

**ELABORACION DE CURVAS PARA UNA APROXIMACIÓN A LA SELECCIÓN
ÓPTIMA DE LAS UNIDADES DE BOMBEO MECANICO NO
CONVENCIONALES**

VIVIAN PAOLA GARCIA DIAZ

DIEGO ARMANDO PENAGOS SAAVEDRA

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR EL
TÍTULO DE:
INGENIERO DE PETROLEOS**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA INGENIERIA DE PETROLEOS
NEIVA – HUILA
2012**

**ELABORACION DE CURVAS PARA UNA APROXIMACIÓN A LA SELECCIÓN
ÓPTIMA DE LAS UNIDADES DE BOMBEO MECANICO NO
CONVENCIONALES**

VIVIAN PAOLA GARCIA DIAZ

Cód. 2007270182

DIEGO ARMANDO PENAGOS SAAVEDRA

Cód. 2005202333

**DIRECTOR DEL PROYECTO
ERVIN ARANDA ARANDA
INGENIERO DE PETRÓLEOS
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA INGENIERIA DE PETROLEOS
NEIVA – HUILA
2012**

Nota de Aceptación

ERVIN ARANDA ARANDA
Director del proyecto

Firma del jurado
RICARDO PARRA PINZON.

Firma del jurado
JAVIER MARTINEZ.

Neiva, de 2012

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	12
RESUMEN	13
1. GENERALIDADES DEL BOMBEO MECÁNICO	14
1.1 VENTAJAS DEL SISTEMA DE BOMBEO MECANICO	15
1.2 DESVENTAJAS DEL SISTEMA DE BOMBEO MECANICO	15
1.3 EQUIPO DE SUPERFICIE	15
1.3.1 Tipos de geometrías para unidades de bombeo mecánico	17
1.3.1.1 Unidad Convencional	17
1.3.1.2 Unidad Balanceada por aire	18
1.3.1.3 Unidad Mark II	19
1.3.1.4 Unidad Churchill Beam	21
1.3.1.5 Rotaflex	22
1.3.2 Equipos de subsuelo	23
2. DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO MECANICO	29
2.1 METODOS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO MECANICO	29
2.1.1 Método API RP-11L	29
2.1.2 Método convencional	31
2.1.3 Método de la ecuación de onda	32
2.1.4 Software ECHOMETER QRod	33
2.1.5 Software Lufkin Automation SROD	33
2.1.6 Software RODSTAR (Theta Enterprise)	35
2.2 PAUTAS A TENER ENCUESTA PARA UN BUEN DISEÑO	35
	37
3. ELABORACION DE CURVAS Y TABLAS PARA EL DISEÑO DE UNIDADES TIPO BALANCEADAS POR AIRE, MARK II Y CHURCHILL BEAM	37
3.1 PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO MECANICO NO CONVENCIONAL CON EL SOFTWARE RODSTAR-V	37

3.1.1	Información del pozo	37
3.1.2	Información de producción	38
3.1.3	Información de la bomba y tubing	38
3.1.4	Información de la sarta de varillas	39
3.1.5	Información de la unidad de bombeo	39
3.1.6	Información del motor	40
3.1.7	Reportes	40
3.1.8	Tabla general	43
3.1.9	Grafica de la unidad	45
3.1.10	Grafica general y tabla resumen	45
3.2	RESULTADOS DEL PROYECTO	46
3.2.1	Unidad de Bombeo mecánico Balanceada por aire	47
3.2.1.1	Grafica para la selección de unidades Balanceadas por aire	47
3.2.1.2	Tablas resumen de las unidades Balanceadas por aire	48
3.2.2	Unidad de bombeo mecánico Mark II	51
3.2.2.1	Grafica para la selección de unidades Mark II	51
3.2.2.2	Tablas resumen de las unidades Mark II	52
3.2.3	Unidad de bombeo mecánico Churchill Beam	57
3.2.3.1	Grafica para la selección de unidades Churchill Beam	57
3.2.3.2	Tablas resumen de las unidades Churchill Beam	58
4.	MODELO DE APLICACIÓN EMPLEANDO LAS TABLAS Y GRAFICAS ELABORADAS	60
4.1	EJEMPLO DE APLICACION PARA UNIDADES BALANCEADAS POR AIRE	60
4.1.1	Selección de tamaño de unidad	60
4.1.2	Datos para dimensionamiento	61
5.	CONCLUSIONES	64
6.	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFIA	66
	ANEXOS	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. Grados de varilla certificados por la API	23
TABLA 2. Niveles de asentamiento de las bombas de subsuelo de bombeo mecánico	26
TABLA 3. Ejemplo, tabla general de la unidad A-320-356-120	44
TABLA 4. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-320-256-120	48
TABLA 5. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-456-365-120	48
TABLA 6. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-640-427-144	49
TABLA 7. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-912-427-192	49
TABLA 8. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-1280-427-192	50
TABLA 9. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-1284-470-192	50
TABLA 10. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-114-173-64	52
TABLA 11. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-160-246-74	52
TABLA 12. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-228-256-100	53
TABLA 13. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-320-256-120	53
TABLA 14. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-456-256-120	54
TABLA 15. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-640-365-120	54
TABLA 16. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-912-305-216	55
TABLA 17. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-1280-427-216	55
TABLA 18. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-1824-427-216	56
TABLA 19. Tabla resumen correspondiente a la unidad B-16-53-30	58
TABLA 20. Tabla resumen correspondiente a la unidad B-25-67-36	58
TABLA 21. Tabla resumen correspondiente a la unidad B-40-76-48	58

TABLA 22.	Tabla resumen correspondiente a la unidad B-57-76-48	59
TABLA 23.	Tabla resumen correspondiente a la unidad B-80-13-59	59
TABLA 24.	Tabla comparación entre datos de pozo real y datos de diseño	63

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
FIGURA 1.	Sistema de Bombeo Mecánico	15
FIGURA 2.	Unidad Convencional	18
FIGURA 3.	Unidad Balanceada por aire	19
FIGURA 4.	Unidad Mark II	20
FIGURA 5.	Desfase de la manivela de la unidad Mark II	20
FIGURA 6.	Unidad Churchill Beam	22
FIGURA 7.	Unidad Rotaflex	23
FIGURA 8.	Ejemplo 1, sartas ahusadas	25
FIGURA 9.	Ejemplo2, sartas ahusadas	25
FIGURA 10.	Tipos de pistones para bombas de subsuelo de bombeo mecánico.	28
FIGURA 11.	Diseño de bombeo mecánico por método API	31
FIGURA 12.	Software Echometer QRod 2.4	34
FIGURA 13.	Software Lufkin Automation SROD	35
FIGURA 14.	Esquema de pautas a tener en cuenta para un buen diseño	35
FIGURA 15.	Información del pozo	38
FIGURA 16.	Información de producción	38
FIGURA 17.	Información de bomba y tubing	39
FIGURA 18.	Información de la sarta de varillas	39
FIGURA 19.	Información de la unidad de bombeo	40
FIGURA 20.	Información del motor	40
FIGURA 21.	Reporte en formato PDF	41

FIGURA 22.	Procedimiento para la simulación	42
FIGURA 23.	Ejemplo de aplicación para unidad balanceada por aire	61
FIGURA 24.	Reporte RODDIAG del pozo Usco 1	62

LISTA DE GRAFICAS

		Pág.
GRAFICA1.	Curva de la unidad A-320-256-120	45
GRAFICA 2.	Grafica para la selección de unidades Balanceadas por Aire.	47
GRAFICA 3.	Grafica para la selección de unidades Mark II	51
GRAFICA 4.	Grafica para la selección de unidades Churchill Beam	57

ANEXOS

		Pág.
ANEXO A.	MUESTRA DE TABLAS Y GRAFICAS GENERALES DE LAS UNIDADES	67
TABLA 1.	Tabla general de la unidad A-320-356-120	67
TABLA 2.	Tabla general unidad A-456-305-120	73
GRAFICA 1.	Curva de la unidad A-456-305-120	79
TABLA 3.	Tabla general unidad M-1280-427-216	80
GRAFICA 2.	Curva de la unidad M-1280-427-216	87
TABLA 4.	Tabla general unidad B-25-67-36	88
GRAFICA 3.	Curva de la unidad B-25-67-36	90

INTRODUCCION

El diseño de una unidad de bombeo mecánico, tiene gran influencia en el comportamiento total del sistema de producción, partiendo de esta idea y resaltando que el principal método de levantamiento artificial es el bombeo mecánico, se destaca la responsabilidad del ingeniero de hacer un diseño optimo de una forma sencilla y rápida que cumpla con las expectativas de producción.

Generalmente no se tienen presente todos los parámetros que afectan el dimensionamiento del sistema y este a su vez es bastante complejo y requiere un alto grado de experiencia en el campo operacional para acertar rápidamente; como consecuencia se tienen unidades que no tienen la capacidad para la producción total de fluido, o que han sido sobredimensionadas, lo cual se verá reflejado en inconvenientes operacionales y altos costos de mantenimiento y producción, que no son convenientes para ninguna compañía.

En este trabajo se reconocen y analizan todos los parámetros y variables que afectan el diseño de una unidad mediante el software RODSTAR que es el mas utilizado en la industria petrolera, dicha información permite elaborar las curvas para una selección óptima y eficaz de las diferentes unidades de bombeo mecánico no convencional.

RESUMEN

Actualmente el proceso de selección y optimización de los equipos de bombeo mecánico no convencionales son muy dispendiosos y demorados debido a la cantidad de variables que influyen en su comportamiento.

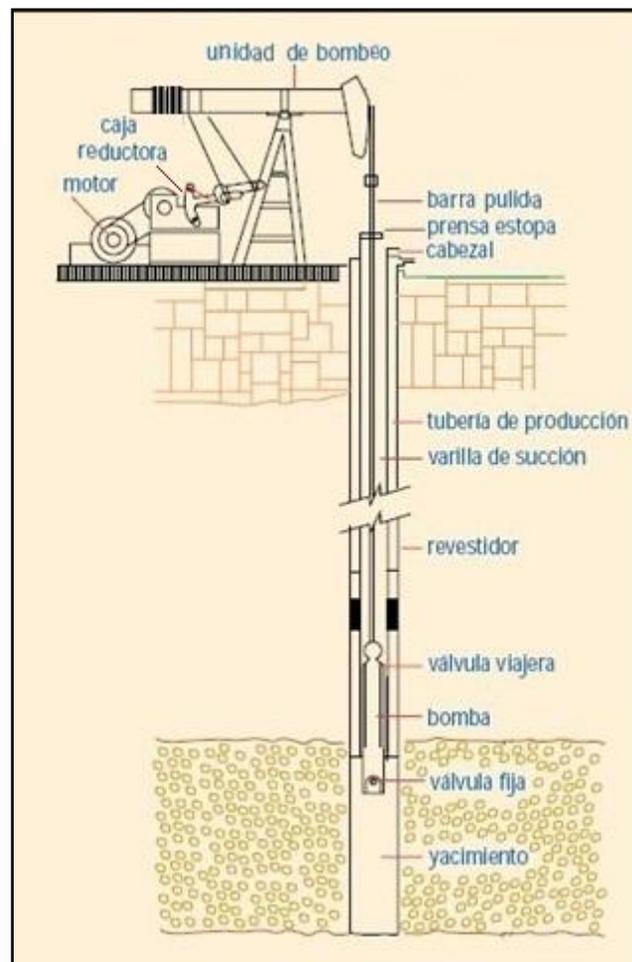
En este trabajo se hace un reconocimiento práctico con el uso del software especializado Rodstar de las variables más influyentes como son el caudal, la profundidad del pozo, diámetro del pistón, diámetro de varillas y velocidad de bombeo para cada tipo de unidad y se seleccionan los rangos en los cuales muestra su mejor comportamiento y mayor eficiencia; dicha información es validada, comparada y corregida en base a diseños y condiciones reales de campo para finalmente ser organizada en tablas y gráficos para cada unidad.

Estas gráficas y tablas permiten dar inicio al diseño de las unidades de superficie balanceadas por Aire, Mark II y Beam más eficiente para unas condiciones determinadas de caudal y profundidad del pozo de forma sencilla y eficaz.

1. GENERALIDADES DEL BOMBEO MECÁNICO

El principal método de levantamiento artificial es el bombeo mecánico debido a que es usualmente el más económico y el sistema más fácil de mantener cuando es diseñado y operado apropiadamente. El bombeo mecánico es un procedimiento de succión y transferencia casi continua del petróleo hasta la superficie, el cual consta de una unidad de superficie que transmite la potencia proveniente del motor a la sarta de varillas y a una bomba de subsuelo instalada en la tubería de producción a cierta profundidad del fondo del pozo. Este tipo de sistema de levantamiento artificial tiene su principal aplicación en el ámbito mundial en la producción de crudos pesados y extra pesados, aunque también se usa en la producción de crudos medianos y livianos.

Figura 1. Sistema de bombeo mecánico



El bombeo mecánico es el método más antiguo y con más unidades distribuidas a través de todo el mundo; hoy en día gracias al amplio desarrollo tecnológico existen otros métodos de levantamiento artificial muy eficientes, sin embargo debido a la sencillez del equipo utilizado, de las mejoras en diseños y nuevas geometrías de unidades de levantamiento y de las ventajas que estas presentan, el bombeo mecánico se sigue manteniendo en el negocio de la extracción de hidrocarburos.

1.1 VENTAJAS DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

- Fácil de operar y de hacer mantenimiento
- Se puede cambiar fácilmente de rata de producción por cambio en la velocidad de bombeo o longitud del stroke.
- Puede bombear el pozo a una muy baja presión de entrada para obtener la máxima producción.
- Usualmente es la más eficiente forma de levantamiento artificial.
- Fácil intercambio de unidades de superficie.
- Se pueden usar motores a gas como motores primarios si la electricidad no está disponible.
- Permite ser optimizado mediante el uso de software especializado de diseño y diagnóstico como el Rodstar.

1.2 DESVENTAJAS DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

- No es conveniente en pozos con alta desviación.
- No puede ser usada en pozos off shore por los grandes equipos de superficie y la limitada capacidad de producción comparada con otros métodos.
- No puede funcionar con excesiva producción de arena.
- La eficiencia volumétrica cae drásticamente cuando se tiene gas libre.
- La rata de producción cae drásticamente con la profundidad comparado con otros métodos de levantamiento artificial.
- No es oportuno en áreas urbanas debido al gran tamaño de la unidad y al demasiado ruido que genera.

1.3 EQUIPO DE SUPERFICIE

La unidad de superficie de un equipo de bombeo mecánico tiene por objeto transmitir la energía desde su instalación en el cabezal del pozo hasta la profundidad de asentamiento de la bomba de subsuelo con el objetivo de proporcionar el movimiento recíproco del pistón para elevar los fluidos desde el fondo hasta la superficie. La unidad de bombeo tiene una gran influencia en el

comportamiento del sistema debido a que afecta las cargas en la barra pulida, longitud del stroke, tamaño de la unidad motriz y consumo de energía. Actualmente existe una amplia variedad de geometrías de unidades, tamaños y longitudes de carrera que hacen necesario tener un conocimiento del posible comportamiento frente a las condiciones de pozo como el caudal deseado, profundidad de la bomba, cargas de varillas, tipos de varillas, tipos de bombas de subsuelo, diámetro del pistón, diámetro de la tubería y propiedades del fluido como la densidad, viscosidad y relación gas líquido (RGL), como variables más influyentes.

Productividad: La unidad debe ser capaz de manejar la producción total deseada. Se busca diseñar el equipo con una capacidad un poco mayor al caudal deseado para contrarrestar las pérdidas por desgaste del equipo y por imprecisiones de los datos. Por otro lado, hay que tener especial cuidado con el sobre dimensionamiento del equipo en el cual caudales de producción superiores a la capacidad de aporte del pozo ocasionan el achicamiento y problemas como el golpe de fluido que finalmente causan el rápido deterioro de la bomba, sarta de varillas y equipo de superficie.

Profundidad: La unidad de superficie debe soportar las cargas originadas por los fluidos y equipos de bombeo de pozo. La profundidad del pozo es un factor determinante de los esfuerzos de tensión, de elongación y del peso. Grandes profundidades necesitan el empleo de bombas de subsuelo de largos recorridos. Las unidades de superficie sub-diseñadas, limitan las condiciones del equipo de producción y en consecuencia la tasa de producción del pozo. Los balancines sobre-diseñados, poseen capacidad, carga, torque y carrera que están muy por encima de lo requerido pueden resultar muchas veces antieconómicos.

1.3.1 TIPOS DE GEOMETRÍAS PARA UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO

1.3.1.1 UNIDAD CONVENCIONAL

Las unidades convencionales basan su geometría en un sistema de palanca

Figura 2. Unidad Convencional



LUFKIN INDUSTRIA S.A

CLASE I, es decir con un punto de apoyo en el medio de la viga viajera y emplea pesas en las manivelas para el contrabalanceo de la unidad.

Ventajas de la unidad convencional

- Bajos costos de mantenimiento
- Bajo costo comparado con otro tipo de unidades.
- Usualmente operan mejor con varillas de fibra de vidrio que la unidad MarkII u otro tipo de unidades.
- Pueden bombear más rápido que otro tipo de unidades
- Requiere contrapesas más livianas que las Mark II.
- Sentido de rotación horario y anti horario.

Desventajas de la unidad convencional

- Para el caso de las unidades mas grandes, estas no son tan eficientes como las unidades Mark II u otro tipo de unidades.
- Para las mismas condiciones de carga las unidades convencionales pueden necesitar cajas reductoras mas grandes que otro tipo de unidades (especialmente con varillas de acero).

1.3.1.2 UNIDAD BALANCEADA POR AIRE

Figura 3. Unidad Balanceada por aire



LUFKIN INDUSTRIA S.A

Este tipo de unidades son caracterizadas por una geometría de palanca tipo III con apoyo en uno de los extremos y el contrabalanceo de la unidad es proporcionado por la fuerza de presión del aire comprimido contenido dentro de un cilindro, que actúa como un pistón conectado al balancín.

Ventajas

- Es más compacta y de fácil balance comparado con otro tipo de unidades.
- Los costos de transporte son muy bajos respecto a otro tipo de unidad.
- Se encuentran disponible en tamaños más grandes con respecto a otras unidades.
- Pueden rotar en sentido horario o anti horario

Desventajas

- Es más compleja y requiere mayor mantenimiento del cilindro.

- La condensación de agua en el cilindro de aire puede causar problemas.
- La caja reductora puede averiarse si el cilindro de aire pierde presión.

1.3.1.3 UNIDADES MARK II

Figura 4. Unidad Mark II



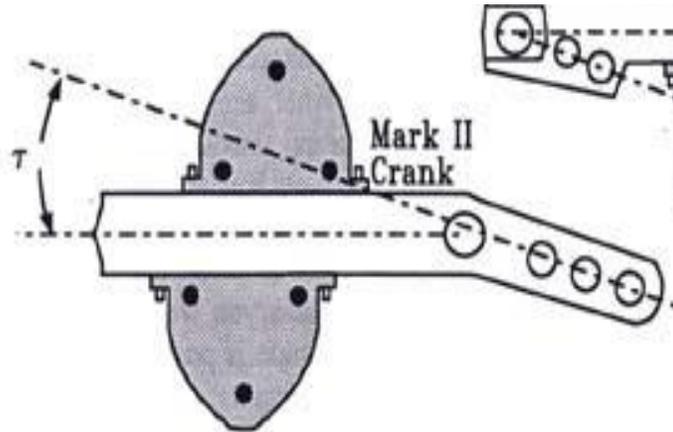
LUFKIN INDUSTRIA S.A

Las unidades Mark II tienen su punto de apoyo en el extremo de la unidad, en el cual se instala el cojinete ecualizador creando un sistema de palanca tipo III. Tiene una manivela desfasada, la cual produce un contrabalanceo más efectivo. Independientemente de estos factores, las unidades Mark II producirán un torque uniforme trabajando en forma conjunta, reduciendo un 35% del torque en la caja reductora.

El propósito del ángulo de desfase de la manivela es ayudar a reducir el torque en la caja de engranaje mejorando la fase entre las cargas en la barra pulida y el momento de las contrapesas.

