

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO,
GAS NATURAL Y PETROQUÍMICA



**EVALUACIÓN DE LAS VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO EN EL SISTEMA
DE BOMBEO MECÁNICO PARA OPTIMIZAR LA PRODUCCIÓN DE
PETRÓLEO**

INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE PETRÓLEO

PRESENTADO POR:
JAIME GUZMÁN FERNÁNDEZ

PROMOCIÓN
1993- II

LIMA – PERÚ
2014

DEDICATORIA

A los obreros y comunidades, para que la riqueza que extraen también sea para ellos fuente de desarrollo humano

A los empresarios inteligentes y colegas que contribuyen a un trabajo limpio, sin contaminar la tierra

Dedico esta tesis a la pachamama por brindarnos sus riquezas más profundas

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia por impulsarme a terminar lo pendiente

Gracias también a mi asesor por su dedicación y apoyo muy valioso

Mis agradecimientos a la UNI cuna de los mejores ingenieros que tiene el Perú

SUMARIO

En la industria del petróleo es de vital importancia la maximización de la recuperación de petróleo que se encuentra en el reservorio.

El factor de recuperación de petróleo depende de las condiciones y propiedades del reservorio, de las características del fluido, y también, de la tecnología que se emplea para producirlo.

Para producir petróleo siempre se emplean dos metodologías en la etapa de la recuperación primaria, dependiendo de la energía confinada en el reservorio; de manera surgente, empleando para ello la energía propia del reservorio o utilizando métodos de levantamiento artificial, para suplir o complementar la energía propia de estos.

Dentro de los métodos de levantamiento artificial, se encuentra el de bombeo mecánico, el cual emplea la energía mecánica proveniente de un motor eléctrico o de combustión, para suplir la energía del reservorio, transmitida a través de una unidad de bombeo. Este método hace uso de una bomba de subsuelo impulsada por una sarta de varillas la que su vez transmite el movimiento proporcionado por un mecanismo impulsado por el motor.

Las varillas del sistema, suelen ser de acero, aunque desde fines del siglo pasado se está desarrollando el empleo de varillas de fibra de vidrio.

El empleo de varillas de bombeo de fibra de vidrio es una tecnología, que empieza a probarse y utilizarse en la producción de petróleo en la década de los 70's en campos petroleros ubicados al oeste de Texas, para reducir las fallas por corrosión. La industria petrolera del Perú utiliza en sus sistemas de bombeo mecánico varillas de acero.

Este estudio evalúa el comportamiento de las varillas de fibra de vidrio mediante el análisis de evaluaciones de resultados de su empleo en campos petroleros, de lugares donde se han hecho pruebas y se utilizan con buenos resultados.

En el capítulo I se plantea nuestro objeto de estudio, se formulan las alternativas de mejora para su empleo, se determina el objetivo que se quiere alcanzar para resolver situaciones adversas para el sistema de bombeo mecánico empleando varillas de acero.

En este primer capítulo, también, se presenta la justificación e importancia de realizar la presente investigación y los aportes que tendría la aplicación de la metodología propuesta.

En el capítulo II se desarrolla una clasificación general de los sistemas artificiales de producción, para precisar el sistema artificial donde se va a evaluar las varillas de bombeo de fibra de vidrio.

En el capítulo III se describe de manera general el sistema de bombeo mecánico empleando varillas. Como los componentes están inter relacionados, se describen los componentes principales para dar a conocer desde el mismo sistema como funcionaria las varillas.

En los capítulos IV y V, se profundiza la investigación sobre las varillas de bombeo de acero y fibra de vidrio respectivamente, su identificación, grados, cargas que soportan, fallas y los cuidados que se debe tener. Además, se investiga cartas dinamométricas típicas que ayudan a identificar problemas comunes en el campo.

En el capítulo VI se analiza, las ventajas y desventajas de las varillas de fibra de vidrio al reemplazar a las varillas de acero en pozos con diferentes condiciones, como pozo desviado, formación de parafinas. Planteándose además casos de estudio y su respectivo análisis.

En el capítulo VII se muestra un análisis económico realizado comparando el empleo de varillas tradicionales de acero y sus resultados respecto al uso de varillas de fibra de vidrio.

En el Capítulo VIII se plantean las conclusiones y recomendaciones que se deducen de la investigación.

INDICE

| | |
|--|-----------|
| Capítulo I: Planteamiento del problema..... | 8 |
| 1.1. Situación Problemática..... | 8 |
| 1.2. Formulación del Problema..... | 9 |
| 1.3. Objetivos..... | 10 |
| 1.4. Justificación e Importancia..... | 10 |
| 1.5. Delimitación del problema..... | 11 |
| | |
| Capítulo II: Clasificación de los sistemas artificiales de producción.... | 13 |
| 2.1. Sistemas de producción por bombeo mecánico (sarta de varillas)..... | 14 |
| 2.2. Sistemas de producción por bombeo hidráulico (b.h)..... | 14 |
| 2.3. Sistemas de producción por bombeo electro sumergible (b.e.s)..... | 14 |
| 2.4. Sistemas de producción por bombeo neumático (gas <i>lift</i>)..... | 14 |
| | |
| Capítulo III: Sistema de bombeo mecánico..... | 16 |
| 3.1. Componentes del sistema de bombeo mecánico..... | 17 |
| 3.1.1. Equipo de superficie..... | 17 |
| 3.1.2. Equipo de fondo o subsuelo..... | 23 |
| | |
| Capítulo IV: Varillas de bombeo de acero..... | 26 |
| 4.1. Identificación..... | 26 |
| 4.2. Grados de las varillas..... | 28 |
| 4.3. Cargas actuantes sobre la sarta de varillas..... | 29 |
| 4.3.1. Cargas estáticas..... | 30 |
| 4.3.2. Cargas por fricción..... | 30 |
| 4.3.3. Cargas por golpes..... | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 4.3.4. Cargas dinámicas..... | 30 |
| 4.3.5. Cargas por vibración de la sarta de varillas..... | 31 |
| 4.4. Fallas en las varillas..... | 33 |
| 4.4.1 Fallas por tensión..... | 33 |
| 4.4.2. Fallas por fatiga..... | 33 |
| 4.4.3. Fallas por diseños..... | 34 |
| 4.4.4 Fallas mecánicas (Sup. de la varilla o cuplas, dobladuras, flexión)..... | 35 |
| 4.4.5. Fallas por conexiones..... | 37 |
| 4.4.6 Fallas por desgaste..... | 40 |
| 4.4.7. Fallas por corrosión (por CO ₂ – corrosión dulce, por H ₂ S – corrosión ácida, Corrosión por cloruros)..... | 41 |
| 4.5. Cuidado y manejo de las varillas..... | 44 |
| 4.5.1. Almacenamiento y transporte..... | 44 |
| 4.5.2. Corridas y recorridas..... | 46 |
| 4.6. Sistema dinamométrico..... | 49 |
| 4.6.1. Dinagramas..... | 49 |
| 4.6.2. Factores que influyen en una carta dinamométrica..... | 49 |
| 4.6.3. Problemas típicos a identificar con las cartas dinamométricas..... | 50 |
| Capítulo V: Varillas de bombeo de fibra de vidrio..... | 58 |
| 5.1. Dimensiones físicas de las varillas..... | 59 |
| 5.2. Cuidado, manejo y almacenamiento..... | 61 |
| 5.3. Propiedades de las varillas fibra de vidrio y varillas de acero..... | 61 |
| 5.4. Proporción de fibra de vidrio y acero en la sarta de varillas..... | 63 |
| Capítulo VI: Análisis de las ventajas y desventajas de las varillas de fibra de vidrio..... | 65 |
| 6.1. Reducción de fallas por corrosión..... | 65 |
| 6.2. Aumento de la producción..... | 65 |
| 6.3. Reducción de tensiones en el sistema de bombeo de superficie..... | 66 |

| | |
|---|-----------|
| 6.4. Disminución de costo de levantamiento..... | 67 |
| 6.5. Control de parafinas en pozos con varillas de fibra de vidrio..... | 68 |
| 6.6. Varillas de fibra de vidrio en pozos con fluido muy bajo..... | 69 |
| 6.7. Varillas de fibra de vidrio en pozos desviados..... | 69 |
| 6.8. Casos de estudios y pruebas..... | 69 |
| | |
| Capítulo VII: Análisis económico..... | 88 |
| | |
| Capítulo VIII: Conclusiones..... | 96 |
| | |
| Capítulo IX: Bibliografía..... | 98 |

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los métodos de levantamiento artificial es el bombeo mecánico (BM), el cual emplea la energía mecánica para suplir la energía del reservorio y llevar el fluido a superficie. El método tradicional hace uso de una bomba de subsuelo impulsada por una sarta de varillas metálicas la que transmite el movimiento proporcionado por un mecanismo impulsado por un motor. Sin embargo el uso de las varillas de acero ocasiona grandes problemas de fallas por corrosión, originando pérdidas de producción debido a incremento de gastos de operación por intervenciones de cambios de varillas.

1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

El bombeo mecánico es el sistema de levantamiento artificial de extracción de petróleo, más ampliamente usado en el Perú y el mundo. Esto nos da la idea de lo importante que es el sistema de bombeo mecánico en la industria. Por esta razón, el reducir el número de fallas que este a menudo presenta y optimizar su desempeño, se ha convertido en uno de los mayores retos de la industria petrolera.

Cada componente del sistema de bombeo mecánico es importante para la eficiencia de la operación en la producción de petróleo. Uno de estos componentes es la sarta de varillas de acero la cual es el enlace entre el equipo de superficie y el equipo de fondo, por lo que su eficiencia es importante para el rendimiento del sistema.

En nuestro país, se usan las varillas de acero, en el sistema de bombeo mecánico. Estas varillas, tienen sus ventajas y desventajas.

Una desventaja es que se requiere unidades de bombeo de gran capacidad de carga debido a que los reservorios se encuentran a grandes profundidades, además, se requiere de mayor cantidad de energía. Otra desventaja es la reducción de la eficiencia volumétrica por la fricción.

Sin olvidarnos que la mayor desventaja es la falla por corrosión. En respuesta a este problema se empieza a probar y utilizar las varillas de fibra de vidrio en la producción de petróleo. Al ser de material sintético, estas varillas son resistente a la corrosión, reduciendo las paradas de producción, por fallas originados debido a la misma. Y pronto se hizo evidente que la varilla de fibra de vidrio tiene otras ventajas con respecto a la varilla de acero, como menor peso, mayor elasticidad; reduciendo las desventajas del sistema con varillas de acero, por lo tanto, mejorando la eficiencia de producción del sistema.

La alternativa de usar varillas de fibra de vidrio en remplazo de las varillas de acero en el sistema de bombeo mecánico, permitiría reducir las fallas por corrosión que se presentan al usar varillas de acero, mejorar la eficiencia de producción de petróleo. La reducción de estas fallas permitiría la disminución de los costos de mantenimiento.

Por estas razones, se realiza el estudio del comportamiento de las varillas de fibra de vidrio comparándolos con el uso de varillas de acero, para aplicarlos a algunos casos peruanos, partiendo de las evaluaciones y resultados de su empleo en campos petroleros similares, donde se han hecho pruebas utilizando dichas varillas y se han obtenido mejores resultados y beneficios que las varillas de bombeo de acero.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La continuación del uso de las varillas de acero genera grandes gastos de intervención de cambio de varillas ocasionados por la corrosión de estas mismas.

HIPOTESIS:

El reemplazo de las varillas de acero por las de fibra de vidrio eliminaríamos las intervenciones de cambio de varillas ocasionados por los problemas de corrosión y consecuentemente disminuiríamos los gastos operativos.

1.3. OBJETIVOS

➤ **Objetivo general**

Analizar el comportamiento de las varillas de bombeo de fibra de vidrio, en la producción de petróleo con el sistema de bombeo mecánico para evaluar la mejora de la eficiencia de producción de petróleo, reducción de las fallas que trae el uso de las varillas de acero y disminuir los costos de mantenimiento.

➤ **Objetivos específicos**

Señalar las ventajas de rendimiento del empleo de las varillas de fibra de vidrio en el sistema de bombeo mecánico para la producción de petróleo.

Definir las condiciones y casos específicos donde el uso de las varillas de fibra de vidrio es más ventajoso en comparación al uso de las varillas de acero

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El sistema artificial de producción por bombeo mecánico se aplica en los pozos que no tienen la energía suficiente para llevar los fluidos a la superficie por si solos, este sistema, ayuda a continuar con la explotación del pozo hasta su última etapa como productor. El sistema de bombeo mecánico es el método de producción artificial más utilizado en los pozos de petróleo; en la publicación que hace el Centro de Capacitaciones Petroperu1981. (Introducción Pág. IV) da la siguiente información: [...] en las operaciones del noroeste del Perú, de un total de 1644 pozos con sistema de producción artificial, 1512 pozos producían por bombeo mecánico en el año 1981.

Esta cifra es el 92% del total de pozos con sistema de producción artificial, lo que nos da una idea de la importancia del sistema citado en la explotación del petróleo. El mejoramiento en su eficiencia de operación representaría un incremento notable en la producción de petróleo.

