = Esfuerzo en la sección B de la varilla, (Lb/in²)

E_c = Esfuerzo en la sección C de la varilla, (Lb/in²)

Con la igualación de esfuerzos, el siguiente paso sería reemplazar las ecuaciones 3, 5 y 7 en la ecuación 8, obteniendo así la ecuación 9.

Ecuación 9. Igualación de los esfuerzos, reemplazando Ecuaciones 3 y 5 para una sarta doble.

$$\frac{W_a}{A_a} = \frac{W_b}{A_b}$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p 64

Dónde:

Wa= Carga en la sección A, (Lb)

Wb= Carga en la sección B, (Lb)

Aa= Área de la sección transversal en A, (in²)

Ab= Área de la sección transversal en B, (in²)

Con la igualación de los esfuerzos, reemplazando las ecuaciones 3 y 6, se obtiene la ecuación 10.

Ecuación 10. Igualación de los esfuerzos, reemplazando Ecuaciones 3 y 6

$$\frac{Wa}{Aa} = \frac{Wb}{Ab} \quad y \quad \frac{Wa}{Aa} = \frac{Wc}{Ac}$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 64

Dónde:

Wa= Carga en la sección A, (Lb)

Wb= Carga en la sección B, (Lb)

Wc= Carga en la sección C, (Lb)

Aa= Área de la sección transversal en A, (in²)

Ab= Área de la sección transversal en B, (in²)

Ac= Área de la sección transversal en C, (in²)

Por lo tanto para determinar los porcentajes de cada sección, se debe utilizar las ecuaciones que serán descritas a continuación, los casos se pueden presentar para sarta doble (dos secciones), o para una sarta triple (tres secciones).

5.1.1 Para una Sarta Doble. En la ecuación 8 y sustituyendo las cargas Wa y Wb, ecuaciones 2 y 4, respectivamente. Se despejará %Rb como función de %Ra, obteniendo la ecuación 11:

Ecuación 11. Porcentaje de longitud para la Sección B.

$$\%Rb = \frac{(Wp + Ma * \%Ra * L) * \left(\frac{Ab}{Aa} - 1\right)}{Mb * L}$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 64

Dónde:

%Rb= Porcentaje fraccional de la sección B de la varilla, (%)

Wp= Carga sobre el pistón, (Lb)

Ma= Peso unitario de varilla de la sección A, (Lb/ft)

%Ra= Porcentaje fraccional de la sección A de la varilla, (%)

L= Longitud de la sarta de varillas, (ft)

Ab= Área de la sección transversal en B, (in²)

Aa= Área de la sección transversal en C, (in²)

Mb= Peso unitario de la varilla de la sección B, (Lb/ft)

El procedimiento de ensayo y error se realiza asumiendo un valor de %Ra y se calcula %Rb, posteriormente el cálculo del porcentaje para la Sección A sería el mostrado en la ecuación 12.

Ecuación 12. Porcentaje de longitud para la Sección A.

$$\%Ra = 1 - \%Rb$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 64

Dónde:

%Ra= Porcentaje fraccional de la sección A de la varilla, (%)

%Rb= Porcentaje fraccional de la sección B de la varilla, (%)

De esta manera se determina un valor de %Ra calculado y se comparará con el valor asumido de %Ra. Si su diferencia de error es mayor al supuesto, se debe realizar nuevamente el cálculo, utilizando el valor calculado de %Ra hasta que se cumpla la igualdad entre estos.

5.1.2 Para una Sarta Triple. La sarta triple tiene presente tres secciones de varilla, las ecuaciones para el desarrollo de este sistema se describen a continuación.

Inicialmente se despeja Wb y Wc, de la ecuación 8, posteriormente se sustituyen los valores de Wa, Wb y Wc ecuaciones 2, 4 y 5, en el despeje realizado de la ecuación 8, de esta manera halla las ecuaciones para %Rb y %Rc como función de %Ra, obteniendo la ecuación 13 y la ecuación 14.

Ecuación 13. Porcentaje de longitud para la Sección B.

$$\%Rb = \frac{(Wp + Ma * \%Ra * L) * \left(\frac{Ab}{Aa} - 1\right)}{Mb * L}$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 64

Ecuación 14. Porcentaje de longitud para la Sección C.

$$\%Rc = \frac{((Wp + Ma * \%Ra * L) * \left(\frac{Ac}{Aa} - 1\right)) - (Mb * \%Rb * L)}{Mc * L}$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 64

Dónde:

%Rb= Porcentaje fraccional de la sección B de la varilla, (%)

Wp= Carga sobre el pistón, (Lb)

Ma= Peso unitario de varilla de la sección A, (Lb/ft)

%Ra= Porcentaje fraccional de la sección A de la varilla, (%)

L= Longitud de la sarta de varillas, (ft)

Aa= Área de la sección transversal en A, (in²)

Mb= Peso unitario de varilla de la sección B, (Lb/ft)

Ac= Área de la sección transversal en C, (in²)

Mc= Peso unitario de varilla de la sección C, (Lb/ft)

%Rc= Porcentaje fraccional de la sección C de la varilla, (%)

El procedimiento de ensayo y error se realiza asumiendo un valor de %Ra y se calcula %Rb y %Rc, luego el cálculo del porcentaje para la Sección A estaría dado por la ecuación 15.

Ecuación 15. Porcentaje de longitud para la Sección A.

$$\%Ra = 1 - (\%Rb + \%Rc)$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 64

Dónde:

%Ra= Porcentaje fraccional de la sección A de la varilla, (%)

%Rb= Porcentaje fraccional de la sección B de la varilla, (%)

%Rc= Porcentaje fraccional de la sección C de la varilla, (%)

5.2 MÉTODO API RP-11L

Una vez hallados los porcentajes de longitud de las varillas en sus diferentes secciones, posteriormente se deben calcular los requerimientos de cargas, máximas y mínimas que pueden soportar las varillas, siendo esta una parte esencial del re-diseño.

Por tanto, uno de los métodos más conocido para este cálculo es el de “Prácticas recomendadas 11L” de la API, desde su estudio y aparición la API RP-11L, se ha convertido en el diseño más popular.⁵⁹

Con los porcentajes obtenidos, se llevará a cabo el cálculo del peso muerto de la sarta de varillas estaría dado por la ecuación 16.

Ecuación 16. Peso muerto de la sarta de varillas.

$$W_{rT} = \sum m_i * L_i$$

Fuente: American Petroleum Institute.
Recommended practice for design
calculations for sucker rod pumping
systems. P 8

Dónde:

W_{rT} = Peso muerto total de la sarta de varillas, (Lb)

m_i = Peso unitario de la varilla en su respectiva sección, (Lb/ft)

L_i = Longitud de la sarta de varillas (ft).

Los cálculos respectivos de peso por cada sección, se utiliza la ecuación 17.

⁵⁹ PDVSA, CIED. *Ibíd.*, p. 36-37

Ecuación 17. Peso unitario de varilla.

$$W_{ri} = L_i * m_i$$

Fuente: American Petroleum Institute.
Recommended practice for design
calculations for sucker rod pumping
systems. P. 8

Dónde:

W_{ri} = Peso muerto por cada sección de varillas, (Lb)

m_i = Peso unitario de la varilla en su respectiva sección, (Lb/ft)

L_i = Longitud de la sarta de varillas (ft).

Una vez calculado el peso muerto total, se tendrá también en cuenta el valor del peso de varillas en flotación estaría dado por la ecuación 18.

Ecuación 18. Peso de varillas en flotación.

$$W_{rf} = W_{rT} [1 - (0.128 * GE)]$$

Fuente: American Petroleum Institute.
Recommended practice for design
calculations for sucker rod pumping
systems. P. 8

Donde W_{rf} es el peso total de varillas en Flotación (Lb), W_{rT} es el peso total de varillas en el aire (Lb) y GE es la gravedad específica del fluido (adimensional).

Otra ecuación importante en el Método API RP-11L es, la carga del fluido sobre la bomba (**Fo**), sin embargo en este caso será cero, debido a que la Bomba CBM no levanta fluido en la carrera ascendente, por tanto no existirá Fo. La ecuación 19 es la usada para determinar la carga de fluido sobre la bomba.

Ecuación 19. Carga del Fluido sobre la bomba.

$$F_o = 0.340 * GE * D^2 * H$$

Fuente: American Petroleum Institute.
Recommended practice for design
calculations for sucker rod pumping
systems. P. 8

Dónde:

Fo= Carga del fluido sobre la bomba, (Lb)

GE= Gravedad específica del fluido, (adimensional)

D= Diámetro del pistón, (in)

H= Profundidad de levantamiento – Elevación Neta, (ft)

Para el cálculo del estiramiento de varillas que es adimensional, se debe tener en cuenta **Fo/SKr**, que es una relación importante para determinar el estiramiento, así como la constante elástica de las varillas. Las propiedades de estiramiento total de la sarta de varillas se relacionan con su constante Kr, cuyo recíproco está dado por la ecuación 20.

Ecuación 20. Recíproco de la constante de estiramiento.

$$\frac{1}{K_r} = E_r * L$$

Fuente: American Petroleum Institute.
Recommended practice for design
calculations for sucker rod pumping
systems. P. 8

Dónde:

1/Kr= Constante de estiramiento total, (in/Lb)

Er= Constante elástica de la sarta de varillas, (in/Lb-ft)

L= Longitud de la sarta de varillas, (ft)

Estas constantes elásticas están estipuladas por el Método de Diseño API RP-11L, véase en el Anexo D, que presenta los valores que pueden utilizarse según el tamaño de la bomba.

Una vez calculada la constante de estiramiento, se puede obtener el dato de la relación adimensional de estiramiento, dada por la ecuación 21.

Ecuación 21. Relación adimensional de estiramiento.

$$\frac{F_o}{S K_r}$$

Fuente: American Petroleum Institute. Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems. P. 8

Dónde:

Fo= Carga del fluido sobre la bomba, (Lb)

SKr= Libras de carga necesaria para estirar el total de la sarta de varillas una cantidad igual a la carrera S de la barra pulida

De igual manera, se debe realizar el cálculo para la carrera del pistón en el cual se tendrá en cuenta el estiramiento de las varillas, el cual está dado por la ecuación 22.

Ecuación 22. Carrera del Pistón.

$$SP = \text{Longitud de carrera} - \text{estiramiento}$$

Fuente: American Petroleum Institute. Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems. p. 8

Donde, SP viene a ser la carrera de la bomba en fondo de pozo (in), para este calculo se tiene en cuenta la longitud de carrera de la sarta de varillas (in) y el estiramiento que presentan las varillas.

Para un óptimo diseño otra relación importante a tener en cuenta, es la velocidad de Bombeo Adimensional (**N/No'**) dado por la ecuación 23. Este factor es el coeficiente entre la velocidad de bombeo y la frecuencia natural de las varillas, la cual es la frecuencia mediante la cual las varillas vibrarán sin fricción.

Ecuación 23. Velocidad de Bombeo adimensional.

$$\frac{N}{N'_o} = \frac{N * L}{245000 * Fc}$$

Fuente: American Petroleum Institute. Recommended practice for design Calculations for sucker rod pumping systems. p. 2

Despejando N'_o , quedaría como la ecuación 24.

Ecuación 24. Frecuencia Natural de la sarta de varillas con diferentes secciones de diámetro.

$$N'_o = \frac{245000 * Fc}{L}$$

Fuente: American Petroleum Institute. Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems. P. 2

Dónde:

N'_o = Frecuencia natural de la sarta de varillas con diferentes secciones de diámetro, (spm – stroke por minuto)

N = Velocidad de bombeo, (spm – stroke por minuto)

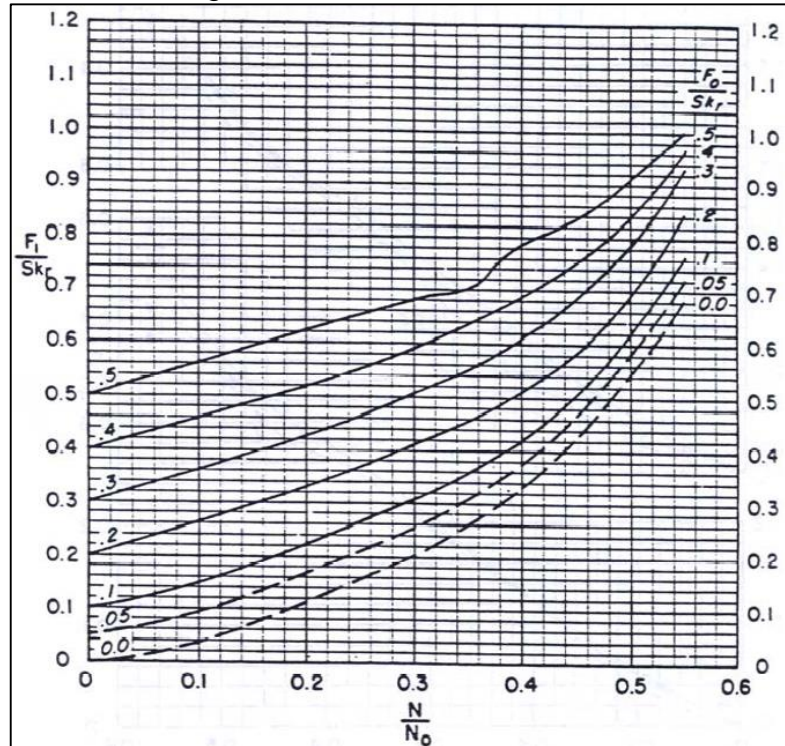
L = Longitud de la sarta de varillas, (ft)

Fc = Factor de corrección de la frecuencia natural, (véase Anexo D)

De esta manera para el cálculo de la carga máxima y mínima que se presente en la sarta de varilla, se tienen en cuenta los factores adimensionales descritos anteriormente, los cuales son N/N'_o y Fo/SKr . Pues, según el Método API RP-11L, estos serán necesarios en las gráficas dadas por dicho Método para las relaciones adimensionales de las respectivas cargas. Y así hallar sus valores reales en carga en la sarta de varillas.

Por tanto, primero se lleva a cabo el cálculo de la relación adimensional para la carga máxima, en el cual se usará la gráfica 1.

Gráfica 1. Relación adimensional (F_1/SK_r) para el cálculo de carga máxima en las varillas.



Fuente: American Petroleum Institute. Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems. p. 16

De esta gráfica, se obtiene F_1/SK_r valor adimensional para carga máxima en la sarta de varillas. Teniendo presente el Factor N/No' y F_0/SK_r , y de acuerdo a esto se obtendrá el valor de F_1 , ya que el valor de SK_r es conocido. Con el valor de F_1 , se puede llevar a cabo el cálculo para obtener la carga máxima en la sarta de varillas (PPRL) dada por la ecuación 25.