Manivela de la unidad Mark II

Figura 5. Desfase de la manivela de la unidad Mark II



Manual de bombeo mecánico avanzado

En unidades Mark II, debido al desfase angular, es más rápido en la carrera descendente lo que se traduce en mayor aceleración y menores cargas mínimas en la barra pulida. En crudos viscosos, esta característica debe ser tomada en cuenta para evitar velocidades que puedan generar flotación de la sarta de varillas.

Ventajas

- En muchos casos maneja bajos torques (con varillas de acero) comparado con unidades convencionales.
- Puede costar menos (5% hasta 10%) comparado con tamaños convencionales.
- En muchos casos es más eficiente que las unidades convencionales.

Desventajas

- En muchas aplicaciones, la bomba no puede operar tan rápido como las unidades convencionales.
- Puede rotar únicamente en contra del sentido de las manecillas del reloj.
- Puede causar más daño a las varillas y la bomba en caso de golpe de fluido.
- Puede someter la parte baja de la sarta a una severa compresión, lo que puede ocasionar fallas por pandeo.
- Puede tener altos torques comparados con unidades convencionales cuando se tiene una sarta de varillas de fibra de vidrio.

1.3.1.4 UNIDADES CHURCHILL BEAM

Figura 6. Unidad Churchill Beam



LUFKIN INDUSTRIAS S.A

Las unidades de bombeo mecánico Churchill Beam son las más pequeñas que existen y son diseñadas especialmente para pozos pocos profundos y bajos caudales de producción. Las unidades Beam se caracterizan principalmente porque las contrapesas van ubicadas al final de la viga viajera detrás del ecualizador.

Ventajas

- Ideales para ser instaladas en pozos menores a 2000 ft de profundidad
- Unidades pequeñas
- Bajo consumo de energía

Desventajas

- Solo aplica en pozos someros
- Producción de caudales menores a 700 BPD

1.3.1.5 UNIDAD ROTAFLEX

Figura 7. Unidad Rotaflex



LUFKIN INDUSTRIAS S.A

La unidad Rotaflex es una unidad de bombeo de carrera larga que proporciona la posibilidad de trabajar a muy bajos ciclos por minuto lo cual permite un completo llenado de la bomba y una menor carga dinámica. El bombeo con la unidad Rotaflex reduce la carga estructural sobre el equipo y alarga la vida útil de la instalación de fondo de pozo ya que la sarta de varillas de bombeo trabaja a velocidades relativamente constantes. La banda de carga para servicio pesado que conecta el sistema de potencia con la sarta de varillas de bombeo, actúa como amortiguador de choques, lo que reduce eficazmente la fatiga de todo el sistema.

APLICACIONES

- Pozos de alto caudal y alta carga dinámica
- Pozos desviados y horizontales
- Pozos con alta frecuencia de intervención por problemas de fondo
- Operaciones que requieren de ahorro de energía

1.3.2 EQUIPO DE SUBSUELO

El equipo de subsuelo es el que constituye la parte fundamental de todo el sistema de bombeo mecánico y está conformado por:

- La tubería de producción
- La sarta de varillas
- La bomba de subsuelo

Tubería de Producción

La tubería de producción tiene por objeto conducir el fluido que se está bombeando desde el fondo del pozo hasta la superficie. Entre los diámetros más comunes se encuentra la de 1.9", 2 3/8", 2 7/8" y 3 1/2". En cuanto a la resistencia, generalmente la tubería de producción es menos crítica debido a que las presiones del pozo se han reducido considerablemente para el momento en que el pozo es condicionado para bombear.

Varillas de Succión

La sarta de varillas es el enlace entre la unidad de bombeo instalada en superficie y la bomba de subsuelo. Las principales funciones de las mismas en el sistema de bombeo mecánico son:

- Transferir el movimiento recíprocante de la barra pulida a la bomba de subsuelo.
- Soportar las cargas que genera el peso del fluido y fricción con la tubería.
- Accionar la bomba de subsuelo para la carga y descarga de fluido.

Existen básicamente varillas de acero y de fibra de vidrio, estas últimas mucho más livianas y resistentes a la corrosión. Entre los diámetros más utilizados están las de 1 ¼, 1 1/8, 1, 7/8, ¾, y 5/8. Y longitudes de 25 y 30 pies para varillas en acero y 27,5 pies para varilla de fibra de vidrio. La resistencia de las varillas juega uno de los factores más importantes a la hora de diseñar un sistema de bombeo mecánico debido a que de esta depende la máxima profundidad del pozo en el que aplique y la cantidad de fluido que se pueda levantar hasta superficie. La tabla 1 muestra los grados de varillas certificados por la API con sus respectivas resistencias máximas y mínimas a la tensión.

Tabla 1. Grados de varillas certificados por la API

GRADO	Resistencia mínima (psi)	Resistencia máxima (psi)
K	85.000	115.000
C	90.000	115.000
D	115.000	140.000

Para pozos de grandes profundidades y alto caudal en muchos casos aplican con gran éxito las varillas no API de alto grado como la Norris 97(N97), Electra(EL) y la Upco 50K que presenta resistencia máxima a la tensión aproximadas a 200.000 psi aunque se debe tener especial cuidado por su alta susceptibilidad a la corrosión

Varillas continuas (corod)

Las varillas continuas ofrecen la gran ventaja de que no tienen acoples y pueden ser utilizadas en pozos desviados o en otras aplicaciones donde el roce varilla-tubería sea un problema. Sus diámetros varían en 1/16 desde la 19/16 a la 10/16

Sartas ahusadas

Son sartas de varillas compuestas por tramos de varillas de diferentes diámetros, siendo las de mayores diámetros las que se encuentran más cerca al cabezal del pozo. El API ha desarrollado un código de identificación de la sarta de varillas el cual consta de dos dígitos, el primero representa el diámetro de la sarta de mayor diámetro y el segundo la sarta de menor diámetro.

Para las varillas API, cuyos diámetros varían en 1/8, ambos dígitos refieren al primer numeral de diámetro de la sarta en octavos de pulgada.

Ejemplo1: Una sarta código 86 tiene 3 secciones

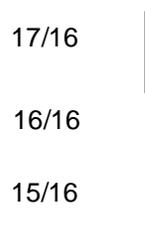
Figura 8. Ejemplo 1, sartas ahusadas



Para las varillas corod (varilla continua) ambos dígitos refieren al segundo número de diámetro de la varilla.

Ejemplo2: Una sarta corod código 75 tiene 3 secciones

Figura 9. Ejemplo 2, sartas ahusadas



BOMBA DE SUBSUELO

Es un equipo de desplazamiento positivo (reciprocante), la cual es accionada por la sarta de varillas desde la superficie. Los componentes básicos de la bomba de subsuelo son simples, pero construidos con gran precisión para asegurar el intercambio de presión y volumen a través de sus válvulas. Existen básicamente dos tipos de bombas:

Bombas de Tubería (T)

En este tipo de bomba, el barril y el sistema de anclaje forman parte de la sarta de producción. La mayor desventaja de esta bomba es que hay que hacer un viaje para sacar la tubería cuando se necesita cambiarla. Sólo es posible anclarlas al fondo y el barril siempre es estacionario.

Bombas de Varillas o Insertadas (R)

Estas bombas se corren como un todo con las varillas y se asientan en el anclaje previamente colocado en la tubería de producción. Las bombas tipo R pueden ser de barril estacionario o movable. Así mismo, pueden tener anclaje inferior o superior. La bomba de subsuelo está conformada generalmente por los siguientes componentes:

Barril o camisa

Barril de pared gruesa: son recomendados para pozos de altas profundidades y bombas de gran diámetro que manejan altos volúmenes de fluido.

Barril de pared delgada: son utilizados para pozos pocos y medianamente profundos y bombas de pequeño diámetro que manejan pequeños volúmenes de fluidos.

El nivel de asentamiento de las bombas está en función del diámetro de la bomba y del espesor de pared. Entre menor sea el diámetro y mayor sea el espesor de pared del barril de la bomba, esta aplica para mayores rangos de profundidades.

Tabla 2. Niveles de asentamiento de las bombas de subsuelo de bombeo mecánico

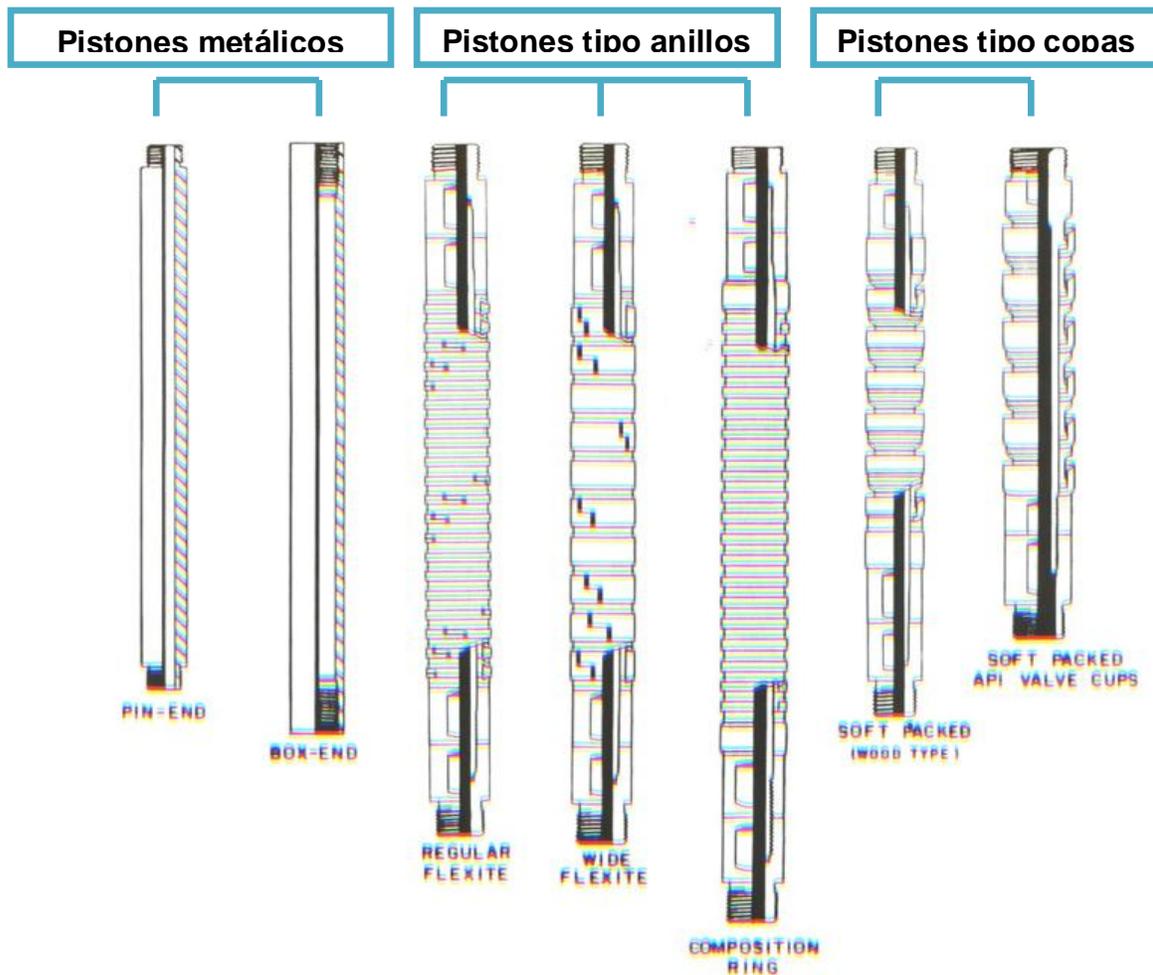
Anclada en el fondo, bomba de pared gruesa		
Pistón (plg)	Espesor de la pared	Profundidad máxima
1.00	0.125	11540
1.06	0.125	11000
1.25	0.188	13350
1.50	0.188	11570
1.75	0.250	11970
2.00	0.158	7785
2.25	0.25	10485
Anclado en el fondo, bomba de pared delgada		
2.00	0.125	6400
2.50	0.125	5240
Bombas de tubería		
1.75	0.25	9600
2.25	0.25	7870
2.75	0.25	6660

El pistón

Pistones metálicos: son utilizados generalmente para pozos profundos y donde la producción de sólidos no es significativa debido a que los finos del fluido desgastan rápidamente la pared del pistón. La pared puede ser de acero, cromada o en metal pulverizado (aleación de Níquel, Boro y Silicio).

Pistones no metálicos (Soft packet): son recomendados generalmente para pozos poco o medianamente profundos y fluidos con alta presencia de sólidos. Los pistones no metálicos vienen de tipo copas para pozos someros y tipo anillos para pozos medianamente profundos.

Figura 10. Tipo de pistones para bombas de subsuelo de bombeo mecánico



HARBISON FISHER

Válvulas con sus asientos y bolas

Las válvulas son las encargadas de controlar la entrada y descarga de fluido por la cámara de compresión forma por el barril y el pistón. La acción del fluido llena la cámara a través de la válvula fija y la vacía a través de la válvula viajera.

Bolas y asientos de acero inoxidable: Presentan mejor comportamiento En pozos con ambientes poco corrosivos y sin producción de arena

Bolas y asientos de carbono o cerámica: son recomendadas generalmente para fluidos altamente abrasivos

Bolas de cerámica en asientos de carbono: Son utilizados en pozos con

problemas severos de abrasión, tales como producción excesiva de arena.

Jaulas

La función de las jaulas es permitir que la bola realice un desplazamiento adecuado dentro de ella para permitir la entrada de fluido en la carrera descendente del pistón, y evitar el escape del fluido en la carrera ascendente. Las jaulas vienen de dos tipos:

Jaulas abiertas: causan menor restricción al flujo, utilizadas principalmente en fluidos altamente viscosos.

Jaulas cerradas: limitan el recorrido de la bola pero causan mayor restricción al flujo.

ANCLAJE O ASENTAMIENTO

La función del anclaje es asegurar la bomba a la tubería de producción. Estas Vienen de dos tipos:

ANCLAJE TIPO COPAS: Utiliza copas de plástico para provocar el sello, lo que lo hace susceptible a las altas temperaturas.

ANCLAJE MECÁNICO: Utiliza resortes de acero para provocar el sello, lo que lo hace susceptible a fluidos altamente corrosivos.

2. DISEÑO DEL SISISTEMA DE BOMBEO MECANIICO

El objetivo de diseñar el sistema de bombeo mecánico es escoger el equipo de superficie, de subsuelo, la velocidad de bombeo y la longitud de la carrera que permita extraer el caudal deseado en el mayor punto de eficiencia, para lo cual es de gran importancia entrar a considerar los siguientes parámetros:

- Tasa de Producción
- Costos de capital
- Cargas de la varillas
- Cargas en la caja de engranaje
- Eficiencia del sistema y costos de energía.

Para obtener un buen diseño se debe tener pleno conocimiento de las condiciones de superficie, del pozo y de las propiedades del fluido a producir. Esto permitirá hacer un análisis más profundo del sistema en general y correlacionar de forma precisa cada una de las propiedades que intervienen en el comportamiento del sistema, lo que permitirá obtener resultados veraces de forma eficaz

2.1 METODOS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR BOMBEO MECANICO

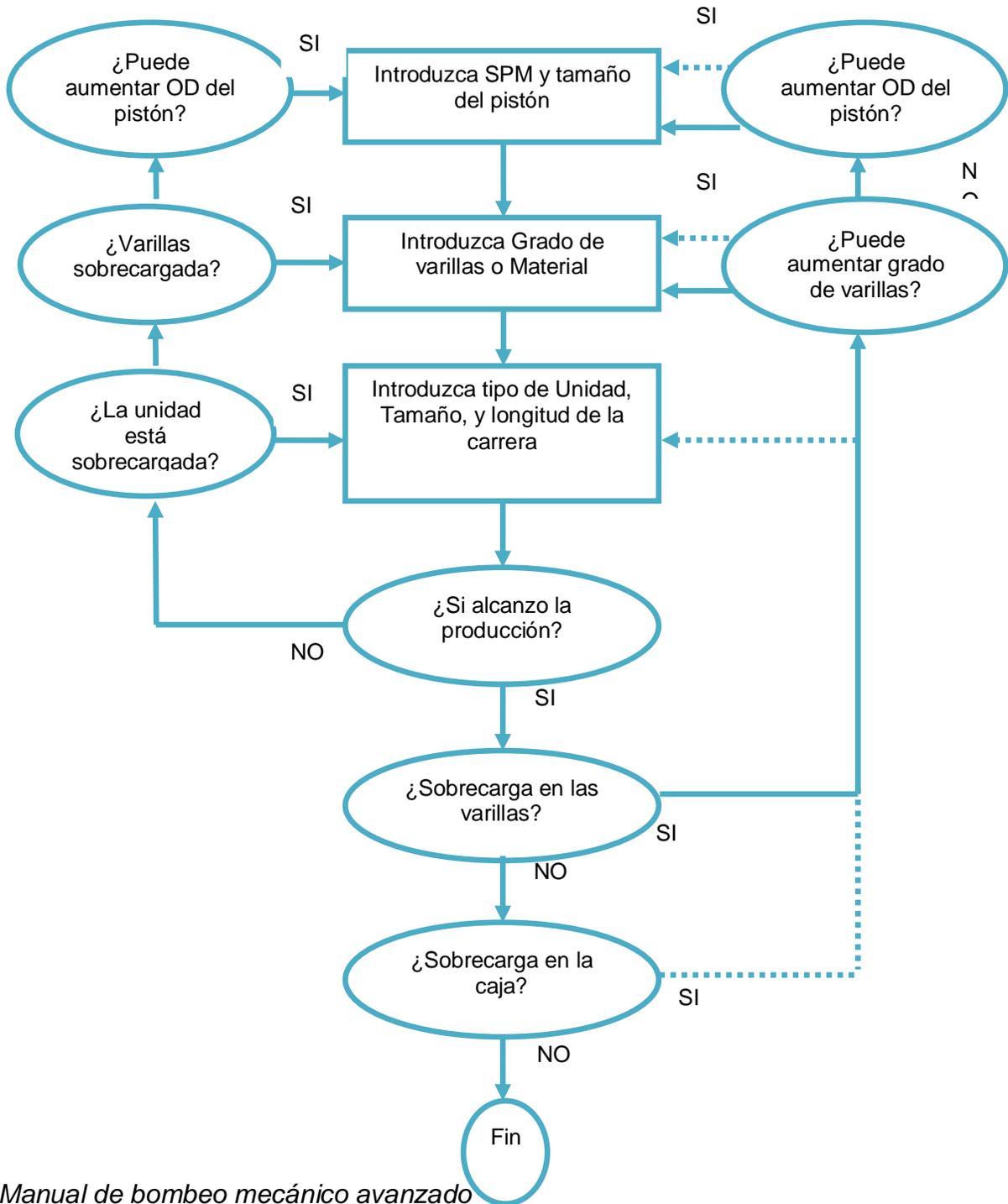
El principio para diseñar una unidad de bombeo mecánico no convencional es similar a la de una unidad convencional; inicialmente se desarrollaron métodos de diseño basados en las “Prácticas recomendadas 11L” de la API, actualmente existen métodos más exactos como la ecuación de onda, que ha sido implementada en varios software para lograr rápida y efectivamente un buen diseño. A continuación se muestran diferentes métodos de diseño de bombeo mecánico:

2.1.1 MÉTODO API RP-11L

En 1967 la API publicó “Recommended Practice 11 L” desde su aparición este se ha convertido en el método de diseño más popular, aunque el método tiene muchas limitaciones debido a las suposiciones realizadas cuando fue desarrollado; en este método se simuló el comportamiento de la sarta de varillas en diferentes condiciones de bombeo, en los cuales se obtuvieron datos que finalmente fueron tabulados para luego generar cartas dinagráficas de fondo y de superficie; la figura 11 representa el diagrama de flujo para el diseño de sistema de bombeo mecánico por el método API en el cual se observa que se inicia ingresando el diámetro del pistón y la velocidad de bombeo y otra serie de parámetros para finalmente evaluar si se logra el caudal deseado; de no cumplirse esta condición se deben volver a cambiar todos los datos ingresados, lo que hace

de este método iterativo un proceso muy tedioso y largo que puede tomar mucho tiempo

Figura 11. Diseño de bombeo mecánico por método API



Manual de bombeo mecánico avanzado

Este método hace las siguientes consideraciones:

- Llenado completo de la bomba de subsuelo (sin interferencia de gas o golpe de fluido)
- Varillas de acero con diseño API.
- Unidades de bombeo de geometría convencional.
- Poco deslizamiento del motor.
- Unidad perfectamente balanceada.
- No debe existir grandes efectos de fricción o aceleración del fluido.
- No hay efectos por aceleración del fluido.
- Tubería de producción anclada.
- Profundidades mayores a 2000 pies.