Todos los componentes del sistema de bombeo mecánico son importantes. Uno de estos componentes es la sarta de varillas, que rige un mayor efecto en el rendimiento del sistema. La sarta de varillas define la carrera neta del pistón de la bomba, por lo tanto, define el caudal de producción de petróleo.

Por otro lado, el uso de varillas de acero en pozos profundos, conlleva a tener altas cargas de sarta de varillas y equipamiento mayores de extracción, con lo que los costos asociados son mayores. El buen comportamiento de la sarta de varillas tiene un impacto fundamental en la eficiencia del sistema y su eventual fracaso conduce a una pérdida total de la producción.

Una alternativa, para el mejoramiento de la eficiencia de producción de dicho sistema son las varillas de fibra de vidrio en reemplazo de las varillas de acero, por lo que es importante hacer el estudio del comportamiento de las varillas de fibra de vidrio, evaluando los resultados de su empleo y pruebas hechos en campos petroleros.

El presente estudio es de utilidad para el área de producción en la industria petrolera del Perú, porque muchos pozos depletados producen con el sistema de bombeo mecánico, usando varillas de acero. Teniendo así, el conocimiento y referencia de una alternativa, del componente muy importante de dicho sistema, que es la sarta de varillas, que interviene en el análisis del funcionamiento eficiente del sistema, ya que la falla de la sarta de varillas, origina la parada de producción.

1.5. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.

La investigación está delimitada a empresas peruanas y a una área en particular y muy importante que es la producción del petróleo con el sistema de bombeo mecánico.

El análisis y evaluación comparativa del comportamiento en el empleo y pruebas se basará en las varillas de fibra de vidrio con respecto al comportamiento del empleo de las varillas de acero con el sistema de bombeo mecánico que ya mencionamos en campos petroleros específicos

Esta investigación pretende realizar una comparación del comportamiento de dichas varillas, identificar las ventajas y desventajas que tienen las varillas de fibra de vidrio en la operación del sistema de bombeo mecánico convencional en reemplazo de las varillas de acero para la producción de petróleo.

La delimitación del problema es en los casos en que el pozo no produce con flujo de manera natural. Los pozos dejan de producir con flujo natural por dos razones principales: Una razón es porque la presión fluyente de fondo cae debido a la pérdida gradual de presión que ocurre en el yacimiento, que tiene lugar debido a la extracción de fluidos de la formación.

La otra razón para que no haya flujo es porque las pérdidas de presión en el pozo son tan grandes, que la presión de fondo necesaria para mover el fluido hacia la superficie no es suficiente, este caso involucra una creciente resistencia al flujo en el pozo.

Por lo tanto, si el pozo no es capaz de producir con flujo natural hasta el punto de entrega, es necesario suministrar energía adicional a los fluidos producidos por el yacimiento, desde una profundidad dada, con algún sistema artificial de producción para continuar la explotación del yacimiento cuando en éste ha declinado la presión.

De las diferentes producciones artificiales, la investigación está delimitada aquella que utiliza la energía mecánica, esto es el sistema de bombeo mecánico.

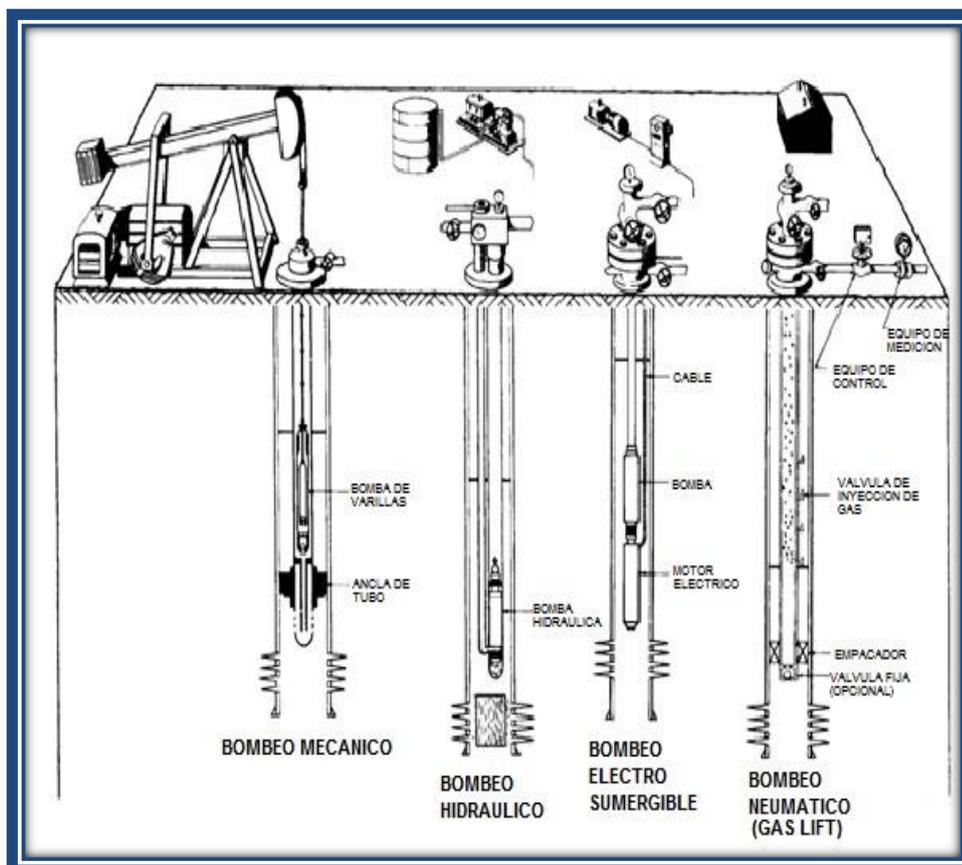
CAPÍTULO II

CLASIFICACION GENERAL DE LOS SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCION

Si el yacimiento tiene suficiente energía para extraer el petróleo hasta la superficie, se le conoce como flujo natural, pero, si la presión es solamente suficiente para que el petróleo llegue hasta cierto nivel en el pozo, entonces se hará producir por algún sistema artificial de producción.

La forma habitual de clasificar a los sistemas artificiales de producción es de acuerdo a las características del reservorio y a las condiciones mecánicas de cada pozo, así como las características del fluido que se desea producir. La figura N° 2-1 muestra los principales tipos de sistemas artificiales y la forma en que se clasifican.

Figura N° 2-1 Sistemas Artificiales de Producción



Fuente: Curso Producción II .Ing. Alberto Erazo- Facultad de Petróleo.UNI- Lima

2.1. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN POR BOMBEO MECÁNICO: SARTA DE VARILLAS

Este sistema requiere de un vínculo mecánico para transmitir la energía de la unidad de bombeo superficial a la bomba de fondo, a este vínculo mecánico se le llama sarta de varillas. Este sistema de bombeo es conocido en inglés como “*sucker rod pumping*”. Su función es extraer los fluidos mediante el movimiento ascendente – descendente originado por una unidad de bombeo superficial (balancín), y transmite la energía por medio de la sarta de varillas a la bomba colocada en el fondo del pozo, cerca del yacimiento.

2.2. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN POR BOMBEO HIDRÁULICO (B.H)

Este sistema transmite la potencia empleando un fluido presurizado que es inyectado a través de la tubería, el fluido presurizado se conoce como fluido motriz y puede ser agua o aceite. El fluido motriz acciona una bomba de fondo que convierte la energía potencial del fluido motriz en una carga de presión, la cual es transmitida a los fluidos producidos del reservorio para ser llevados hacia la superficie.

2.3. SISTEMA DE PRODUCCIÓN POR BOMBEO ELECTRO SUMERGIBLE (B.E.S)

Este sistema artificial utiliza bombas electro sumergible compuestas de varias etapas, una tras otra, las cuales constan de un impulsor giratorio y un difusor estacionario cada una. La bomba de fondo no requiere de sarta de varillas y es accionada por un motor eléctrico de fondo, que es la fuente de potencia que genera el movimiento a la bomba para mantener la producción de fluidos.

2.4. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN POR BOMBEO NEUMÁTICO (GAS LIFT)

Este sistema utiliza gas natural a alta presión que se inyecta desde la superficie para producir los fluidos del pozo.

El bombeo neumático es un método de levantamiento artificial mediante el cual se inyecta continuamente gas a alta presión para aligerar la columna hidrostática en el pozo (flujo continuo) o en forma cíclica para desplazar los fluidos del pozo en forma de tapones de líquido hasta la superficie (flujo intermitente).

CAPÍTULO III

SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

Este sistema se emplea en reservorios que no tienen suficiente energía para que el fluido alcance llegar a superficie. Por lo que el sistema de bombeo con varillas tiene por objeto transmitir la energía desde la superficie hasta la profundidad en donde se encuentra el fluido, a fin de elevarlo hasta la superficie. Por lo tanto, el bombeo mecánico es un procedimiento de succión y transferencia del fluido casi continua hasta la superficie.

El sistema de bombeo mecánico consiste en una bomba de subsuelo de acción reciprocante que es abastecida de energía a través de una sarta de varillas. La energía proviene de un motor eléctrico o de combustión interna, la cual moviliza a una unidad de superficie mediante un sistema de engranajes y correas. Cada vez que la unidad de bombeo superficial y el ensamblaje de fondo realizan el proceso reciprocante, un volumen de líquido proveniente de la formación es levantado a través del espacio anular entre la tubería de producción y la sarta de varillas de acero hacia la línea de descarga en superficie.

Al respecto Campos y Panchi mencionan en su tesis: “Estudio para el cambio de Sistema de levantamiento artificial a bombeo mecánico en el campo Lago Agrio operado por EP – Petroecuador”¹

La bomba eleva el fluido desde el nivel dinámico y no desde la profundidad donde está sentada; por lo tanto el trabajo desarrollado será mayor cuanto más bajo se encuentre dicho nivel. Para una eficiente extracción será indispensable bajar el nivel de fluido tanto como sea posible (a fin de evitar aplicar una contrapresión a la formación) sin que ello provoque un llenado parcial del barril de la bomba que disminuya su rendimiento y cause el golpe de fluido. (Campos 2011:3)

¹ CAMPOS Orlando, Raúl PANCHI. Estudio para el cambio de Sistema de levantamiento artificial a bombeo mecánico en el campo Lago Agrio operado por EP – Petroecuador. Ecuador: 2011

3.1. COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO MECANICO.

Los componentes individuales de un sistema de bombeo mecánico se pueden dividir en dos grupos principales:

3.1.1. Equipo de superficie

El equipo de superficie incluye:

Motor primario

Proporciona la fuerza motriz para el funcionamiento del sistema y puede ser un motor eléctrico o de gas. El motor afecta al consumo de energía y a las cargas de la caja de engranaje. La potencia del motor depende de la profundidad del pozo, nivel dinámico de fluido o sumergencia, velocidad de bombeo y balanceo de la unidad, razón por la que se debe realizar un buen diseño para calcular la potencia del motor, ya que si bien el sobredimensionamiento garantiza la potencia requerida, esto no incrementa la producción y más bien representa un dispendio.

Figura N° 3-1: Motor eléctrico convencional

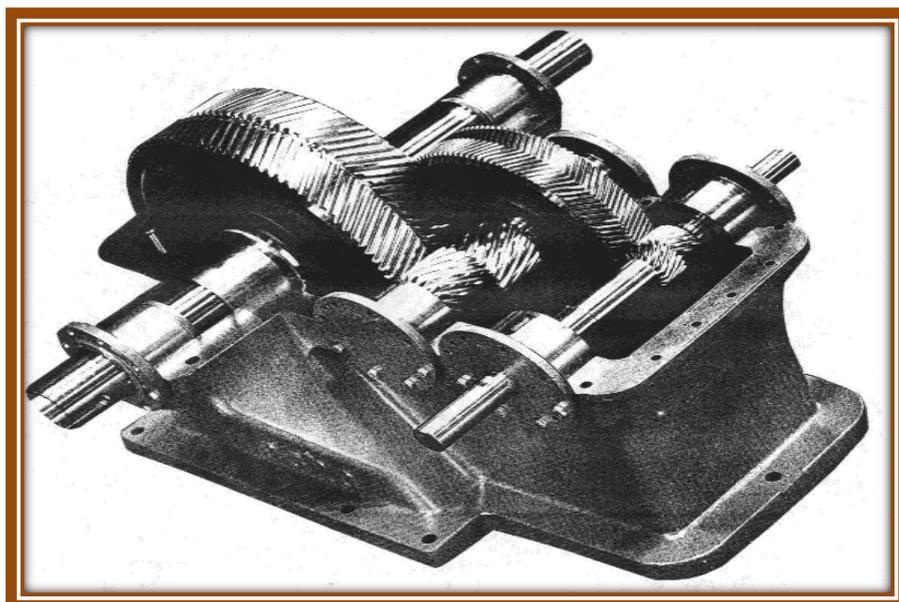


Fuente: Fotografía de Daniel F. Velasco (Petroproducción- Ecuador)

Caja de engranaje o caja reductora

Reduce la velocidad de rotación del motor primario a la velocidad requerida de bombeo y aumenta el torque disponible en su eje de baja velocidad. Una reducción típica de una caja de engranaje es 30:1, esto significa que la caja de engranaje reduce los rpm de entrada a 30 veces, mientras intensifica el torque de entrada a 30 veces.