Ecuación 25. Carga Máxima

$$PPRL = Wrf + F1$$

Fuente: American Petroleum Institute. Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems. P. 8

Dónde:

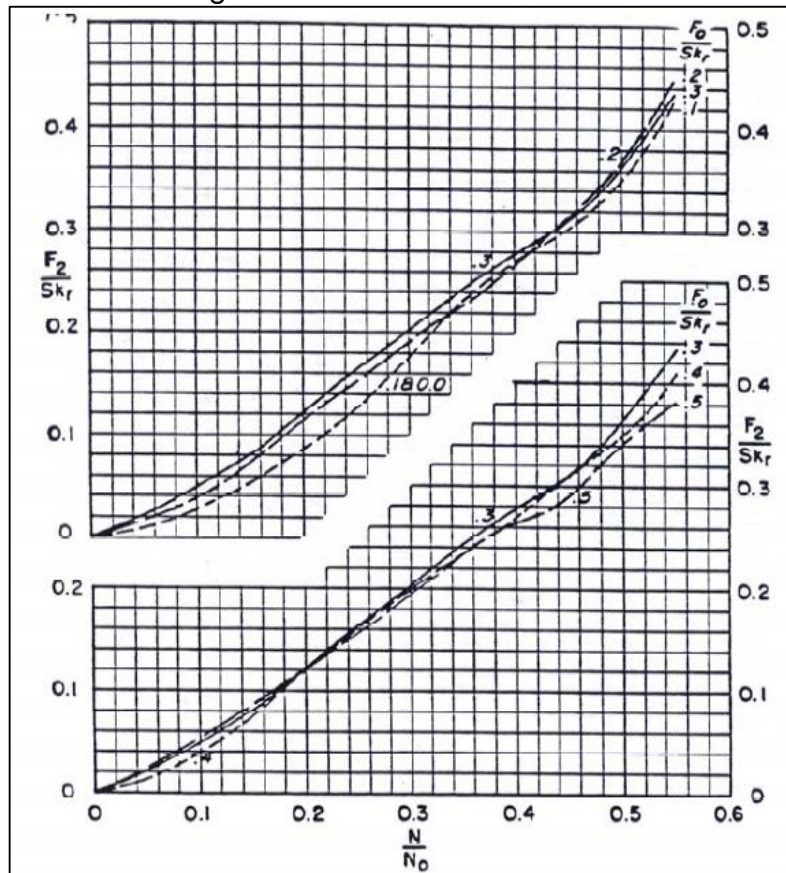
PPRL= Carga máxima en la sarta de varillas, (Lb)

W_{rf} = Peso de la sarta de varillas en flotación, (Lb)

F_1 = Factor de PPRL. Carga de fluido más los efectos dinámicos máximos en la carrera ascendente

Posteriormente el Método API RP-11L presenta la gráfica 2, de donde se obtiene la relación adimensional F_2/SK_r , para calcular la carga mínima en la sarta de varillas.

Gráfica 2. Relación adimensional (F_2/SK_r) para el cálculo de carga mínima en las varillas.



Fuente: American Petroleum Institute. Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems. p. 17

De igual manera, teniendo en cuenta los factores adimensionales de N/No' y F_0/SK_r , y de acuerdo con esto se obtendrá el valor de F_2 , debido a que SK_r es un valor conocido. Una vez obtenido el valor de F_2 se calculará la carga mínima (MPRL) en la sarta de varillas, por medio de la ecuación 26

Ecuación 26. Carga Mínima

$$MPRL = Wrf - F2$$

Fuente: American Petroleum Institute.
Recommended practice for design
calculations for sucker rod pumping
systems. P. 8

Dónde:

PPRL= Carga mínima en la sarta de varillas, (Lb)

Wrf= Peso de la sarta de varillas en flotación, (Lb)

F1= Factor de MPRL. Efectos dinámicos mínimos en la carrera descendente menos la carga del fluido

El cálculo de carga mínima es de suma importancia, debido a que si este resultado es negativo, se requieren consideraciones de diseño diferentes. Y por tanto afectaría en la varillas variando su velocidad en la carrera descendente, generando un daño en los equipos. Adicionalmente, el rango entre las cargas máximas y mínimas, gobiernan los límites de esfuerzos impuestos por la sarta de varillas, y son factores de suma importancia para la vida útil de estas.

5.3 MÉTODO GOODMAN

Luego de calcular la carga máxima y mínima en la sarta de varillas, se debe realizar un análisis de esfuerzos con el fin de identificar sobrecargas en estas.

Como se mencionó anteriormente, estos esfuerzos son factores de suma importancia para la vida útil de las varillas e igualmente las condiciones de operación que puedan resistir.

El método más utilizado para esta evaluación de esfuerzos se basa en el Método de Goodman, el cual considera esfuerzos máximos, mínimos, el rango de estos y los esfuerzos máximos permisibles.⁶⁰

Este método tendrá en cuenta el ambiente que presente el subsuelo, es decir si es corrosivo, por tanto se realiza un ajuste al esfuerzo permisible para asegurar la carga correcta y prevenir fallas prematuras. Esto se realizará mediante los Factores de servicio, que pueden presentar un valor entre 0.7 y 1, logrando una extensión de la vida útil de la sarta de varillas.⁶¹ Por tanto la ecuación 27 permite calcular el esfuerzo máximo permisible.

⁶⁰ PDVSA. CIED. Ibíd. p. 65

⁶¹ PDVSA. CIED. Ibíd. p. 67

Ecuación 27. Esfuerzo máximo Permissible

$$S_A = (0.25 * T + 0.5625 * S_{min}) * SF$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p.47

Dónde:

S_A = Esfuerzo máximo permissible, (psi)

S_{min} =Esfuerzo mínimo calculado, (psi)

SF = Factor de servicio

T = Resistencia a la tensión mínima, (psi)

Por tanto, se calculará el esfuerzo mínimo (S_{min}) dado por la ecuación 28:

Ecuación 28. Esfuerzo mínimo

$$S_{min} = \frac{(\Sigma W_{varilla}) - W_p}{\text{Área de la varilla}}$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p.68

Dónde:

S_{min} =Esfuerzo mínimo calculado, (psi)

$\Sigma W_{varilla}$ = Carga en la sección de varilla correspondiente y sus cargas previas (Lb)

W_p = Carga del fluido sobre el pistón, (Lb)

A= Área de la sección de varilla correspondiente, (in²)

Y el esfuerzo máximo ($S_{máx}$), se calculará como se muestra en la ecuación 29.

Ecuación 29. Esfuerzo máximo

$$S_{máx} = \frac{(\Sigma W_{varilla})}{\text{Área de la varilla}}$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p.68

Dónde:

$S_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo máximo calculado, (psi)

$\sum W_{varilla}$ = Carga en la sección de varilla correspondiente y sus cargas previas (Lb)

A = Área de la sección de varilla correspondiente, (in²)

Para este método la carga de Fluido que esta expresada como W_p , será tomada en cuenta debido a que es una carga que en la Bomba CBM es igual a cero, mientras que en un diseño de Bomba Convencional esta carga si influye en el esfuerzo mínimo de la sarta de varillas. La ecuación para el cálculo de W_p estaría dada por la ecuación 30.

Ecuación 30. Carga de fluido

$$W_p = 0.340 * GE * D^2 * H$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p.42

Dónde:

W_p = Carga del fluido sobre el pistón, (Lb)

GE = Gravedad específica del fluido, (Adimensional)

D = Diámetro del pistón, (in)

H = Profundidad de la bomba, (ft)

De esta manera el siguiente paso del Método Goodman, es calcular el rango de esfuerzo permitido, que está dado por la ecuación 31.

Ecuación 31. Rango de esfuerzo permitido.

$$DS_A = S_A - S_{min}$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 68

Dónde:

DS_A = Rango de esfuerzo permitido, (psi)

S_A = Esfuerzo máximo permisible, (psi)

S_{\min} = Esfuerzo mínimo calculado, (psi)

Y finalmente se calcula el porcentaje de carga de varilla que permite visualizar como son las cargas en esta, y se define como de muestra en la ecuación 32.

Ecuación 32. Porcentaje de carga en la varilla.

$$\%Carga \text{ en la varilla} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{DS_A} * 100$$

Fuente: PDVSA, Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. p. 68

Dónde:

DS_A = Rango de esfuerzo permitido, (psi)

S_{\max} = Esfuerzo máximo calculado, (psi)

S_{\min} = Esfuerzo mínimo calculado, (psi)

De esta manera, si el rango de esfuerzo actual (S_{\max} - S_{\min}) es igual al rango de esfuerzo máximo permisible entonces las cabillas se encuentran cargadas en un 100%. Si el actual rango de esfuerzos excede al rango de esfuerzo máximo permisible entonces la carga es mayor al 100%. Este valor indica que la varilla esta sobrecargada. Por lo general, para un diseño de Bombeo Mecánico Convencional lo ideal es que este porcentaje se encuentre en un rango de 60% a 80%, y con un factor de servicio entre 0.8 y 0.9.

5.4 CASO I

El primer caso del rediseño de un Sistema de Bombeo Mecánico usando una Bomba CBM, se realizó con ayuda de los métodos planteados anteriormente, los cuales permitirán cumplir uno de los objetivos de este proyecto.

Para el desarrollo de los cálculos de este rediseño, es pertinente colocar algunos parámetros necesarios que permitirán resultados óptimos, los cuales serán descritos a continuación:

- La sarta de varillas a diseñar será telescópica, es decir, sus diámetros serán diferentes.
- La sarta de varillas será de tres secciones, los cuales serán 1", 7/8" y 3/4", esto debido a que es la combinación de diámetro más utilizada en el Bombeo Mecánico.
- La carga de Fluido se tomará como cero.

Además de esto es importante conocer algunos datos necesarios para la resolución de los diferentes métodos, estos se presentan en las tablas 3, 4 y 5:

Tabla 3. Datos de las varillas a usar respecto a sus diámetros.

Datos de las varillas					
Secciones	Diámetro(in)	Variable	Área(in ²)	Variable	Peso (lb/ft)
A	3/4	Aa	0.442	Ma	1.63
B	7/8	Ab	0.601	Mb	2.16
C	1	Ac	0.785	Mc	2.88

Tabla 4. Datos de la Bomba

Diámetro del pistón (in)	Área del pistón (in ²)	Velocidad de Bombeo (spm)	Longitud de carrera del pistón (in)
2.25	3.98	3	336

Tabla 5. Datos de pozo y de fluido

Profundidad L (ft)	Carga del Fluido Wp (Lb)	Gravedad Especifica del Fluido
8182	0	0.8982

Adicionalmente se necesitará el dato de Constante elástica para la sarta de varillas, esta constante se encuentra en el Anexo D, siendo la necesaria para este primer caso con un valor de $E_r = 0.656 \cdot 10^{-6}$ in/Lb-ft, y un Factor de Frecuencia $F_c = 1.153$, teniendo en cuenta los diámetros de varilla a usar y el diámetro del pistón.

5.4.1 Longitudes de varilla para Caso I. Para hallar el porcentaje de longitudes para las tres secciones de varillas, sección A (3/4”), sección B (7/8”) y sección C (1”). El valor supuesto para %Ra fue de 0.663.

Los datos hallados se encuentran en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados de los porcentajes de longitud para cada sección.

Variable	Resultado
%Rb	0.1799
%Rc	0.1562
%Ra	0.6638

5.4.2 Cargas mediante Método API RP-11L para el Caso I. En esta sección se llevará a cabo el cálculo de cargas para el sistema obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 7, 8, 9 y 10.

Tabla 7. Resultado de longitudes para cada sección.

Sección	Variable	Resultado
3/4"	L _A	5431.31 ft
7/8"	L _B	1472.58 ft
1"	L _C	1278.09 ft
Total	L _T	8182 ft

Tabla 8. Resultado para pesos en cada sección, peso total de la sarta en aire y peso de la sarta de varillas en flotación.

Sección	Variable	Resultado
3/4"	W _{rA}	8853.04 Lbs
7/8"	W _{rB}	3180.79 Lbs
1"	W _{rC}	3680.91 Lbs
Peso Total	W _{rT}	15714.75 Lbs
Peso en Flotación	W _{rf}	13908.03 Lbs

Tabla 9. Resultados adimensionales para carga máxima.

Carga máxima	
Variable	Resultado
F ₀	0 Lb
1/K _r	0.0053
SP	336 in
N/No'	0.08689
F ₁ /SK _r	0.025
F ₁	1565.00 Lb
PPRL	15473.04 Lb

Tabla 10. Resultados adimensionales para carga mínima.

Carga mínima	
Variable	Resultado
Fo	0 Lb
1/Kr	0.0053
SP	336 in
N/No'	0.0868
F2/SKr	0
F2	0 Lb
MPRL	13908.03 Lb

El primer análisis es que la carga máxima y la carga mínima están aproximadamente cercanas siendo 15473Lb para la máxima y 13908Lb para la mínima, el resultado sería lógico debido a que la única carga que existe en la carrera ascendente sería la sarta de varillas y como no hay peso del fluido, las cargas serán parecidas.

5.4.3 Método de Goodman para el Caso I. En este método se analizarán los esfuerzos máximos y mínimos que pueden presentarse en la sarta de varillas que se está diseñando.

5.4.3.1 Esfuerzos para la Sección A 3/4". Los primeros cálculos a tener en cuenta serán el esfuerzo máximo y mínimo que presentará esta sección, por tanto, estos serán analizados a diferentes factores de servicio y con una resistencia a la tensión mínima de 140000 psi. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 11 y la tabla 12.

Tabla 11. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección A, y carga del fluido.

Emáx (psi)	20029.50
Emin (psi)	-8589.47
Wp (Lbs)	12649.59

Tabla 12. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección A

Factor de Servicio	Esfuerzo Máximo Permissible (psi)	Rango de Esfuerzo Permitido (psi)	% Carga en la varilla (%)
0.7	21117.89	29707.37	96.33
0.75	22626.31	31215.79	91.68
0.8	24134.73	32724.21	87.45
0.85	25643.15	34232.63	83.60
0.9	27151.57	35741.05	80.07
0.95	28659.99	37249.47	76.83
1	30168.41	38757.89	73.84

5.4.3.2 Esfuerzos para la Sección B 7/8”. Los primeros cálculos a tener en cuenta serán el esfuerzo máximo y mínimo que presentará la sección B, por tanto, estos serán analizados a diferentes factores de servicio y con una resistencia a la tensión mínima de 140000 psi. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 13 y la tabla 14.

Tabla 13. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección B y carga del fluido.

Emáx (psi)	20023.02
Emin (psi)	-1024.55
Wp (Lbs)	12649.59

Tabla 14. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección B.

Factor de Servicio	Esfuerzo Máximo Permissible (psi)	Rango de Esfuerzo Permitido (psi)	% Carga en la varilla (%)
0.7	24096.58	25121.13	83.78
0.75	25817.76	26842.31	78.41
0.8	27538.95	28563.50	73.68
0.85	29260.13	30284.68	69.49
0.9	30981.32	32005.87	65.76
0.95	32702.50	33727.05	62.40
1	34423.68	35448.24	59.37

5.4.3.3 Esfuerzos para la Sección C 1”. Los primeros cálculos a tener en cuenta serán el esfuerzo máximo y mínimo que presentará esta sección, por tanto, estos serán analizados a diferentes factores de servicio y con una resistencia a la tensión mínima de 140000 psi. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 15 y la tabla 16.

Tabla 15. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección C y carga del fluido.

Emáx (psi)	20018.79
Emin (psi)	3904.66
Wp (psi)	12649.59

Tabla 16. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección C.