El método API que fué desarrollado inicialmente para unidades de superficie de geometría convencional, posteriormente fué sometido a algunos ajustes de constantes y variables para la ampliación del uso del método a geometrías como la balanceada por Aire y Mark II, pero de igual forma sus resultados siguen siendo cuestionables.

2.1.2 METODO CONVECIONAL

Alrededor de los años 1959 Craft, Holden and Graves publicaron en su libro “well desing, drilling and producción” desarrollaron un método rápido y sencillo de aplicar, con el cual a partir del caudal deseado y la profundidad de la bomba se pueden escoger los datos de entrada para el diseño del sistema de bombeo mecánico como son:

- Tipo de unidad API convencional
- Longitud de carrera
- Velocidad de bombeo
- Diámetro de la tubería
- Diámetro del pistón
- Diámetro y longitud de cada sección de varillas

Desventajas:

- El método solo aplica para unidades convencionales
- Debido a la antigüedad del método, para su desarrollo no se tuvieron en cuenta de forma precisa cada una de las variables que influyen en el comportamiento del sistema.
- Posee todas las limitaciones del método API.

Teniendo en cuenta las ventajas del método convencional en cuanto a la facilidad y sencillez, en este proyecto se adopta la misma metodología en el cuales se elaboran las curvas y tablas para el diseño de unidades balanceadas por aire, Mark II y Beam utilizando el software Rodstar V que soluciona todos los problemas y desventajas que presenta el método convencional.

2.1.3 MÉTODO DE LA ECUACIÓN DE ONDA

$$\frac{\delta^2 u(x, t)}{\delta t^2} = \alpha^2 \frac{\delta^2 u(x, t)}{\delta x^2} - c \frac{\delta u(x, t)}{\delta t}$$

Donde:

α =Velocidad del sonido en el acero.

c = coeficiente de amortiguación (1/seg)

t = tiempo (seg)

x =distancia desde la barra pulida (pies)

$u(x, t)$ = desplazamiento a partir de la posición de equilibrio (pies)

El método de la ecuación de onda representa el estado del arte en el diseño de sistemas de levantamiento artificial por bombeo mecánico. Este método aplica una ecuación diferencial parcial que intenta modelar el comportamiento de la sarta de varillas pero que no tiene solución exacta, lo que hace necesario el uso de programas computacionales para poder llegar a la solución.

Hoy en día se cuenta con varios programas de diseño de bombeo mecánico como el Rodstar, el Echometer, entre otros que utilizan la ecuación de onda y nos permiten aprovechar las innumerables ventajas entre las cuales se encuentran:

- Permite realizar diseños para unidades convencionales, balanceadas por aire, Mark II, Reverse Mark, Rotaflex, Dina Pump, Beam, entre otras.
- Realizar diseños para sarts de varillas de fibra de vidrio.
- Diseños con motores de alto deslizamiento.
- Determinar la condición de unidades fuera de desbalance
- Bombas parcialmente llenas.
- Simular sistemas con problemas de golpe de fluido o interferencia de gas.
- Realizar diseños para pozos de profundidades menores y mayores a 2000 ft.

La ecuación de onda puede tener una aplicación de análisis y diagnostico de sistemas de bombeo mecánico con la cual se puede calcular la carta dinagráfica de fondo a partir de la carta dinagráfica de superficie o también puede usarse

como método predictivo o de diseño en el cual se puede determinar la carta dinográfica para un sistema dado.

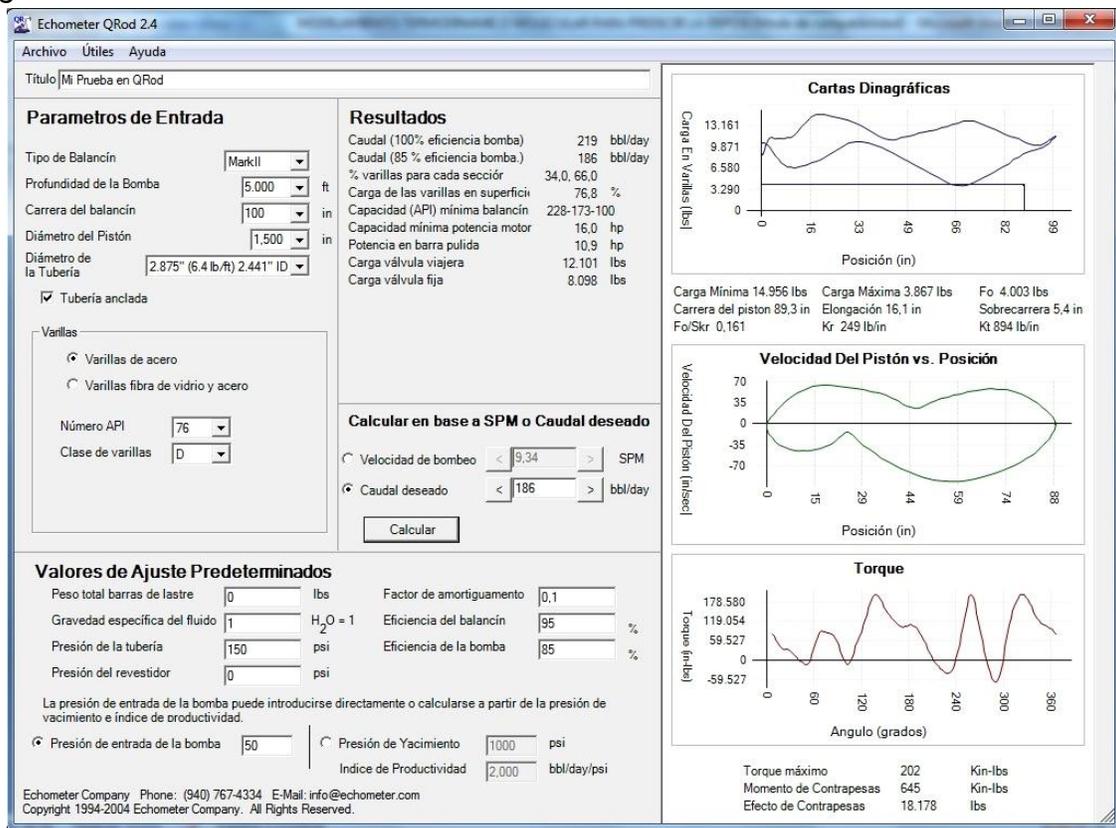
2.1.4 SOFTWARE ECHOMETER QRod

La tecnología de este software usa la ecuación de onda para graficar con precisión las cargas dinámicas de la bomba y de superficie; para una profundidad de bomba determinada y la producción deseada el software muestra los efectos al cambiar los parámetros como el diámetro del tubing, longitud del stroke, velocidad de la bomba, y diámetro de la bomba.

Entre los datos requeridos son: geometría de la unidad de superficie ya sea convencional Mark II, Reverse Mark o unidades balanceadas por aire.

Los datos obtenidos por este software incluyen: desplazamiento de la bomba, cargas en la válvula viajera y válvula fija, esfuerzos de carga de las varillas, torque y requerimientos de potencia del motor.

Figura 12. Software Echometer QRod 2.4



ECHOMETER

2.1.5 SOFTWARE LUFKIN AUTOMATION SROD

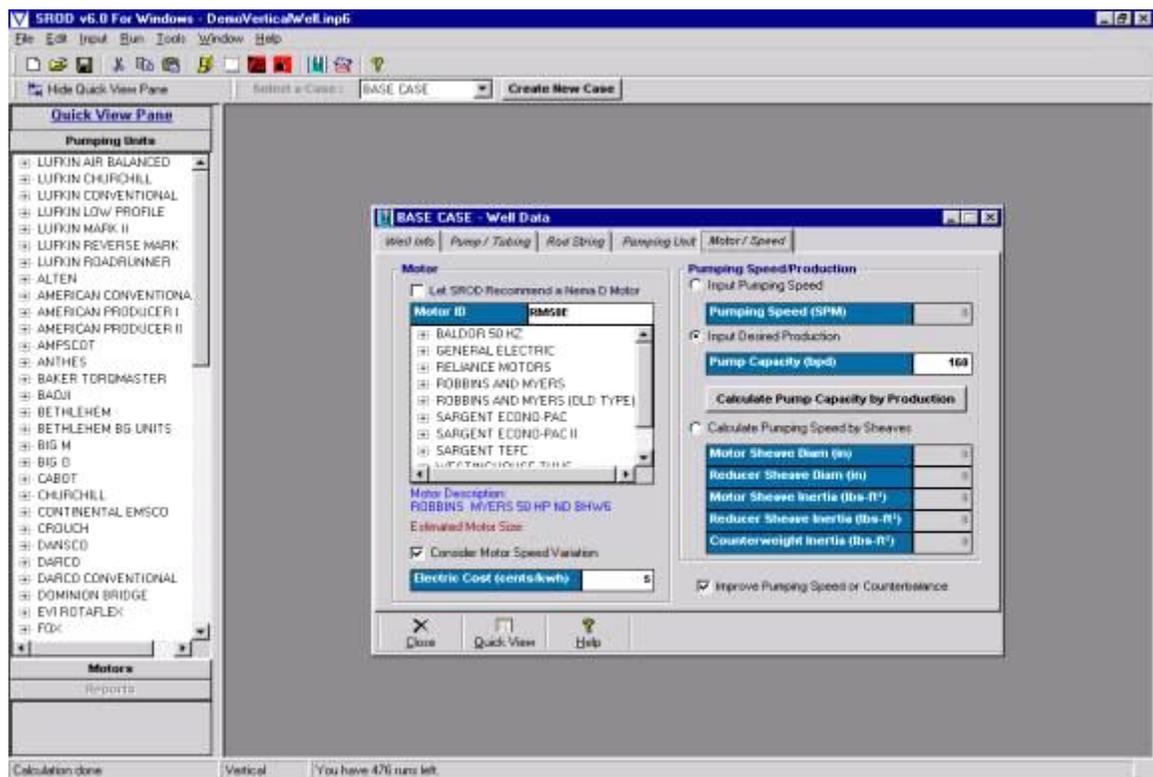
El software de diseño y predicción en pozos de sistemas de bombeo mecánico, SROD, es utilizado para conocer el comportamiento de la unidad de bombeo y

del pozo. Puede ser utilizado en pozos verticales, desviados obteniendo datos como torque, carga estructural, producción, contrapeso, consumo de energía, estado de las varillas, tendencia al pandeo, etc.

Algunas de sus características para el diseño y predicción son:

- Entrada de llenado de la bomba en porcentaje
- Estimar un tamaño de la unidad de bombeo antes de seleccionar
- Estimar un motor antes de seleccionar un motor
- Programa de contrapeso, actualizado con el software C-Balance de datos del fabricante
- Se usa motor Nema-D
- Los datos de estimación de la inercia como valores por defecto en la entrada de la base de datos de usuario
- Permite diseños cónicos
- Tener en cuenta longitudes de varillas de 30 o 25 pies
- Base de datos actualizada para la unidad de bombeo, motor, datos eléctricos, diseño de sarta de varillas .

Figura 13. Software Lufkin Automation SROD



LUFKIN INDUSTRIA S.A

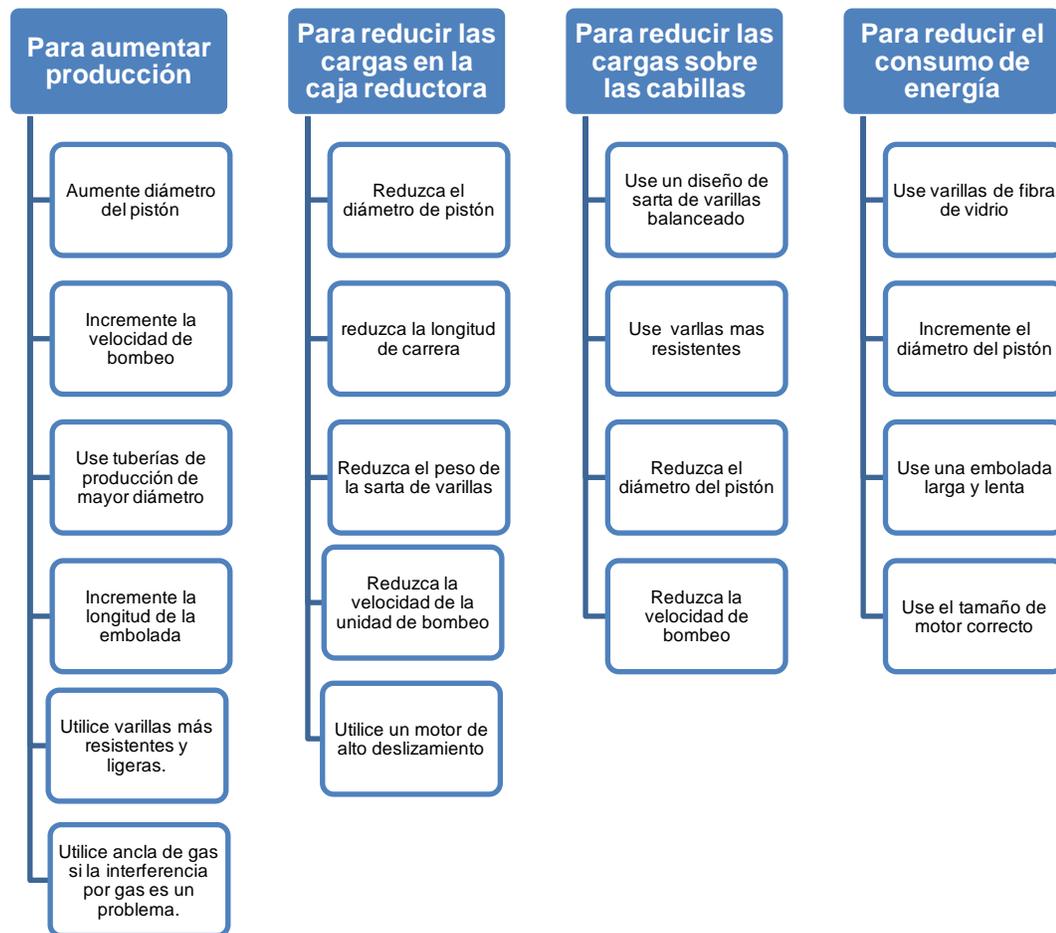
2.1.6 SOFTWARE RODSTAR (THETA ENTERPRISE)

Este software modela correctamente toda la geometría de las unidades de bombeo mecánico usando la ecuación de onda para la sarta de varillas; Theta Enterprise maneja dos versiones del software: RODSTAR-V y RODSTAR-D, el primero se usa para diseñar pozos verticales y RODSTAR-D para sistemas de bombeo con pozos desviados.

RODSTAR contiene datos para diversos tipos de bomba, tamaño de varillas, grado de varillas, unidades de superficie, tamaño de tubería, y cuenta además con modelos matemáticos para las cargas dinámicas del fluido en la tubería que permiten obtener diseños óptimos. Se puede introducir un diseño del sistema propio, o pedirle al programa que calcule los SPM y el tamaño del pistón para obtener la producción objetivo.

2.2 PAUTAS A TENER EN CUENTA PARA UN BUEN DISEÑO

Figura 14. Esquema de pautas a tener en cuenta para un buen diseño



EL esquema anterior nos brinda unas nociones claras de que parámetros o variables debemos modificar para converger rápidamente en los resultados que deseamos obtener como lo es el caudal, cargas en la caja reductora, cargas en las varillas y consumo de energía.

3. ELABORACION DE CURVAS Y TABLAS PARA EL DISEÑO DE UNIDADES DE BOMBEO MECANICO NO CONVENCIONALES

Para la elaboración de este proyecto se utilizo el software RODSTAR-V que representa con exactitud el estado del arte en diseño unidades de bombeo mecánico para pozos verticales, este software utiliza el modelo de ecuación de onda para simular el comportamiento de la sarta de varillas junto a modelos matemáticos de unidades de bombeo que pueden simular cualquier geometría de unidades.

Se tienen en cuenta condiciones óptimas de bombeo para alcanzar la producción a profundidades dadas tales como bomba llena, sin problemas de golpe de fluido, y unidad completamente balanceada; se asumen condiciones críticas del pozo con el fin de homogenizar y hacer más fácil el análisis de resultados.

3.1 PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE BMNC CON EL SOFTWARE RODSTAR-V

En cada paso se mencionan las consideraciones de condiciones críticas del pozo para el efecto anteriormente mencionado.

3.1.1 Información del pozo

En esta ventana además de ingresar datos generales del pozo, se consideran condiciones críticas como:

Condiciones de la bomba: bomba llena

Eficiencia volumétrica de la bomba: 85%

Tiempo de ejecución: 24 horas

Diámetro de la barra pulida: 1 ½"

Presión de tubing: 150 psi

Presión de casing: 0 psi

Corte de agua: 90 %

Gravedad específica del agua: 1

Gravedad API: 20

Profundidad de la bomba varía de 500 ft a 11000 ft

Figura 15: información de pozo

The screenshot shows the 'Well Information' window in the RODSTAR-V 3.3 software. The window title is 'RODSTAR-V 3.3 - demo_RSv2.rsvx - [Well Information]'. The interface includes a menu bar (File, Edit, Run!, Tools, Window, Help) and a toolbar with various icons. The main area is divided into several sections:

- Company information:** Company name: usco, Well name: usco1, User name: Vivian-Diego, Comment: (empty).
- Date:** sábado, 10 de septiembre de 2010.
- Pump parameters:** Pump depth (ft): 6000, Run time (hrs/day): 24, Stuffing box friction (lbs): 100, Pump load adjustment (lbs): 0, Polished rod diameter: 1 1/2".
- Pump condition:** Radio buttons for Full pump (selected), Fluid pound, Gas interference, and Calculate pump condition and fillage.
- Efficiency and fillage:** Pump efficiency (%): 90, Pump fillage (%): (empty).
- Pressure and Gravity:** Tubing pressure (psi): 50, Casing pressure (psi): 50, Water cut (%): 90, Water specific gravity: 1.0, Oil gravity (API °): 20, Fluid specific gravity: (empty).
- Calculate:** A checked checkbox labeled 'Calculate'.

Software "RODSTAR"

3.1.2 Información de producción

Se especifica el nivel de fluido sobre la bomba, y se ingresa la producción deseada en Barriles de fluido por día, variando este ultimo parámetro de 50 a 3000 BFPD en pasos de 100BFPD.

Figura 16: información de producción

The screenshot shows the 'Production Information' window in the RODSTAR software. The window title is 'Production Information'. It features a radio button selection for the calculation method:

- Enter fluid level: Fluid level (ft from surface): 6000
- Enter pump intake pressure
- Calculate pump intake pressure from target production and IPR data

- Enter pumping speed
- Enter target production: Target production (BFPD): 310
- Calculate production from inflow performance data

There is an 'IPR Data' button at the bottom right of the window.

Software "RODSTAR"

3.1.3 Información de la bomba y tubing

En esta ventana se selecciona el diámetro del tubing teniendo en cuenta que para diámetros de pistón de bomba mayores a 2 3/4" se utiliza un diámetro de tubing de 3 1/2"; para este proyecto se utiliza bomba tipo inserta, tubería anclada si la profundidad de la bomba es mayor a 4000 ft, se tiene en cuenta los coeficientes de fricción varilla-tubing, no se incluyen efectos de boyancia.

Se varía el diámetro del pistón de la bomba de 1 1/4" hasta 2 3/4".