Figura N° 3-2: Caja reductora o caja de engranaje



Fuente: Manual de bombeo mecánico. UPCO de Venezuela. Héctor Partidas. 2003.

Contrapesos

En unidades convencionales son los que ayudan a reducir el torque, que la caja de engranaje (caja reductora) debe suministrar. Estos ayudan con el torque a la caja de engranaje, durante la carrera ascendente y la carrera descendente, acelerando o desacelerando, cuando las cargas en el vástago pulido son el máximo y el mínimo.

Unidad de bombeo

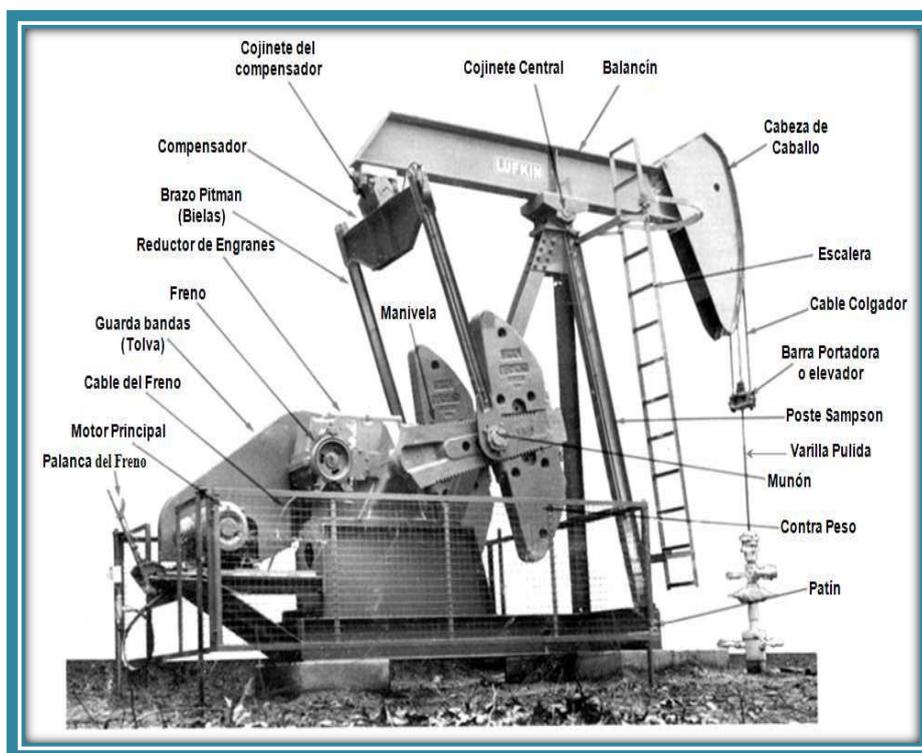
Llamado balancín, caballito, “*pumping unit*”, etc. es el que transforma el movimiento giratorio de la caja de engranaje, en movimiento oscilante ascendente-descendente requerido para operar la bomba de fondo.

El elemento principal de esta Unidad de bombeo es el balancín, son estructuras muy fuertes y que aguantan muy bien las duras condiciones de trabajo. Toda la estructura debe ser colocada sobre una base de acero o concreto que asegure su estabilidad y alineamiento. En general hay tres tipos básicos de unidades de bombeo mecánico (balancines) las que se diferencian por su geometría y clase de contrapeso:

➤ Unidad convencional

Se basa su geometría en un sistema de palanca de clase I (palanca de doble brazo), con punto de apoyo en el medio de la viga del balancín y emplea contrapeso mecánico.

Figura N°3-3: Unidad de Bombeo Mecánico Convencional

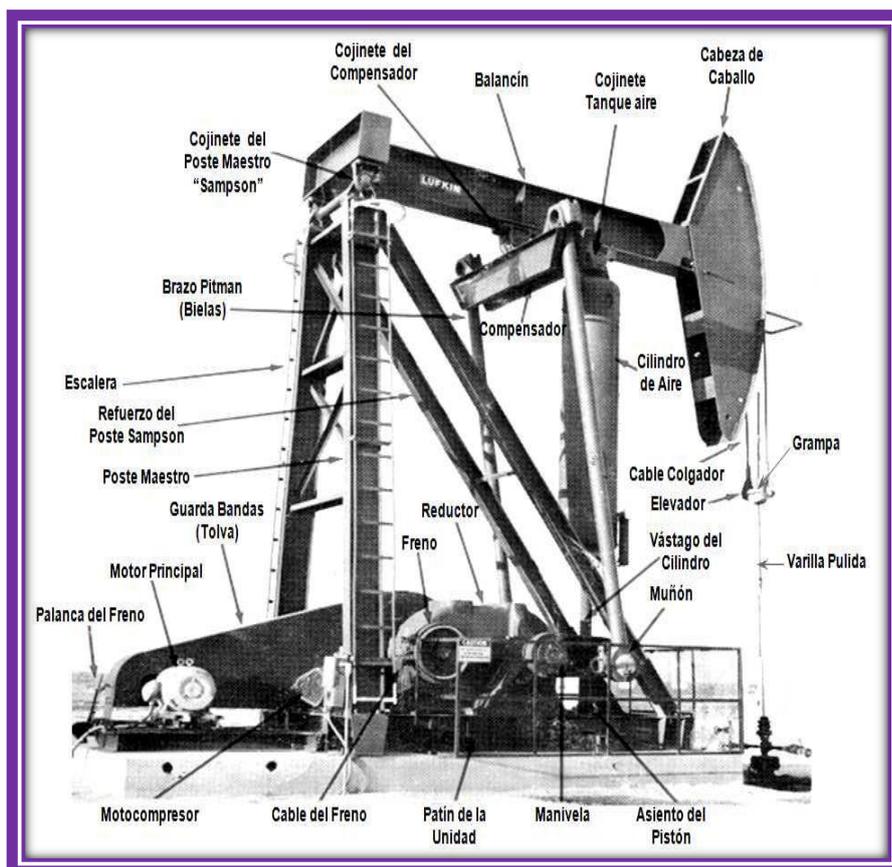


Fuente: RAGA, Juan. Manual de selección de unidades de bombeo mecánico del Activo de producción Poza Rica. México.2001

➤ **Unidad balanceada por aire**

Utiliza un sistema de palanca de clase III (palanca de un solo brazo), con punto de apoyo en el extremo del balancín y es de empuje ascendente simétrico.

Figura N°3-4: Unidad de bombeo mecánico balanceada por aire

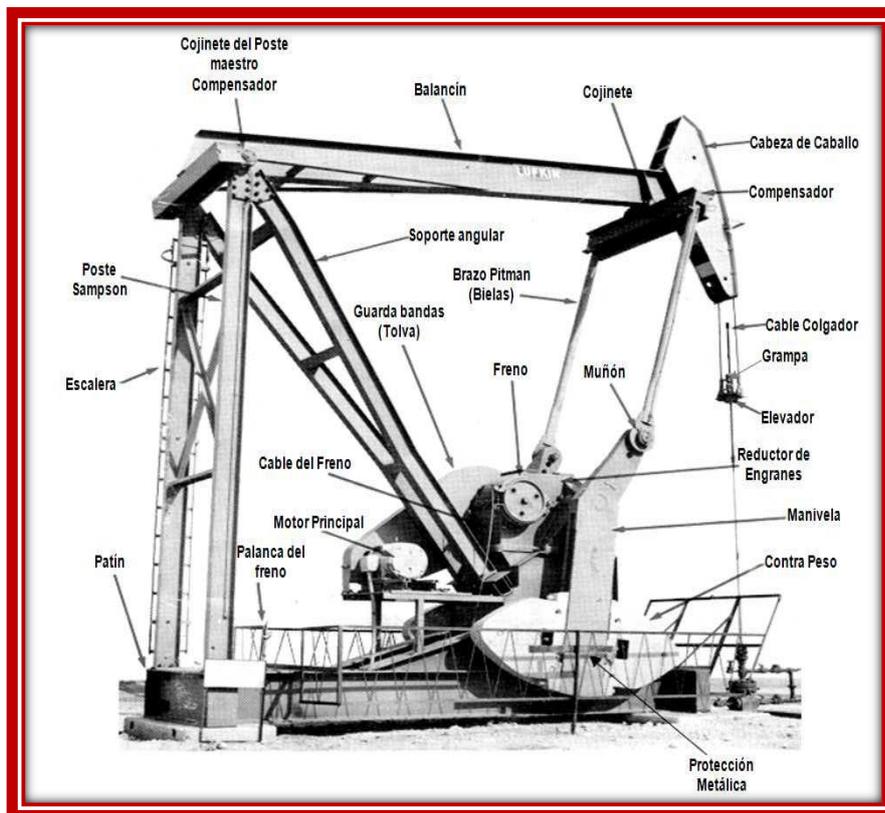


Fuente: VILLEGAS. David. Aplicación de un nuevo sistema de bombeo mecánico no convencional. México: 2014

➤ **Unidad de geometría especial o Mark II**

Utiliza un sistema de palanca de clase III (palanca de un solo brazo), de empuje ascendente asimétrico y emplea contrapeso mecánico.

Figura N°3-5: Unidad de bombeo mecánico Mark II



Fuente: VILLEGAS, David Montiel. Aplicación de un nuevo sistema de bombeo mecánico no convencional. UNAM. 2014

Vástago pulido

Dispositivo de acero conocido como vástago pulido, conecta el balancín a la sarta de varillas. La función principal del vástago pulido es soportar el peso de la sarta de varillas, bomba y fluido. Por lo tanto, el vástago pulido experimenta cargas más altas que cualquier otra parte de la sarta. La superficie lisa de la varilla pulida previene el desgaste de la empacadura de la prensa estopa.

Figura N°3-6: Vástago pulido



Fuente: ADIMRA – CATALOGO: Asociación de Industriales Metalúrgicos Argentina.

Prensa estopas

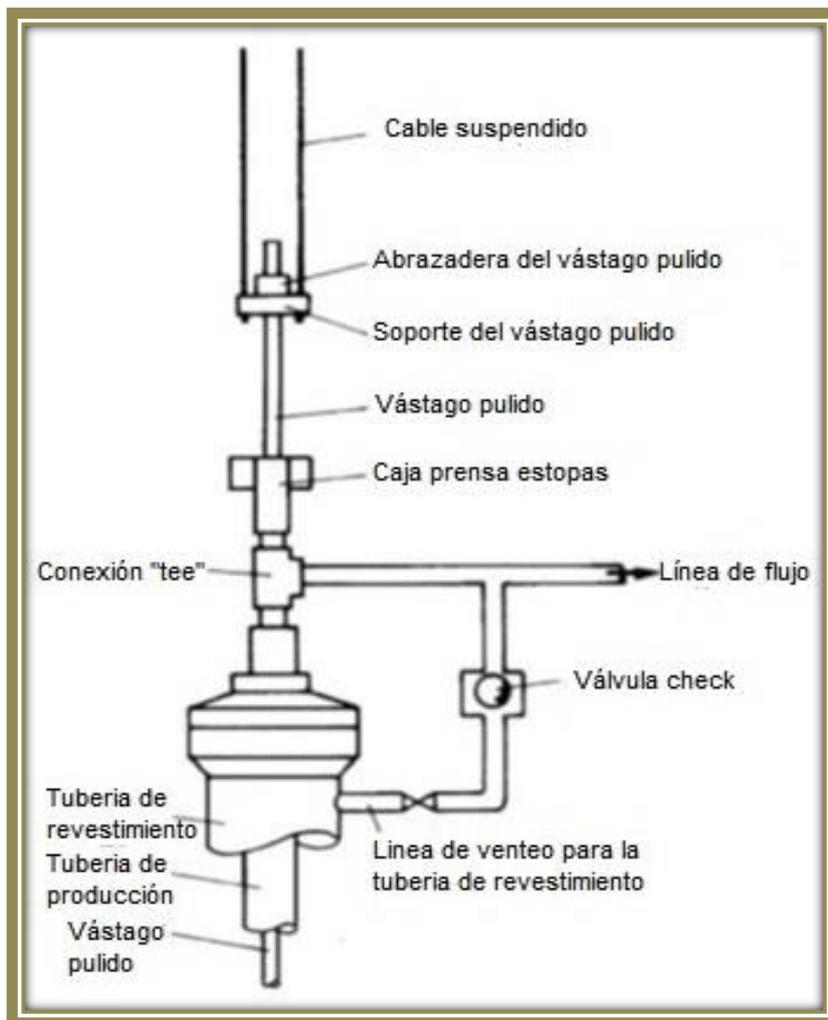
Artefacto que se instala en el cabezal del pozo, forma el sello entre el vástago pulido y el tope de la tubería de producción para permitir el flujo de fluido a través de la línea de flujo y evitar derrame de fluido.

Línea de flujo

Conectan el cabezal del pozo con el separador.

El arreglo del cabezal de pozo de un bombeo mecánico típico se muestra en la figura N° 3-7.