Factor de Servicio	Esfuerzo Máximo Permissible (psi)	Rango de Esfuerzo Permitido (psi)	% Carga en la varilla (%)
0.7	26037.46	22132.79	72.80
0.75	27897.28	23992.61	67.16
0.8	29757.09	25852.43	62.33
0.85	31616.91	27712.25	58.14
0.9	33476.73	29572.07	54.49
0.95	35336.55	31431.89	51.26
1	37196.37	33291.70	48.40

Como conclusión de este caso se observó que los resultados de la carga máxima y la carga mínima fueron muy cercanos, siendo esto posible debido a que no existe peso de fluido. Sin embargo, al realizar los cálculos de esfuerzos, en dos secciones los esfuerzos mínimos dieron resultados negativos, esto no debe suceder debido a que, al ser un esfuerzo negativo el sistema estaría en compresión, lo que indicaría que la sarta puede que no sea lo suficientemente resistente para el empuje que debe generar en el fluido en la carrera descendente y que este pueda lograr llegar a superficie. Por tanto se planteó, que lo necesario para el sistema es eliminar esa compresión existente y llevarlo a tensión, que es una fuerza que debe existir en este sistema de levantamiento. De esta manera se llevó a cabo la ejecución del caso II.

5.5 CASO II

Este caso fue necesario debido a la compresión existente en el sistema, la solución planteada ha sido utilizar una sarta doble (dos secciones) y adicionalmente colocar una barra de peso siendo añadida como una sección, pero con una longitud y un peso ya preestablecidos, para así generar el rompimiento de compresión y que el sistema logre quedar en tensión, y así cumplir con el funcionamiento deseado para el principio descrito por la Bomba CBM.

Para el desarrollo de los cálculos de este rediseño, es pertinente colocar algunos parámetros necesarios que permitirán resultados óptimos, los cuales serán descritos a continuación:

- La sarta de varillas a diseñar será telescópica, es decir, sus diámetros serán diferentes.
- La sarta de varillas será de dos secciones, los cuales serán 1" y 7/8", y una barra de peso en su sección inferior de 1 1/8".
- La carga de Fluido se tomará como el peso de la barra de peso, de la sección inferior, la cual será llamada W_s .

Además de esto es importante conocer algunos datos necesarios para la resolución de los diferentes métodos, estos se presentan en las tablas 17, 18, 19 y 20:

Tabla 17. Datos de las varillas a usar respecto a sus diámetros.

Datos de las varillas					
Secciones	Diámetro(in)	Variable	Área(in ²)	Variable	Peso (lb/ft)
A	7/8	Aa	0.601	Ma	2.16
B	1	Ab	0.785	Mb	2.88

Tabla 18. Datos de la Bomba

Diámetro del pistón (in)	Área del pistón (in ²)	Velocidad de Bombeo (spm)	Longitud de carrera del pistón (in)
2.25	3.98	2.5	336

Tabla 19. Datos de pozo y de fluido

Profundidad L (ft)	Carga del Fluido W_p (Lbs)	Gravedad Especifica del Fluido
8182	0	0.8982

Tabla 20. Datos de la Barra de peso.

Longitud de la Barra de peso L (ft)	Peso Unitario de la Barra de peso (Lbs/ft)	Área de la Barra de peso (in ²)	Esfuerzo de la Barra de peso (psi)
4021.32	3.64	0.9940	2000

Adicionalmente se necesitará el dato de Constante elástica para la sarta de varillas, esta constante se encuentra en el Anexo D, siendo la necesaria para este segundo caso con un valor de $E_r = 0.594 \cdot 10^{-6}$ in/Lb-ft, y un Factor de Frecuencia $F_c = 1.075$, teniendo en cuenta los diámetros de varilla a usar y el diámetro del pistón. En esta caso diámetros de 7/8" y 1".

5.5.1 Longitudes de varilla para el Caso II. Para hallar el porcentaje de longitudes para las dos secciones de varillas, sección A (7/8") y sección B (1"). El

valor supuesto para %Ra fue de 0.509, y con una longitud de 4160.67 ft total para las dos secciones restantes, debido a que la longitud faltante hace parte de la longitud de la barra de peso. Y también para el cálculo de estos porcentajes se tendrá en cuenta el valor de carga de la barra de peso que será $W_s = 14637.63$ Lbs.

Los datos hallados se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Resultados de los porcentajes de longitud para cada sección.

Variable	Resultado
%Rb	0.4908
%Ra	0.5091

5.5.2 Cargas mediante Método API RP-11L para el Caso II. En esta sección se llevará a cabo el cálculo de cargas para el sistema obteniendo los resultados de la tabla 22, 23, 24 y 25.

Tabla 22. Resultado de longitudes para cada sección.

Sección	Variable	Resultado
1 1/8" (barra de peso)	L_s	4021.32 ft
7/8"	L_A	2118.34 ft
1"	L_B	2042.32 ft
Total	L_T	8182 ft

Tabla 23. Resultado para pesos en cada sección, peso total de la sarta en aire y peso de la sarta de varillas en flotación.

Sección	Variable	Resultado
1 1/8" (Barra de peso)	W_s	14637.63 Lbs
7/8"	W_{rA}	4575.63 Lbs
1"	W_{rB}	5881.89 Lbs
Peso Total	W_{rT}	25095.15 Lbs
Peso en Flotación	W_{rf}	22209.97 Lbs

Tabla 24. Resultados adimensionales para carga máxima.

Carga máxima	
Variable	Resultado
Fo	0 Lb
1/Kr	0.0024
SP	336 in
N/No'	0.07766
F1/SKr	0.01
F1	1359.53 Lbs
PPRL	23569.50 Lbs

Tabla 25. Resultados adimensionales para carga mínima.

Carga mínima	
Variable	Resultado
Fo	0 Lb
1/Kr	0.0024
SP	336 in
N/No'	0.07766
F2/SKr	0
F2	0 Lbs
MPRL	9560.38 Lbs

En este caso, la distancia entre carga máxima y carga mínima es más amplia, generalmente el Bombeo mecánico convencional trabaja con PPRL de 40000 Libras, lo que indica que si hay una reducción considerable en la carga máxima, lo que posiblemente represente una reducción en la carga energética, al no tener un peso tan alto como en el bombeo convencional.

5.5.3 Método de Goodman para el Caso II. En este método se analizarán los esfuerzos máximos y mínimos que pueden presentarse en la sarta de varillas que se está diseñando.

5.5.3.1 Esfuerzos para la Sección A 7/8". Los primeros cálculos a tener en cuenta serán el esfuerzo máximo y mínimo que presentará esta sección, por tanto, estos serán analizados a diferentes factores de servicio y con una resistencia a la tensión mínima de 140000 psi. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 26 y la tabla 27.

Tabla 26. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección A y carga del fluido.

Emáx (psi)	31968.83
Emin (psi)	10921.25
Wp (Lbs)	12649.59

Tabla 27. Resultado de porcentaje de carga en la Varilla en la Sección A

Factor de Servicio	Esfuerzo Máximo Permissible (Lpc)	Rango de Esfuerzo Permitido (psi)	% Carga en la varilla (psi)
0.7	28800.24	17878.98	117.72
0.75	30857.40	19936.14	105.57
0.8	32914.56	21993.30	95.69
0.85	34971.72	24050.46	87.51
0.9	37028.88	26107.62	80.61
0.95	39086.04	28164.78	74.73
1	41143.20	30221.94	69.64

5.5.3.2 Esfuerzos para la Sección B 1”. Los primeros cálculos a tener en cuenta serán el esfuerzo máximo y mínimo que presentará la sección B, por tanto, estos serán analizados a diferentes factores de servicio y con una resistencia a la tensión mínima de 140000 psi. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 28 y la tabla 29.

Tabla 28. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección B y carga del fluido.

Emáx (psi)	31968.35
Emin (psi)	13321.68
Wp (Lbs)	12649.59

Tabla 29. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección B.

Factor de Servicio	Esfuerzo Máximo Permissible (Lpc)	Rango de Esfuerzo Permitido (psi)	% Carga en la varilla (%)
0.7	29745.41	16423.72	113.53
0.75	31870.08	18548.40	100.52
0.8	33994.75	20673.07	90.19
0.85	36119.43	22797.74	81.79
0.9	38244.10	24922.41	74.81
0.95	40368.77	27047.08	68.94
1	42493.44	29171.76	63.92

Como se puede observar en este caso, los esfuerzos máximos serán casi iguales en ambas secciones lo que indica que se ha cumplido con el método API RP-11L, debido a que uno de sus principios es la igualación de esfuerzos, por tanto los esfuerzos deben ser iguales en todas las secciones.

Por otra parte, se logró romper la compresión que está presentando el diseño al tener esfuerzos mínimos positivos y por tanto el sistema estará en tensión, adicionalmente al estudiar los porcentajes de carga en varilla, se planteó que lo ideal era tener porcentajes de 60 a 80%, y en este caso se obtiene un porcentaje de 81% con un factor de servicio ideal de 0.85, siendo un diseño que cumple con los objetivos del Sistema de Bombeo Convencional, pero evaluado con una Bomba CBM, y obteniendo reducción en sus cargas máximas y mínimas. Quizás la reducción no es significativa como lo esperado, sin embargo esto se comparará en el capítulo de simulación, observando si existe una reducción significativa en el principal objetivo de este proyecto, que es el consumo energético.

5.6 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO PROPUESTO PARA EL POZO A

Se presenta información generalizada del Pozo A como lo es: su estado mecánico, información de los elementos del Sistema de Bombeo Mecánico, propiedades del fluido y datos de producción.

Para la respectiva evaluación de consumo energético fue elegido el Pozo A, elección que fue realizada por la empresa TDA SUPPLY & SERVICE S.A teniendo en cuenta que este presenta la problemática a solucionar y además de esto, tiene características similares a pozos aledaños; lo cual permitirá la aplicabilidad del uso de la Bomba CBM a dichos pozos.

De acuerdo con la información suministrada por TDA SUPPLY & SERVICE S.A⁶², el Pozo A se encuentra en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. En el Anexo A se puede observar el estado mecánico del Pozo A, el cual está perforado en dos secciones, la primera sección comprendida desde superficie hasta 1005 ft con broca de 12 1/4", fue revestida con casing de 9 5/8" hasta una profundidad del zapato de 1000 ft, dejando 5 ft de bolsillo. La segunda sección está comprendida desde una profundidad verdadera de 1000 ft hasta 10000 ft con broca de 8 3/4", fue revestida con casing de 7" hasta una profundidad del zapato de 9995 ft.

Después de estar cementado el pozo, se realizaron los perforados: el tope se encuentra a una profundidad de 5550,43 ft, la base a 6491,21 y media a 6020,82 ft, teniendo una Pwf de 400 psi cada uno.

⁶² TDA SUPPLY & SERVICE S.A. Hoja de diseño SLA. Documento de Excel: Hoja 1. 2017.

El Sistema de Bombeo Mecánico consta de un equipo de superficie con una Unidad hidráulica HRP con medidas H-533.8-336, una longitud de recorrido de 336 pulgadas y soporta 53.380 Lbs máximas de peso sobre la estructura.

Por su parte, el equipo de fondo cuenta con una sarta de tubería y de varillas. La sarta de tubería correspondiente al perfil del Pozo A, esta es de grado N-80, con un diámetro de 3 1/2" y un peso de 9,3 lb/ft. Se encuentra una bomba convencional, que a partir de la nomenclatura API, se puede obtener información más detallada de la bomba, tal y como se ve en la figura 16. Por lo tanto, esta es una bomba con un tubing de 3 1/2" (88.9 mm), con un pistón de diámetro de 2" (50.8 mm), es un tipo de bomba insertable, con un anclaje inferior de copas, con una longitud de barril de 24 ft y una longitud nominal del pistón de 4 ft. La sumergencia de la bomba es de 300 ft-md. Las varillas fueron diseñadas con una configuración telescópica de grado D, en donde habrá 92 de un diámetro de 1 1/8", 96 de un diámetro de 1", 124 de un diámetro de 7/8" llegando a una profundidad de 7800 ft y 16 de barra de lisa de 1 1/2", aproximadamente. Cada una de las varillas es de aproximadamente de 22 a 25 ft de longitud.

Teniendo en cuenta las pruebas previamente realizadas en pozos cercanos, el Pozo A tiene una producción total de fluido de 400 BPD, con un nivel dinámico de 7800 ft-md desde superficie. Se presenta un aceite de gravedad API de 30, siendo un crudo medio, con una producción de gas de 447.000 SFC/día y un GOR de 2500 SFC/STB. Presenta un BSW de 13%, con temperatura en fondo de pozo de 160°F y de cabezal de pozo de 90°F.

5.6.1 Diseño de Bombeo Mecánico con Bomba Convencional, usando el Método API RP- 11L. Este diseño se realizará para obtener los resultados para Bomba Convencional a través del uso del Método API RP-11L.

Para el desarrollo de los cálculos de este rediseño, es pertinente colocar algunos parámetros necesarios que permitirán resultados óptimos, los cuales serán descritos a continuación:

- La sarta de varillas a diseñar será telescópica, es decir, sus diámetros serán diferentes.
- La sarta de varillas será de tres secciones, los cuales serán 1", 7/8" y 3/4", esto debido a que es la combinación de diámetro más utilizada en el Bombeo Mecánico.
- La carga de Fluido existe, debido al principio de funcionamiento de una Bomba Convencional, es decir, que existe levantamiento de fluido.

Además de esto es importante conocer algunos datos necesarios para la resolución de los diferentes métodos, estos se presentan en las tablas 30, 31 y 32:

Tabla 30. Datos de las varillas a usar respecto a sus diámetros.

Datos de las varillas					
Secciones	Diámetro(in)	Variable	Área(in ²)	Variable	Peso (lb/ft)
A	3/4	Aa	0.442	Ma	1.63
B	7/8	Ab	0.601	Mb	2.16
C	1	Ac	0.785	Mc	2.88

Tabla 31. Datos de la Bomba

Diámetro del pistón (in)	Área del pistón (in ²)	Velocidad de Bombeo (spm)	Longitud de carrera del pistón (in)
2.25	3.98	3	336

Tabla 32. Datos de pozo y de fluido

Profundidad L (ft)	Carga del Fluido Wp (Lb)	Gravedad Especifica del Fluido
8182	12649	0.8982

La profundidad a tomar será de 7800 ft, debido a que los cálculos del Método API RP-11L, no tienen en cuenta un porcentaje de longitud para la barra lisa, la cual según la información dada sería de 382ft, aproximadamente.

Adicionalmente se necesitará el dato de Constante elástica para la sarta de varillas, esta constante se encuentra en el Anexo D, siendo la necesaria para este primer caso con un valor de $E_r = 0.656 \cdot 10^{-6}$ in/Lb-ft, y un Factor de Frecuencia $F_c = 1.153$, teniendo en cuenta los diámetros de varilla a usar y el diámetro del pistón.

5.6.2 Longitudes de varilla para el diseño con una Bomba Convencional. Para hallar el porcentaje de longitudes para las tres secciones de varillas, sección A (3/4”), sección B (7/8”) y sección C (1”). El valor supuesto para %Ra fue de 0.344. Los datos hallados se encuentran en la tabla 33.

Tabla 33. Resultados de los porcentajes de longitud para cada sección.

Variable	Resultado
%Rb	0.3446
%Rc	0.3508
%Ra	0.3045

5.6.3 Cargas mediante Método API RP-11L para el diseño con una Bomba Convencional. En esta sección se llevará a cabo el cálculo de cargas para el sistema obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 34, 35, 36 y 37.

Tabla 34. Resultado de longitudes para cada sección.