Figura 17: información de la bomba y tubing

Pump And Tubing Information

Tubing size (in): 3 1/2 O.D. (in): 3,5 I.D. (in): 2,992 Tubing anchored Tubing anchor depth (ft): 6000

Pump type: Insert pump Tubing pump Large bore pump

Calculate plunger size Plunger size: 2.75 (in)

Calculate rod-tubing friction coefficients Upstroke rod-tubing friction: Downstroke rod-tubing friction: Pump friction (lbs): 200

Include buoyancy effects Include fluid inertia effects Fluid compressibility index:

Software “RODSTAR”

3.1.4 Información de la sarta de varillas

Para este proyecto solamente se utilizaron varillas de acero, por tanto se especifica el grado de acero de la varilla tipo Norris 97, se selecciona el diámetro máximo y mínimo de varilla variando cada uno desde $\frac{3}{4}$ “hasta 1 1/8” para que el software simule diseños ahusados cuando sea necesario; se especifica que el factor de servicio de varilla a utilizar será 0,9.

Figura 18: información de la sarta de varillas

Rod String Information

Steel grade or manufacturer: Norris 97 Maximum rod diameter to use: 1" Minimum rod diameter to use: 3/4"

Include sinker bars/sinker rods Sinker bars Sinker rods

Sinker bar grade/manufacturer: Sinker bar diameter: Sinker bar length (ft):

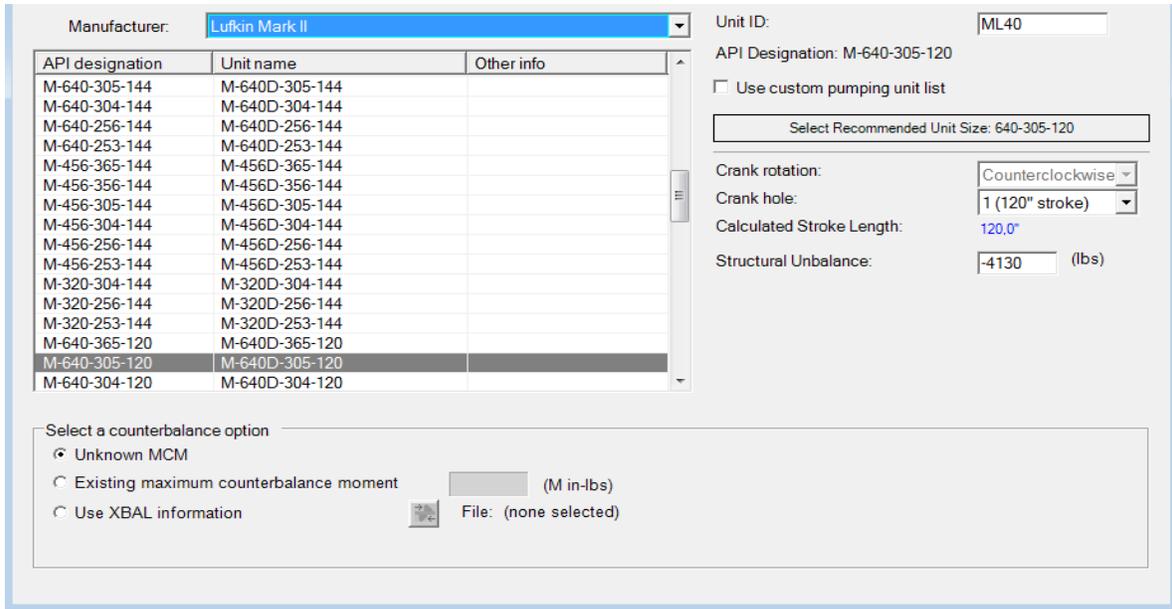
Other rod string information Additional rod costs (\$): 0 Steel rod service factor: 0,9 Cost description:

Software “RODSTAR”

3.1.5 Información de la unidad de bombeo

Seleccionar el tipo de unidad entre las cuales se trabajaron unidades Mark II, Balanceadas por aire y Churchill Beam; luego se selecciona la designación API de la respectiva unidad que se desea simular, la dirección de rotación de la manivela es en sentido horario y se selecciona siempre la máxima longitud del stroke.

Figura 19: información de la unidad de bombeo

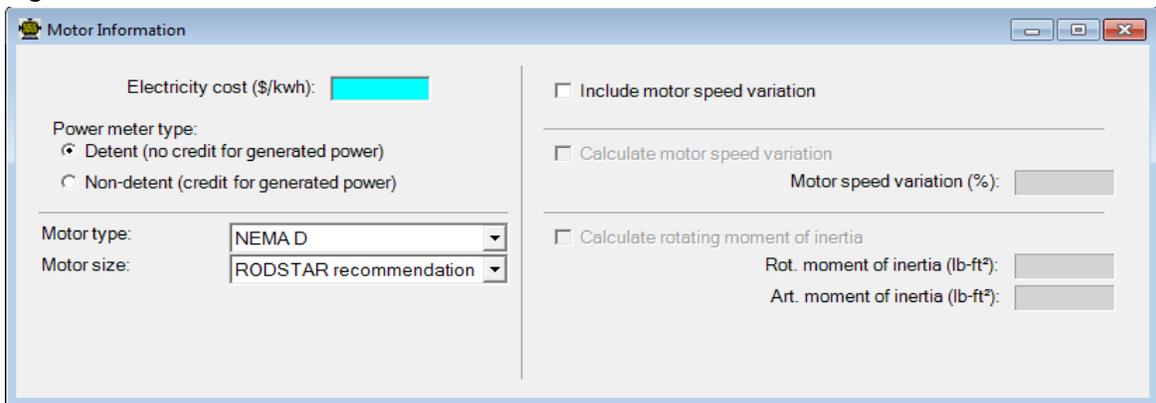


Software “RODSTAR”

3.1.6 Información del motor

Para este proyecto se selecciona el tipo de motor NEMA D y se deja el tamaño de motor recomendado por el software.

Figura 20: información del motor



Software “RODSTAR”

3.1.7 Reportes

Después de ingresar o modificar los datos se ejecuta el software para generar el reporte de cada simulación.

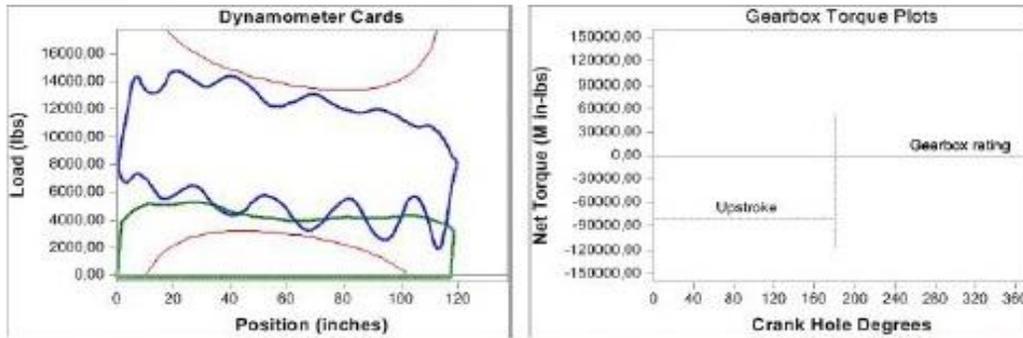
Figura 21: Reporte en formato pdf

RODSTAR-V 3.3.1
© Theta Oilfield Services, Inc. (www.gotheta.com) Page 1 of 3
User:
Date: 04/05/2011

Company: usco
Well: usco
Disk file: (Untitled)
Comment:

INPUT DATA				CALCULATED RESULTS				
Target prod. (bfpd):	1000	Fluid level (ft from surface):	1700	Production rate (bfpd):	1001	Peak pol. rod load (lbs):	14810	
Run time (hrs/day):	24,0	(ft over pump):	0	Oil production (BOPD):	100	Min. pol. rod load (lbs):	1663	
Tubing pres. (psi):	50	Stuf box fr. (lbs):	100	Strokes per minute:	10,72	MPRL/PPRL:	0,126	
Casing pres. (psi):	50	Pol. Rod Diam: 1.5"		System eff. (Motor->Pump):	41%	Unit struct. loading:	58%	
Fluid properties				Motor & power meter				
Water cut:	90%	Power Meter Detent:		Permissible load HP:	46,1	PRHP / PLHP:	0,53	
Water sp. gravity:	1	Electr. cost: \$1/KWH:		Flt in load on num ths:	4343	Buoyant rod weight (lbs):	6748	
Oil API gravity:	20,0	Type: NEMA D:		Polished rod HP:	24,4	N/N0: ,074 , Fo/SKr: ,02		
Fluid sp. gravity:	0,9934			Required prime mover size (speed var. not included) BALANCED (Min Torq)				
Compress. Index:	3,0			NEMA D motor: 40 HP				
Pumping Unit: Lufkin Air-Balanced (A-320D-256-120)				Single/double cyl. engine: 40 HP				
API size: A-320-256-120 (unit ID: AL54)				Multicylinder engine: 40 HP				
Crank hole number: #1 (out of 3)				Torque analysis and electricity consumption BALANCED (Min Torq)				
Calculated stroke length (in): 119,7				Peak g'box torq (M in-lbs): 295				
Crank Rotation with well to right: CW				Gearbox loading: 92%				
Air tank pressure at bottom-of-stroke (psig): Unknown				Cyclic load factor: 1,2				
				Max. air tank pres. (psig): 261				
Tubing and pump information				Daily electr. use (KWH/day): 549				
Tubing O.D. (ins):	3,500	Upstr. rod-tbg fr. coeff:	1,340	Monthly electric bill:	\$16739			
Tubing I.D. (ins):	2,992	Dnstr. rod-tbg fr. coeff:	1,340	Electr. cost per bbl. fluid:	\$0,548			
Pump depth (ft):	1700	Tubing is not anchored		Electr. cost per bbl. oil:	\$5,481			
Pump condition:	Full	Pump load adj. (lbs):	0,0	Tubing, pump and plunger calculations				
Pump type:	Tubing	Pump vol. efficiency:	90%	Tubing stretch (ins):	1,1			
Plunger size (ins):	2,75	Pump friction (lbs):	200,0	Prod. loss due to tubing stretch (bfpd):	9,5			
Rod string design (rod tapers calculated)				Gross pump stroke (ins): 118,9				
Diameter (inches):	1,25	Rod Grade:	Norris 97	Pump spacing (in. from bottom):	5,1			
Length (ft):	1700	Min. Tensile Strength (psi):	140000	Minimum pump length (ft):	15,0			
				Recommended plunger length (ft): 2,0				
				Rod string stress analysis (service factor: 0,9)				
				Stress Load %	Top Maximum Stress (psi)	Top Minimum Stress (psi)	Bot. Minimum Stress (psi)	Stress Calc. Method
				24%	12059	1672	-999	API MG T/2.8

NOTE Stress calculations include buoyancy effects.



Software "RODSTAR"

Se realizaron simulaciones para las unidades Balanceadas por Aire, Mark II y Beam basándose en los parámetros seleccionados que representan condiciones actuales de operación. El proceso de simulación para cada una de las opciones posibles se explica en la figura 22:

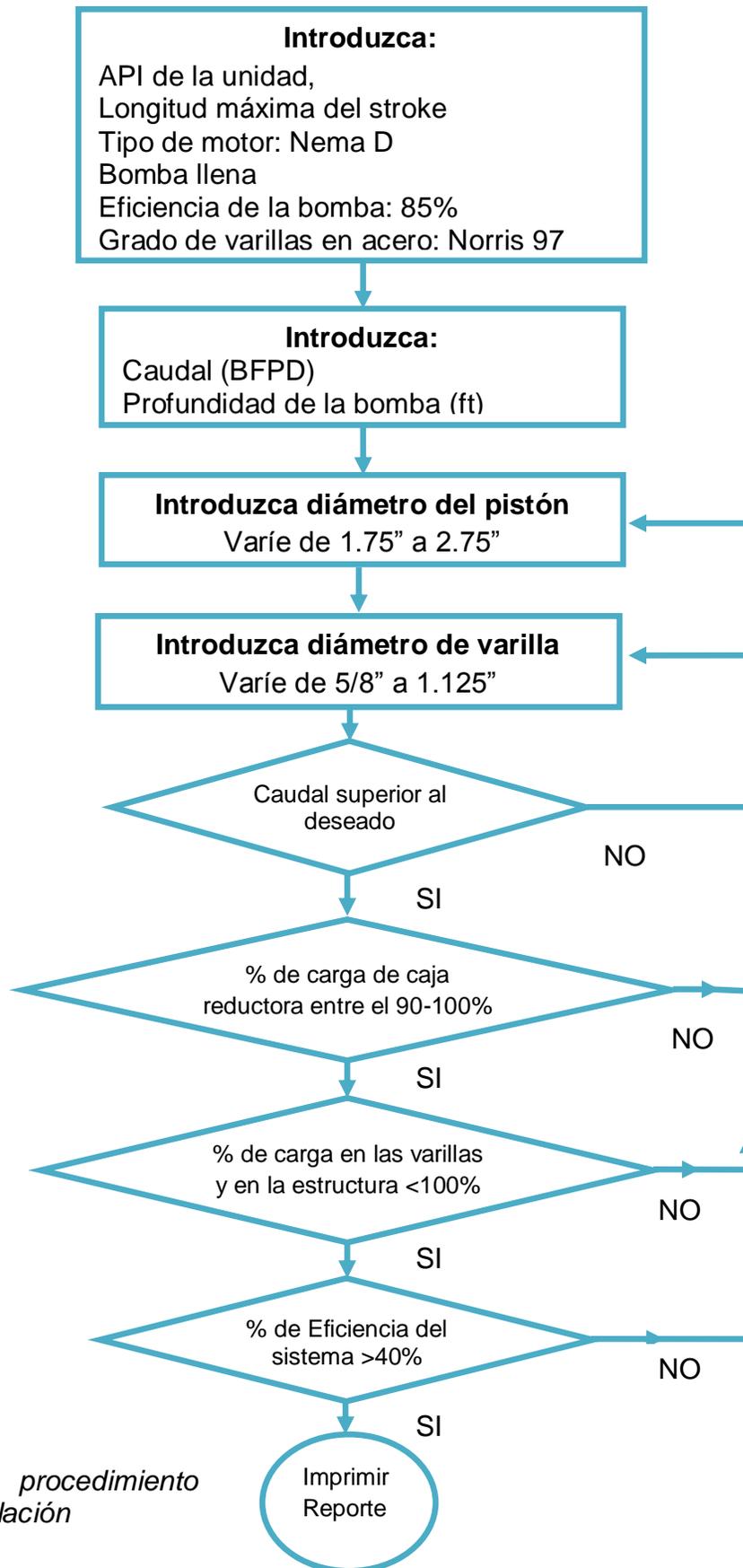


Figura 22: procedimiento para la simulación

Como se muestra en la figura 22 se revisó que cada uno de los reportes cumpliera con los siguientes requerimientos:

- ✓ El caudal obtenido sea superior al deseado
- ✓ La carga de la caja reductora este entre el 90 y 100%
- ✓ No existan sobrecargas en las varillas, ni en la unidad estructural
- ✓ Eficiencia del sistema mayor al 40%

Luego de seleccionar los reportes que cumplen con estas condiciones se organiza una tabla general por unidad simulada, donde se encontrarán cada uno de los datos obtenidos para cada caso, lo que permitirá una mejor apreciación y facilitará la identificación y análisis de la información.

3.1.8 TABLA GENERAL

Una vez seleccionados los reportes que cumplen con los requerimientos anteriormente mencionados, se organiza la información en tablas que contengan los datos necesarios hacer la selección óptima de la unidad, se realiza una tabla por cada una de las unidades simuladas. A continuación se mostrará un ejemplo de tabla general para la unidad A-320-256-120 (tabla 3). Una muestra representativa de las tablas generadas para los diferentes tipos de unidades se podrá ver en los anexos (tabla 26 – 28)

Tabla 3. Ejemplo, tabla general de la unidad A-320-256-120

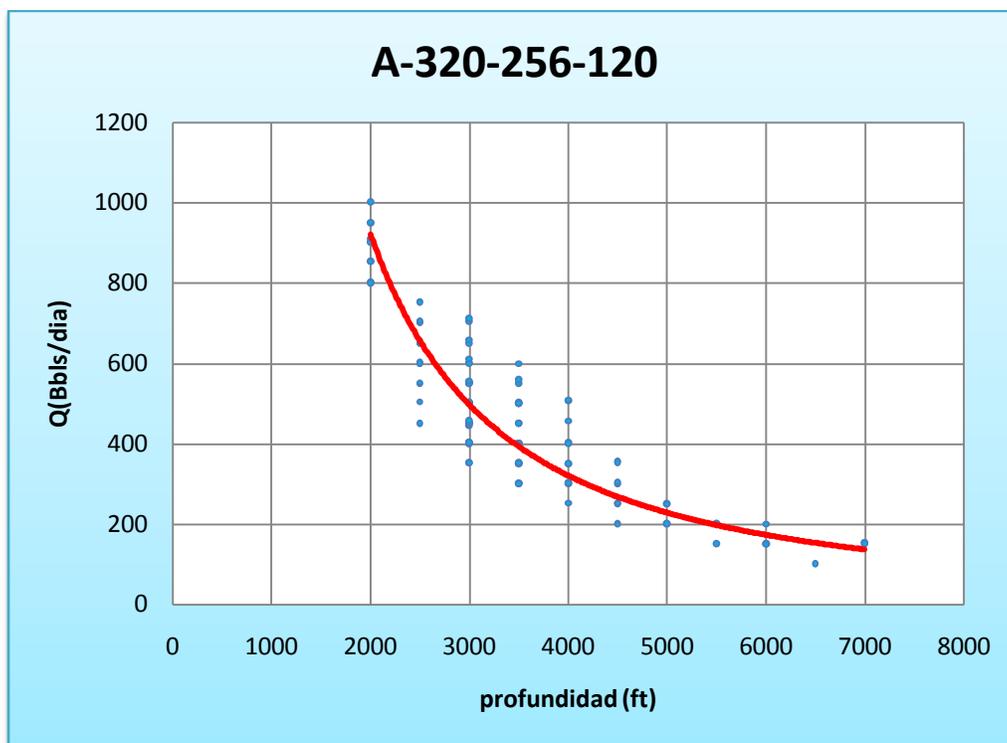
PROFUNDIDAD (Ft)	CAUDAL BFPD	DIAMETRO BOMBA	DIAMETRO VARILLAS	CAUDAL BFPD	STROKES POR MINUTO (SPM)	EFICIENCIA SISTEMA %	CARGA ESTRUCTURAL %	CARGA DE LA CAJA %	CARGA VARILLAS %
2000	1000	2,75	1	1003	10,93	48	52	97	37
2000	950	2,75	1	950	10,38	49	52	95	35
2000	950	2,75	0,875	951	10,49	52	46	90	42
2000	900	2,75	1,125	903	9,82	48	58	97	29
2000	900	2,75	1	911	10	50	52	93	34
2000	900	2,5	1,125	903	11,75	42	60	95	32
2000	850	2,75	1,125	855	9,28	49	56	90	27
2000	850	2,5	1,125	854	11,1	43	55	92	29
2000	800	2,75	1,125	803	8,75	50	57	90	28
2000	800	2,5	1,125	801	10,46	44	56	90	30
2500	750	2,75	0,75	754	8,89	54	47	100	59
2500	750	2,5	0,875	753	10,18	49	53	94	48
2500	700	2,75	0,875	702	8,1	54	53	98	46
2500	700	2,75	0,75	702	8,32	56	47	96	58
2500	700	2,5	1	704	9,46	47	60	96	39
2500	700	2,5	0,875	702	9,57	50	52	91	46
2500	700	2,25	1	707	11,42	41	59	98	41
2500	650	2,75	1,25	652	7,2	56	76	99	26
2500	650	2,75	1,125	654	7,28	57	66	97	30
2500	650	2,75	1	650	7,34	59	58	95	35
2500	650	2,75	0,875	652	7,54	55	52	95	44
2500	650	2,75	0,75	653	7,75	57	46	91	55
2500	650	2,75	0,625	655	8,15	57	41	90	74

* Ver tabla completa en Anexo A, tabla 1.