Figura N° 3-7: Componentes típicos de un cabezal de pozo con
Bombeo mecánico convencional



Fuente: VILLEGAS, David Montiel. Aplicación de un nuevo sistema de bombeo

3.1.2. Equipo de fondo o subsuelo

El equipo de fondo o de subsuelo incluye:

Componentes de la bomba de fondo:

➤ Émbolo o pistón

Es la parte móvil de la bomba de fondo, está conectado a la sarta de varillas.

➤ **Barril o cilindro**

Es la parte estacionaria de la bomba de fondo. Es un tramo de tubería metálica con una pared interna pulida para permitir el movimiento suave del pistón.

➤ **Válvulas**

Son de tipo “*check*” y operan sobre el principio de una bola y un asiento. El sistema tiene dos válvulas: la **válvula fija**, es la que se instala en el barril, permite el llenado de fluido al barril en la carrera ascendente. Y la **válvula viajera**, se instala en el émbolo, permite el ingreso de fluido del barril a la tubería de producción en la carrera descendente para luego descargarlo en la carrera ascendente.

Sarta de varillas de bombeo

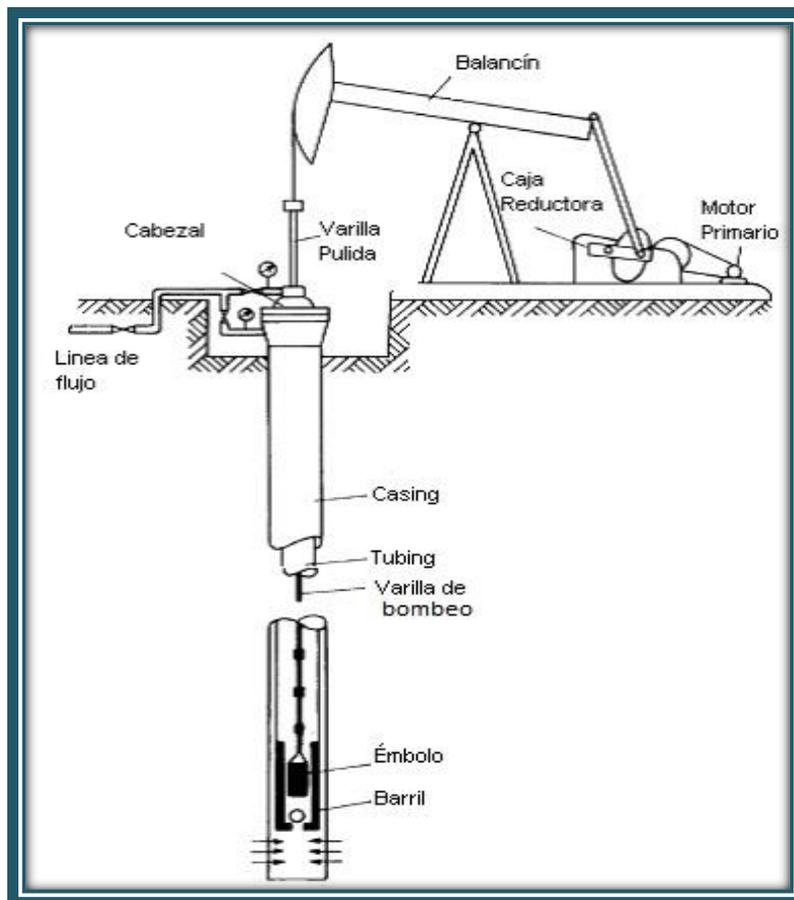
Las varillas de acero son las más usadas, sus principales funciones es de proporcionar el vínculo mecánico entre la unidad de superficie y la bomba de fondo, transmitir la potencia, soportar las cargas, accionar la bomba y llevar los fluidos a superficie.

Sarta de tubería de producción (“*tubing*”)

Es la que se introduce en el pozo y el fluido se produce través del anular tuberías-varillas de bombeo, hasta la superficie. Si la tubería no está anclada entonces podría afectar las cargas sobre las varillas y el desplazamiento del émbolo de la bomba debido a su estiramiento.

Los principales elementos de una instalación de bombeo mecánico se pueden apreciar en la siguiente figura N° 3-8:

Figura N° 3-8: Componentes principales del bombeo mecánico no convencional.



Fuente: VILLEGAS, David Montiel. Aplicación de un nuevo sistema de Bombeo Mecánico no convencional. UNAM. 2014.

CAPÍTULO IV

VARILLAS DE BOMBEO DE ACERO

La sarta de varillas es una parte vital del sistema de bombeo mecánico, que es la que conecta la bomba de fondo con los componentes de superficie.

El comportamiento de la sarta de varillas tiene un impacto directo en la eficiencia del sistema, sus fallas ocasionan la total paralización del sistema de bombeo, por tanto, es indispensable un diseño apropiado de la sarta para asegurar la continuidad de la operación y evitar pérdidas de producción y aumento de costos por mantenimiento. La función principal es transmitir el movimiento oscilatorio de la varilla pulida a la bomba de fondo para levantar los fluidos del reservorio hasta la superficie.

La sarta de varillas se construye conectando las varillas individuales una por una hasta la profundidad deseada de la bomba, las de diámetros mayores son utilizados en el tope y las de diámetro más pequeño en la base para soportar las cargas tensionales.

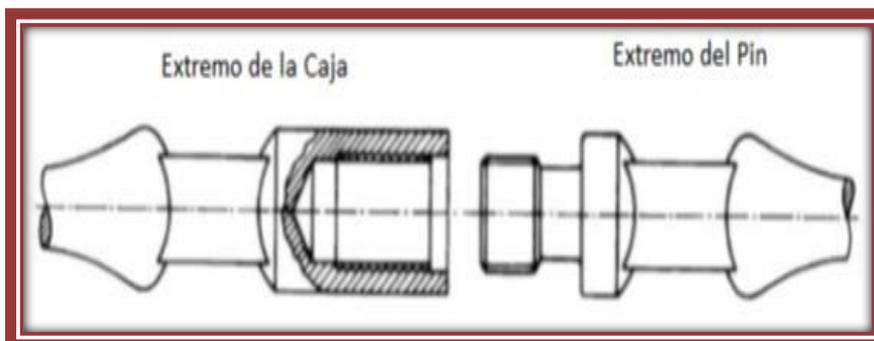
4.1. IDENTIFICACIÓN

Las varillas de bombeo fueron hechos originalmente de postes largos de madera, los extremos hechos de acero, atornillado a la varilla de madera. Una mejora, fue utilizar en los extremos de la varilla, acero y forja recalcada. En la actualidad existen diferentes diseños, por ejemplo: varillas de acero hueco, continuo, flexible y de fibra de vidrio

Las varillas de bombeo más utilizadas son piezas metálicas de acero cilíndricas con conexiones estándar y se fabrican de diferentes diámetros, los diámetro del cuerpo de las varillas van desde 1/2" a 1 1/4" en incrementos de 1/8" y longitudes estándar de 25 o 30 pies. Los extremos de las varillas individuales son forjados en caliente y se terminan con roscas macho (pin) y luego se le coloca a uno de los extremos un cuello con rosca hembra (caja) para ser conectados luego cuando se bajan al pozo.

Los materiales de las varillas pueden ser de diferentes tipos de acero.

Figura N° 4-1: Conexiones en los extremos de las varillas de bombeo (Hembra – macho)



Fuente: VILLEGAS, David Montiel. Aplicación de un nuevo sistema de bombeo mecánico no convencional. UNAM. 2014.

Las especificaciones más importantes de las varillas API de acero se dan en la tabla N°4.1 la cual enumera las áreas transversales del cuerpo de la varilla, el peso medio de la varilla e incluye los acoplamientos y las constantes elásticas para los diferentes tamaños.

TABLA N°4.1. ESPECIFICACIONES MÁS IMPORTANTES DE LAS VARILLAS API DE ACERO

| Tamaño de varilla | Área transversal | Peso en aire | Constante elástica |
|-------------------|------------------|--------------|--------------------|
| Plg | Plg ² | Lb/pie | Plg/(lb pie) |
| ½ | 0.196 | 0.726 | 1.990 E-6 |
| 5/8 | 0.307 | 1.135 | 1.270 E-6 |
| 3/4 | 0.442 | 1.634 | 0.883 E-6 |
| 7/8 | 0.601 | 2.224 | 0.649 E-6 |
| 1 | 0.785 | 2.904 | 0.497 E-6 |
| 1 1/8 | 0.994 | 3.676 | 0.393 E-6 |
| 1 ¼ | 1.227 | 4.538 | 0.318 E-6 |

Fuente: VILLEGAS, David Montiel. Aplicación de un nuevo sistema de bombeo Mecánico no convencional. UNAM. 2014.

4.2. GRADOS DE LAS VARILLAS API

El tipo de varilla de bombeo, más utilizado, es la varilla de acero sólido, de acuerdo a los tipos de materiales con los que se fabrican las varillas se dividen en tres grados:

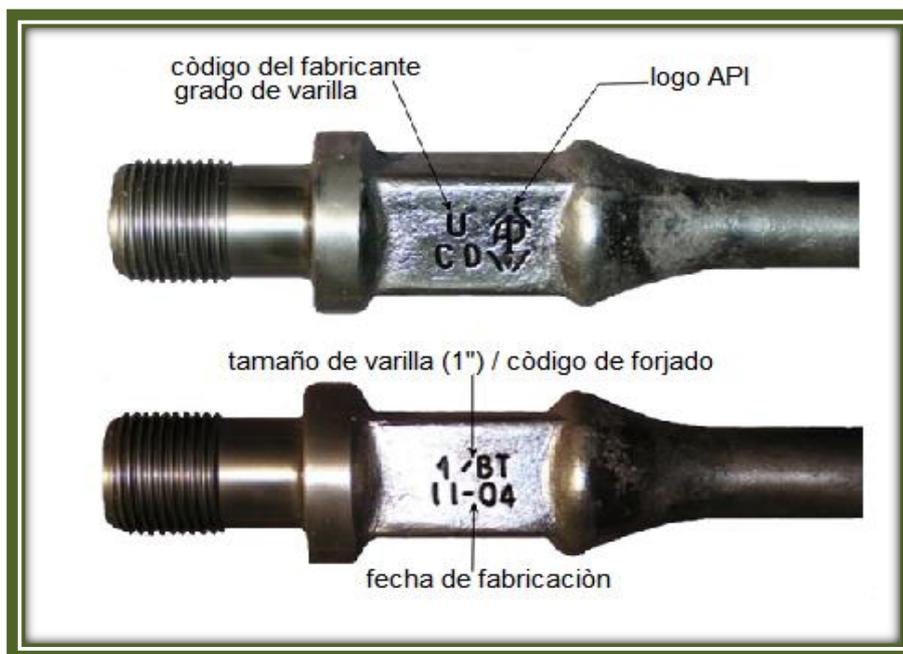
- **Acero grado K, aleación de acero al Níquel y Molibdeno.**
Son de menor resistencia mecánica, pero las que mejor se adaptan para el trabajo en medios corrosivos (CO₂-anhidrido carbónico, H₂S-ácido sulfhídrico). Estas tienen una resistencia mínima a la tracción de 85000 psi. y máximo 115000 psi.
- **Acero grado C, acero al Carbono Manganeso.**
Contiene más del 1.5% de manganeso. El propósito de este aditivo es proporcionarle mayor solidez al acero.
Tienen una resistencia mínima a la tracción de 90000 psi. y máximo 115000 psi, recomendado para servicios medianos y fluidos pocos corrosivos.

➤ **Acero grado D al Carbono o aleación Níquel, Cromo y Molibdeno.**

Estas varillas tienen la propiedad de conseguir mayor resistencia, que llegan hasta 115000 psi. Mínimo y 140000 psi, máximo; recomendado en pozos no corrosivos o fluidos poco corrosivo.

La figura N°4-2 muestra las especificaciones impresas que presentan las varillas API. El módulo de elasticidad del acero es de aproximadamente 30.5 MM Lbs/pulg², con un pequeño ajuste debido al cuello. La velocidad de propagación de la onda de esfuerzo en las varillas es alrededor de 16 M pies/seg.

Figura N°4-2: Identificación de varillas de bombeo de acero API



Fuente: Saskatchewan oil report, 3 y 4 junio del 2015.

4.3. CARGAS ACTUANTES SOBRE LA SARTA DE VARILLAS.

El movimiento de la sarta de varillas puede asemejarse a un movimiento armónico simple. Sin embargo, en la realidad difiere de este tipo de movimiento en que la velocidad angular raramente es constante.

El movimiento de la unidad de bombeo de superficie hace que alternadamente suba y baje la sarta de varillas, dando lugar a diferentes tipos de cargas actuando sobre ellas.

La carga máxima que actúa sobre las varillas se presenta durante la carrera ascendente de las mismas, en la cual, la varilla localizada al tope de la sarta soporta el peso de toda la sarta, la carga de aceleración y el peso del fluido levantado. Esta carga se conoce como la máxima carga soportada por el vástago pulido (PPRL).

Durante la carrera descendente, la varilla localizada al tope de la sarta soportara solamente el peso de las varillas debajo de ella, mientras que la carga de aceleración es negativa. Esta carga se conoce como la mínima carga soportada por el vástago pulido (MPRL).

En general se pueden dividir las cargas que actúan sobre la sarta de varillas en: estáticas, de fricción, de golpes, dinámicas y por vibración.