Sección	Variable	Resultado
3/4"	L _A	2688 ft
7/8"	L _B	2736 ft
1"	L _C	2375 ft
Total	L _T	7800 ft

Tabla 35. Resultado para pesos en cada sección, peso total de la sarta en aire y peso de la sarta de varillas en flotación.

Sección	Variable	Resultado
3/4"	W _{rA}	4381 Lbs
7/8"	W _{rB}	5911 Lbs
1"	W _{rC}	6840 Lbs
Peso Total	W _{rT}	17133 Lbs
Peso en Flotación	W _{rf}	15163 Lbs

Tabla 36. Resultados adimensionales para carga máxima.

Carga máxima	
Variable	Resultado
F ₀	12059 Lb
1/K _r	0.00512
F ₀ /S _{Kr}	0.18
SP	317 in
N/No'	0.086
F ₁ /S _{Kr}	0.22
F ₁	14446 Lb
PPRL	41669 Lb

Tabla 37. Resultados adimensionales para carga mínima.

Carga mínima	
Variable	Resultado
Fo	12059 Lb
1/Kr	0.00512
Fo/SKr	0.18
SP	317 in
N/No'	0.086
F2/SKr	0.025
F2	1444 Lb
MPRL	13719 Lb

Por lo que se puede observar los resultados obtenidos para la carga máxima y la carga mínima de, 41669 Lb y 13719 Lb, respectivamente, son datos coherentes debido a que se tiene en cuenta que generalmente el peso de carga máxima para un diseño de Bombeo Mecánico con Bomba Convencional es de 40000 Lb. Por tanto los cálculos realizados se compararán por los obtenidos con el simulador RODSTAR en el capítulo 6.

Como se planteó en el inicio del cálculo, este diseño no tendrá en cuenta la longitud de una barra lisa, por tanto la profundidad tomada fue de 7800 ft, y por tanto los resultados obtenidos no son los más exactos, ya que el Método API RP-11L, es un método desarrollado primitivamente para el diseño de Bombeo Mecánico y actualmente ha presentado muchas modificaciones numéricas y de forma, que aplicadas en un software correctamente diseñado permite que los datos que obtenidos sean mucho más precisos.

5.6.4 Método de Goodman para el diseño con Bomba Convencional. En este método se analizaran los esfuerzos máximos y mínimos que pueden presentarse en la sarta de varillas que se está diseñando.

5.6.4.1 Esfuerzos para la Sección A 3/4". Los primeros cálculos a tener en cuenta serán el esfuerzo máximo y mínimo que presentará esta sección, por tanto, estos serán analizados a diferentes factores de servicio y con una resistencia a la tensión mínima de 140000 psi. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 38 y la tabla 39.

Tabla 38. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección A, y carga del fluido.

Emáx (psi)	37915.34
Emin (psi)	9912.23
Wp (Lbs)	12059.14

Tabla 39. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección A

Factor de Servicio	Esfuerzo Máximo Permissible (psi)	Rango de Esfuerzo Permitido (psi)	% Carga en la varilla (%)
0.7	28403.45	18490.12	147
0.75	30432.87	20519.43	132
0.8	32460.45	22547.56	120
0.85	34489.98	24576.67	111
0.9	36518.87	26605.86	102
0.95	38547.53	28634.54	95
1	40576.77	30663.23	88

5.6.4.2 Esfuerzos para la Sección B 7/8”. Los primeros cálculos a tener en cuenta serán el esfuerzo máximo y mínimo que presentará la sección B, por tanto, estos serán analizados a diferentes factores de servicio y con una resistencia a la tensión mínima de 140000 psi. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 40 y la tabla 41.

Tabla 40. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección B y carga del fluido.

Emax (psi)	37191.22
Emin (psi)	17126.54
Wp (Lbs)	12059

Tabla 41. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección B.

Factor de Servicio	Esfuerzo Máximo Permissible (psi)	Rango de Esfuerzo Permitido (psi)	% Carga en la varilla (%)
0.7	31243.77	14117.87	142
0.75	33475.64	16348.67	122
0.8	35706.53	18580.54	107
0.85	37938.56	20812.34	96
0.9	40170.23	23043.22	87
0.95	42401.17	25275.67	79
1	44633.76	27507.98	72

5.6.4.2 Esfuerzos para la Sección C 1”. Los primeros cálculos a tener en cuenta serán el esfuerzo máximo y mínimo que presentará esta sección, por tanto, estos serán analizados a diferentes factores de servicio y con una resistencia a la tensión mínima de 140000 psi. Obteniendo los resultados mostrados en la tabla 42 y la tabla 43.

Tabla 42. Resultado de esfuerzo máximo y mínimo en la Sección C y carga del fluido.

Emáx (psi)	37187.65
Emin (psi)	21826.46
Wp (psi)	12059

Tabla 43. Resultado de porcentaje de carga en la varilla para la Sección C.

Factor de Servicio	Esfuerzo Máximo Permisible (psi)	Rango de Esfuerzo Permitido (psi)	% Carga en la varilla (%)
0.7	33049.75	11267.59	136
0.75	35457.45	13631.68	112
0.8	37821.32	15995.78	96
0.85	40185.87	18359.12	83
0.9	42549.54	20723.25	74
0.95	44913.88	23087.76	66
1	47277.72	25451.34	60

El diseño para el Bombeo Mecánico usando Bomba Convencional, se analizará teniendo en cuenta los datos arrojados por el Simulador RODSTAR, con el cuál se llevara a cabo la comparación tanto del diseño numérico, la simulación y el rediseño realizado para el uso de la Bomba CBM.

6. EVALUACIÓN DEL RE-DISEÑO DEL EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO CON LA BOMBA CBM COMPARADO CON EL DISEÑO CONVENCIONAL SIMULADO CON RODSTAR

En la realización del re-diseño del Sistema de Bombeo Mecánico con Bomba CBM, para evaluar la disminución y variación existente en los datos más relevantes en el diseño de un Bombeo Mecánico, se tendrá en cuenta la simulación realizada a través del Simulador RODSTAR, el cual simulará los datos tomados del diseño del pozo propuesto, arrojando los datos necesarios para el diseño de Bombeo Mecánico con Bomba Convencional y de esta manera llevar a cabo una comparación entre lo obtenido por el Método API RP-11L para la Bomba CBM; de igual manera se tendrá en cuenta lo calculado en el diseño para la Bomba Convencional evaluado con el Método API RP-11L y el diseño de Bombeo Mecánico con Bomba Convencional mediante la simulación con el Software RODSTAR.

Para llevar a cabo la evaluación del re-diseño del Sistema de Bombeo Mecánico con la Bomba CBM se realizó una comparación con el diseño de la Bomba Convencional simulado en el Software RODSTAR, ya que este permite conocer diferentes factores, para determinar las ventajas que presenta cada uno de los diseños y realizar mediante los datos arrojados el cálculo de consumo de energía. Los resultados obtenidos por medio de la simulación y la comparación de cada uno de los sistemas abarcan el sexto objetivo del proyecto.

6.1 SIMULACIÓN BOMBA CONVENCIONAL

En el Cuadro 2 se observan las variables de entrada del simulador Rodstar correspondientes a la Bomba Convencional.

Cuadro 2. Datos de entrada del Simulador Rodstar

Variables de entrada	Valores
Diámetro de las varillas	1 1/8"- 1"- 7/8"
Diámetro de la barra lisa	1/2"
Golpes por minuto	2.5
Profundidad del Pozo	8182 ft
Eficiencia de la Bomba	85%
Diámetro de la Bomba	2.25"
Nivel de fluido desde superficie	7882 ft
Nivel de sumergencia bomba	300 ft
Survey del pozo ⁶³	Se encuentra en el Anexo B
Tipo de Motor de Unidad de Bombeo	NEMA D
Tipo de Unidad de Bombeo	HRP Unidad Hidráulica
Presión del Casing	65 psi
Presión de la tubería	70 psi
Diámetro de la tubería	3 1/2"

Los datos suministrados de inicio al Simulador fueron obtenidos de acuerdo a los equipos de fondo propuestos para el Pozo A que fueron descritos en el Capítulo 5.

A partir del Simulador Rodstar se obtiene información diversa referente al diseño del Sistema de Bombeo Mecánico, para el estudio particular de este proyecto se tendrá en cuenta solo los aspectos que sean relevantes para el mismo. Tal y como se pudo apreciar en el Capítulo 5, dos de las variables más importantes para obtener la carga máxima (PPRL) y la carga mínima (MPRL) son N/No' y Fo/SKr, las cuales permiten establecer si existe o no elongación de las varillas debido al peso que estas soportan o si su recorrido es igual, mayor o menor en superficie con respecto al fondo. Para este caso el valor de N/No' es de 0.083 y de Fo/SKr es de 0.153, a partir de los cuales se tendrá como resultado una PPRL de 40217 lbs y una MPRL de 16951 lbs; este sistema permite una producción de fluido de 357 BFPD y una producción de petróleo de 311 BOPD. Estos valores fueron tomados del Anexo D en la sección "Calculated Results".

En el cuadro 3 se presenta el comportamiento de la sarta de varillas:

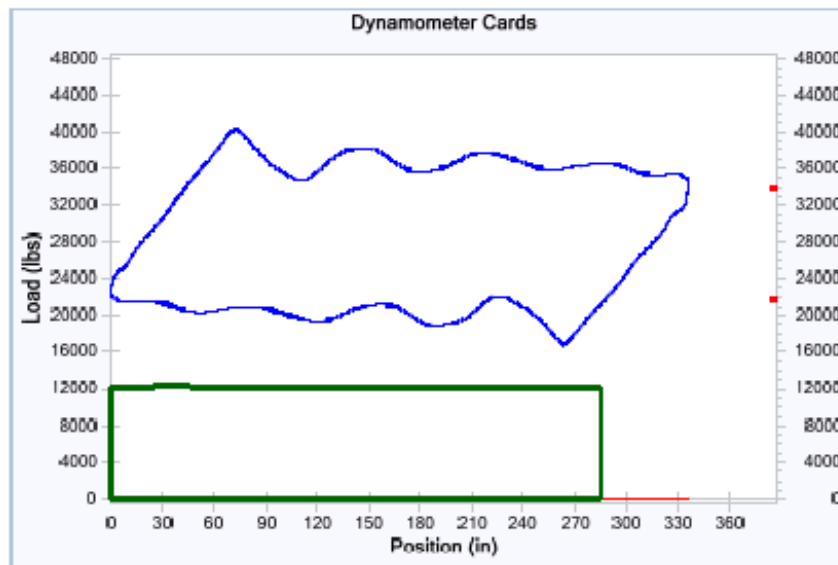
⁶³ TDA SUPPLY & SERVICE S.A. Hoja de diseño SLA. Documento de Excel: Hoja 3. 2017.

Cuadro 3. Resultados simulación diseño del Sistema de Bombeo Mecánico convencional

Diámetro	Longitud	Esfuerzo mínimo	Coefficiente de fricción	Carga en la varilla	Carga máxima de varilla en el tope	Carga mínima de varilla en el tope	Carga mínima en fondo
1 1/8"	2300 ft	140000 psi	0.15	69%	40358 psi	17154 psi	10818 psi
1"	2400 ft	140000 psi	0.15	67.60%	37724 psi	13235 psi	7561 psi
7/8"	3100 ft	140000 psi	0.15	69.40%	36089 psi	9016 psi	1343 psi
# 1 1/2"	382 ft	140000 psi	0.15	33.20%	7332 psi	- 155 psi	- 57 psi

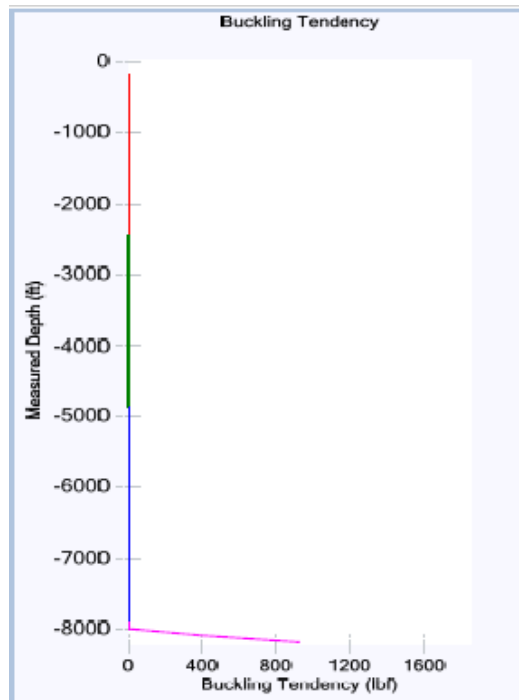
En la figura 26 se pueden ver las cartas dinamométricas de superficie (línea azul) y de fondo (línea verde). Según la forma de la carta de fondo se puede decir que la bomba se encuentra llena y anclada, y la carta de superficie representa los puntos de cargas respecto a la posición.

Figura 26. Cartas dinamométricas de fondo y superficie Software Rodstar



En la figura 27 se observa la tendencia de buckling o pandeo que se puede presentar en el pozo durante el funcionamiento del Sistema de Bombeo Mecánico, este se evidencia en profundidades altas, a los 8000 ft aproximadamente. Este efecto se produce debido a que las varillas se encuentran a una compresión alta que producen desplazamientos transversales que causan desgaste y una menor vida útil de las varillas.

Figura 27. Buckling en el Sistema de Bombeo Mecánico con una Bomba Convencional



6.2 COMPARACIÓN DEL RE-DISEÑO DE BOMBEO MECÁNICO CON LA BOMBA CBM Y LA SIMULACIÓN REALIZADA DE BOMBEO MECÁNICO CON BOMBA CONVENCIONAL EN RODSTAR.

Para lograr cumplir con uno de los objetivos del proyecto, es necesario hacer el comparativo entre, el re-diseño del Bombeo Mecánico usando una Bomba CBM, diseño desarrollado a través del Método API RP-11L y el Método de Goodman, y el diseño de un simulador para un Bombeo Mecánico Convencional, el cual fue desarrollado por el programa RODSTAR.

Inicialmente, se tendrán en cuenta las variables más representativas en el re-diseño con Bomba CBM, ya que partiendo de este principio hay valores observados que presentan una significativa modificación, con respecto al principio de funcionamiento de un Bombeo Convencional. Para esto se presenta el cuadro 4, en el cual se muestran los resultados arrojados por el simulador RODSTAR, y los resultados obtenidos de los cálculos realizados en el capítulo 5 para el re-diseño del Bombeo Mecánico con la Bomba CBM en fondo.

Cuadro 4. Resultados comparativos de variables de diseño para el Bombeo Mecánico.