3.1.9 GRÁFICA DE LA UNIDAD

Con los datos de la tabla anterior se grafica profundidad de la bomba (Ft) contra caudal obtenido (BFPD) para obtener la curva representativa para cada unidad simulada. Una vez realizada la grafica se utiliza la función potencial para representar la línea de tendencia de los datos, de esta manera se establece la curva que representa las condiciones críticas de la unidad. . A continuación se mostrara un ejemplo de la curva de la unidad A-320-256-120 (ver grafica 1). Una muestra representativa de las graficas generadas para los diferentes tipos de unidades se podrá ver en los anexos (graficas 5 – 7)

Grafica 1. Curva de la unidad A-320-256-120



3.1.10 GRAFICA GENERAL Y TABLA RESUMEN

Después de realizar el anterior procedimiento para cada una de las unidades seleccionadas, se procede a realizar una gráfica general que reúna todas las curvas y permita una selección aproximada de la unidad de bombeo mecánico, con la introducción de profundidad de la bomba y caudal deseado. Se realizó una grafica para cada tipo de unidad trabajada en este proyecto (ver grafica 3 - 5) Una vez analizados los datos de las tablas de cada unidad se elaboran las tablas resumen individuales utilizadas para el dimensionamiento del equipo de subsuelo de las unidades de acuerdo al método convencional, seleccionando los mejores

resultados para cada intervalo de profundidad (ver tablas 4 – 24). El principal parámetro para el diseño es el torque máximo en la caja reductora debido a que el comportamiento puede ser similar para diferentes capacidades de resistencia estructural; por tanto la misma caja reductora sirve para una familia de unidades.

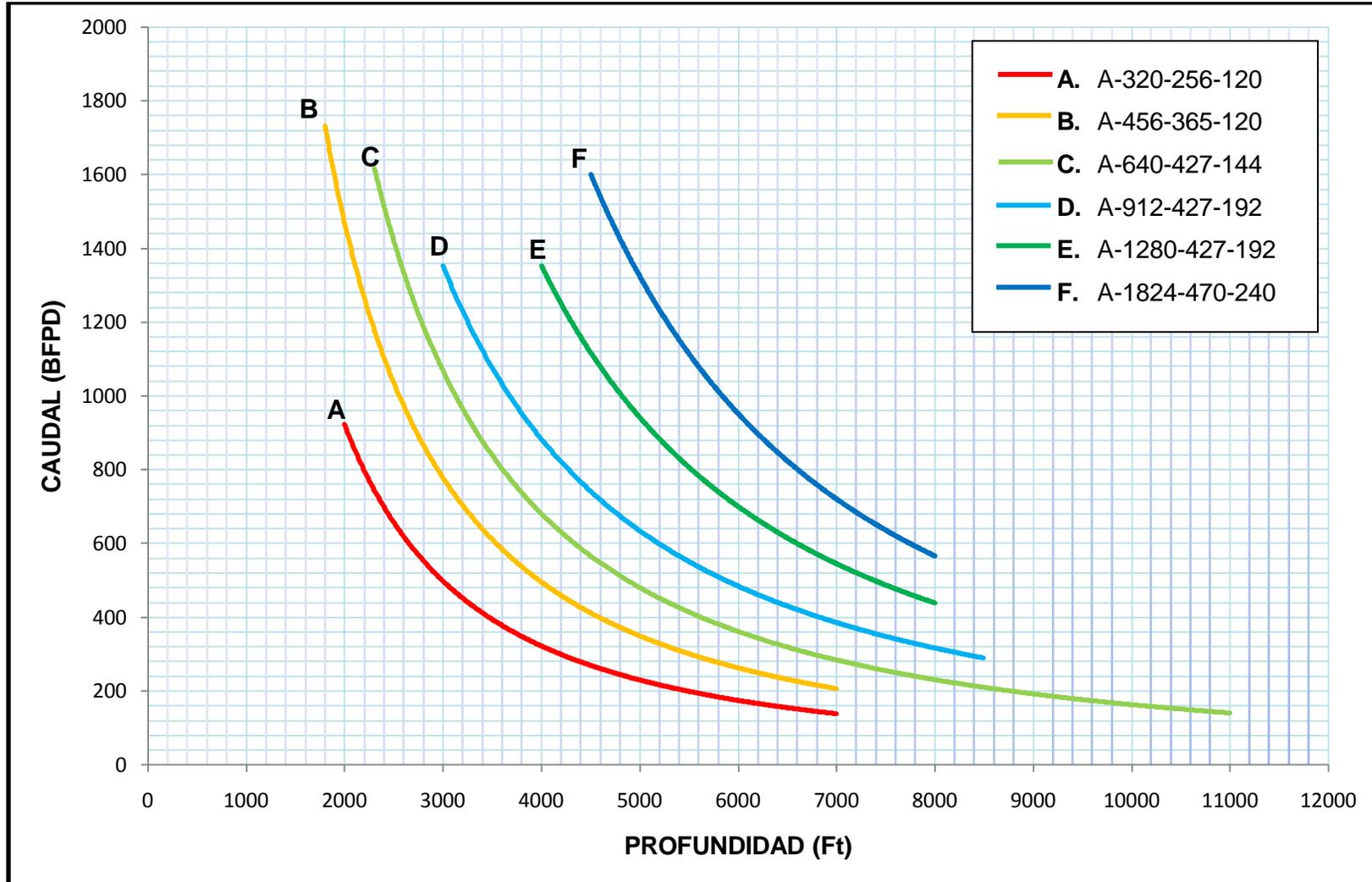
3.2 RESULTADOS DEL PROYECTO

A continuación se mostraran los resultados de la simulación de las unidades Balanceadas por aire, Mark II y Churchill Beam con su respectiva curva general y tablas resumen individual de cada una de las unidades simuladas:

3.2.1 UNIDAD DE BOMBEO MECANICO BALANCEADA POR AIRE

3.2.1.1 GRAFICA PARA LA SELECCIÓN DE UNIDADES BALANCEADAS POR AIRE

Grafica 2. Grafica para la selección de unidades Balanceadas por Aire



3.2.1.2 TABLAS RESUMEN DE LAS UNIDADES BALANCEADAS POR AIRE

Tabla 4. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-320-256-120

A-320-256-120			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
1500-2000	2 ³ / ₄	1- 1 ¹ / ₈	8 – 12
2000-2500	2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	⁷ / ₈ – 1	8 – 12
2500-3000	2 ¹ / ₄ - 2 ¹ / ₂	³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1	6 – 11
3000-3500	2 ¹ / ₄ - 2 ¹ / ₂	³ / ₄ - ⁷ / ₈	5 – 11
3500-4000	2 - 2 ¹ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄	4 – 11
4000-4500	1 ¹ / ₂ - 1 ³ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 12
4500-6000	1 ³ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 8
6000-6500	1 ¹ / ₂	⁵ / ₈ - ³ / ₄	6 – 7

Tabla 5. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-456-365-120

A-456-365-120			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
1500-2000	2 ³ / ₄	1 ¹ / ₈	12 – 15
2000-2500	2 ³ / ₄	1- 1 ¹ / ₈	10 – 13
2500-3000	2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	⁷ / ₈ – 1	8 – 13
3000-3500	2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	³ / ₄ - ⁷ / ₈	7 – 11
3500-4000	2 ¹ / ₄ - 2 ¹ / ₂	³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 11
4000-4500	2 - 2 ¹ / ₄	³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1	4 – 12
4500-5000	2 - 2 ¹ / ₄	⁷ / ₈ – 1	4 – 8
5000-5500	2 - 2 ¹ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄	4 – 8
5500-7000	1 ³ / ₄ - 2	⁵ / ₈ - ³ / ₄	4 – 7

Tabla 6. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-640-427-144

A-640-427-144			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
2000-3000	2 ³ / ₄	1 ¹ / ₈	11 – 14
3000-3500	2 ³ / ₄	1- 1 ¹ / ₈	8 – 11
3500-4000	2 ¹ / ₄ - 2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	⁷ / ₈ - 1 - 1 ¹ / ₈	5 – 12
4000-6000	2 - 2 ¹ / ₄	⁷ / ₈ – 1	5 – 11
6000-9000	1 ³ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄	5 – 8
9000-11000	1 ¹ / ₂	³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1	5 – 8

Tabla 7. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-912-427-192

A-912-427-192			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
2500-3000	2 ³ / ₄	1- 1 ¹ / ₈	8 – 10
3000-4500	2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	⁷ / ₈ - 1 - 1 ¹ / ₈	6 – 8
4500-5500	2 - 2 ¹ / ₄	⁷ / ₈ – 1	4 – 8
5500-7000	2 - 2 ¹ / ₄	³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 8
7500-8500	1 ³ / ₄	³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 8

Tabla 8. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-1280-427-192

A-1280-427-192			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
4000-4500	2 ³ / ₄	1 ¹ / ₈	10 – 12
4500-5000	2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	1- 1 ¹ / ₈	7 – 11
5000-6000	2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	1- 1 ¹ / ₈	7 – 11
6000-7000	2 ¹ / ₄ - 2 ¹ / ₂	1- 1 ¹ / ₈	4 – 9
7500-8000	2 - 2 ¹ / ₄	³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1	4 – 9

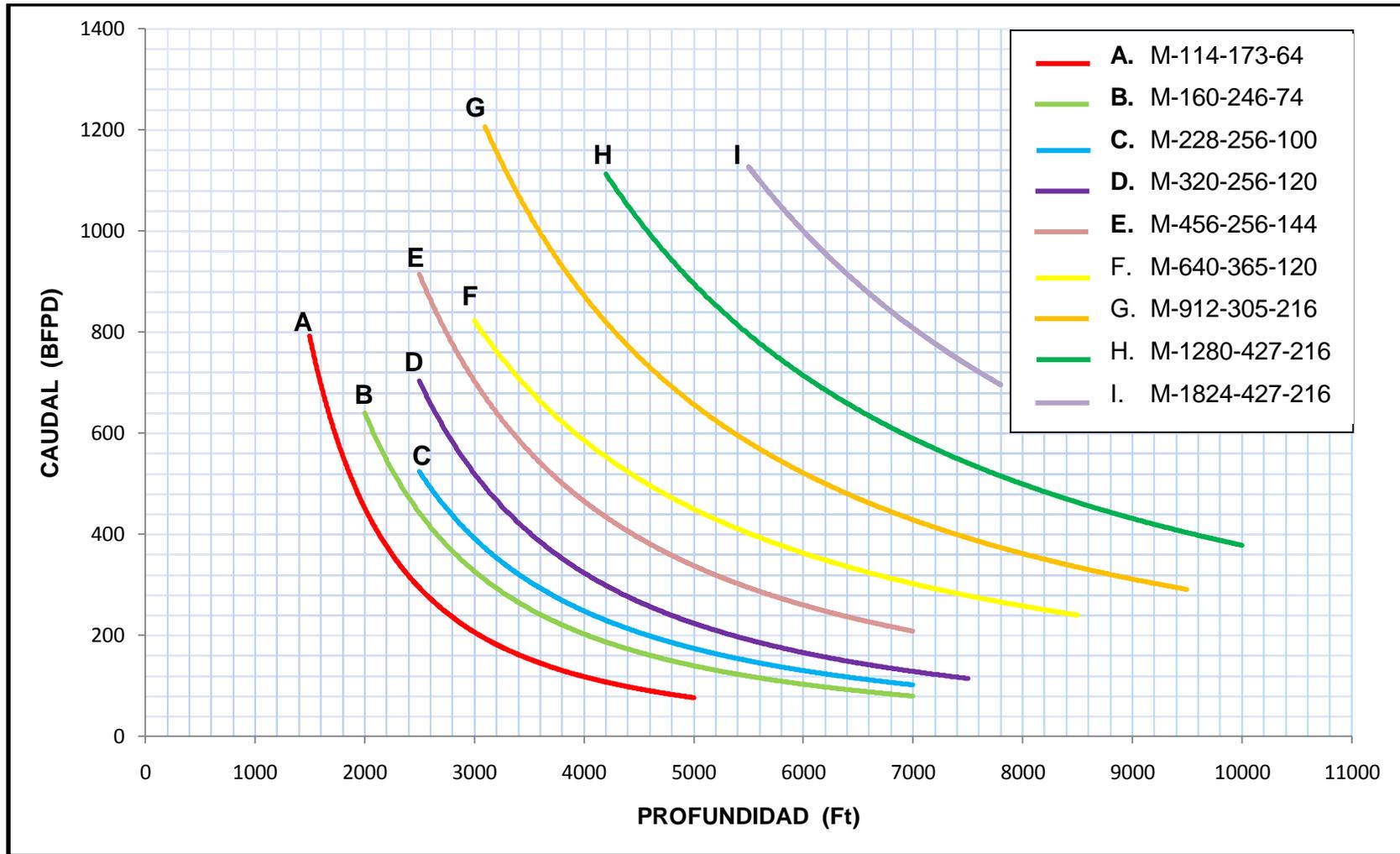
Tabla9. Tabla resumen correspondiente a la unidad A-1824-470-240

A-1284-470-240			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
4000-4500	2 ³ / ₄	1 ¹ / ₈	7 – 9
4500-5000	2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	1 ¹ / ₈	7 – 9
5000-6000	2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	1- 1 ¹ / ₈	5 – 9
6000-7000	2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	⁷ / ₈ - 1 - 1 ¹ / ₈	4 – 7
7000-8000	2 ¹ / ₂	⁷ / ₈ - 1 - 1 ¹ / ₈	4 – 7

3.2.2 UNIDAD DE BOMBEO MECANICO MARK II

3.2.2.1 GRAFICA PARA LA SELECCIÓN DE UNIDADES MARK II

Grafica 3. Grafica para la selección de unidades Mark II



3.2.2.2 TABLAS RESUMEN DE LAS UNIDADES MARK II

Tabla 10. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-114-173-64

M-114-173-64			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
1500-2000	2 ³ / ₄	⁷ / ₈ - 1 - 1 ¹ / ₈	12 – 14
2000-2500	2 ¹ / ₄ - 2 ¹ / ₂	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1	8 – 13
2500-3000	2 - 2 ¹ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1	6 – 13
3000-3500	1 ³ / ₄ - 2	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1	7 – 11
3500-4500	1 ³ / ₄ - 2	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	5 – 9
4500-5000	1 ¹ / ₂	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 7

Tabla 11. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-160-246-74

M-160-246-74			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
1500-2000	2 ³ / ₄	1 ¹ / ₈	12 – 15
2000-2500	2 ³ / ₄	³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1 - 1 ¹ / ₈	6 – 12
2500-3000	2 ¹ / ₂	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1 - 1 ¹ / ₈	5 – 11
3000-3500	2 ¹ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1 - 1 ¹ / ₈	5 – 11
3500-4000	2 ¹ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 9
4000-4500	2	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 8
4500-5000	1 ¹ / ₂ - 1 ³ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	5 – 9
5000-7000	1 ¹ / ₂	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 8

Tabla 12. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-228-256-100

M-228-256-100			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
2000-2500	2 ³ / ₄	³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1 - 1 ¹ / ₈	8 – 10
2500-3000	2 ¹ / ₄ - 2 ¹ / ₂	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1	5 – 10
3000-3500	2 - 2 ¹ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1	4 – 11
3500-4000	2 - 2 ¹ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	5 – 12
4000-4500	1 ³ / ₄ - 2	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1	7 – 9
4500-5500	1 ¹ / ₂	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 11
5500-7000	1 ¹ / ₄ - 1 ¹ / ₂	⁵ / ₈ - ³ / ₄	6 – 10

Tabla 13. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-320-256-120

M-320-256-120			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
2000-2500	2 ³ / ₄	1 - 1 ¹ / ₈	9 – 11
2500-3500	2 ¹ / ₄ - 2 ¹ / ₂	1 - 1 ¹ / ₈	8 – 10
3500-4000	2 - 2 ¹ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈ - 1	5 – 8
4000-4500	1 ³ / ₄ - 2	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 9
4500-6000	1 ¹ / ₂ - 1 ³ / ₄	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	6 – 9
6000-7500	1 ¹ / ₂	⁵ / ₈ - ³ / ₄ - ⁷ / ₈	4 – 5

Tabla 14. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-456-256-120

M-456-256-120			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
2000-2500	2 ¾	1 - 1 1/8	5 – 9
2500-3000	2 ¾	7/8 - 1 - 1 1/8	5 – 9
3000-3500	2 ½ - 2 ¾	¾ - 7/8 - 1 - 1 1/8	4 – 8
3500-4000	2 ¼ - 2 ½	¾ - 7/8	4 – 8
4000-4500	2 - 2 ¼	¾ - 7/8 - 1	4 – 7
4500-5500	1 ¾ - 2	5/8 - ¾	4 – 7
5500-7000	1 ¾	5/8 - ¾	4 – 7

Tabla 15. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-640-365-120

M-640-365-120			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
3000-3500	2 ¾	1 1/8	11 – 12
3500-4000	2 ½ - 2 ¾	1 - 1 1/8	9 – 11
4000-4500	2 ½ - 2 ¾	7/8 - 1	8 – 12
4500-5000	2 ¼ - 2 ½	1 - 1 1/8	7 – 12
5000-5500	2 ¼ - 2 ½	1 - 1 1/8	10 – 5
5500-6000	2 ¼	7/8 - 1	4 – 10
6000-6500	2 ¼	7/8 - 1	4 – 10
6500-7000	2	7/8 - 1	4 – 10
7000-7500	2	7/8 - 1	4 – 9
7500-8500	2	7/8 - 1	8 – 10
8500-9500	1 ¾	5/8 - ¾ - 7/8	8 – 10
9000-9500	1 ¾	5/8 - ¾ - 7/8	8 – 10

Tabla 16. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-912-305-216

M-912-305-216			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
2500-3000	2 ¾	1 1/8	4 – 8
3000-3500	2 ½ - 2 ¾	1 - 1 1/8	4 – 8
3500-4000	2 ¼ - 2 ½	7/8 - 1	4 – 7
4000-4500	2 ¼ - 2 ½	¾ - 7/8	4 – 7
4500-5000	2 - 2 ¼	¾ - 7/8	4 – 7
5000-5500	2	7/8	4 – 6
5500-6000	2	¾ - 7/8	4 – 6
6000-6500	2	¾ - 7/8	4 – 6
6500-7000	1 ¾	5/8 - ¾	4 – 6

Tabla 17. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-1280-427-216

M-1280-427-216			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
4000-4500	2 ¾	1 1/8	5 – 7
4500-5000	2 ½ - 2 ¾	1 - 1 1/8	4 – 6
5000-6000	2 ¼ - 2 ½ - 2 ¾	7/8 - 1 - 1 1/8	4 - 6
6000-6500	2 - 2 ¼ - 2 ½	1 - 1 1/8	4 – 5
6500-7000	2 - 2 ¼	7/8 - 1 - 1 1/8	4 – 7
7000-7500	1 ¾ - 2	7/8 - 1	5 – 7
7500-8500	1 ¾ - 2	¾ - 7/8 - 1	4 – 7
8500-9000	1 ¾ - 2	7/8 - 1	4 – 7
9000-10000	1 ¾	¾ - 7/8 - 1	5 – 7