4.3.1. Cargas estáticas

Se refieren al peso de las varillas más el peso del fluido levantado menos el efecto de flotabilidad.

4.3.2. Cargas por fricción

Son las fricciones del pistón en su barril, de las varillas con el fluido y contra las paredes de la tubería de producción (*"Tubing"*), del fluido contra las paredes del *"Tubing"*.

4.3.3. Cargas por golpes

Son cargas por choque como resultado de golpes de fluido, golpe de gas, golpe de bomba, juego en cojinetes, juego en reductor.

4.3.4. Cargas dinámicas

Son originadas por los cambios de velocidad y de movimiento durante el ciclo de bombeo.

4.3.5. Cargas por vibración de la sarta de varillas

Son las vibraciones mecánicas que se originan en la sarta de varillas por las cargas que están sometidas durante el ciclo de bombeo, dichas cargas recorrerán las varillas en forma de onda longitudinal hasta el otro extremo en donde será reflejada y volverá al punto de origen iniciando la vibración natural de la sarta de varillas. La velocidad de la onda será igual a la velocidad del sonido en el material de la varilla.

Si es aplicado otro impulso a la sarta de varilla vibrando, la primera vibración puede ser aumentada o disminuida. En el primer caso las vibraciones son llamadas sincrónicas y en el segundo caso asincrónicas.

En la sarta de varillas deben ser consideradas dos series de vibraciones:

1. Movimiento de vibración impartido a las varillas por el mecanismo de superficie.
2. La vibración natural de las varillas.

La frecuencia natural de una vibración no amortiguada es inversamente proporcional al tiempo requerido por una onda de fuerza para hacer cuatro viajes a lo largo de la sarta.

Así, la frecuencia natural de una vibración no amortiguada será:

$$No' = a / 4Ls$$

Para sartas combinadas:

$$No' = (Fc * a) / 4Ls$$

Para sartas uniformes $Fc = 1$, mientras que para sartas combinadas es mayor, dado que la frecuencia natural de vibración es mayor.

La velocidad teórica de propagación de la onda es alrededor de 17000 pies / seg.

En la práctica sin embargo, se han encontrado valores de 16300 pies / seg. Utilizando este último valor se obtiene:

$$No' = 244000 * Fc / Ls$$

Teniendo en cuenta el orden de la armónica se tiene:

$$No' = 244000 * Fc / n Ls$$

A partir de esta ecuación se tiene:

$$n = 244000 * Fc / No' Ls$$

Si en la ecuación anterior, cuando se reemplaza No' por la frecuencia del movimiento de bombeo (SPM) y se obtiene un numero entero, significa que está en sincronismo con una armónica del orden "n" obtenido.

Para otras velocidades de bombeo en las cuales "n" no sea un número entero, las velocidades serán asincrónicas.

Las velocidades sincrónicas originaran un tipo de carga en las varillas que causan una fatiga más acelerada de las varillas lo que provoca una rotura de la misma. Siempre que no se originen sobrecargas, puede ser beneficioso operar con velocidades sincrónicas dado que aumentan el recorrido del pistón. Las cargas durante el ciclo de bombeo son siempre de tensión.

Estas cargas tensionales adicionales tienen diferentes efectos en los esfuerzos a los cuales están sometidos tanto el pin como el cuello o caja de las varillas individuales.

Los esfuerzos en el pin son aditivos, es decir, siempre tienen el mismo sentido mientras que la parte superior del cuello está en compresión debido al torque de ajuste.

Por tanto, es de esperarse que el torque apropiado durante las conexiones debe originar esfuerzos de compresión mayores que los máximos esfuerzos tensionales esperados.

En las secciones inferiores del cuello la compresión va cediendo gradualmente hasta que alcanza el punto neutro y por debajo del cual, aparecen los esfuerzos tensionales.

Estos alcanzan su máximo valor en la sección media del cuello. De todo esto se desprende que el torque aplicado durante la bajada en el pozo es de suma importancia.

El torque apropiado tiene un papel muy importante en la prevención de fallas en las conexiones. La mayor parte del torque es absorbido por la fricción entre las roscas macho y hembra de la conexión y en el área de contacto entre el pin y el cuello.

4.4. FALLAS EN LAS VARILLAS

Las fallas en la sarta de varillas de bombeo son:

4.4.1. Fallas por tensión

Las fallas por tensión no son muy comunes y se originan cuando las cargas aplicadas exceden la resistencia a la tensión de la varilla, como por ejemplo cuando se intenta liberar una bomba que está pegada por arena u otro tipo de depósito.

4.4.2. Fallas por fatiga

Las fallas por fatiga son progresivas, comienzan por puntos pequeños, multiplicadores de esfuerzos, que van creciendo bajo la acción de los esfuerzos cíclicos. En una superficie dañada se reduce la sección, por lo que se incrementa la carga o tensión sobre la misma, convirtiéndose en multiplicador de esfuerzo y originando fallas por esfuerzos menores que la resistencia del acero de la varilla.

La figura N°4-3 muestra este tipo de falla, en la mitad superior de la cara rota se observa una superficie liza pulida y la otra mitad de grano grueso y rugoso.

Figura N°4-3: Falla por fatiga mostrando el área liza y rugosa



Fuente: Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico: actualización tecnológica aplicada a la industria– Volumen 2.- B.A, 2010.

4.4.3. Fallas por diseños

La prevención de fallas en las varillas comienza con el diseño apropiado de la sarta de varillas, pero, esto no es suficiente porque los parámetros iniciales pueden variar a medida que las condiciones del pozo cambian. Uno de los parámetros que debe ser monitoreado es la sumergencia porque puede ser motivo de golpe de fluidos lo cual es sumamente dañino para la sarta de varillas.

Un diseño deficiente de la sarta de varillas puede originar fallas en las mismas, atribuidas a **sobrecargas**, como se muestra en la figura N°4-4

Figura N°4-4: Fallas por sobrecargas en la varilla o diseño deficiente



Fuente: Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico: Actualización tecnológica aplicada a la industria– Volumen 2.- B.A, 2010.

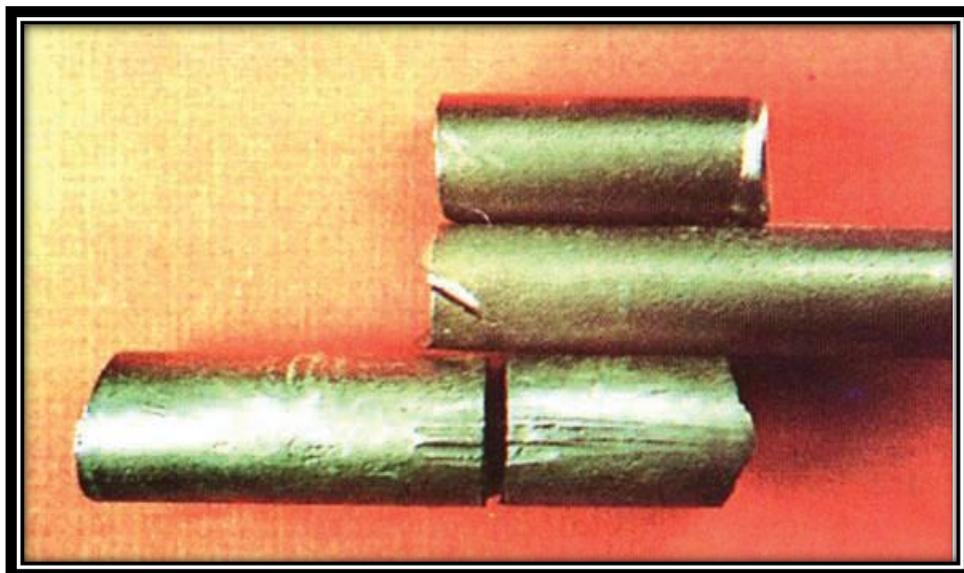
4.4.4. Fallas mecánicas

Las fallas mecánicas son bastantes frecuentes y pueden ser originados por un diseño inapropiado, mal manejo en la localización, torques fuera de rango, practicas obsoletas durante las operaciones de la sarta de varillas en el pozo o cualquier combinación de todas.

✓ DAÑOS EN LA SUPERFICIE DE LA VARILLA O EN LAS CUPLAS

Daños en la superficie de las varillas pueden causar fallas en operación. Evitar dañar las varillas cuando están en la localización con el adecuado manipuleo y revisarlas cuidadosamente antes de bajarlas al pozo. Nunca bajar una varilla con daño visible en su superficie. En la figura N°4-5, vemos cuerpos que presentan fallas por superficies dañadas.

Figura N°4-5: Fallas en las varillas por superficies dañadas



Fuente: Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico: Actualización tecnológica aplicada a la industria – Volumen 2.- B.A, 2010.

✓ DOBLADURAS

Si el cuerpo de la varilla es arrastrado arqueándose, ésta no deberá bajarse en columnas que estén sometidas a cargas altas, éstas ocasionan fallas. La figura N°4-6 muestra varillas dobladas con radio corto. Cada dobladura se hace cuando se toma la varilla por los extremos tendiendo a doblarse en el medio por su propio peso.

Figura N°4-6: Varilla doblada con radio corto

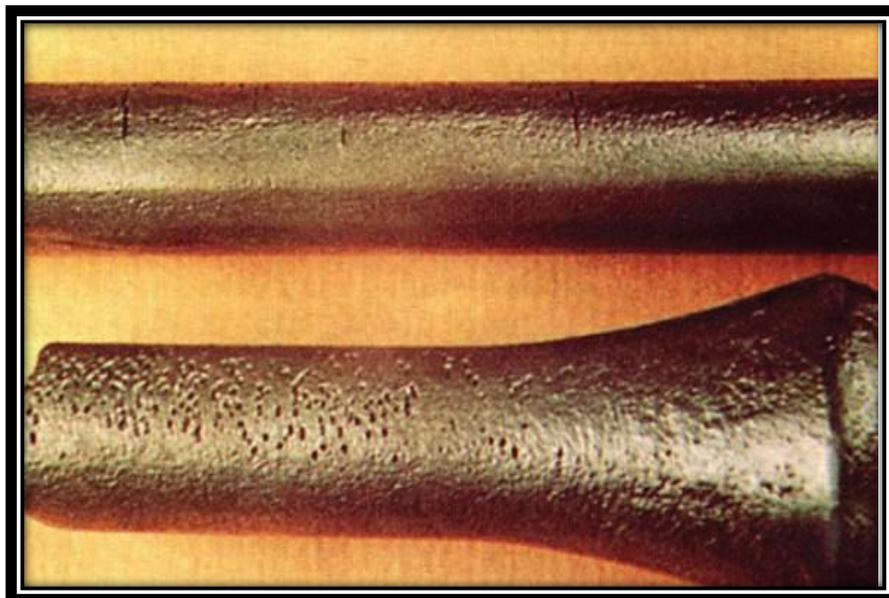


Fuente: Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico actualización Tecnológica aplicada a la industria– Volumen 2.- B.A, 2010.

✓ FLEXIÓN

Las fallas por flexión se producen por el movimiento de la sarta de varillas durante el ciclo de bombeo. Son provocados por velocidades de bombeo muy altas, bloqueo de bomba, golpe de fluido.

Figura N°4-7: Fractura por flexión de fatiga a lo ancho de la Varilla sin abrasión.



Fuente: Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico: Actualización tecnológica aplicada a la industria– Volumen 2.- B.A, 2010.

4.4.5. Fallas por conexiones

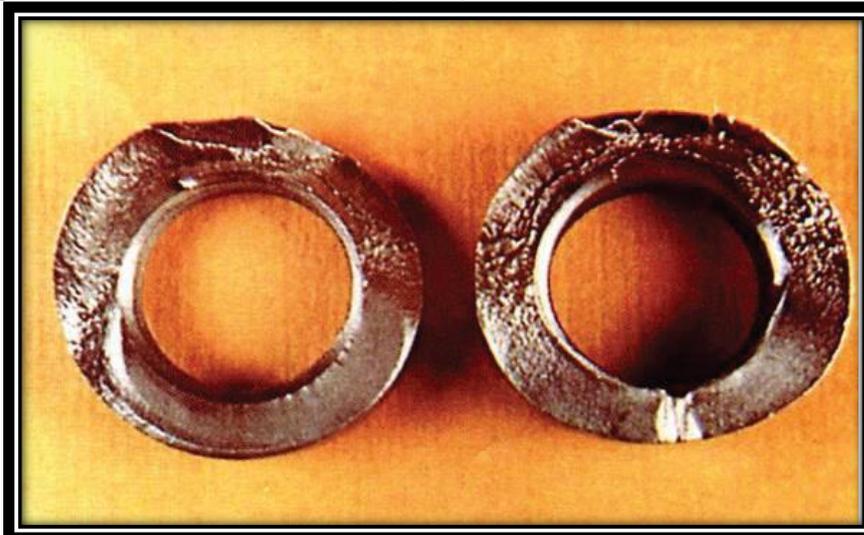
Las cargas de fricción, que se generan entre el pin y la caja, mediante el torque aplicado, ayudan a mantener la conexión apretada, y las roscas deben estar limpias. Si estas condiciones no se satisfacen, pueden ocurrir fallas en las uniones, como se muestran en las figuras siguientes. En la figura N°4-8 presenta dos tipos de fallas del pin por desenrosque. El de la izquierda es la falla más común. La figura N°4-9 muestra fallas por apriete incorrecto en mayor o menor torque.