Variable Analizada	Simulador RODSTAR, Bomba Convencional	Método API RP-11L, Bomba Convencional	Método API RP-11L, Bomba CBM	Comentarios
Relación adimensional de estiramiento (Fo/SKr)	0.153	0.183	0	El bombeo convencional presentará estiramiento, debido a que en la carrera ascendente en la sarta de varillas tendrá la carga de ella y el peso del fluido. Situación que no sucede en la CBM, ya que en la carrera ascendente está solo llevará el peso de la sarta de varillas.
Velocidad de Bombeo Adimensional	0.083	0.086	0.077	Su velocidad de bombeo adimensional es relativamente cercana, debido a que la unidad utilizada es la misma, sin embargo la longitud es diferente en cada diseño debido a que la bomba CBM necesita una barra de peso para generar el empuje de fluido.
Carga Máxima (PPRL) (Lbs)	40217.67	41669.33	23569.72	Uno de los principales objetivos del proyecto es reducir la carga máxima, ya que si esto sucede la carga energética se verá afectada y por lo tanto presentará una reducción, como en este caso se observa que usando la bomba CBM, la carga máxima disminuye casi a la mitad que en un Bombeo Mecánico con Bomba Convencional.
Carga Mínima (MPRL) (Lbs)	16951.56	13719.15	9560.65	De igual manera se ve una disminución en carga mínima, con el uso de la Bomba CBM.
Esfuerzo máximo en sección 7/8" (psi)	36089.04	37191.12	31968.83	El comportamiento del esfuerzo máximo en la sección de 7/8, disminuye mínimamente en la Bomba CBM, sin embargo siguen siendo aproximados.
Esfuerzo mínimo en sección 7/8" (psi)	9016.12	17126.23	10921.25	El esfuerzo mínimo es menor en la Bomba Convencional, igualmente sigue siendo aproximados.

Cuadro 4. (Continuación)

Variable Analizada	Simulador RODSTAR, Bomba Convencional	Método API RP-11L, Bomba Convencional	Método API RP-11L, Bomba CBM	Comentarios
Esfuerzo máximo en sección 1" (psi)	37724.76	37187.54	31968.35	Este esfuerzo máximo en la sección de una pulgada es menor en el diseño realizado con la bomba CBM. Su diferencia no es muy grande.
Esfuerzo mínimo en sección 1" (psi)	13235.43	21826.34	13321.68	El esfuerzo mínimo en ambos diseños es aproximadamente igual, esto se debe a que ningún diseño realizado con las bombas presenta peso adicional es su carrera descendente.

Como se puede observar en el cuadro 4, existe una variación en los tres datos en los cuales se está llevando a cabo la comparación, inicialmente entre los resultados de la simulación y el diseño convencional con el Método API RP-11L, la diferencia entre resultados de cada variable no es demasiado alta, lo que significa que se aplicó el Método correctamente, la variación puede presentarse debido a que los cálculos y el diseño realizado por el simulador RODSTAR, son más precisos debido al principio de funcionamiento insertado en este software y de igual manera los cálculos mejorados a través de los años para el diseño de Bombeo Mecánico.

Igualmente realizando la comparación con los datos obtenidos para la Bomba CBM, se puede observar que si existe una disminución en cuanto a sus valores más relevantes, esto debido a que no hay carga de fluido y el que principio de funcionamiento es mediante empuje y no mediante levantamiento de fluido.

6.2.1 Resultados arrojados por la plantilla “Unidades Hidráulicas HRP Hoja de Diseño- Single Well” para una Bomba Convencional. De igual manera, a través de la reducción de energía consumida, se puede demostrar que la CBM disminuye levemente algunos valores que afectan el consumo y carga energética de un sistema de Bombeo Mecánico. Para ello, la empresa TDA SUPPLY & SERVICE S.A., permitió el uso de una plantilla “Unidades Hidráulicas HRP Hoja de Diseño-Single Well” en la que se realizó la comparación cuanto al uso de energía según la carga mínima y máxima de cada Bomba (Convencional y CBM) y la potencia del motor a utilizar. Las imágenes para una Bomba Convencional se presentan a continuación.

En la imagen 1, se observan los principales datos a ingresar, como la potencia del motor eléctrico, la velocidad de este, la carrera del pistón, que para este caso es

de 336 in, esta imagen hace referencia a los datos ingresados para Bomba Convencional.

Imagen 1. Plantilla de diseño TDA. (Hydraulic Unit Input Data) Convencional.

HYDRAULIC UNIT INPUT DATA	
HYDRAULIC PUMP DISPLACEMENT (GPM)@1200 RPM	62.00
ELECTRIC MOTOR POWER (HP)	150.00
NAMEPLATE NOMINAL LOAD (A)	170.00
ASYNCHRONIC VELOCITY MOTOR (RPM)	1,780.00
STROKE LENGHT (IN)	336.00
CYLINDER INSIDE DIAMETER(IN)	5.00
POLISHED ROD OD(IN)	1.50
ADDITIONAL BACKPRESSURE DUE FLOW CONTROL (PSI)	100.00
STACK VALVE ASSEMBLY BACKPRESSURE (PSI)	100.00
ADDITIONAL BACKPRESSURE DUE RELIEF VALVE (PSI)	100.00
OVERALL EFFICIENCY (%)	100.00%

Fuente: TDA SUPPLY & SERVICES S.A. Modificado por los autores.

En la imagen 2, se puede observar otra parte de la plantilla de diseño en donde se ingresarán los valores de carga máxima, carga mínima, la longitud de carrera del pistón y la velocidad de bombeo, valores tomados de la simulación con RODSTAR.

Imagen 2. Plantilla de diseño TDA. (RODSTAR Input Data) Convencional.

RODSTAR INPUT DATA	
PPRL (LBS)	40,217.00
MPRL(LBS)	16,951.00
ADJUSTED STROKE LENGTH (IN)	336.00
SPM	2.50

Fuente: TDA SUPPLY & SERVICES S.A. Modificado por los autores.

En la imagen 3, se puede observar los ajustes a máximas operaciones, estos datos han sido calculados por la plantilla de diseño.

Imagen 3. Plantilla de diseño TDA. (Max. Operation Settings) Convencional.

MAX. OPERATION SETTINGS	
MAX. CONTINUOS WORK PRESSURE (PSI)	3,000.00
CURRENT FLOW OIL (GPM)	91.97
MAX PPRL (LBS)	49,950.97
EFFECTIVE AREA (IN2)	17.87
CILYNDER VOL. @AJUSTED STROKE (IN3)	6,003.60
CILYNDER VOL. @AJUSTED STROKE (GALLONS)	25.99
UPSTROKE TIME (SEC)	<u>17.0</u>
TOTAL SHIFT DELAY (SEC)	0.2
MAX DOWN STROKE TIME (SEC)@4 FT/SEG	7.0
MAX ROUND TRIP TIME (SEC)	24.2
MAX SPM	<u>2.48</u>

Fuente: TDA SUPPLY & SERVICES S.A. Modificado por los autores.

La imagen 4, permite observar los resultados de los cálculos de las variables presentes a condiciones de operación, en donde una de las variables es el Consumo total de energía en KW.

Imagen 4. Plantilla de diseño TDA. (Surface Unit Calculated Operation Condition) Convencional.

SURFACE UNIT CALCULATED OPERATION CONDITION			
UPSTROKE PRESSURE@PPRL (PSI)	2,250.80	DOWNSTROKE PRESSURE@PPRL (PSI)	948.69
DESING UPSTROKE PRESSURE (PSI)	2,450.80	DESING DOWN STROKE PRESSURE (PSI)	1,148.69
UPSTROKE HP	131.50	DOWNSTR. HP	61.63
UPSTROKE AMP	149.034	DOWND STR. AMP	69.852
AJUSTED SHIFT DELAY (S)	0.2	AJUSTED DOWNSTROKE TIME (s)	6.0
Ajusted SPM	2.59	CURRENT ROUND TRIP (SG)	23.2
UPSTROKE KW/H	72.22	DOWNSTROKE KW/H	11.98
DELAY HP	55.37	DELAY KW/H	0.36
* TOTAL CONSUMO ENERGIA KW/HR			84.6

Fuente: TDA SUPPLY & SERVICES S.A. Modificado por los autores.

Por tanto el diseño de Bombeo Mecánico con una Bomba Convencional y simulado en RODSTAR, presenta un Consumo de Energía Total de 84.6 KW/hr.

6.2.2 Resultados arrojados por la plantilla “Unidades Hidráulicas HRP Hoja de Diseño- Single Well” para una Bomba CBM. La plantilla de diseño se presenta a continuación con la que se realizó el comparativo en cuanto a uso de energía según la carga mínima y máxima con Bomba CBM y la potencia del motor a utilizar. Las imágenes para una Bomba CBM son las siguientes.

En la imagen 5, se observan los principales datos a ingresar, como la potencia del motor eléctrico, la velocidad de este, la carrera del pistón, que para este caso es de 336 in, esta imagen hace referencia a los datos ingresados para Bomba CBM.

Imagen 5. Plantilla de diseño TDA (Hydraulic Unit Input Data) CBM.

HYDRAULIC UNIT INPUT DATA	
HYDRAULIC PUMP DISPLACEMENT (GPM)@1200 RPM	62.00
ELECTRIC MOTOR POWER (HP)	100.00
NAMEPLATE NOMINAL LOAD (A)	124.00
ASYNCHRONIC VELOCITY MOTOR (RPM)	1,780.00
STROKE LENGHT (IN)	336.00
CYLINDER INSIDE DIAMETER(IN)	5.00
POLISHED ROD OD(IN)	1.50
ADDITIONAL BACKPRESSURE DUE FLOW CONTROL (PSI)	100.00
STACK VALVE ASSEMBLY BACKPRESSURE (PSI)	100.00
ADDITIONAL BACKPRESSURE DUE RELIEF VALVE (PSI)	100.00
OVERALL EFFICIENCY (%)	100.00%

Fuente: TDA SUPPLY & SERVICES S.A.
Modificado por los autores.

La imagen 6, permite observar otra parte de la plantilla de diseño en donde se ingresarán los valores de carga máxima, carga mínima, la longitud de carrera del pistón y la velocidad de bombeo, valores tomados del re-diseño del Sistema de Bombeo Mecánico a partir del Método API RP-11L y el Método de Goodman.

Imagen 6. Plantilla de diseño TDA. (RODSTAR Input Data) CBM.

RODSTAR INPUT DATA	
PPRL (LBS)	23,569.51
MPRL(LBS)	9,560.39
ADJUSTED STROKE LENGTH (IN)	336.00
SPM	2.50

Fuente: TDA SUPPLY & SERVICES S.A. Modificado por los autores.

En la imagen 7, se puede observar los ajustes a máximas operaciones estos datos fueron calculados por la plantilla de diseño utilizada, en este caso para la bomba CBM.

Imagen 7. Plantilla de diseño TDA. (Max. Operation Settings) CBM.

MAX. OPERATION SETTINGS	
MAX. CONTINUOS WORK PRESSURE (PSI)	3,000.00
CURRENT FLOW OIL (GPM)	91.97
MAX PPRL (LBS)	33,300.65
EFFECTIVE AREA (IN ²)	17.87
CILYNDER VOL. @AJUSTED STROKE (IN ³)	6,003.60
CILYNDER VOL. @AJUSTED STROKE (GALLONS)	25.99
UPSTROKE TIME (SEC)	<u>17.0</u>
TOTAL SHIFT DELAY (SEC)	0.2
MAX DOWN STROKE TIME (SEC)@4 FT/SEG	7.0
MAX ROUND TRIP TIME (SEC)	24.2
MAX SPM	<u>2.48</u>

Fuente: TDA SUPPLY & SERVICES S.A. Modificado por los autores.

La imagen 8, permite observar los resultados de los cálculos de las variables presentes a condiciones de operación, en donde una de las variables es el Consumo total de energía en KW.

Imagen 8. Plantilla de diseño TDA. (Surface Unit Calculated Operation Condition) CBM.

SURFACE UNIT CALCULATED OPERATION CONDITION			
UPSTROKE PRESSURE@PPRL (PSI)	1,319.10	DOWNSTROKE PRESSURE@PPRL (PSI)	535.06
DESING UPSTROKE PRESSURE (PSI)	1,519.10	DESING DOWN STROKE PRESSURE (PSI)	735.06
UPSTROKE HP	81.51	DOWNSTR. HP	39.44
UPSTROKE AMP	101.071	DOWND STR. AMP	48.906
AJUSTED SHIFT DELAY (S)	0.2	AJUSTED DOWNSTROKE TIME (s)	6.0
Ajusted SPM	2.59	CURRENT ROUND TRIP (SG)	23.2
UPSTROKE KW/H	44.76	DOWNSTROKE KW/H	7.66
DELAY HP	38.70	DELAY KW/H	0.25
TOTAL CONSUMO ENERGIA KW/HR			52.7

Fuente: TDA SUPPLY & SERVICES S.A. Modificado por los autores.

Por tanto el re-diseño de Bombeo Mecánico con una Bomba CBM en fondo y calculado con el Método API RP-11L, presenta un Consumo de Energía Total de 52.7 KW/hr.

Las restricciones para este Bombeo son diferentes, por tanto se podría trabajar con una velocidad de bombeo un poco mayor, y de igual manera implementar un motor con más potencia, con lo cual se generaría una mayor producción. Para verificar lo obtenido mediante esta plantilla se llevará a cabo el cálculo de potencia que también está presente en el Método API RP-11L, para corroborar la información obtenida y de esta manera dar un análisis más preciso a lo observado tanto en el capítulo 5, como en el que se está desarrollando.

6.2.3 Resultados de potencia requerida para cada sistema (Bomba Convencional y Bomba CBM), usando los cálculos matemáticos presentados en el Método API RP-11L. La potencia requerida para mover el peso en la sarta de varillas se expresa mediante PRHP, y se obtiene a través de la ecuación 33 expresada en el Método API RP-11L mostrada a continuación.

Ecuación 33. Potencia requerida

$$PRHP = \left(\frac{F_3}{SK_r} \right) * S^2 * Kr * N * (2.53 \times 10^{-6})$$

Fuente: American Petroleum Institute.
Recommended practice for design
calculations for sucker rod pumping
systems. P. 8

Dónde:

F_3/SK_r = Relación adimensional para el cálculo de potencia, (adimensional)

S = Longitud de carrera del pistón, (in)

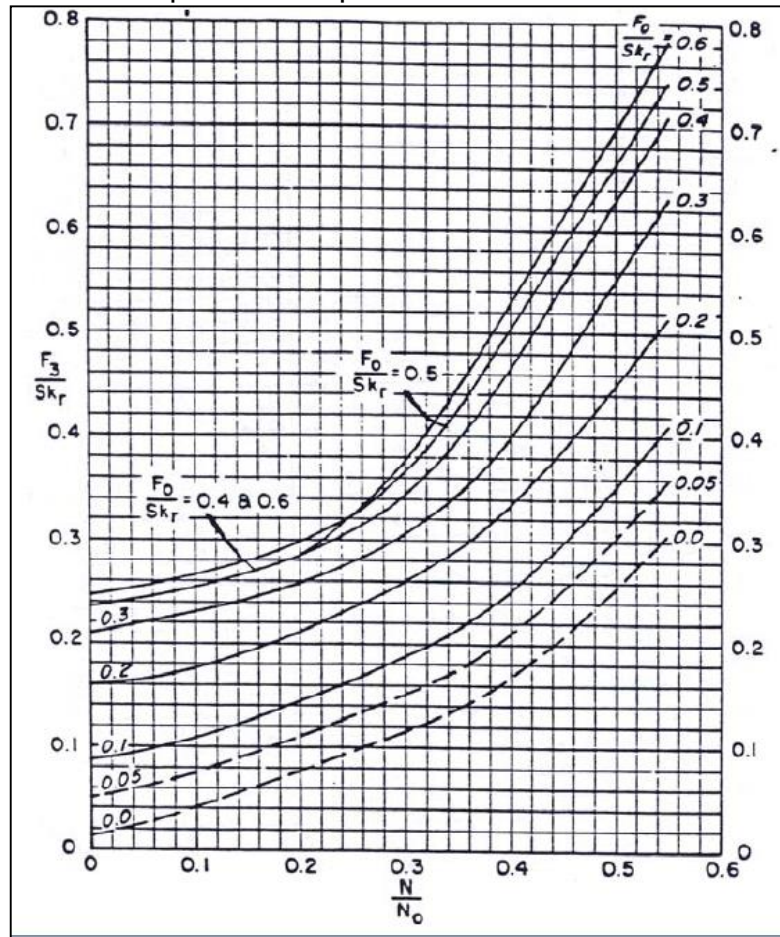
K_r = Constante de estiramiento total, (in/Lb)

N = Velocidad de bombeo, (spm – stroke por minuto)

PRHP = Potencia requerida para el levantamiento del peso en la sarta de varillas, (HP)

La relación adimensional (F_3/SK_r) se obtiene mediante la gráfica 3, en la cual utilizando los valores adimensionales fundamentales de velocidad ($N/No' = 0.086$) y de estiramiento de varillas ($Fo/SK_r = 0.18$), como se puede ver a continuación.