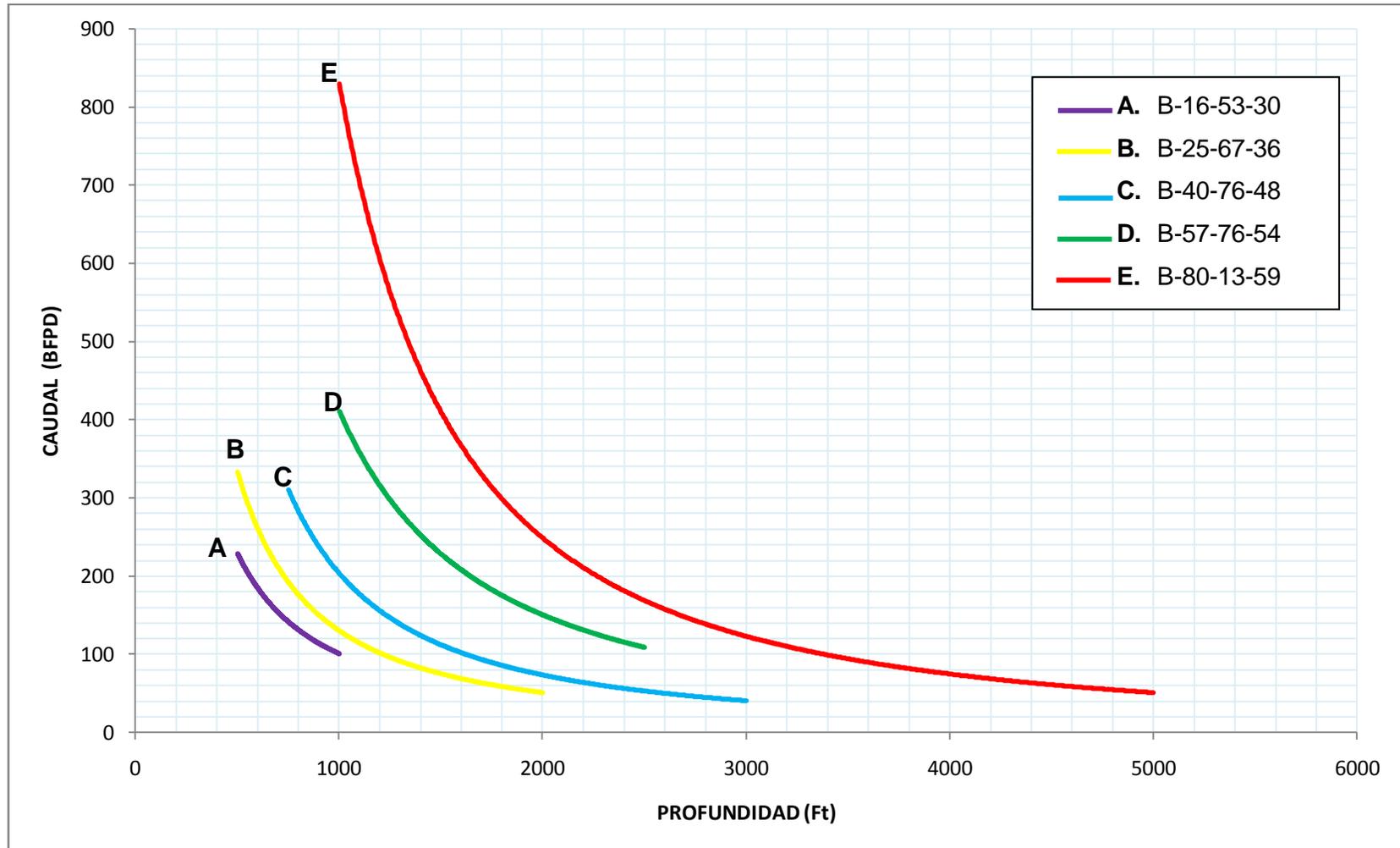
Tabla 18. Tabla resumen correspondiente a la unidad M-1824-427-216

M-1824-427-216			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
5500-6000	2 ³ / ₄	1 ¹ / ₈	7 – 8
6000-6500	2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	1 - 1 ¹ / ₈	6 – 8
6500-7000	2 ¹ / ₄ - 2 ¹ / ₂ - 2 ³ / ₄	⁷ / ₈ - 1 - 1 ¹ / ₈	5 – 7
7000-7500	2 ¹ / ₄ - 2 ¹ / ₂	⁷ / ₈ - 1 - 1 ¹ / ₈	5 – 7

3.2.3 UNIDAD DE BOMBEO MECANICO CHURCHILL BEAM

3.2.3.1 GRAFICA PARA LA SELECCIÓN DE UNIDADES CHURCHILL BEAM

Grafica 4. Grafica para la selección de unidades Churchill Beam



3.2.3.2 TABLAS RESUMEN DE LAS UNIDADES CHURCHILL BEAM

Tabla 19. Tabla resumen correspondiente a la unidad B-16-53-30

B-16-53-30			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
500-1000	2 - 2 ¼ - 2 ½ - 2 ¾	5/8 - ¾ - 7/8 - 1 - 1 1/8	8 – 15

Tabla 20. Tabla resumen correspondiente a la unidad B-25-67-36

B-25-67-36			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
500-1000	2 ½ - 2 ¾	1-1 1/8	11 – 14
1000-1500	1¾ - 2 - 2 ¼ - 2 ½	5/8 - ¾ - 7/8 - 1	4 – 13
1500-2000	1 ½ - 1 ¾	¾ - 7/8 - 1	6 – 7

Tabla 21. Tabla resumen correspondiente a la unidad B-40-76-48

B-40-76-48			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
750-1000	2 ½ - 2 ¾	¾ - 7/8 - 1 - 1 1/8	6 – 11
1000-1500	1¾ - 2 - 2 ¼ - 2 ½	5/8 - ¾ - 7/8 - 1 - 1 1/8	4 – 18
1500-2000	2 - 2 ¼	5/8 - ¾ - 7/8	4 – 5
2000-2500	1 ½ - 2	5/8 - ¾ - 7/8	4 – 6
2500-3000	1 1/8 - 1 ½	5/8 - ¾ - 7/8	4 – 7

Tabla 22. Tabla resumen correspondiente a la unidad B-57-76-48

B-57-76-48			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
500-1000	2 ½ - 2 ¾	7/8 - 1	7 – 14
1000-1500	2- 2 ¼	3/4 - 7/8	7 – 13
1500-2000	1¾ - 2	5/8 - ¾	6 – 12
2000-2500	1 ½ - 1¾	5/8	6 – 12

Tabla 23. Tabla resumen correspondiente a la unidad B-80-13-59

B-80-13-59			
Profundidad de la bomba (Ft)	Diámetro del pistón (Pulg)	Diámetro de las varillas (Pulg)	Velocidad de bombeo (SPM)
500-1500	2 ½ - 2 ¾	3/4 - 7/8 - 1 - 1 1/8	13 – 18
1500-2500	2- 2 ¼ - 2 ½	5/8 - ¾ - 7/8 - 1	6 – 18
2500-3500	1 ½ - 1¾	5/8 - ¾ - 7/8	5 – 17
3500-5000	1 ¼ - 1 ½	5/8 - ¾	4 – 12

4. MODELO DE APLICACIÓN EMPLEANDO LAS TABLAS Y GRAFICAS ELABORADAS

Tomando como referencia el método propuesto por Craft, Holden and graves en su libro “Well Desing”, se describe a continuación con un ejemplo el procedimiento para la selección del sistema de bombeo mecánico con las curvas y tablas para unidades balanceadas por aire, Mark II y Beam, que fueron elaboradas utilizando el software Rodstar el cual incluye la ecuación de onda que soluciona todas las limitantes del método antiguo y que permite relacionar de forma precisa cada una de las variables que influyen en el comportamiento del sistema.

El procedimiento que se explicará a continuación es similar para las unidades balanceadas por Aire, Mark II y Churchill Beam, en donde lo único que se debe tener en cuenta es la utilización de las curvas y tablas respectivas de cada unidad. Se utilizará como ejemplo los datos de un pozo suministrado por ECOPETROL S.A y PARKO SERVICES.

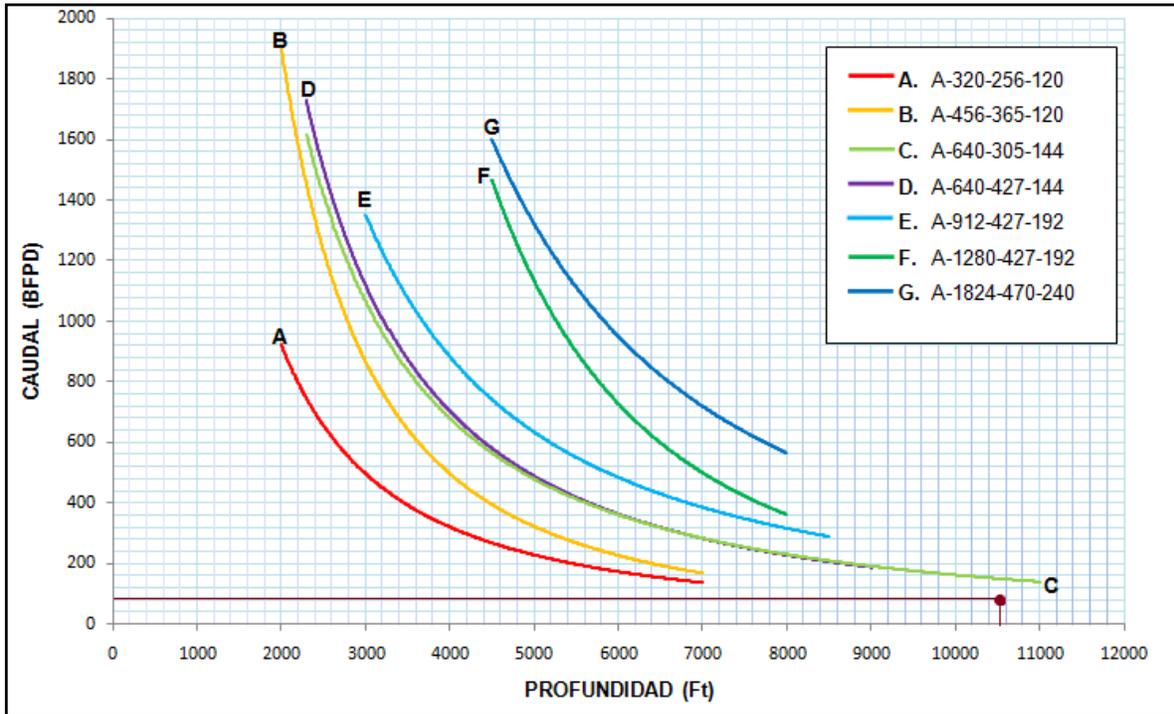
4.1 EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA UNIDADES BALANCEADAS POR AIRE

El pozo USCO1. Produce 63 BFPD a una profundidad de asentamiento de la bomba de 10522 ft, con estos datos se puede ingresar a las graficas generadas mediante el software RODSTAR-V para iniciar el diseño optimo de la unidad.

4.1.1 Selección del tamaño de la unidad

Se ingresa a la grafica 2 con los datos de producción y profundidad de la bomba para seleccionar la unidad correspondiente a la curva más cercana al punto de intercepción como se muestra en la figura 23.

Figura23. Ejemplo de aplicación para unidad Balanceada por Aire, selección de unidad.



Como se muestra en la figura 23 las condiciones de este pozo se pueden aplicar a la unidad A-640-305-144, debido a que la intersección de los datos se ubica cercana a la curva C.

4.1.2 Datos para dimensionamiento

Según la unidad seleccionada, se escogen los datos de dimensionamiento de la tabla resumen respectiva, en este caso la tabla 7 que corresponde a la tabla resumen de la unidad A-640-427-144:

- | | |
|--------------------------------|----------------|
| ✓ Profundidad de la bomba (Ft) | 9000 - 11000 |
| ✓ Diámetro de pistón (in) | 1 ½ |
| ✓ Diámetro de varillas (in) | 3/4 – 7/8 -- 1 |
| ✓ Velocidad de bombeo (SPM) | 5 - 8 |

Figura 24. Reporte RODDIAG del pozo Usco1.

RODDIAG 3.3.0				Page 1 of 1				
Company: Ecopetrol S.A.		© Theta Oilfield Services, Inc. (www.gotheta.com)		User: AMMB				
Well: TN-08		Disk file: TN-08 (28 Sep 2011).rdg		Date: 01/10/2011				
Comment: Dinagrama del 1 Oct2011								
Input Data			Calculated Results					
Run time (hrs/day):	24.0	Tubing pres. (psi):	165.0	Peak pol. rod load (lbs):	32967	Polished rod HP:	6.2	
Strokes per minute:	6.38	Casing pres. (psi):	49.0	Min. pol. rod load (lbs):	16956	Permissible load HP:	67.4	
Surf. stroke (in):	147.1	Gross prod. (bfpd):	<u>63</u>	MPRL/PPRL:	0.514	PRHP / PLHP:	0.09	
		Stuff. Box Fr. (lbs):	100	System eff. (Motor->Pump):	<u>17%</u>	Unit struct. loading:	<u>77%</u>	
Fluid level (ft from surf.):	10237	Fluid level (ft over pump):	285	Buoyant rod weight (lbs):	20804	Gearbox loading:	<u>73%</u>	
		Pol. Rod Diam: 1.5"		Max. rod loading:	<u>73%</u>			
Fluid Properties		Motor & power meter		Required prime mover size				
Water cut:	32%	Power meter:	Detent	for existing conditions	BALANCED	EXISTING		
Water sp. gravity:	1.05	Electr. cost:	.06/KWH	(Min Torq)				
Oil API gravity:	37.0	Type:	NEMA D	NEMA D motor:	20 HP	20 HP		
Fluid sp. gravity:	0.907	Size:		Single/double cyl. engine:	15 HP	15 HP		
				Multicylinder engine:	20 HP	20 HP		
Unit: Lufkin Air-Balanced (A-912D-427-192)				Torque analysis and electricity consumption				
API size:	A-912-427-192 (unit ID: AL20)				BALANCED	EXISTING		
Crank hole #3 (out of 3)				Peak g'box torq. (M in-lbs):	626	663		
Calc. stroke length (in):	147.1			Gearbox loading:	69%	73%		
Rotation with well to right:	CW			Cyclic load factor:	2.13	2.09		
Air tank pressure at bottom-of-stroke (psig):	400			Max. air tank pres. (psig):	394	400		
				Daily electr. use (KWH/day):	454	454		
				Monthly electric bill:	\$831	\$831		
				Electr. cost per bbl. fluid:	\$0.433	\$0.432		
				Electr. cost per bbl. oil:	\$0.636	\$0.636		
Dyna. data source: "TENAY0008A(1 Oct-2011).dyn" (283)								
Date dyna. card was recorded: "10-01-2011, 09:36"								
Tubing and pump information				Tubing, pump and plunger calculations				
Tubing O.D. (in):	3.500	Rod-tub. frict.:	1.00	Tubing movement (in):	0.0	Fl. load on pump (lbs):	6192	
Tubing I.D. (in):	2.992	Pump type:	Insert	Gross pump stroke (in):	116	Fl.lev. (ft from surf.):	8474	
Plunger size (in):	<u>1.5</u>	Pump depth (ft):	<u>10522.0</u>	Gross pump displ. (bfpd):	194	Fl.lev. (ft over pump):	2048	
Tubing anchor depth (ft):	10398.0			Appar. net stroke (in):	51	Pump int. pres. (psi):	808	
				Eff. net stroke (in):	51	Pump vol. efficiency:	32.5%	
				Net str. displ. (bfpd):	85	Pump fillage:	44%	
						Est. pump frict. (lbs):	N/A	
Rod string (service factor: 0.9)				Rod string stress analysis				
Diameter (inches)	Rod Grade	Length (ft)	Min. Tensile Strength (psi)	Stress Load %	Top Max. Stress (psi)	Top Min. Stress (psi)	Bot. Min. Stress (psi)	Stress Calc Method
<u>1.0</u>	Tenaris UHS-N	3325	140000	73%	42012	21881	13329	API MG T/2.8
<u>0.875</u>	Tenaris UHS-N	3525	140000	66%	37531	16959	6067	API MG T/2.8
<u>0.75</u>	Norris 97	3672	140000	67%	32536	7226	1377	API MG T/2.8

NOTE: Stress calculations do not include buoyancy effects.

Tabla 24. Comparación entre datos de pozo real y datos de diseño

Parámetros	Reporte RODDIAG	Selección por curvas elaboradas con RODSTAR-V
Profundidad de la bomba	10522	10522
Caudal (BFPD)	63	63
Unidad	A-912D-427-192	A-640-305-144
carga en la caja reductora	73%	90%-100%
Eficiencia del sistema	17%	<50%
Diámetro del pistón (in)	1,5	1,5
Diámetro de varillas (in)	1-7/8-3/4	1-7/8-3/4
Velocidad de la bomba(spm)	6,3	5-8

La tabla 25 nos muestra los parámetros de diagnóstico de un pozo real y los parámetros de un sistema diseñado con las curvas elaboradas con el software RODSTAR-V para las mismas condiciones de caudal y profundidad de asentamiento de la bomba. Vale la pena resaltar que el pozo real con la unidad que cuenta actualmente tiene un porcentaje de carga del 73% y una eficiencia del sistema del 17% por lo que se puede pensar que la unidad está sobredimensionada y solo se está aprovechando una mínima parte de la energía suministrada al sistema, mientras que el diseño por curvas nos sugiere una unidad más pequeña en la que se aprovechará la mayor parte de la capacidad de carga y energía debido a que las corridas fueron realizadas para un rango entre el 90 y el 100% de carga en la caja reductora y eficiencias del sistema superiores al 50%.

5. CONCLUSIONES

- Las curvas elaboradas permiten obtener los datos de inicio para el diseño de unidades de bombeo mecánico balanceadas por Aire, Mark II y Beam de forma rápida y confiable.
- Las curvas elaboradas con el software RODSTAR-V permite realizar diseños óptimos debido a que las unidades seleccionadas garantizan porcentajes de cargas cercanos al 90% y eficiencias mayores al 50%, lo que soluciona el problema de utilizar unidades sobredimensionadas.
- Para la elaboración de las curvas de las unidades de bombeo mecánico, el principal parámetro a tener en cuenta es el porcentaje de carga de la caja reductora.

RECOMENDACIONES

- Antes de iniciar con el diseño de un sistema de bombeo mecánico es indispensable identificar todos aquellos parámetros que influyen significativamente en el comportamiento del mismo.
- Se recomienda que para pozos desviados y pozos que produzcan fluidos con alto GOR el diseño debe ser complementado con el uso de software especializado.
- Debido a que el diámetro de la tubería no influye significativamente en el comportamiento del sistema de bombeo mecánico, se recomienda que este sea seleccionado de acuerdo a los requerimientos técnicos del diámetro de varillas utilizados y su costo.

BIBLIOGRAFIA

API RP 11L, "Recommended Practice for Design Calculations for Sucker Rod Pumping Systems (Conventional Units)", Third Edition, Feb 1977

Centro Internacional de Educación y Desarrollo (Cied), L., 2001. Diseño de Instalación de Levantamiento Artificial por Bombeo Mecanico. Sección 2.

Craft, B., Holden, W., Graves, E., 1962. Well Design Drilling and Production. Englewood Cliffs. Seccion 5

Lufkin Industries Inc. 2000. Lufkin Oilfield Product Group, General Catalog. USA pag 12, 20, 60, 61.