Figura N°4-8: Presentamos dos tipos de fallas del pin



Fuente: Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico: Actualización tecnológica aplicada a la industria– Volumen 2.- B.A, 2010

Figura N°4-9: Fallas en las cuplas por apriete incorrecto en torque.



Fuente: Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico: actualización tecnológica aplicada a la industria– Volumen 2.- B.A, 2010.

En otros casos, el torque excesivo en cajas y pines, y pobre lubricación con limpieza deficiente son causales de este tipo de falla, como se muestra a continuación en la figura N°4-10.

El excesivo apretado del pin contra el tope de la cuplas se observa por la deformación concéntrica del pin de la varilla.

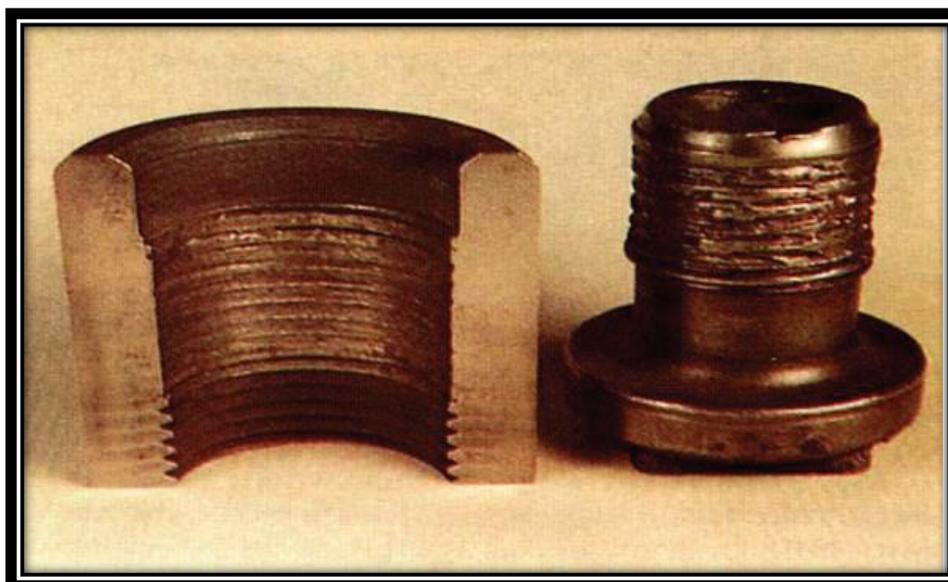
Figura N°4-10: Fallas por el sobre apretado en las uniones



Fuente: Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico: actualización tecnológica aplicada a la industria– Volumen 2.- B.A, 2010.

Como parte del procedimiento de apriete, siempre existe la posibilidad de que las roscas se engranen mal como muestra la figura N° 4-11 fallas por el sobre apretado en las uniones.

Figura N°4-11: Fallas evidentes de las uniones por mal engranaje

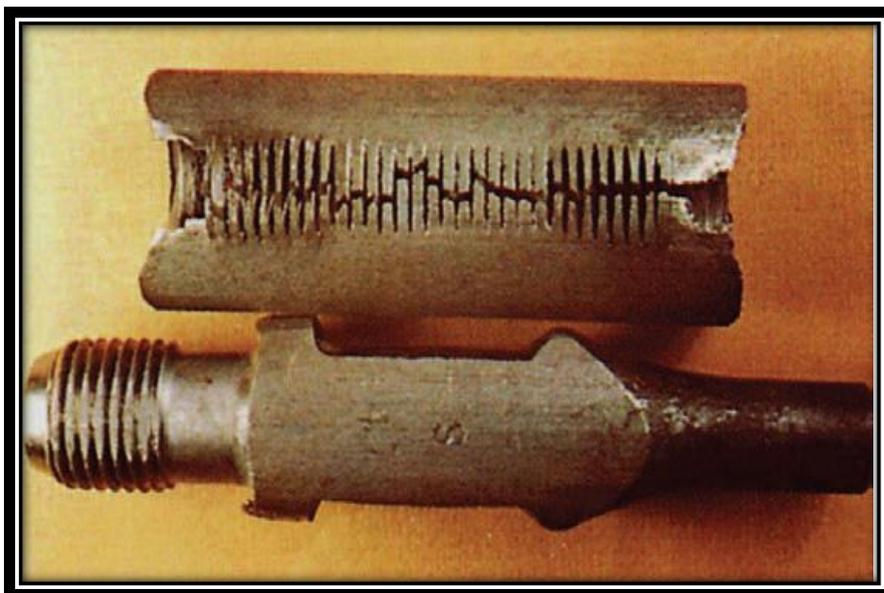


Fuente: Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico: Actualización Tecnológica aplicada a la industria– Volumen 2.- B.A, 2010.

4.4.6. Fallas por desgaste

Desgaste sobre la sarta de varillas de bombeo es la pérdida de las superficies de metal por contacto con la tubería de producción. Esto produce fallas por reducción de la sección resistente, exponiendo nuevas superficies de metal corrosible, los que aceleran el ataque de la corrosión y fallas en las uniones de impacto y daños a los topes. La figura N°4-12 muestra la eliminación de material, por el ajuste y desajuste en la unión.

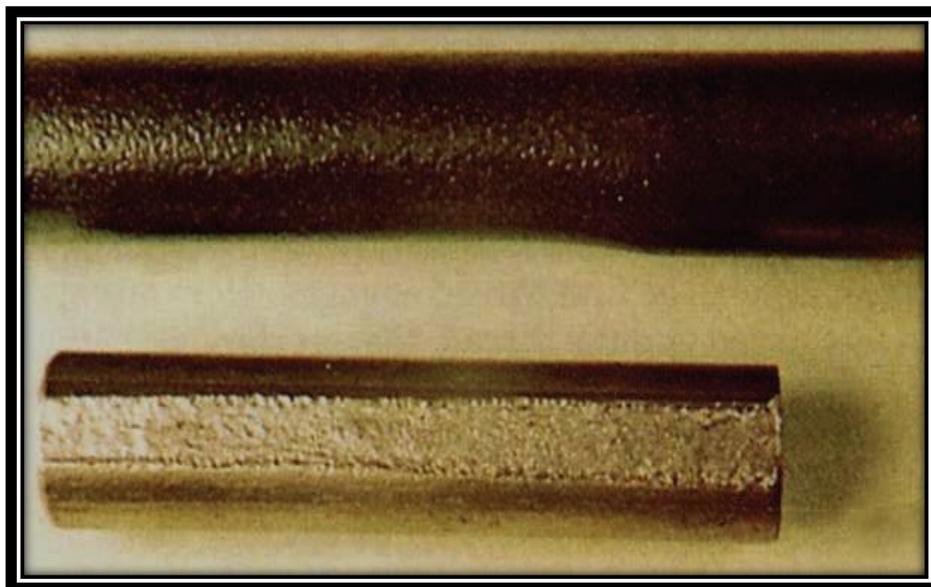
Figura N°4-12: Fallas por desgaste al desajustar las uniones



Fuente: Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico:
Actualización tecnológica aplicada a la industria– Volumen 2.- B.A, 2010.

En la figura N°4-13 se indican dos tipos de desgaste en el cuerpo de la varilla de bombeo, la varilla de arriba es un desgaste por abrasión. La varilla de abajo muestra un desgaste de corrosión-abrasión, donde la película del inhibidor de corrosión se ha roto y el metal quedó expuesto a la corrosión según las condiciones y diversas causas que se ocasionaron en pleno funcionamiento.

Figura N°4-13: Desgaste del cuerpo por abrasión



Fuente: Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico:
Actualización tecnológica aplicada a la industria– Volumen 2.- B.A, 2010.

4.4.7. Fallas por corrosión

La corrosión es el resultado destructivo de una reacción electro-química entre el acero y el ambiente operacional donde actúa.

El hierro elemental del acero se combina con humedad o ácido para formar otros compuestos tales como: óxido de hierro, sulfuro de hierro, carbonato de hierro, etc.

El agua está presente en varias formas y concentración en los fluidos de los pozos considerados como corrosivos y la mayoría tiene cantidades considerables de impurezas y gases disueltos.

Por ejemplo gases ácidos como el dióxido de carbono (CO_2) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S) que se encuentran en la mayoría de los pozos petroleros, son altamente soluble por lo cual tienden a disolverse rápidamente en agua bajando su pH.

Las características de la corrosión según el gas disuelto en el agua:

➤ **Corrosión por CO₂ – Corrosión dulce**

El CO₂ se combina con el agua para formar ácido carbónico y reduce el pH. Este ácido es muy agresivo con el acero.

Este tipo de corrosión se reconoce porque los hoyos que forma son redondos y profundos con bordes afilados.

Generalmente los hoyos se interconectan a través de largos canales y sus bases pueden tener capas de escamas de carbonato de hierro, un depósito de color gris generado por el CO₂.

Figura N°4-14: Desgaste del cuerpo por abrasión



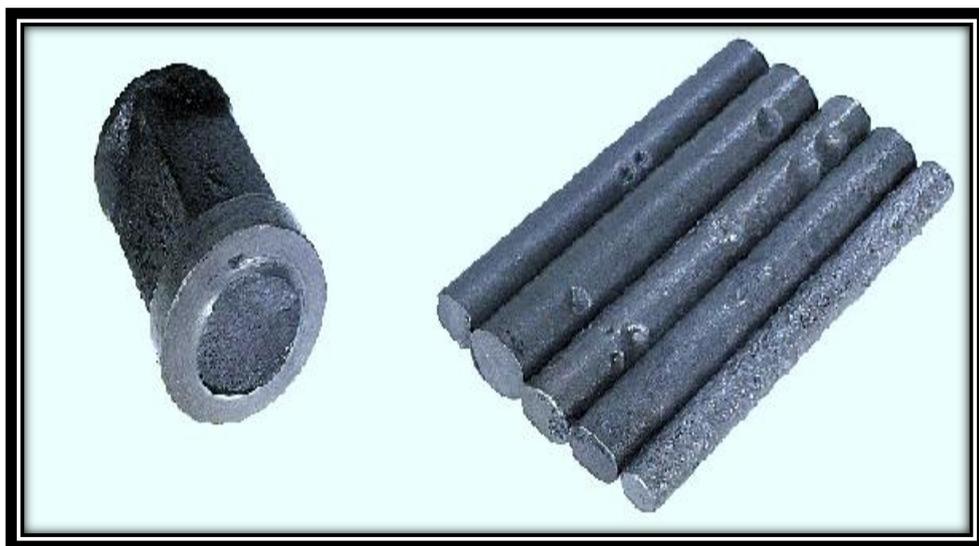
Fuente: Autor: Russell Stevens. Revista: Well Servicing - The Voice of the Oil & Gas Service Industry. Norris DOVER Company- AESC (Association of Energy Service Companies).

➤ **Corrosión por H₂S – Corrosión ácida**

Los huecos formados por este tipo de corrosión son pequeños, redondos y profundos, con bordes biselados y generalmente están esparcidos aleatoriamente por toda el área de la varilla.

Las superficies de las varillas y los huecos están cubiertos por una escama de color negro, bien adherida de sulfuro de hierro que tiende a acelerar la tasa de corrosión. El H₂S también causa la pérdida de resistencia a la tensión por el hidrógeno y origina que el área de la fisura presente una apariencia granular o quebradiza.

Figura N°4-15: Corrosión por Sulfuro de Hidrogeno (H₂S)



Fuente: Partidas Héctor. ESP OIL Engineering Consultants. Taller internacional: Bombeo Mecánico optimización, diagnóstico y operación 2003. Venezuela. (Cortesía: Norris Corp.)

➤ **Corrosión por cloruros**

Los cloruros aumentan la probabilidad de que las varillas fallen por corrosión y esto aumenta con la concentración de cloruros y, por otra parte, dificultan la acción protectora de los inhibidores. Es más agresiva en varillas de acero al carbono que con aleaciones. Los huecos por esta corrosión cubren toda el área de la varilla y no son profundos, de fondo plano, con forma irregular y bordes afilados.

Figura N°4-16: Corrosión con cloruros



Fuente: Análisis de las fallas de las varillas de bombeo. Un informe especial de Norris/A Dover Company 2000-2007

4.5. CUIDADO Y MANEJO DE LAS VARILLAS.

La sarta de varillas de bombeo constituye un enlace esencial entre los equipos de superficie y de fondo de un pozo de bombeo mecánico con varillas. Una sarta de varillas de acero diseñada apropiadamente, manipulada adecuadamente y conformada de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, operada dentro de los parámetros de diseño aceptables y manteniendo un control adecuado de la corrosión en el fondo del pozo, debiera garantizar una larga vida de servicio, económica y satisfactoria, en caso contrario, puede generar gastos considerables.

4.5.1. Almacenamiento y transporte

El almacenamiento físico y transporte de los componentes de la sarta de varillas, de conformidad con las recomendaciones 11BR de la API, ayudaran a evitar las fallas prematuras que se producen por procedimientos indebidos de almacenamiento y de transporte de los mismos.