Gráfica 3. Relación adimensional (F_3/SK_r) para el cálculo de potencia requerida en el motor.



Fuente: American Petroleum Institute. Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems. p. 19

Por lo tanto, los resultados obtenidos se pueden ver en la tabla 44:

Tabla 44. Consumo energetico con el Método API RP-11L

Tipo de Bomba	F_3/SK_r	PRHP (HP)	Potencia del motor requerida (HP)	Consumo energético (kW/h)
Bomba Convencional	0.15	20.93	42.87	31.21
Bomba CBM	0.03	8.67	17.34	13

Teniendo en cuenta los valores obtenidos por medio de la plantilla suministrada por la empresa y el cálculo realizado mediante el Método API RP-11L, se puede observar que dichos resultados no son cercanos, debido a que la plantilla tiene en cuenta el tipo de Unidad Hidráulica y el tipo de motor a usar para el correcto funcionamiento del Sistema de Bombeo Mecánico, de manera contraria el Método calcula la potencia del motor asumida para una Unidad Convencional (Machine).

7. ANÁLISIS FINANCIERO

En la actualidad la Empresa TDA SUPPLY & SERVICE S.A. está trabajando en diferentes pozos petroleros que tienen como Sistema de Levantamiento el Bombeo Mecánico, estos se caracterizan por tener un alto consumo energético originado por la variación de la longitud de carrera y la velocidad de bombeo. Debido a esto se propuso como alternativa la evaluación del uso de una Bomba CBM en el Pozo A; esta cumple la misma función que una bomba convencional pero su principio de funcionamiento es distinto, lo cual permitirá reducir el consumo de energía presente en el pozo.

El siguiente análisis financiero tiene como objetivo evaluar la viabilidad financiera del proyecto a partir del consumo energético en el pozo petrolero, para esto se tiene en cuenta la metodología del indicador financiero Valor Presente (VPN) tomando como unidad monetaria de valor constante el dólar Americano, con una Tasa de Interés de Oportunidad (TIO) del 11% efectivo anual que es comúnmente utilizada para los proyectos de inversión desarrollados por la empresa, el período de evaluación es de tres años con periodos anuales, adicionalmente se realiza un análisis de inversión y de costos de operación.

7.1 ANÁLISIS DE INVERSIÓN (CAPEX)

Los costos de inversión (CAPEX) son inversiones iniciales realizadas por una compañía para generar beneficios monetarios en un periodo determinado.

Para realizar el análisis de costos inversión para la Bomba CBM empleada en el Sistema Levantamiento artificial Bombeo Mecánico, es necesario adquirir equipos, productos y servicios. A continuación se presentan estos valores de inversión para la bomba.

7.1.1 Escenario actual. Los valores que se presentan en el análisis de inversión para este escenario fueron suministrados por la empresa, cabe indicar que estos costos corresponden a la adquisición de los equipos de superficie y de fondo, además del servicio de instalación del sistema, estos no incluyen el trabajo de perforación, ya que este ya había sido realizado. En la tabla 45 se ilustran los costos de inversión del Sistema de Levantamiento Bombeo Mecánico para el Pozo A. La tabla 46 indica el periodo de inversión para el pozo.

Tabla 45. Inversión para la implementación de la Bomba Convencional

Costos Sistema de Bombeo Mecánico Pozo A			
Equipos de superficie			
Equipo	Cantidad	Precio unitario (USD)	Precio total (USD)
Unidad Hidráulica de superficie	1	83000.00	83000.00
Cabezal de Bombeo Mecánico	1	250.00	250.00
Total equipos de superficie			83,250.00
Equipos de fondo			
Equipo	Cantidad	Precio unitario (USD)	Precio total (USD)
Bomba Convencional	1	3,250.00	3,250.00
Varillas	324	130.00	42,120.00
Total equipos de fondo			45,370.00
Costo total del equipo (USD)		128,620.00	
Costo de Workover (USD)		185,000.00	
Costo total (USD)		313,620.00	

Tabla 46. Periodo de inversión Pozo A

Periodo (año)	Costo de inversión (USD)
0	313,620.00

7.1.2 Escenario nuevo. De igual manera como se presentó anteriormente, a continuación en la tabla 47 se ilustran los costos de inversión totales para este sistema propuesto. La tabla 48 indica el periodo de la inversión para el pozo.

Tabla 47. Inversión para la implementación de la Bomba CBM

Costos Sistema de Bombeo Mecánico Pozo A			
Equipos de superficie			
Equipo	Cantidad	Precio unitario (USD)	Precio total (USD)
Unidad Hidráulica de superficie	1	83000.00	83,000.00
Cabezal de Bombeo Mecánico	1	250.00	250.00
Total equipos de superficie			83,250.00
Equipos de fondo			
Equipo	Cantidad	Precio unitario (USD)	Precio total (USD)
Bomba CBM	1	4,200.00	4,200.00
Varillas	326	130.00	42,380.00
Total equipos de fondo			46,580.00
Costo total del equipo (USD)		129,830.00	
Costo de Workover (USD)		185,000.00	
Costo total (USD)		314,830.00	

Tabla 48. Periodo de inversión Pozo A

Periodo (año)	Costo de inversión
0	314,830.00

7.2 ANÁLISIS DE COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX)

Tal y como su nombre lo indica, son los gastos asociados al desarrollo de un proyecto, así como el mantenimiento de los equipos, alquiler de equipos, gastos en combustibles, entre otros.

El análisis de costos de este análisis financiero tendrá en cuenta el consumo de energía, el mantenimiento de las bombas y el detenimiento de la producción durante dicho mantenimiento, asumiendo una producción constante para el escenario actual y para el escenario propuesto.

7.2.1 Escenario actual. En la tabla 49 se observan los costos de mantenimiento:

Tabla 49. Costos de mantenimiento con Bomba Convencional

Ítem	Costo mantenimiento (USD)	Cantidad	Costo total (USD)
Mantenimiento Bomba Convencional	1,500.00	1	1,500.00
Detenimiento producción	170,000.00	1 día	170,000.00
Total costos de mantenimiento			171,500.00

En la tabla 50 se observan los costos de energía generados durante el funcionamiento del Sistema de Bombeo Mecánico con una Bomba Convencional y el total de los costos de operación:

Tabla 50. Costos de energía con Bomba Convencional

Kw/hr totales	Kw/año totales	Costo Kw/USD	Costo total (USD)
84.60	739,065.60	0.13	99,034.79
Total costos de operación (USD)			270,534.79

7.2.2 Escenario propuesto. En la tabla 51 se observan los costos de mantenimiento:

Tabla 51. Costos de mantenimiento con Bomba CBM

Ítem	Costo mantenimiento (USD)	Cantidad	Costo total (USD)
Mantenimiento Bomba CBM	2,100.00	1	2,100.00
Detenimiento producción	170,000.00	1 día	170,000.00
Total costos de mantenimiento			172,100.00

En la tabla 52 se observan los costos de energía generados durante el funcionamiento del Sistema de Bombeo Mecánico con una Bomba CBM y los Costos de operación totales:

Tabla 52. Costos de mantenimiento con Bomba CBM

Kw/hr totales	Kw/año totales	Costo Kw/USD	Costo total (USD)
52.70	460,387.20	0.13	61,691.88
Total costos de operación (USD)		233,791.88	

7.3 EVALUACIÓN FINANCIERA

El análisis financiero, se realizará basado en los Costos de Inversión (CAPEX) y en los Costos de Operación (OPEX), en donde se mostrara el flujo de caja para cada uno de los escenarios propuestos. Para realizar dicho análisis, se utilizará el indicador de Valor Presente Neto (VPN) y el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), y así determinar la viabilidad de proyecto al implementar cada una de las bombas en el Pozo A.

7.3.1. Flujos de Caja. Son una representación gráfica para el análisis financiero de un proyecto que permiten relacionar los ingresos y egresos en periodo dado.

7.3.2 Valor Presente Neto (VPN). “Es el equivalente en pesos actuales de todos los ingresos y egresos, presentes y futuros, que constituyen el proyecto”⁶⁴

Este valor se calcula mediante la ecuación 34.

Ecuación 34. Determinación del Valor Presente Neto (VPN)

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

Fuente: BACCA C., Guillermo. Ingeniería Económica: Valor presente neto. Editorial educativa. Octava Edición. 2005. P. 197

En donde, F_0 es la inversión inicial (CAPEX), F_n es el Flujo de Caja Neto de cada uno de los periodos de evaluación, n es el número de periodos de evaluación y por último, i que es la tasa a la cual se descuentan cada uno de los flujos de caja; esta tasa es llamada Tasa de Interés de Oportunidad.

El resultado obtenido a partir de la ecuación 33, permitirá determinar cuál es la viabilidad del proyecto. Si el VPN es menor a cero, significa que el proyecto no es rentable, si es mayor a cero el proyecto es rentable, y cuando es igual a cero el proyecto no genera ganancia o pérdida, la realización del proyecto es indiferente.

⁶⁴ VILLAREAL, Arturo. Evaluación financiera de proyectos de inversión. 2001. p. 67.

Para realizar el cálculo del VPN, es necesario realizar un flujo de caja y así determinar el estado financiero del proyecto, según su estructura, los ingresos están ubicados en la parte superior sobre la línea de tiempo mientras los egresos están ubicados en la parte inferior debajo de la línea de tiempo.

7.3.2.1 Escenario actual. En el diagrama 1 se presenta el flujo de caja para el Sistema de Bombeo Mecánico con una Bomba Convencional.

Diagrama 1. Flujo de caja escenario actual

	USD				Total
Ingresos					
Inversión	313.620,00				313.620,00
Costos de operación		270.534,79	270.534,79	270.534,79	811.604,37
Total egresos	313.620,00	270.534,79	270.534,79	270.534,79	1.125.224,37

A continuación, en la ecuación 35 se observa el procedimiento del cálculo del VPN, correspondiente al escenario actual.

Ecuación 35. Valor Presente Neto escenario actual

$$VPN (0.11) = 313.620,00 + \frac{270.534,79}{(1 + 0.11)^1} + \frac{270.534,79}{(1 + 0.11)^2} + \frac{270.534,79}{(1 + 0.11)^3}$$

$$VPN (0.11) = 974.729,8474 \text{ USD}$$

7.3.2.2 Escenario propuesto. En el diagrama 2 se presenta el flujo de caja para el Sistema de Bombeo Mecánico con una Bomba CBM.

Diagrama 2. Flujo de caja escenario propuesto

	USD				Total
Ingresos					
	0	1	2	3	
Inversión	314.830,00				314.830,00
Costos de operación		233.791,88	233.791,88	233.791,88	701.375,64
Total egresos	314.830,00	233.791,88	233.791,88	233.791,88	1.016.205,64

A continuación, en la ecuación 36 se observa el procedimiento del cálculo del VPN, correspondiente al escenario propuesto.

Ecuación 36. Valor Presente Neto escenario propuesto

$$VPN (0.11) = 314.830,00 + \frac{233.791,88}{(1 + 0.11)^1} + \frac{233.791,88}{(1 + 0.11)^2} + \frac{233.791,88}{(1 + 0.11)^3}$$

$$VPN (0.11) = 828.567,8692 \text{ USD}$$

7.3.3 Tasa de Interés de Oportunidad (TIO). Según Guillermo Bacca Currea⁶⁵: “La Tasa de Interés de Oportunidad (que se representa por TIO), es la tasa de interés más alta que un inversionista sacrifica con el objeto de realizar un proyecto.”

TDA SUPPLY & SERVICE S.A, maneja una Tasa de Interés de Oportunidad del 11% con periodos anuales, la cual será la misma en los escenarios de estudio.

7.3.4 Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE). Consiste en tomar los ingresos y egresos como una forma equivalente de pago para así comparar los costos generados durante un año del Sistema de Levantamiento con una bomba convencional con el Sistema de Levantamiento con una Bomba CBM. Generalmente, la comparación se realiza a un año.

Se determina el valor de la cuota equivalente a cada ingreso y a cada egreso anual, para así realizar la suma algebraica de la cuota equivalente de los ingresos y los egresos como se muestra en ecuación 37.

⁶⁵ BACCA, Guillermo. Ingeniería Económica. Editorial educativa. Bogotá D.C. p. 197

Ecuación 37. Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)

$$CAUE = -CAO - \frac{C}{\left[\frac{1 - (1+i)^{-n}}{i}\right]} + \frac{VS}{\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i}\right]}$$

Fuente: Untiteled. [En línea]. Disponible desde internet en: <https://www.emaze.com/@AQTLFOOI>
Modificado por los autores.

En donde CAO es el Costo anual de operación, C el costo inicial, VS el valor de salvamento, i la tasa de interés y n el número de periodos de vida útil.

Cuando se realiza una comparación entre dos escenarios, el de menor valor absoluto del Costo Anual Uniforme Equivalente será el proyecto, financieramente, más viable.

7.3.4.1 Escenario actual. En la ecuación 38 se presenta el cálculo del CAUE para el escenario actual, teniendo en cuenta el diagrama 1 y por medio de la ecuación 34.

Ecuación 38. Costo Anual Uniforme equivalente escenario actual

$$CAUE \text{ (actual)} = -270.534,79 - \frac{313.620,00}{\frac{1 - (1 + 0.11)^{-3}}{0.11}} + 0 = -398.872,1929$$

7.3.4.2 Escenario propuesto. En la ecuación 39 se presenta el cálculo del CAUE para el escenario propuesto, teniendo en cuenta el diagrama 2 y por medio de la ecuación 38.

Escenario 39. Costo Anual Uniforme equivalente escenario propuesto

$$CAUE \text{ (propuesto)} = -233.791,88 - \frac{314.830,00}{\frac{1 - (1 + 0.11)^{-3}}{0.11}} + 0 = -362.624,4307$$

Por lo tanto el ahorro generado en cuanto a los costos de energía estaría dado por la ecuación 40:

Ecuación 40. Ahorro total costos de energía

$$\begin{aligned} \text{Ahorro total costos de energía (USD)} &= 398.872,1929 \text{ USD} - 362.624,4307 \text{ USD} \\ &= 36.247,7629 \text{ USD} \end{aligned}$$

7.4 CONCLUSIÓN DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA

Desde el punto de vista financiero la mejor opción, es utilizar el escenario propuesto, es decir, el uso del Sistema de Bombeo Mecánico con la Bomba CBM, ya que este logro una reducción en los costos de energía de aproximadamente 9,1%.