Theta Enterprises. 2005. "Optimización de Bombeo Mecánico". Venezuela. Sección 2 y 8

Theta Enterprises. 2006."Rodstar – D/V, Modern Design and Simulation of Rod Pumping Systems for Deviated or Vertical Wells, ". Theta Oilfield Service. Sección 4

Villegas, J. M., y Muñoz, A.R., 2010 "Elaboración de curvas para una aproximación a la selección optima de la unidad de bombeo". Sección 1 y 2

ANEXOS

ANEXO A. MUESTRA DE TABLAS Y GRAFICAS GENERALES DE LAS UNIDADES

Tabla 1. Tabla general de la unidad A-320-256-120

PROFUNDIDAD (Ft)	CAUDAL BFPD	DIAMETRO BOMBA	DIAMETRO VARILLAS	CAUDAL BFPD	STROKES POR MINUTO (SPM)	EFICIENCIA SISTEMA %	CARGA ESTRUCTURAL %	CARGA DE LA CAJA %	CARGA VARILLAS %
2000	1000	2,75	1	1003	10,93	48	52	97	37
2000	950	2,75	1	950	10,38	49	52	95	35
2000	950	2,75	0,875	951	10,49	52	46	90	42
2000	900	2,75	1,125	903	9,82	48	58	97	29
2000	900	2,75	1	911	10	50	52	93	34
2000	900	2,5	1,125	903	11,75	42	60	95	32
2000	850	2,75	1,125	855	9,28	49	56	90	27
2000	850	2,5	1,125	854	11,1	43	55	92	29
2000	800	2,75	1,125	803	8,75	50	57	90	28
2000	800	2,5	1,125	801	10,46	44	56	90	30
2500	750	2,75	0,75	754	8,89	54	47	100	59
2500	750	2,5	0,875	753	10,18	49	53	94	48
2500	700	2,75	0,875	702	8,1	54	53	98	46
2500	700	2,75	0,75	702	8,32	56	47	96	58
2500	700	2,5	1	704	9,46	47	60	96	39
2500	700	2,5	0,875	702	9,57	50	52	91	46
2500	700	2,25	1	707	11,42	41	59	98	41
2500	650	2,75	1,25	652	7,2	56	76	99	26
2500	650	2,75	1,125	654	7,28	57	66	97	30
2500	650	2,75	1	650	7,34	59	58	95	35
2500	650	2,75	0,875	652	7,54	55	52	95	44

2500	650	2,75	0,75	653	7,75	57	46	91	55
2500	650	2,75	0,625	655	8,15	57	41	90	74
2500	650	2,5	1,125	652	8,68	46	65	99	31
2500	650	2,5	1	653	8,8	48	57	93	36
2500	650	2,25	1	652	10,6	42	55	91	36
2500	600	2,75	1,125	603	6,74	58	65	92	28
2500	600	2,5	1,125	600	8,03	47	64	95	29
2500	600	2,5	1	602	8,14	50	56	90	34
2500	600	2,25	1,125	601	9,78	40	64	96	32
2500	550	2,75	1,125	550	6,15	58	65	92	28
2500	550	2,25	1,125	552	8,97	42	61	90	29
2500	500	2,75	1,125	504	5,66	57	64	90	27
2500	450	2,75	1,125	451	5,07	58	63	90	26
3000	700	2,5	0,75	705	10,14	52	52	99	65
3000	700	2,25	0,75	713	12,04	48	48	93	60
3000	650	2,5	0,75	651	9,54	53	52	96	64
3000	650	2,5	0,625	650	9,83	54	44	91	81
3000	650	2,25	0,75	659	11,23	49	48	93	60
3000	600	2,5	0,75	602	8,73	55	50	95	60
3000	600	2,25	0,875	601	10,23	48	56	96	49
3000	600	2	0,875	611	12,48	41	54	98	50
3000	550	2,5	0,75	552	8,03	56	49	93	59
3000	550	2,5	0,875	551	7,79	54	57	97	48
3000	550	2,5	1	553	7,69	52	66	100	40
3000	550	2,25	1	551	9,16	48	62	96	38
3000	550	2	0,875	557	11,54	43	51	93	46
3000	500	2,75	0,875	501	6,07	61	58	100	46
3000	500	2,75	0,75	501	6,33	61	51	99	59

3000	500	2,75	0,625	503	6,79	60	46	96	81
3000	500	2,5	1	502	6,97	59	64	91	37
3000	500	2,5	0,875	504	7,15	60	55	90	45
3000	500	2,25	1	501	8,39	49	62	91	38
3000	500	2,25	1,125	502	8,33	46	72	99	33
3000	500	2	0,875	503	10,6	44	52	91	46
3000	450	2,75	1	454	5,35	60	66	98	36
3000	450	2,75	0,875	445	5,5	60	58	97	45
3000	450	2,75	0,75	451	5,74	60	51	96	58
3000	450	2,75	0,625	452	6,21	60	45	95	79
3000	450	2,5	1,125	451	6,2	58	71	93	29
3000	450	2,5	1	451	6,3	58	62	90	34
3000	450	2	1,125	452	9,26	41	68	93	31
3000	450	1,75	1	458	12,04	34	62	100	41
3000	400	2,75	1,125	403	4,67	59	74	99	30
3000	400	2,75	1	401	4,74	60	65	95	36
3000	400	2,75	0,875	404	4,93	61	57	94	45
3000	400	2,75	0,75	404	5,15	61	50	93	56
3000	400	2,75	0,625	401	5,53	59	45	93	77
3000	400	2,5	1,125	403	5,54	57	69	90	27
3000	350	2,75	1,125	354	4,12	59	73	97	29
3000	350	2,75	1	352	4,18	60	64	93	34
3500	600	2,25	0,75	600	10,8	50	54	99	66
3500	550	2	0,75	551	12,25	45	52	94	66
3500	550	2,25	0,75	560	10	51	54	97	65
3500	500	2,5	0,75	501	7,84	55	57	100	67
3500	500	2,5	0,625	502	8,31	56	49	99	87
3500	500	2,25	0,75	503	9,06	52	53	96	64

3500	500	2	0,875	501	10,58	46	58	96	50
3500	450	2,5	0,625	452	7,65	57	48	95	85
3500	450	2,5	0,75	452	7,02	59	55	97	63
3500	450	2,5	0,875	451	6,66	59	63	100	51
3500	450	2,25	0,875	451	8,02	52	60	97	49
3500	450	2,25	0,75	451	8,3	54	52	90	61
3500	450	2	0,875	451	9,64	47	58	95	48
3500	400	2,5	1	401	5,77	60	70	100	38
3500	400	2,5	0,875	402	6,02	60	62	97	48
3500	400	2,5	0,75	400	6,24	60	54	96	61
3500	400	2,5	0,625	402	6,9	58	47	93	82
3500	400	2,25	1	402	6,4	57	68	90	38
3500	400	2,25	1,125	402	6,84	56	79	95	32
3500	400	2	1	400	8,57	46	67	96	39
3500	350	2,5	1,125	350	4,97	58	80	99	31
3500	350	2,5	1	353	5,15	59	70	98	37
3500	350	2,5	0,875	352	5,28	59	60	94	45
3500	350	2,5	0,75	350	5,52	60	52	93	58
3500	350	2,5	0,625	350	5,99	58	46	90	79
3500	350	2,25	1,125	352	5,99	55	77	91	30
3500	300	2,5	1,125	302	4,31	58	79	98	30
3500	300	2,5	1	301	4,38	59	69	93	36
3500	300	2,5	0,875	302	4,54	60	59	90	43
3500	300	2,25	1,25	301	5,09	54	86	92	24
4000	500	2	0,75	507	11,28	49	58	100	71
4000	500	2	0,625	509	11,86	52	47	96	86
4000	450	2	0,625	457	10,9	52	46	93	84
4000	400	2,25	0,75	403	7,51	59	57	95	65

4000	400	2,25	0,625	401	8,28	55	49	96	87
4000	400	2	0,875	401	8,66	50	64	99	52
4000	350	2,25	0,75	350	6,72	60	55	92	62
4000	350	2,25	0,875	350	6,27	60	64	93	49
4000	350	2,25	1	350	6,1	59	75	99	41
4000	350	2	0,875	351	7,73	51	63	96	50
4000	300	2,25	0,875	300	5,49	59	64	91	47
4000	300	2,25	1	303	5,31	58	74	95	39
4000	300	2,25	1,125	302	5,17	57	86	100	33
4000	300	2	1,125	302	6,36	54	84	93	33
4000	250	2,5	0,625	253	4,78	57	50	98	85
4000	250	2,5	0,75	252	4,22	60	58	99	63
4000	250	2,5	0,875	252	3,91	60	67	100	49
4000	250	2,25	1,125	252	4,28	56	96	99	25
4000	250	2,25	1,125	253	4,35	58	84	94	30
4000	250	2,25	1	252	4,47	58	72	90	35
4500	350	1,5	0,875	356	12,3	35	68	100	57
4500	350	1,5	0,75	356	12,51	39	56	90	68
4500	350	1,75	0,875	357	10	42	72	100	60
4500	350	1,75	0,75	354	10,14	46	58	89	68
4500	300	2	0,625	300	8,11	51	50	97	87
4500	300	2	0,75	303	7,07	56	60	96	68
4500	300	1,75	0,875	300	8,51	45	67	93	53
4500	300	1,75	0,75	300	9,06	46	58	91	68
4500	300	1,5	0,875	305	11,02	36	67	89	56
4500	250	2	0,75	252	6,08	54	59	95	65
4500	250	2	0,875	251	5,73	54	69	97	52
4500	250	2	0,75	252	6,08	54	59	95	65

4500	250	1,75	1	250	6,95	51	78	97	42
4500	250	1,75	0,875	252	7,06	52	65	90	49
4500	200	2,25	0,625	201	4,91	52	53	96	89
4500	200	2	1,125	200	4,33	52	91	96	32
5000	250	1,75	0,875	251	7,19	53	70	93	51
5000	250	1,75	0,75	250	7,84	48	62	96	70
5000	250	1,75	0,625	250	8,22	50	50	92	86
5000	200	2	1	201	4,56	53	86	98	42
5000	200	2	0,875	201	4,81	54	73	97	52
5000	200	2	0,75	201	5,19	54	63	97	68
5000	200	2	0,625	201	6,13	50	53	99	90
5000	200	1,75	1,125	200	5,54	49	98	97	36
5000	200	1,75	1	201	5,82	50	84	98	43
5000	200	1,75	0,875	201	5,91	52	70	91	50
5000	200	1,5	1,125	201	7,21	43	92	94	34
5500	200	1,75	0,875	201	5,92	53	75	99	54
5500	200	1,75	0,625	203	7,09	53	53	94	88
5500	150	1,75	0,875	151	4,7	52	73	90	50
5500	150	2	0,75	151	4,28	52	66	99	70
6000	200	1,5	1	200	7,61	42	97	98	52
6000	150	1,75	0,875	151	4,74	53	79	100	55
6000	150	1,75	0,75	150	5,16	52	66	95	69
6000	150	1,75	0,625	152	5,93	50	54	94	89
6000	150	1,5	1	150	5,69	48	90	92	41
6500	100	1,75	0,625	101	4,6	47	58	99	94
7000	150	1,5	0,75 - 0,625	155	7,15	50	64	100	67
7000	150	1,5	0,75	151	6,48	50	71	93	73
7000	150	1,5	0,875	152	6,2	48	88	94	63

Tabla 2. Tabla general unidad A-456-365-120

<i>PROFUNDIDAD (Ft)</i>	<i>CAUDAL (BFPD)</i>	<i>DIAMETRO BOMBA</i>	<i>DIAMETRO VARILLAS</i>	<i>CAUDAL BFPD</i>	<i>STROKES POR MINUTO (SPM)</i>	<i>EFICIENCIA SISTEMA %</i>	<i>CARGA ESTRUCTURAL %</i>	<i>CARGA DE LA CAJA %</i>	<i>CARGA VARILLAS %</i>
2000	1400	2,75	1,125	1425	14,92	40	50	90	40
2500	1100	2,75	1	1109	12,12	44	49	95	50
2500	1050	2,75	1,125	1051	11,29	43	53	100	41
2500	1050	2,75	1	1056	11,48	45	47	93	47
2500	1000	2,75	1,125	1008	10,85	44	53	96	40
2500	1000	2,75	1	1008	10,95	45	46	90	46
3000	1000	2,75	0,875	1007	11,36	49	48	99	63
3000	1000	2,5	1	1014	13,33	43	53	99	54
3000	950	2,75	0,875	957	10,7	50	49	96	63
3000	900	2,75	1	904	10,24	49	55	97	52
3000	900	2,75	0,875	905	10,43	48	48	95	62
3000	900	2,5	1	913	12	45	50	98	49
3000	900	2,5	0,875	914	12,2	47	43	89	57
3000	850	2,75	1	853	9,74	48	54	95	50
3000	850	2,75	0,875	860	10	49	47	90	60
3000	850	2,5	1	855	11,34	45	51	97	50
3000	850	2,5	0,875	865	11,57	46	44	89	57
3000	800	2,75	1,125	804	8,94	48	59	96	42
3000	800	2,75	1	802	9,09	50	52	92	49
3000	800	2,5	1	804	10,78	44	51	94	49
3000	800	2,25	1	813	12,94	41	49	89	49

3000	750	2,75	1,125	755	8,45	49	59	95	41
3000	750	2,75	1	750	8,54	51	52	91	48
3000	750	2,5	1,125	754	10,6	43	58	94	41
3000	750	2,25	1	762	12,19	40	47	89	47
3000	700	2,5	1,125	702	7,91	51	58	90	39
3500	800	2,75	0,875	803	9,63	50	54	99	68
3500	800	2,75	0,75	804	10,52	52	47	98	84
3500	800	2,5	0,875	804	11,56	48	50	94	66
3500	800	2,25	1	808	13,27	41	57	99	58
3500	750	2,75	0,875	754	9,11	51	53	100	67
3500	750	2,75	0,75	753	9,6	51	46	94	82
3500	750	2,5	1	755	10,31	48	56	99	53
3500	750	2,5	0,875	751	10,58	48	49	90	62
3500	750	2,25	1	757	12,67	41	57	99	57
3500	700	2,75	0,875	703	8,58	52	52	95	64
3500	700	2,75	0,75	701	8,54	52	46	92	81
3500	700	2,5	1	702	9,75	57	46	98	52
3500	700	2,5	0,875	711	10	49	49	90	61
3500	700	2,25	1	700	11,56	44	56	93	53
3500	650	2,75	1	653	7,85	52	59	99	53
3500	650	2,75	0,875	654	8,11	53	52	93	64
3500	650	2,5	1	654	9,09	48	57	95	51
3500	650	2,25	1	655	10,76	44	53	91	50
3500	600	2,75	1,125	603	7,01	58	64	95	41
3500	600	2,75	1	601	7,15	59	56	94	48
3500	600	2,75	0,875	601	7,53	54	51	92	61
3500	600	2,5	1,125	601	8,29	48	63	95	42
3500	600	2,5	1	602	8,48	50	55	90	48

3500	600	2,25	1,125	600	9,82	42	60	97	42
3500	550	2,75	1,125	551	6,47	58	64	92	40
3500	550	2,75	1	552	6,6	59	56	90	48
3500	550	2,25	1,125	551	9,13	44	60	93	41
4000	750	2,25	0,875	753	12,32	47	54	96	72
4000	750	2	0,875	762	14,73	52	43	96	70
4000	700	2,5	0,75	711	10,82	53	48	97	87
4000	700	2,25	0,875	711	11,85	48	54	95	70
4000	700	2	1	712	13,71	40	62	98	62
4000	700	2	0,875	711	13,89	43	52	90	69
4000	650	2,5	0,75	660	10,14	51	47	92	83
4000	650	2,5	0,875	655	9,32	52	54	96	68
4000	650	2,25	0,875	660	11,24	46	54	95	69
4000	650	2	1	661	12,95	41	62	92	61
4000	600	2,5	0,875	607	8,59	53	54	96	67
4000	600	2,25	0,875	605	10,53	47	53	92	68
4000	600	2,25	1	607	10	47	60	99	56
4000	600	2	1	610	12,23	41	59	93	57
4000	550	2,75	0,75	556	7,27	59	49	97	83
4000	550	2,5	0,875	553	7,92	54	54	97	66
4000	550	2,25	1	551	9,6	49	57	92	51
4000	550	2	1	556	11,47	40	60	95	58
4000	500	2,75	0,75	505	6,75	59	48	94	83
4000	500	2,5	1	501	7,1	59	59	93	51
4000	500	2,5	1,125	501	6,73	59	68	93	43
4000	500	2,25	1	502	8,34	50	58	92	51
4000	500	2,25	1,125	501	8,21	48	68	100	46
4000	500	2	1,125	502	10	41	65	96	44

4000	450	2,75	1,125	453	5,25	61	71	100	44
4000	450	2,75	1	452	5,43	61	63	98	53
4000	450	2,75	0,875	452	5,65	61	54	97	64
4000	450	2,75	0,75	451	6,18	58	48	93	82
4000	450	2,5	1,125	452	6,17	59	67	91	42
4000	400	2,75	1,125	401	4,69	60	69	98	41
4000	400	2,75	1	403	4,84	61	61	97	49
4000	400	2,75	0,875	400	5,8	60	54	95	62
4000	400	2,75	0,75	401	5,46	60	47	92	79
4000	350	2,75	1,125	353	4,13	61	68	94	39
4000	350	2,75	1	351	4,25	62	60	92	47
4000	350	2,75	0,875	354	4,51	61	53	91	59
4500	500	2	1	509	10,55	41	65	94	60
4500	550	2	0,875	561	11,56	45	57	96	73
4500	550	2	0,75	560	12,8	46	48	95	86
4500	450	2,25	1	451	7,88	49	66	99	57
4500	450	2,25	0,875	450	8,47	49	57	93	69
4500	450	2,25	0,75	452	8,85	51	49	93	86
4500	450	2	1	452	9,69	42	65	95	59
4500	400	2,75	0,75	403	5,97	58	53	100	89
4500	400	2,5	0,75	401	4,18	55	52	97	87
4500	400	2,25	1	402	6,94	56	63	96	53
4500	400	2,25	0,875	402	7,2	57	54	90	62
4500	400	2,25	0,75- 0,625	408	8,7	50	46	94	80
4500	400	2	1,125	401	8,24	43	71	98	46
4500	350	2,75	0,75	352	5,33	57	53	100	88
4500	350	2,5	1,125	352	5,05	57	75	98	44
4500	350	2,5	1	352	5,22	57	66	94	53

4500	350	2,5	0,875	352	5,62	57	58	96	66
4500	350	2,5	0,75	351	6,02	56	51	94	86
4500	350	2,25	1,125	353	5,99	55	52	96	45
4500	350	2,25	1	352	6,28	55	63	93	52
4500		2	1,125	353	7,3	51	69	90	41
4500	300	2,75	0,875	302	4,11	59	59	100	66
4500	300	2,75	0,75	303	4,64	57	52	97	87
4500	300	2,5	1,125	303	4,36	56	74	98	42
4500	300	2,5	1	302	4,56	56	65	92	51
4500	300	2,5	0,75-0,625	321	5,89	54	48	91	81
5000	400	2	1	403	8,74	44	70	97	62
5000	400	2	0,875	400	8,86	48	59	91	72
5000	350	2	1,125	350	7,29	52	75	97	45
5000	350	2	1	351	7,86	46	69	98	59
5000	300	2,25	1,125	300	5,3	55	79	100	47
5000	300	2,25	1	302	5,56	55	68	98	55
5000	300	2,25	0,875	302	5,75	55	58	93	66
5000	300	2	1,125	303	6,38	53	76	95	46
5000	300	1,75	1,125	301	2,15	40	75	96	48
5000	250	2,5	0,875	251	4,32	55	62	100	69
5000	250	2,5	0,75	252	4,88	53	54	95	89
5000	250	2,25	1,125	250	4,44	54	76	91	42
5500	300	2	1,125	301	6,59	52	81	99	47
5500	300	2	1	301	7,02	51	72	95	59
5500	300	2	0,75	303	7,7	51	51	90	85
5500	300	2	0,75-0,625	318	8,61	50	47	94	79
5500	250	2,25	0,875	251	5,18	54	63	95	69
5500	250	2,25	0,75	250	5,98	52	54	98	88

5500	250	2,25	0,75-0,625	270	6,74	52	51	99	84
5500	250	2	1,125	252	5,55	52	80	96	45
5500	250	2	1	252	5,69	54	68	91	52
5500	200	2,25	1,125	202	3,8	53	82	95	44
5500	200	2,25	0,875	202	4,35	53	61	92	66
5500	200	2,25	0,75	201	4,91	51	53	91	86
5500	200	2,25	0,75-0,625	215	5,75	48	51	97	83
6000	300	1,75	0,75-0,625	304	11,28	41	47	100	80
6000	250	2	0,75	251	7,37	50	54	98	87
6000	250	2	0,875	251	6,6	51	63	94	69
6000	250	2	1	250	6,35	50	74	95	57
6000	250	2	1,125	251	6,19	49	86	95	49
6000	250	1,75	0,75-0,625	254	10	43	46	91	74
6000	200	2	0,75-0,625	220	7,38	47	49	93	79
6000	200	2	1,125	201	4,85	51	84	97	44
6000	200	2	1	202	5,12	51	72	90	53
6500	250	1,75	0,875	253	7,67	49	65	90	71
6500	200	2	1	201	5,11	51	79	96	60
6500	200	2	0,875	202	5,53	52	67	95	72
6500	200	2	0,75	201	6,8	50	57	99	92
6500	150	2	1,125	150	3,65	51	89	94	45
6500	150	2	1	151	3,9	51	76	94	54
6500	100	2,25	1	101	2,29	50	81	100	58
7000	200	1,75	0,75-0,625	204	8,57	44	52	98	83
7000	150	1,75	1,125	152	4,44	49	42	44	47