1. Los componentes de las varillas de bombeo deben ser inspeccionados en su entrega, para verificar las cantidades, dimensiones, grado, etc.
2. Los componentes deben estar limpios con su capa protectora e instalada sus protectores.
3. Inspeccionar rutinariamente cada trimestre los componentes. Retirar y/o reemplazar los componentes dañados. Se debe quitar el óxido con un cepillo de alambre suave, antes de aplicarles una nueva capa protectora.
4. Los componentes deben ser rotados rutinariamente en almacén, de manera que los componentes más antiguos del inventario sean utilizados primero.

- **Procedimiento para la carga o descarga**

1. Durante las manipulaciones, evitar que entren en contacto con objetos que le pueden causar daños mecánicos. Así también, tener cuidado con los separadores y sujetadores usados para su transporte.
2. Las varillas nunca deben ser manejadas de forma tal que se produzca un doblado o retorcimiento permanente. Las varillas dobladas o torcidas están dañadas permanentemente y debieran ser desechados.
3. Las varillas de acero empaquetadas deben ser elevadas y/o recostadas mediante el uso de montacargas y una barra espaciadora aprobada, y con un gancho en "T" que soporte adecuadamente el peso completo del paquete de varillas, elevando un paquete a la vez, desde abajo. Las varillas individuales siempre deben ser elevadas y/o recostada una a una sea con una barra espaciadora aprobada y correas de nylon o mediante el uso de al menos dos personas, cada una ubicadas a 3 o 4 pies desde cada extremo.

- **Procedimiento para el transporte**

1. Los camiones o remolques, para el manejo de componentes de sarta de varillas de acero, deben tener plataforma no metálica o soportes en buenas condiciones.

Se debe evitar el contacto de la correa y las varillas mediante el uso de espaciadores.

Las varillas de acero empaquetadas, deben ser manejadas como una unidad empaquetada. La unidad empaquetada debe mantenerse nivelada, con los soportes no metálicos por debajo de los soportes del paquete. Cuando se requiera apilar los paquetes, uno sobre otro, los soportes del empaque del paquete superior deben alinearse verticalmente con los soportes del paquete que queda por debajo. Las varillas de acero sueltas deben ser colocadas cuidadosamente sobre soportes no metálicos. Los soportes de los extremos deben estar aproximadamente 1 pie de cada extremo y los otros tres soportes deben ser espaciados equidistantes, en el medio. Las varillas de acero apiladas deben ser separadas por espaciadores no metálicos. (Stevens 2003:5)

- **Procedimiento para el almacenaje**

1. Las varillas y componentes deben almacenarse en un sitio bajo techo, protegidos de la intemperie, sobre estantes o paletas fabricadas de materiales no metálicos. Deben ser almacenados separadamente, ordenados por tipo, tamaños, capacidad de carga. El lugar de almacenamiento con los estantes debe tener una superficie nivelada y firme, con un drenaje adecuado para promover el escurrimiento del agua.

Las varillas de acero empaquetadas deben ser almacenadas en estantes diseñados para minimizar el contacto entre metales. Estas deben ser almacenadas con soportes no metálicos debajo de cada soporte de paquete y, al apilar varillas empaquetadas, los soportes del paquete en la fila superior deben alinearse verticalmente y de forma correcta con los soportes del paquete que queda por debajo. Las varillas de acero suelta deben ser almacenados separadamente y ordenados. Utilizar cinco soportes no metálicos, con el soporte en cada extremo ubicado aproximadamente 1 pie del extremo de cada varilla y los otros tres soportes espaciados de forma equidistante en medio de las varillas.

4.5.2. Corridas y recorridas

El documento de la API, Practicas Recomendadas 11BR, manifiesta que “... la fuerza útil de las varillas de acero está limitada por el comportamiento de los metales a la fatiga en un ambiente no corrosivo.”

“... la vida limitada por la fatiga puede ser reducida dramáticamente mediante la instalación incorrecta”.

Los procedimientos correctos para introducir varillas de acero dentro de un pozo en producción toman tiempo y no deberían constituir una carrera contra el reloj. El tiempo invertido se pagará con creces en términos de periodos de corrida más largos, sin tiempos fuera de servicios innecesarios y el reemplazo de varillas.

- **Información general sobre corridas y recorridas**

1. Los componentes de la sarta de varillas de acero deben ser inspeccionados a su recibo. Verificar cantidades, tamaños, tipos, capacidad de carga y que no estén dañados.
2. No retirar los protectores de los componentes hasta que se esté preparado la línea para su instalación, excepto para fines de inspección para luego ser reinstalado de inmediato al concluir la inspección.
A la falta de protectores a algún componente, inspeccionar y, en caso de no estar dañado, limpiar meticulosamente y reaplicar un recubrimiento protector apropiado y reinstalar los protectores.
3. Las varillas sueltas deben almacenarse en el sitio del pozo. Utilizar soportes no metálicos, asegurar que las varillas no se doblen y evitar el contacto de metal sobre metal.
4. Las varillas cortas y los acoples debieran ser almacenados sobre paletas separadas, hasta que se preparen para su uso.

- **Corrida de las varillas**

1. El gancho para las varillas debe ser ubicado sobre el hueco de la tubería de producción, a fin de que las varillas de acero se puedan introducir dentro de la tubería de producción sin crear fricción y así evitar desprender cualquier inhibidor de corrosión.

2. Para desempaquetar de forma segura, sin dañar las varillas, usar cuchillas de corte lateral o tijeras para latón, para cortar las fajas de acero.
3. No colocar herramientas, tuberías u otros equipos sobre el atado de varillas, ya que estas pueden causar daños a la superficie de las varillas.
4. El volcar los acoples al piso, puede causar fallas en cada uno de los mismos, retener contaminantes en las roscas. El limpiar los contaminantes de las roscas de los acoples requiere gran cantidad de tiempo.
5. Las varillas cortas son susceptibles a los mismos daños que pueden sufrir las varillas de longitud convencional.
6. Los protectores de rosca deben ser desenroscados a mano o mediante una llave de impacto neumático. De hacerlo a martillazos dejará residuos plásticos sobre las roscas, que lo dañaran durante el enroscado o desarmado de la sarta de varillas.
7. Al quitar los protectores de las cajas, no encajar un destornillador contra las roscas de los acoples. Estos siempre terminan dañando la cresta de la rosca del acople.
8. Se deben limpiar e inspeccionar los pines y cajas. De estar contaminados, estas deben ser removidos y las roscas deben ser lubricadas nuevamente.
9. Los lubricantes, para las roscas de las varillas de acero, deben ser lisos, grasosas y contener inhibidores de la corrosión así como antioxidantes.
10. Las varillas que choquen el atado de varillas dañarán cada varilla que golpeen. Las varillas arrastradas por la tierra tendrán roscas contaminadas, las cuales deben ser limpiadas e inspeccionadas en cuanto a daños.
11. Las tenazas de potencia se deben instalar correctamente, para que pueda suministrar el desplazamiento circunferencial especificado por el fabricante, al juntar toda la sarta de varilla de bombeo.

4.6. SISTEMA DINAMOMÉTRICO.

Un dinamómetro es una herramienta que tiene como función registrar las cargas (fuerzas) sobre la sarta de varillas como una función de su posición. El registro es usualmente llamado “carta dinamométrica”. Dependiendo del sistema usado, es igual a un gráfico X-Y en una hoja de papel, o en un registro electrónico de los puntos de carga vs posición, y un sistema de grabación, que en mucho de los nuevos sistemas dinamométrico utilizan pequeñas computadoras en lugar de *plotters* analógicos, almacenan la data en discos o memorias de computadoras.

4.6.1. Dinagramas

Las cartas dinamométricas presentan muchos gráficos de formas diferentes, pues las formas dependen, del diseño del sistema, de la instalación y de las condiciones de bombeo. Es una ayuda para entender el funcionamiento de la bomba, si se tiene problema con la sarta de varillas.

4.6.2. Factores que influyen en una carta dinamométrica

Existen factores que influyen en las cartas dinamométricas, como las que a continuación se enumeran:

➤ **Velocidad de bombeo.**

El incremento de este parámetro incrementa el recorrido del pistón.

➤ **Profundidad del bombeo.**

A menor profundidad la carta dinamométrica tiende a ser más rectangular.

➤ **Fuga en las válvulas.**

Se debe sospechar una fuga en las válvulas (fija o viajera) cuando la carta dinamométrica presenta un llenado menor a la carta dinamométrica normal del pozo, sino se han modificado las condiciones mecánicas de la instalación.

➤ **Velocidad de bombeo registrada de superficie.**

Ante una disminución de velocidad en superficie, la carta dinamométrica presenta el fenómeno llamado sub viaje, esto es, la carrera efectiva puede disminuir haciendo menor la eficiencia.

➤ **Carga sobre el pistón.**

La carga sobre el pistón depende del diámetro del pistón, de la carrera efectiva y la velocidad de bombeo. Si se incrementa la carga, la carta dinamométrica presenta el fenómeno sub viaje del pistón.

➤ **Vibraciones.**

Las vibraciones se notan en la carta dinamométrica como incrementos y decrementos de cargas en la carrera descendente.

➤ **Relación alta de gas petróleo.**

La relación alta de gas petróleo, se refleja en la carta dinamométrica como una curva suave en la carrera descendente del pistón.

➤ **Golpe de fluido.**

El golpe de fluido se nota en la carta dinamométrica como una disminución de la carga en el descenso, en un tiempo relativamente corto.

➤ **Fricción.**

Cuando existe mucha fricción entre el pistón y el barril, por efecto de la viscosidad del fluido y poca luz entre pistón y barril, la carta dinamométrica se presenta inclinada hacia arriba.

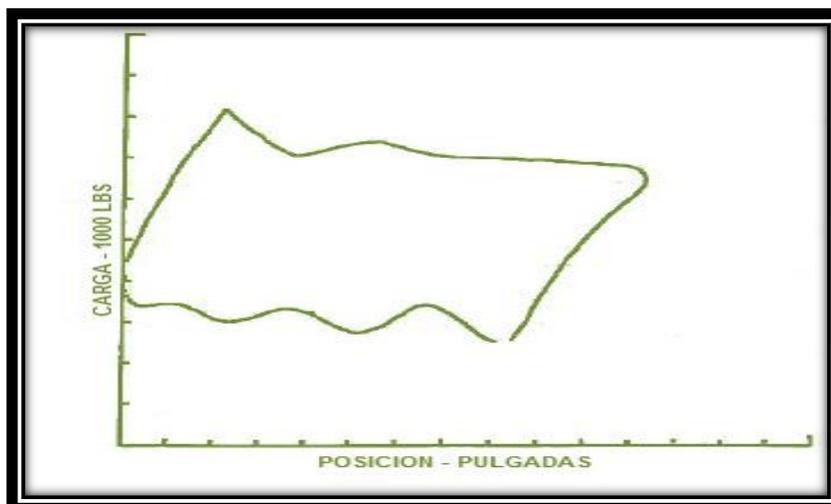
4.6.3. Problemas típicos que se pueden identificar con las cartas dinamométricas

En esta sección se presenta una serie de cartas dinamométricas, que determinan condiciones típicas de bombeo en los pozos.

➤ **Bombeo normal**

Es una carta de forma rectangular, no presenta defecto en las válvulas, no interferencia de gas y muestra un buen llenado de la bomba.

Figura N°4-17: Carta dinamométrica (Bombeo Normal)

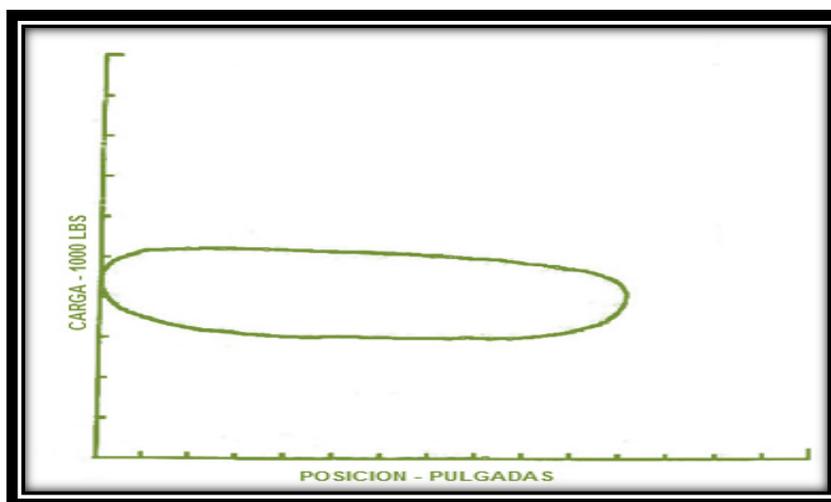


Fuente: Velasco Daniel. Universidad Tecnológica Equinoccial. Facultad de Ciencias de la Ingeniería- carrera tecnología en petróleos. Ecuador -009.

➤ **Bomba desasentada**

Este tipo de carta muestra solo el peso de la sarta de varillas en el fluido, la causa es que la bomba se ha salido de la zapata de anclaje.