8. CONCLUSIONES

- La Cuenca del Valle Medio del Magdalena, cuenta con diversos campos que han sido explorados y explotados desde hace varios años por diferentes empresas petroleras. Las principales formaciones productoras son Lisama, Esmeraldas, La Paz, Colorado y Mugrosa.
- La Unidad de Superficie del Sistema de Levantamiento Artificial Bombeo Mecánico que tiene un largo recorrido y una baja velocidad, es la Unidad Hidráulica, esta ayuda a que la vida útil de los equipos de fondo sea mayor, ya que durante su funcionamiento las fallas se reducen.
- El pozo seleccionado para la realización del re-diseño, elegido por la empresa TDA SUPPLY & SERVICE, coincide con las características de los pozos cercanos, los cuales son de profundidades mayores a los 7000 ft; y el Sistema de Levantamiento Artificial implementado es el Bombeo Mecánico.
- El re-diseño del Sistema de Bombeo Mecánico correspondiente al Caso I, presentó compresión, ya que sus esfuerzos mínimos fueron valores negativos. Por ello, fue necesario cambiar la consideración del mismo mediante el planteamiento del Caso II.
- Mediante el Caso II se obtuvo una alternativa planteada a través de las Cargas de Euler, logrando de esta manera un diseño más preciso que evita la deformación y fatiga generada en las varillas.
- Para cumplir el objetivo de reducción de cargas, el re-diseño debe considerar una barra de peso en su sección inferior para lograr que en el sistema exista tensión, por lo tanto la carga total de la barra de peso debe ser mayor al peso del fluido; de lo contrario, se presentaría compresión.
- La carga máxima (PPRL) y la carga mínima (MPRL) encontradas para el sistema de diseño con una Bomba CBM, presentan disminución con un 41% y 43 %, respectivamente, esto a diferencia a las arrojadas por el Simulador Rodstar en una bomba convencional.
- La evaluación energética entre el diseño con la Bomba Convencional y con la Bomba CBM permitió determinar que el consumo de energía es de 84 KW/hr y de 57 KW/hr, respectivamente. Por lo cual, se presenta una disminución en el planteamiento del re-diseño con la Bomba CBM.
- Considerando los resultados de la potencia requerida para el motor, se pudo determinar que para la Bomba CBM se puede realizar una variación en cuanto

a velocidad y potencia, debido a que la carga a levantar es menor a la requerida por un motor con una Bomba Convencional.

- La evaluación de la viabilidad financiera de este proyecto realizada por medio de la metodología del Valor Presente Neto y del Costo Anual Uniforme Equivalente dio como resultado que el uso de la Bomba CBM para el Sistema de Bombeo Mecánico corresponderá a un ahorro del 9,1% lo que se traduce en 36.247 USD con respecto al uso de una bomba convencional para el mismo sistema.

9. RECOMENDACIONES

- Evaluar un diseño de Bombeo mecánico con Bomba CBM en pozos con condiciones de profundidad más someras y en ambientes poco corrosivos.
- Evaluar el desarrollo de una matriz de selección, para pozos que puedan trabajar bajo el principio de funcionamiento de la Bomba CBM, permitiendo un análisis más detallado de la reducción de energía en los pozos.
- Diseñar un software que permita la simulación de un Sistema de Bombeo Mecánico con Bomba CBM en fondo, teniendo en cuenta los parámetros que implican el funcionamiento de esta.
- Desarrollar un software para el cálculo de variables necesarias, para el análisis de diseño de un Bombeo mecánico con Bomba CBM, que tenga en cuenta los distintos Métodos usados: el Método API RP-11L, Método de Goodman para los esfuerzos y el Método de Euler para barras de peso, en caso de ser necesario.

BIBLIOGRAFÍA

ALVAREZ LACAYO, Francisco Antonio y VEGA CASTRO, Jose Manuel. Análisis de falla en los Sistemas de Bombeo Mecánico del Campo Cantagallo. Bucaramanga, 2008, p.63. Trabajo de investigación para optar el título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems. API RP 11L. 4 ed. Dallas, Texas.: Production Department, 1988. 27 p.

ARDILA ZIPA, Cesar Augusto y BARRERA GONZÁLEZ, Cristian David. Evaluación técnico-financiera de compatibilidad de secuestrantes de H₂S en fluidos de perforación y completamiento en operaciones del Campo Jazmín mediante pruebas de laboratorio. Bogotá D.C, 2016, p 249. Proyecto integral de grado para opta por el título de Ingeniero de Petróleos. Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías.

BACCA, Guillermo. Ingeniería Económica. Editorial educativa. Bogotá D.C. p. 411

CAMPOS MONTAÑO, Orlando Nahim y PANCHI ZAPATA, Cristian Raúl. Estudio para el cambio de sistema de levantamiento artificial a bombeo mecánico en el campo Lago Agrio operado por EP- Petroecuador. Quito, 2011, 224p. Proyecto previo a la obtención del título de ingenieros en petróleo. Escuela politécnica nacional. Facultad de ingeniería en geología y petróleo

CEDIEL, Fabio. El Grupo Girón, una molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental. Servicio Geológico Nacional Boletín Geológico No. 16 (1-3). Bogotá, 1968. P.96.

ESCALANTE, Sharon. Módulo III Bombeo Mecánico. [En línea]. 2016. P.8. [Consultado 29 de Diciembre de 2017]. Disponible en: <http://blogs.unellez.edu.ve/sharon/files/2014/01/Guia-3.-BMC-JUL-2016.pdf>

ESPINDOLA, Marcelo. Sistemas de elevación artificial- “Bombeo Mecánico”. [En línea]. 03 de Noviembre de 2016. P. 70. [Consultado 26 de Diciembre de 2017]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/marceloespindola4/sistema-de-bombeo-mecanico-proyecto2>

INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA INGEOMINAS. Reseña explicativa del mapa geológico preliminar plancha 151 Charalá. Bogotá, 1985. P. 25.

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

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

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

JULIVERT, M. Léxico Estratigráfico Internacional. Volumen V. Fascículo 4^a. Colombia, 1968. P.615.

MARTINEZ MACIAS, Izanami Vidblain. Diagnóstico de fallas y optimización del Bombeo Mecánico. México D.F, 2013, p.129. Tesis individual para obtener el título de Ingeniero Petrolero. Instituto Politécnico Nacional

MOJICA, Jairo y FRANCO, Ricardo. Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena, Colombia. [En Línea]. 1990. P.24. [Consultado 19 de Diciembre de 2017]. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/viewFile/30633/30756>

MORALES, Luis, et al., General geology & oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia: Habitat of Oil. Symposium, America Association of Petroleum Geologists. 1958. P. 643

PDVSA, Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Diseño de Instalaciones de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecánico. Instituto de Desarrollo Profesional y Técnico. 2001. Venezuela. P.71.

REY BOTTO, Blas Octavio. Optimización de la operación del Sistema de Bombeo Mecánico de la sección 67 de los campos petroleros “Gustavo Galindo Velasco”. Bucaramanga, 2004, p. 139. Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-químicas

ROYERO, José María y CLAVIJO, Jairo. Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander: Escala 1:400.000. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear Ingeominas. Colombia, 2001. P.77. Memoria Explicativa

SARMIENTO PÉREZ, Gustavo; et.al. Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena. [En línea]. 29 de Diciembre de 2015. P.34. [Consultado Diciembre 18, 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/wMtc7g>

SOCORRO, Gabriel. Bombeo Mecánico, presentación. [En línea]. 06 de Julio de 2012. P. 46. [Consultado 29 de Enero de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/gabosocorro/bombeo-mecanico-presentacion>

SUÁREZ RUEDA, Carlos Orlando. Arenas basales del Cretáceo inferior, potencial roca hidrocarburífera en la región central de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia. [En línea]. 2016. P.164. Tesis presentada como requisito para optar al título de: Magíster en Geología. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias. [Consultado Diciembre 28 de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/R268Fd>

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

TENARIS. Varillas Huecas HolloRod. [En línea].2015. [Consultado 5 de Mayo de 2018]. Disponible en: <https://bit.ly/2lJRjyE>

TDA SUPPLY & SERVICE S.A. Hoja de diseño SLA. Documento de Excel: 4 Hojas. 2017.

THOMPSON PUMP CO. Double Standing Valve Sucker Rod Pump. Inventor: CHARLES GENE FISHER. Int.CL. F05B 49/22. Fecha de Solicitud: 1, Diciembre, 2011. United States Patent. US 8328528 B2. 11, Diciembre, 2012.

UPC Global. Bomba Mecánica Insertable CBM. [Vídeo]. 2014. Duración: 3:40 minutos. A color. Presencia de sonido. Disponible en internet: <https://goo.gl/asjorf>

Válvula cheque anti bloqueo por gas. Inventor: A. DE GUEVARA LADRON. Fecha solicitud: 10, agosto, 2015. WO2016024210 A3. 28, abril, 2016.

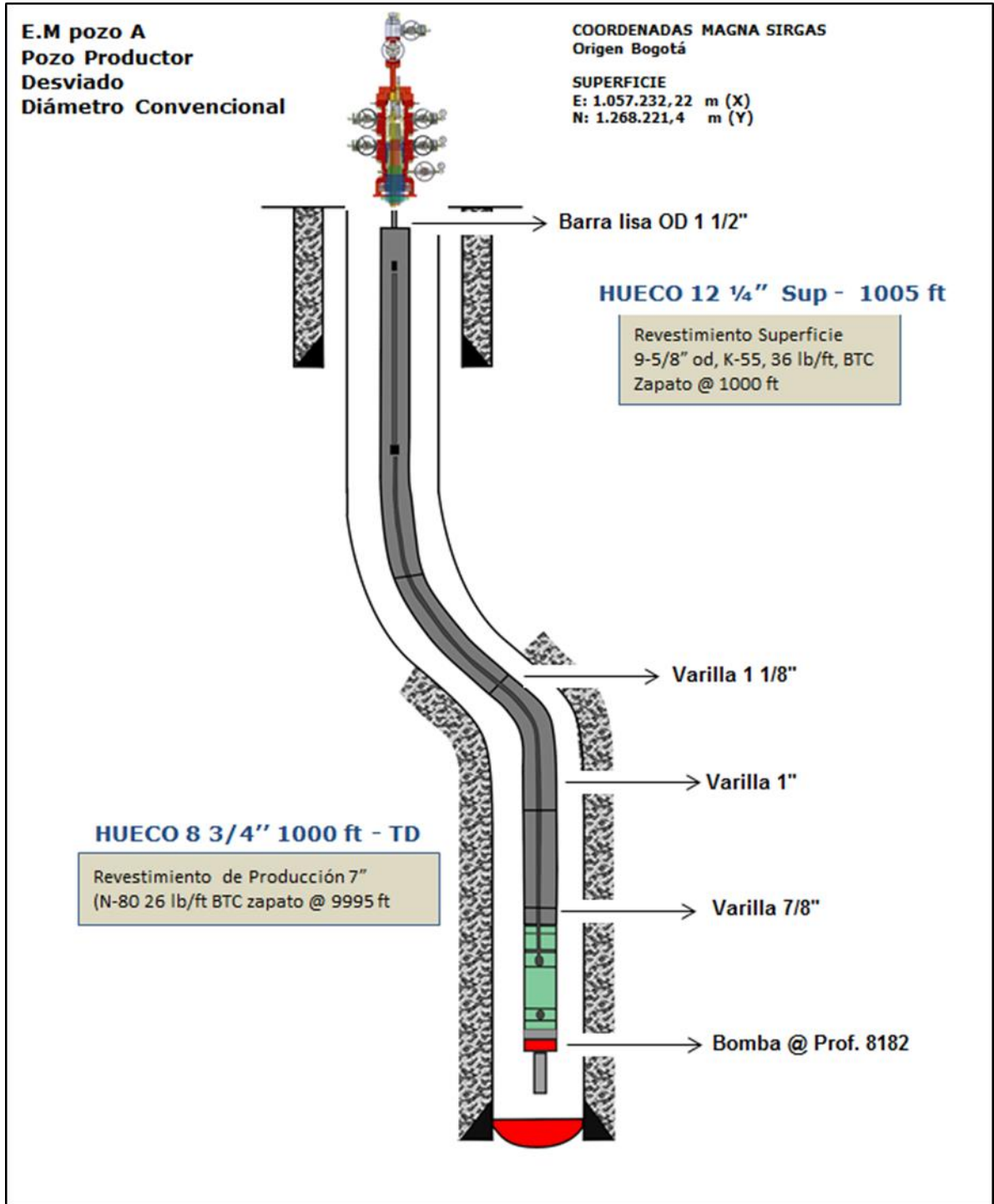
VILLAREAL, Arturo. Evaluación financiera de proyectos de inversión. 2001. P. 401.

WEATHERFORD INTERNATIONAL LTD. Documento de power point: Varillas de bombeo. 117 p.

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

ANEXOS

ANEXO A.
ESTADO MECÁNICO POZO A



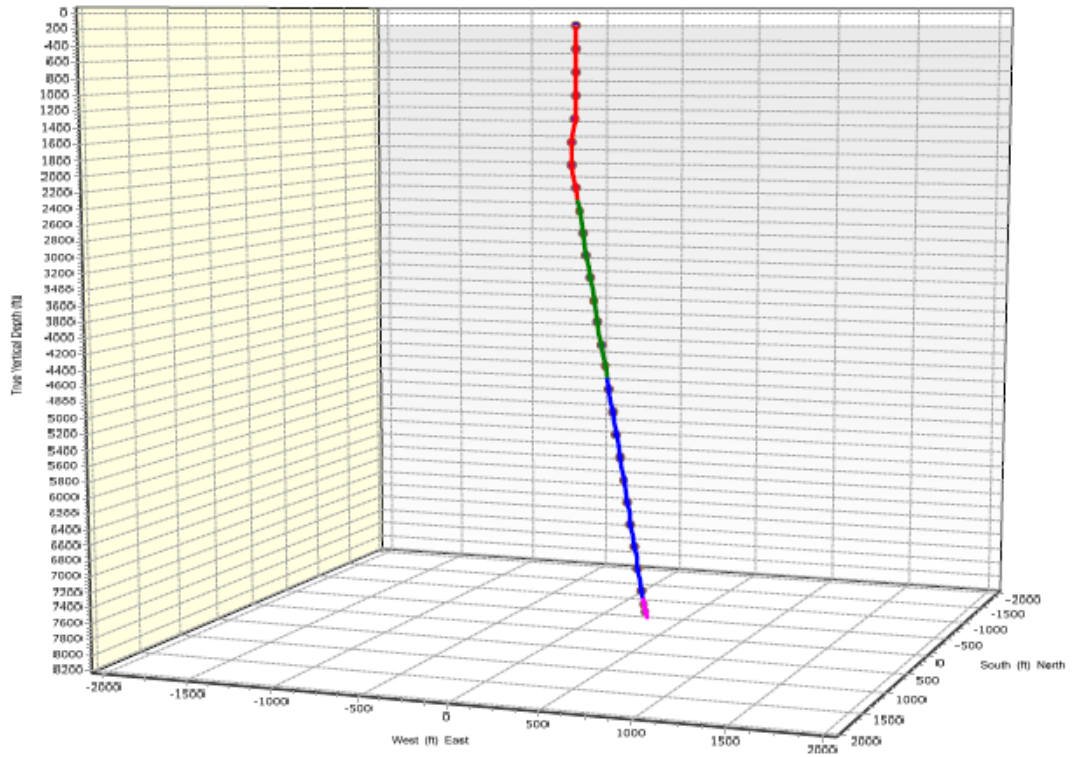
**ANEXO B.
SURVEY POZO A**

Depth	Incl.	Azim.
0	0	0
100	0	0
200	0	0
300	0	0
400	0	0
500	0	0
600	0	0
700	0	0
800	0	0
900	0	0
1000	0	0
1100	0	0
1200	0	0
1300	1.5	230
1400	3	230
1500	4.5	230
1600	6	230
1700	4.803	220.325
1800	3.826	205.059
1900	3.27	182.324
2000	3.354	156.175
2100	4.037	135.255
2200	4.335	130.322
2300	4.335	130.322
2400	4.335	130.322
2500	4.335	130.322
2600	4.335	130.322
2700	4.335	130.322
2800	4.335	130.322
2900	4.335	130.322
3000	4.335	130.322
3100	4.335	130.322
3200	4.335	130.322
3300	4.335	130.322
3400	4.335	130.322
3500	4.335	130.322