Grafica 1. Curva de la unidad A-456-365-120

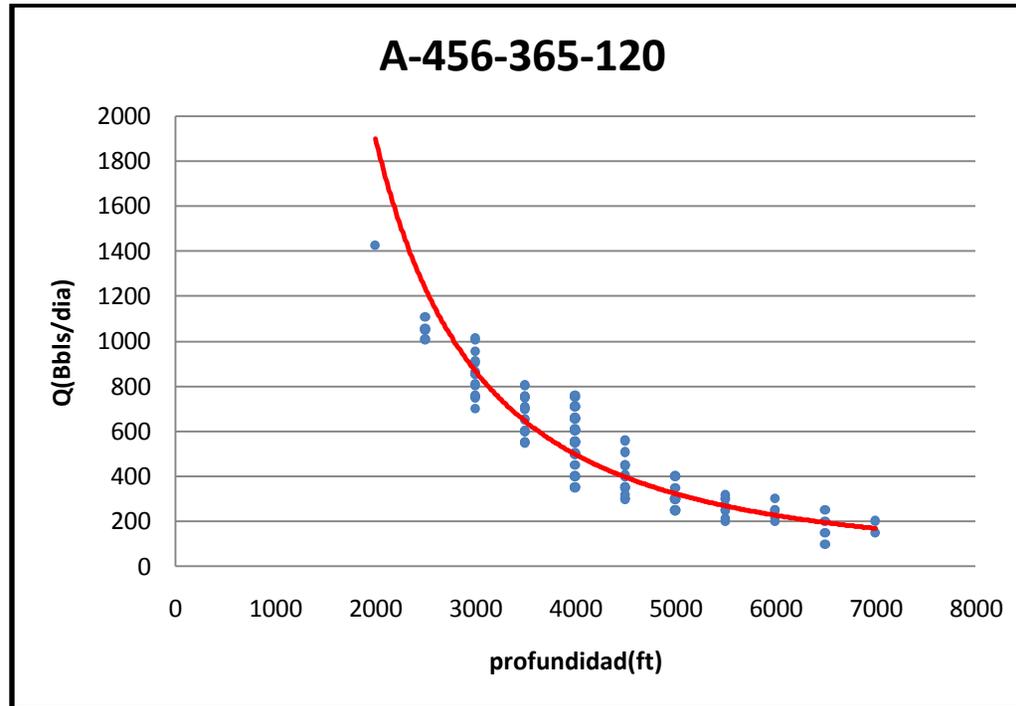


Tabla 3. Tabla general unidad M-1280-427-216

PROFUNDIDAD (Ft)	CAUDAL BFPD	DIAMETRO BOMBA	DIAMETRO VARILLAS	CAUDAL BFPD	STROKES POR MINUTO (SPM)	EFICIENCIA SISTEMA %	CARGA ESTRUCTURAL %	CARGA DE LA CAJA %	CARGA VARILLAS %
4000	1200	2,75	1,25	1503	7,26	40	77	96	57
4000	1200	2,75	1,125	1519	7,44	46	68	93	64
4000	1100	2,75	1,25	1403	6,66	46	74	94	54
4500	1100	2,75	1	1406	6,96	50	66	97	79
4500	1000	2,75	1,25	1308	6,18	46	83	100	59
4500	1000	2,75	1,25	1308	6,18	46	83	100	59
4500	1000	2,75	1,125	1305	6,29	49	74	93	66
4500	900	2,75	1,25	1200	5,52	48	82	99	57
4500	900	2,75	1,125	1202	5,62	50	73	93	64
4500	900	2,5	1,125	1201	6,74	45	72	97	68
4500	900	2,5	1	1202	6,88	48	63	90	76
4500	800	2,75	1,25	1102	4,97	48	81	97	54
4500	800	2,75	1,125	1105	5,06	51	71	90	62
4500	800	2,5	1,25	1102	5,93	43	81	95	57
4500	800	2,25	1,125	1100	7,24	41	67	90	62
4500	700	2,75	1,25	1006	4,37	50	77	97	47
4500	700	2,5	1,25	1007	5,25	43	76	93	50
4500	600	2,75	1,25	900	3,72	54	75	96	43
4500	600	2,5	1,25	906	4,52	45	75	91	46
4500	500	2,75	1,25	801	3,11	53	74	95	42
4500	500	2,5	1,25	801	3,74	47	73	91	43
4500	400	2,75	1,25	702	2,51	53	73	94	39

4500	400	2,5	1,25	702	3,01	47	71	90	38
4500	300	2,75	1,25	605	1,91	53	70	94	33
5000	900	2,75	1,125	1202	5,75	50	80	97	70
5000	900	2,75	1	1208	5,92	51	70	96	80
5000	900	2,75	0,875	1207	6,14	53	61	94	94
5000	900	2,5	1	1208	6,98	49	70	90	82
5000	800	2,75	1	1107	5,32	52	69	90	77
5000	800	2,75	0,875	1102	5,51	53	60	90	91
5000	800	2,5	1	1104	6,24	49	68	96	80
5000	800	2,25	1,125	1105	7,31	41	74	97	68
5000	700	2,75	1,125	1008	4,55	52	77	97	64
5000	700	2,75	1	1003	4,63	54	68	92	74
5000	700	2,5	1,25	1005	5,29	45	87	100	58
5000	700	2,5	1,125	1003	5,39	47	76	92	66
5000	700	2,25	1,25	1000	6,35	40	85	98	59
5000	700	2,25	1,125	1001	6,45	43	72	91	64
5000	600	2,75	1,125	903	3,87	56	74	97	57
5000	600	2,75	1	904	4,03	57	65	90	67
5000	600	2,5	1,25	904	4,56	45	83	100	62
5000	600	2,5	1,125	903	4,64	48	73	93	59
5000	600	2,25	1,25	904	5,5	40	82	92	55
5000	500	2,75	1,125	802	3,24	55	72	95	52
5000	500	2,75	1	807	3,38	55	64	90	64
5000	500	2,5	1,125	805	3,89	49	71	90	54
5000	500	2,25	1,25	802	4,61	42	77	91	46
5000	400	2,75	1,125	703	2,61	55	72	95	52
5000	400	2,5	1,25	701	3,04	47	80	99	45
5000	400	2,25	1,25	706	3,72	43	77	83	43

5000	300	2,75	1,125	605	1,98	55	69	94	45
5000	300	2,5	1,25	602	2,3	47	76	97	37
5000	300	2,25	1,25	600	2,78	44	73	90	37
5000	200	2,75	1,125	501	1,31	54	68	94	42
5000	200	2,5	1,25	500	1,53	47	75	98	33
5000	200	2,25	1,25	503	1,88	43	70	90	29
5000	900	2,75	1	1206	6,06	52	77	98	88
5000	900	2,75	1-0,875	1215	6,35	53	71	95	82
5000	800	2,75	1-0,875	1105	5,64	51	71	97	81
5000	800	2,5	1,125	1105	6,14	46	82	99	71
5000	800	2,25	1	1105	7,58	43	70	96	84
5000	700	2,75	1	1005	4,87	50	75	98	83
5000	700	2,75	1-0,875	1009	5,09	50	69	96	78
5000	700	2,5	1	1006	5,6	488	70	91	79
5000	700	2,5	1,125	1001	5,44	46	81	95	69
5000	700	2,25	1,125	1001	6,45	43	76	91	66
5000	600	2,75	1	908	4,15	54	71	94	75
5000	600	2,75	0,875	901	4,45	50	64	91	93
5000	600	2,5	1,125	901	4,68	47	79	93	64
5000	500	2,75	1,125	802	3,34	50	80	100	61
5000	500	2,75	1	802	3,49	51	71	98	73
5000	500	2,5	1,25	802	3,85	47	86	100	49
5000	500	2,5	1,125	801	3,93	49	75	95	56
5000	500	2,25	1,25	803	4,66	40	84	97	49
5000	400	2,75	1	704	2,85	53	73	100	75
5500	400	2,75	0,875	705	3,02	52	64	85	91
5500	400	2,75	0,875-0,75	712	3,24	52	61	92	89
5500	400	2,5	1,125	704	3,19	50	78	100	58

5500	400	2,25	1,25	706	3,78	35	82	96	45
5500	300	2,75	1	605	2,17	53	70	97	67
5500	300	2,5	1,125	604	2,42	50	75	97	52
5500	300	2,25	1,25	601	2,82	44	81	98	41
5500	200	2,75	0,875	501	1,52	53	61	91	80
5500	200	2,5	1,125	500	1,6	49	72	96	45
5500	200	2,25	1,25	503	1,91	44	77	97	33
6000	700	2,25	0,875-0,75	1009	7,41	51	60	93	94
6000	600	2,5	1-0,875	907	5,18	50	72	96	80-81
6000	600	2,5	1,125	902	5,66	45	84	100	70
6000	600	2	1	903	6,13	42	71	92	83
6000	500	2,5	1	801	4,2	51	76	98	80
6000	500	2,5	1-0,875	808	4,46	50	70	95	77
6000	500	2,25	1,125	804	4,84	45	82	97	67
6000	500	2,25	1	804	4,96	47	71	90	78
6000	400	2,5	0,875	704	3,6	50	64	90	90
6000	400	2,5	1	705	3,42	51	73	98	73
6000	400	2,25	1,125	701	3,87	47	79	98	58
6000	300	2,75	0,875-0,75	613	2,64	50	65	97	94
6000	300	2,75	0,875-0,75	613	2,64	50	65	97	94
6000	300	2,5	1	600	2,54	52	72	97	71
6000	300	2,25	1,125	605	2,96	47	77	97	54
6000	200	2,75	0,875	501	1,62	50	66	98	90
6000	200	2,75	0,875-0,75	514	1,81	50	63	95	87
6000	200	2,75	0,875-0,75	514	1,81	50	63	95	87
6000	200	2,5	1	501	1,71	51	69	95	62
6000	200	2,25	1,125	503	1,99	47	73	94	44
6000	200	2	1,25	502	2,39	40	82	96	37

6500	600	2	1	903	7,12	44	75	96	85
6500	600	2	1-0,875	902	7,34	46	68	93	78
6500	500	2,25	1	804	5	49	77	97	83
6500	500	2,25	1-0,875	810	5,27	50	70	90	76
6500	500	2,25	1	804	5	49	77	97	83
6500	500	2,25	1-0,875	810	5,27	50	70	90	76
6500	500	2	1,125	801	5,95	41	87	93	74
6500	400	2,5	1-0,875	709	3,74	50	74	99	76
6500	400	2,25	1	705	4,12	49	76	95	80
6500	400	2,25	1,125	702	3,94	47	85	100	63
6500	400	2	1,125	703	4,82	41	82	93	65
6500	300	2.5	1-0,875	606	2,82	49	72	99	73-74
6500	300	2,5	0,875-0,75	614	3,14	48	63	92	89
6500	300	2,25	1,125	601	2,98	46	82	99	57
6500	300	2,25	1	604	3,14	47	71	94	68
6500	300	2	1,125	602	3,64	41	78	95	53
6500	200	2,5	0,875	500	1,93	49	65	94	87
6500	200	2,5	0,875-0,75	505	2,11	48	62	90	84-85
6500	200	2,25	1	502	2,11	49	70	91	63
6500	200	2	1,125	501	2,46	42	76	91	47
7000	600	2	1-0,875	903	7,27	47	73	99	83-84
7000	500	2	1	801	6,17	45	79	96	88
7000	500	2	1,125	803	6,02	42	93	100	80
7000	500	2	1-0,875	803	6,38	47	71	94	80
7000	500	1,75	1	802	7,42	40	76	94	87
7000	400	2,25	1-0,875	706	4,38	49	73	95	77-78
7000	400	2	1	700	4,98	46	76	90	78
7000	300	2,25	1	601	3,16	48	77	98	75

7000	300	2,25	1	601	3,16	48	77	98	75
7000	300	2,25	0,875	601	3,47	46	67	91	92
7000	300	2	1,125	601	3,69	43	85	98	62
7000	300	2	1	600	3,83	44	74	90	73
7000	200	2	1,125	504	2,53	43	82	100	54
7500	500	2	1-0,875	805	6,38	47	77	94	84-85
7500	500	2	1-0,875-0,75	805	6,64	47	72	93	79
7500	500	1,75	1	801	7,33	40	82	98	92
7500	500	1,75	1-0,875	802	7,59	43	72	92	82
7500	400	2	1	705	5,22	45	82	98	89
7500	400	2	1-0,875	703	5,42	46	74	94	80
7500	300	2,25	1-0,875-0,75	615	3,74	46	75	98	77-78-77
7500	300	2	1	601	3,89	44	78	95	78
7500	200	2,25	0,875-0,75	507	2,69	45	64	91	87
7500	200	2,25	1-0,875	505	2,4	46	74	99	71-72
7500	200	2	1	500	2,66	44	74	94	66
8000	500	1,75	1-0,875	808	8,1	42	79	93	92
8000	400	2	1-0,875-0,75	706	5,68	45	75	96	80
8000	400	1,75	1	704	6,16	42	80	94	86
8000	300	2	1-0,875	607	4,21	46	76	93	76-77
8000	300	2	0,875-0,75	605	4,69	44	65	90	91
8000	200	2	1	503	2,74	44	80	99	73
8000	200	2	0,875	502	2,99	43	68	90	90
8000	100	2,25	0,875-0,75	407	1,5	42	67	95	86
8000	100	2,25	0,875	400	1,31	42	71	99	93
8000	100	2	1	402	1,4	44	76	99	61
8500	400	1,75	1-0,875	703	6,53	43	78	93	84-85
8500	400	2	1-0,875-0,75	718	5,92	45	78	99	83

8500	300	2	1-0,875-0,75	611	4,77	44	77	100	79-80-80
8500	300	1,75	1	603	5	42	84	97	87
8500	300	1,75	1-0,875	602	5,17	42	74	92	76
8500	200	2	1-0,875	502	3,05	41	78	98	74
8500	100	2	0,875	401	1,6	42	69	93	88
8500	100	1,75	1	401	1,77	40	75	94	59
9000	400	1,75	1-0,875	704	6,91	42	85	93	93
9000	400	1,75	1-0,875-0,75	710	7,35	43	79	90	89
9000	300	1,75	1-0,875	604	5,19	42	78	95	80
9000	200	2	1-0,875-0,75	516	3,41	43	79	99	78
9000	200	1,75	1-0,875	503	3,63	40	76	92	71
9000	200	1,75	1	503	3,46	40	85	100	81
9000	100	2	1-0,875	404	1,62	42	78	100	71-70
9000	100	2	0,875-0,75	401	1,83	40	67	92	88
9000	100	1,75	1	400	1,78	40	80	99	67
9500	400	1,75	1-0,875-0,75	710	7,57	42	82	90	89-89-90
9500	300	1,75	1-0,875	603	5,21	41	84	98	86-87
9500	300	1,75	1-0,875-0,75	608	5,57	42	79	98	81
9500	100	1,75	0,875	402	2,01	40	71	91	89
10000	300	1,75	1-0,875-0,75	617	6,15	40	83	94	87

Grafica 2. Curva de la unidad M-1280-427-216

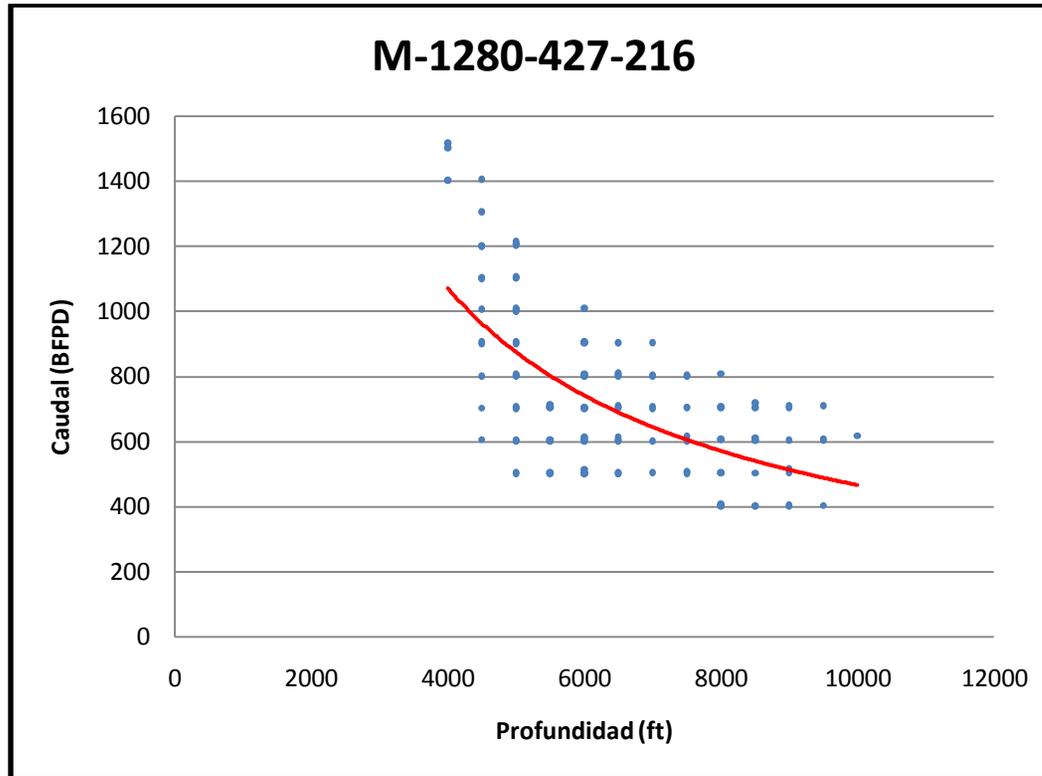


Tabla 4. Tabla general unidad B-25-67-36

PROFUNDIDAD (Ft)	CAUDAL BFPD	DIAMETRO BOMBA	DIAMETRO VARILLAS	CAUDAL BFPD	STROKES POR MINUTO (SPM)	EFICIENCIA SISTEMA %	CARGA ESTRUCTURAL %	CARGA DE LA CAJA %	CARGA VARILLAS %	TOP MINIMUM STRESS (PSI)
500	400	2,75	1,125	402	14,28	42	58	100	7	778
500	400	2,75	1	402	14,3	43	52	96	9	566
500	350	2,75	1,25	352	12,47	40	66	98	6	764
500	350	2,75	1,125	353	12,51	42	60	97	8	534
500	300	2,75	1,25	302	10,71	43	63	94	6	710
500	300	2,75	1,125	303	10,74	44	57	90	7	708
1000	200	2,25	0,75	201	11,06	49	56	97	16	1381
1000	200	2,25	0,625	200	11,26	51	48	94	21	913
1000	200	2	0,75	201	13,88	45	52	95	15	1110
1000	150	2,5	0,625	150	6,97	55	50	93	21	1713
1000	150	2,5	0,75	150	6,81	54	57	96	15	2055
1000	150	2,5	0,875	150	6,73	53	65	99	11	2284
1000	150	2,25	1,125	151	8,13	46	82	98	7	2461
1000	150	2,25	1	151	8,18	48	70	94	8	2341
1000	150	2	1	151	10,26	42	72	98	10	1910
1000	150	2	0,875	151	10,33	44	60	90	11	1729
1000	150	1,75	0,875	151	13,4	36	62	97	12	1444
1000	100	2,5	0,875	101	4,52	51	63	92	11	2398
1000	100	2,5	1	100	4,43	50	72	93	8	2571
1000	100	2,5	1,125	100	4,41	49	83	95	7	2630
1000	100	2,5	1,25	100	4,39	49	95	98	6	2748
1000	100	2,25	1,25	100	5,38	45	91	90	5	2657
1000	50	2,75	0,625	50	1,97	39	51	98	21	2248

1000	50	2,75	0,75	50	1,91	38	58	98	14	2525
1500	100	2	0,625	100	7,59	52	57	100	23	2759
1500	100	1,75	0,625	100	9,66	45	55	97	22	2414
1500	100	1,5	0,625	100	12,79	40	51	93	21	1851
1500	50	2	1	50	3,55	45	90	91	8	4189
2000	50	1,5	0,75	50	6,57	42	75	94	16	4792
2000	50	1,5	0,875	50	6,4	40	90	95	11	5253

Grafica 3. Curva de la unidad B-25-67-36