3600	4.335	130.322
3700	4.335	130.322
3800	4.335	130.322
3900	4.335	130.322
4000	4.335	130.322
4100	4.335	130.322
4200	4.335	130.322
4300	4.335	130.322
4400	4.335	130.322
4500	4.335	130.322
4600	4.335	130.322
4700	4.335	130.322
4800	4.335	130.322
4900	4.335	130.322
5000	4.335	130.322
5100	4.335	130.322
5200	4.335	130.322
5300	4.335	130.322
5400	4.335	130.322
5500	4.335	130.322
5600	4.335	130.322
5700	4.335	130.322
5800	4.335	130.322
5900	4.335	130.322
6000	4.335	130.322
6100	4.335	130.322
6200	4.335	130.322
6300	4.335	130.322
6400	4.335	130.322
6500	4.335	130.322
6600	4.335	130.322
6700	4.335	130.322
6800	4.335	130.322
6845.78	4.335	130.322
6900	4.335	130.322
7000	4.335	130.322
7100	4.335	130.322
7200	4.335	130.322
7300	4.335	130.322
7400	4.335	130.322

7500	4.335	130.322
7600	4.335	130.322
7700	4.335	130.322
7800	4.335	130.322
7900	4.335	130.322
8000	4.335	130.322
8100	4.335	130.322
8200	4.335	130.322
8300	4.335	130.322
8400	4.335	130.322
8500	4.335	130.322
8600	4.335	130.322
8700	4.335	130.322
8800	4.335	130.322
8839.39	4.335	130.322
8851.51	4.335	130.322

DEVIATION SURVEY PLOT



Rod Diameters:	1 1/8"	1"	7/8"	1 1/2"
# Guides/Rod:	3	3	3	3

ANEXO C.

**RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL POZO A A CONDICIONES
ACTUALES CON EL SIMULADOR RODSTAR**

Ver en el CD

ANEXO D.

TABLAS DE VARILLAS PARA CONSTANSTES ELÁSTICAS Y FACTORES DE FRECUENCIA.

DATOS DE LA BOMBA Y DE LAS VARILLAS										
No. DE VARI LLA	DIA. DEL ZEMBOLO d_p	PESO DE LAS VAR. lbs-pie m_v	CONSTANTE ELÁSTICA $\frac{plg}{lbs\ pie} \times 10^{-6}, E_r$	FACTOR DE FRECUENCIA $\frac{A}{F_c}$	SARTA DE VARILLAS, % DE CADA DIAMETRO					
					1 1/8	1	7/8	3/4	5/8	1/2
44	Todos	0.726	1.990	1.000	-	-	-	-	-	100.0
54	1.06	0.906	1.668	1.138	-	-	-	-	44.6	55.4
54	1.25	0.929	1.633	1.140	-	-	-	-	49.5	50.5
54	1.50	0.957	1.584	1.137	-	-	-	-	56.4	43.6
54	1.75	0.990	1.525	1.122	-	-	-	-	64.6	35.4
54	2.00	1.027	1.460	1.095	-	-	-	-	73.7	26.3
54	2.25	1.067	1.391	1.061	-	-	-	-	83.4	16.6
54	2.50	1.108	1.318	1.023	-	-	-	-	93.5	6.5
55	Todos	1.135	1.270	1.000	-	-	-	-	100.0	-
64	1.06	1.164	1.382	1.229	-	-	-	33.3	33.1	33.5
64	1.25	1.211	1.319	1.215	-	-	-	37.2	35.9	26.9
64	1.50	1.275	1.232	1.184	-	-	-	42.3	40.4	17.3
64	1.75	1.341	1.141	1.145	-	-	-	47.4	45.3	7.4
65	1.06	1.307	1.138	1.098	-	-	-	34.4	65.6	-
65	1.25	1.321	1.127	1.104	-	-	-	37.3	62.7	-
65	1.50	1.343	1.110	1.110	-	-	-	41.8	58.2	-
65	1.75	1.369	1.090	1.114	-	-	-	46.9	53.1	-
65	2.00	1.394	1.070	1.114	-	-	-	52.0	48.0	-
65	2.25	1.426	1.045	1.110	-	-	-	58.4	41.6	-
65	2.50	1.460	1.018	1.099	-	-	-	65.2	34.8	-
65	2.75	1.497	0.990	1.082	-	-	-	72.5	27.5	-
65	3.25	1.574	0.930	1.037	-	-	-	88.1	11.9	-
66	Todos	1.634	0.883	1.000	-	-	-	100.0	-	-
75	1.06	1.566	0.997	1.191	-	-	27.0	27.4	45.6	-
75	1.25	1.604	0.973	1.193	-	-	29.4	29.8	40.8	-
75	1.50	1.664	0.935	1.189	-	-	33.3	33.3	33.3	-
75	1.75	1.732	0.892	1.174	-	-	37.8	37.0	25.1	-
75	2.00	1.803	0.847	1.151	-	-	42.4	41.3	16.3	-
75	2.25	1.875	0.801	1.121	-	-	46.9	45.8	7.2	-

Continuación de Tabla 3										
N ^o . DE VARI LLA	DIA. DEL EMBOLO pulg d _e	PESO DE LAS VAR. lbt-pulg m _v	CONSTANTE ELÁSTICA pulg/lbt pulg X 10 ⁻⁶ . E _r	FACTOR DE FRECUENCIA A F _r	SARTA DE VARILLAS, % DE CADA DIAMETRO					
					1 1/8	1	7/8	3/4	5/8	1/2
76	1.06	1.820	0.816	1.072	-	-	28.5	71.5	-	-
76	1.25	1.814	0.812	1.077	-	-	30.6	69.4	-	-
76	1.50	1.733	0.804	1.082	-	-	33.8	66.2	-	-
76	1.75	1.855	0.795	1.088	-	-	37.5	62.5	-	-
76	2.00	1.880	0.785	1.093	-	-	41.7	58.3	-	-
76	2.25	1.908	0.774	1.096	-	-	46.5	53.5	-	-
76	2.50	1.934	0.764	1.097	-	-	50.8	49.2	-	-
76	2.75	1.967	0.751	1.094	-	-	56.5	43.5	-	-
76	3.25	2.039	0.722	1.078	-	-	68.7	31.3	-	-
76	3.75	2.119	0.690	1.047	-	-	82.3	17.7	-	-
77	Todos	2.224	1.000	1.000	-	-	100.0	-	-	-
85	1.06	1.883	0.873	1.261	-	22.2	22.4	22.4	33.0	-
85	1.25	1.943	0.841	1.253	-	23.9	24.2	24.3	27.6	-
85	1.50	2.039	0.791	1.232	-	26.7	27.4	26.8	19.2	-
85	1.75	2.138	0.738	1.201	-	29.6	30.4	29.5	10.5	-
86	1.06	2.058	0.742	1.151	-	22.6	23.0	54.3	-	-
86	1.25	2.087	0.732	1.156	-	24.3	24.5	51.2	-	-
86	1.50	2.133	0.717	1.162	-	26.8	27.0	46.3	-	-
86	1.75	2.185	0.699	1.164	-	29.4	30.0	40.6	-	-
86	2.00	2.247	0.679	1.161	-	32.8	33.2	33.9	-	-
86	2.25	2.315	0.656	1.153	-	36.9	36.0	27.1	-	-
86	2.50	2.385	0.633	1.138	-	40.6	39.7	19.7	-	-
86	2.75	2.455	0.610	1.119	-	44.5	43.3	12.2	-	-
87	1.06	2.390	0.612	1.055	-	24.3	75.7	-	-	-
87	1.25	2.399	0.610	1.958	-	25.7	74.3	-	-	-
87	1.50	2.413	0.607	1.062	-	27.7	72.3	-	-	-
87	1.75	2.430	0.603	1.066	-	30.3	69.7	-	-	-
87	2.00	2.450	0.598	1.071	-	33.2	66.8	-	-	-
87	2.25	2.472	0.594	1.075	-	36.4	63.6	-	-	-
87	2.50	2.496	0.588	1.079	-	39.9	60.1	-	-	-
87	2.75	2.523	0.582	1.082	-	43.9	56.1	-	-	-
87	3.25	2.575	0.570	1.084	-	51.6	48.4	-	-	-
87	3.75	2.641	0.556	1.078	-	61.2	38.8	-	-	-
87	4.75	2.793	0.522	1.038	-	83.6	16.4	-	-	-

Continuación de Tabla 3										
No. DE VARI LLA	DIA. DEL EMBOLO pig d _p	PESO DE LAS VAR. lbs-pie m _r	CONSTANTE ELÁSTICA pig/lbs pie x 10 ⁻⁴ E _r	FACTOR DE FRECUENCIA A F _r	SARTA DE VARILLAS, % DE CADA DIAMETRO					
					1 1/8	1	7/8	3/4	5/8	1/2
88	Todos	2.904	0.497	1.000	-	100.0	-	-	-	-
96	1.06	2.382	0.670	1.222	19.1	19.2	19.5	42.3	-	-
96	1.25	2.435	0.655	1.224	20.5	20.5	20.7	38.3	-	-
96	1.50	2.511	0.633	1.223	22.4	22.5	22.8	32.3	-	-
96	1.75	2.607	0.606	1.213	24.8	25.1	25.1	25.1	-	-
96	2.00	2.703	0.578	1.196	27.1	27.9	27.4	17.6	-	-
96	2.25	2.806	0.549	1.172	29.6	30.7	29.8	9.8	-	-
97	1.06	2.645	0.568	1.120	19.4	20.0	60.3	-	-	-
97	1.25	2.670	0.563	1.124	20.8	21.2	58.0	-	-	-
97	1.50	2.707	0.556	1.131	22.5	23.0	54.5	-	-	-
97	1.75	2.751	0.548	1.137	24.5	25.0	50.4	-	-	-
97	2.00	2.801	0.538	1.141	26.8	27.4	25.7	-	-	-
97	2.25	2.856	0.528	1.143	29.4	30.2	40.4	-	-	-
97	2.50	2.921	0.515	1.141	32.5	33.1	34.4	-	-	-
97	2.75	2.989	0.503	1.135	36.1	35.3	28.6	-	-	-
97	3.25	3.132	0.475	1.111	42.9	41.9	15.2	-	-	-
98	1.06	3.068	0.475	1.043	21.2	78.8	-	-	-	-
98	1.25	3.076	0.474	1.045	22.2	77.8	-	-	-	-
98	1.50	3.089	0.472	1.048	23.8	76.2	-	-	-	-
98	1.75	3.103	0.470	1.051	25.7	74.3	-	-	-	-
98	2.00	3.118	0.468	1.055	27.7	72.3	-	-	-	-
98	2.25	3.137	0.465	1.058	30.1	69.9	-	-	-	-
98	2.50	3.157	0.463	1.062	32.7	67.3	-	-	-	-
98	2.75	3.180	0.460	1.066	35.6	64.4	-	-	-	-
98	3.25	3.231	0.453	1.071	42.2	57.8	-	-	-	-
98	3.75	3.289	0.445	1.074	49.7	50.3	-	-	-	-
98	4.75	3.412	0.428	1.064	65.7	34.3	-	-	-	-
99	Todos	3.676	9.393	1.000	100.0	-	-	-	-	-
107	1.06	2.977	0.524	1.184	16.9	16.8	17.1	49.1	-	-
107	1.25	3.019	0.517	1.890	17.9	17.8	18.0	46.3	-	-
107	1.50	3.085	0.506	1.195	19.4	19.2	19.5	41.9	-	-

Continuación de Tabla 3										
No. DE VARI LLA	DIA. DEL EMBOLO pulg d _p	PESO DE LAS VAR. lb.-pie m _v	CONSTANTE ELÁSTICA pulg/lb.-pie x 10 ⁻⁴ ·E _p	FACTOR DE FRECUENCIA A F _c	SARTA DE VARILLAS, % DE CADA DIAMETRO					
					1 1/8	1	7/8	3/4	5/8	1/2
107	1.75	3.158	0.494	1.197	21.0	21.0	21.2	36.9	-	-
107	2.00	3.238	0.480	1.195	22.7	22.8	23.1	31.4	-	-
107	2.25	3.336	0.464	1.187	25.0	25.0	25.0	25.0	-	-
107	2.50	3.435	0.447	1.174	26.9	27.7	27.1	18.2	-	-
107	2.75	3.537	0.430	1.156	29.1	30.2	29.3	11.3	-	-
108	1.06	3.325	0.447	1.097	17.3	17.8	64.9	-	-	-
108	1.25	3.345	0.445	1.101	18.1	18.6	63.2	-	-	-
108	1.50	3.376	0.441	1.106	19.4	19.9	60.7	-	-	-
108	1.75	3.411	0.437	1.111	20.9	21.4	57.7	-	-	-
108	2.00	3.452	0.432	1.117	22.6	23.0	54.3	-	-	-
108	2.25	3.498	0.427	1.121	24.5	25.0	50.5	-	-	-
108	2.50	3.548	0.421	1.124	26.5	27.2	46.3	-	-	-
108	2.75	3.603	0.415	1.126	28.7	29.6	41.6	-	-	-
108	3.25	3.731	0.400	1.123	34.6	33.9	31.6	-	-	-
108	3.75	3.873	0.383	1.108	40.6	39.5	19.9	-	-	-
109	1.06	3.839	0.378	1.035	18.9	81.1	-	-	-	-
109	1.25	3.845	0.378	1.036	19.6	80.4	-	-	-	-
109	1.50	3.855	0.377	1.038	20.7	79.3	-	-	-	-
109	1.75	3.867	0.376	1.040	22.1	77.9	-	-	-	-
109	2.00	3.880	0.375	1.043	23.7	76.3	-	-	-	-
109	2.25	3.896	0.374	1.046	25.4	74.6	-	-	-	-
109	2.50	3.911	0.372	1.048	27.2	72.8	-	-	-	-
109	2.75	3.930	0.371	1.051	29.4	70.6	-	-	-	-
109	3.25	3.971	0.367	1.057	34.2	65.8	-	-	-	-
109	3.75	4.020	0.363	1.063	39.9	60.1	-	-	-	-
109	4.75	4.120	0.354	1.066	51.5	48.5	-	-	-	-