Figura N°4-18: Dinamométrica (Bomba desasentada)

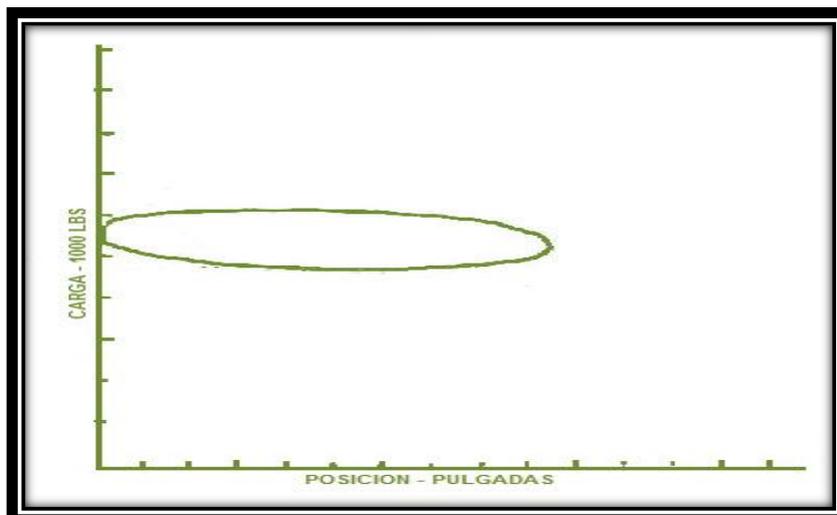


Fuente: Velasco Daniel. Levantamiento artificial por bombeo mecánico Universidad Tecnológica Equinoccial - carrera tecnología en petróleos. Ecuador -2009.

➤ **Bomba bloqueada por gas**

La carta se presenta como una elipse, la base del diagnóstico en este caso es la relación gas petróleo del pozo.

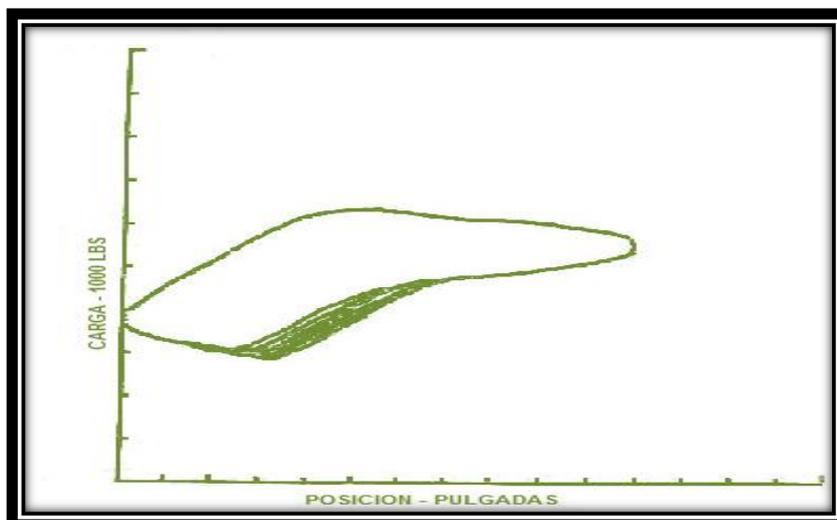
Figura N°4-19: Carta dinamoétrica (Bomba bloqueada por gas)



Fuente: Velasco Daniel. Universidad Tecnológica Equinoccial. Facultad de Ciencias de la Ingeniería- carrera tecnología en petróleos. Ecuador -2009

Este problema se puede solucionar empleando un ancla de gas, la carta dinamoétrica se modifica como se muestra en la figura N°4-20.

Figura N°4-20: Carta dinamoétrica (con ancla de gas)



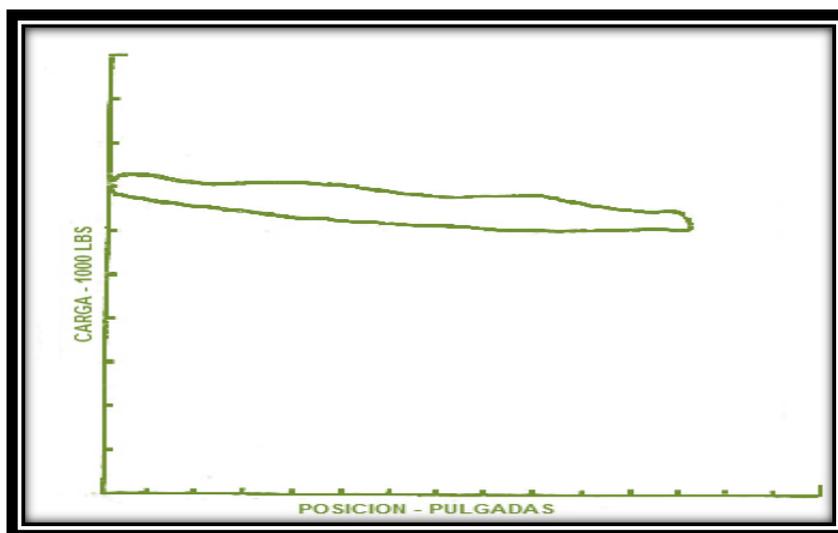
Fuente: Daniel Fernando Velasco Utreras. Estudio del método de producción de Bombeo mecánico mediante varillas de succión en el Ecuador.

➤ Varillas sueltas o partidas

La característica principal de esta carta es la presentación de un espesor mínimo.

En este caso si se prueban las válvulas, deben resultar con la misma carga ambas pruebas, ya que solo se estará midiendo el peso de las varillas en el fluido.

Figura N°4-21: Carta dinamométrica (Varillas sueltas)

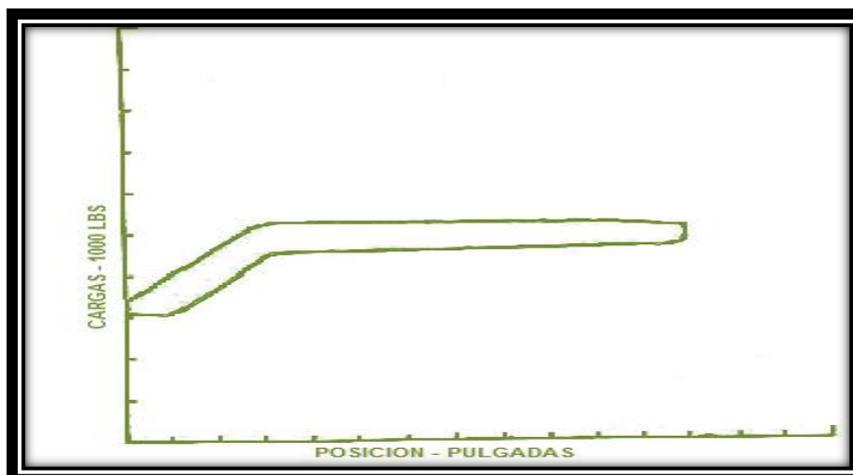


Fuente: Daniel Fernando Velasco Utreras. Estudio del método de producción de Bombeo mecánico mediante varillas de succión en el Ecuador.

➤ Golpe de fluido

Este tipo de carta se puede identificar por disminución de carga en la carrera descendente, en un tiempo muy corto.

Figura N°4-22: Carta Dinamométrica (Golpe de fluido)



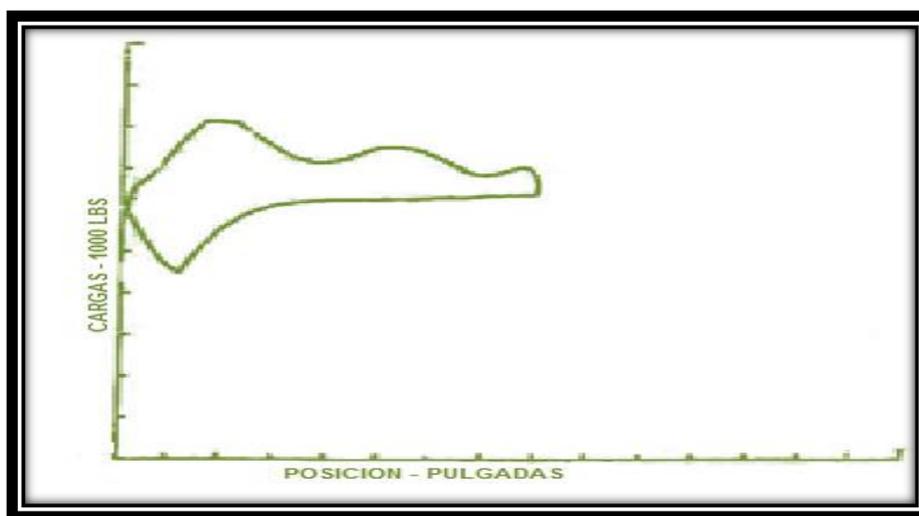
Fuente: Daniel Fernando Velasco Utreras. Estudio del método de producción de Bombeo mecánico mediante varillas de succión en el Ecuador.

La corrección de este problema generalmente se basa en la disminución de la velocidad de bombeo, diámetro de la bomba de fondo o con controladores de bombeo.

➤ **Compresión de gas**

Para este caso la carta se presenta con una declinación suave en la carrera descendente. Este problema se origina por la liberación de gas dentro de la cámara de la bomba, disminuyendo la carrera efectiva del pistón en la bomba.

Figura N° 4-23: Carta dinamométrica (Compresión de gas)

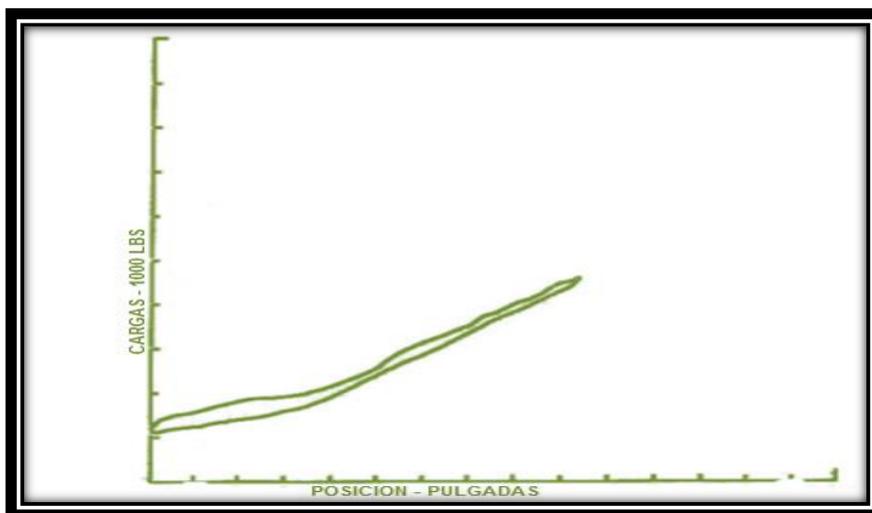


Fuente: Daniel Fernando Velasco Utreras. Estudio del método de Producción de Bombeo mecánico mediante varillas de succión en el Ecuador.

➤ **Bomba arenada**

Esta carta presenta un incremento progresivo de cargas. Este efecto se genera como resultado de la deposición de arena en la bomba creando fricción y estiramiento de varillas.

Figura N° 4-24: Carta dinamométrica (Bomba arenada)

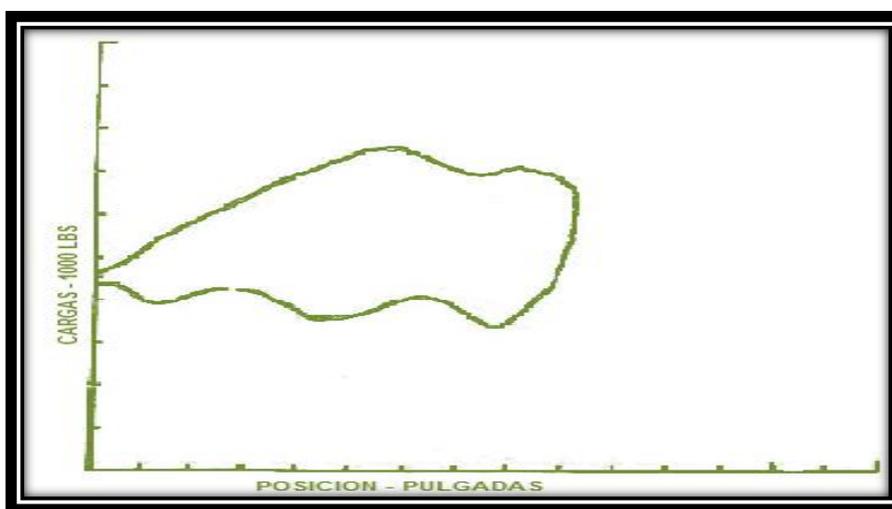


Fuente: Daniel Velasco Estudio del método de producción de Bombeo mecánico mediante varillas de succión en el Ecuador.

➤ **Fuga en la válvula viajera**

Se puede identificar esta falla porque la transferencia de carga de la tubería a las varillas no se produce al principio de la carrera ascendente del pistón. La carta se presenta como muestra la figura N°4-24.

Figura N° 4-24: Carta dinamométrica (Fuga en la válvula viajera)

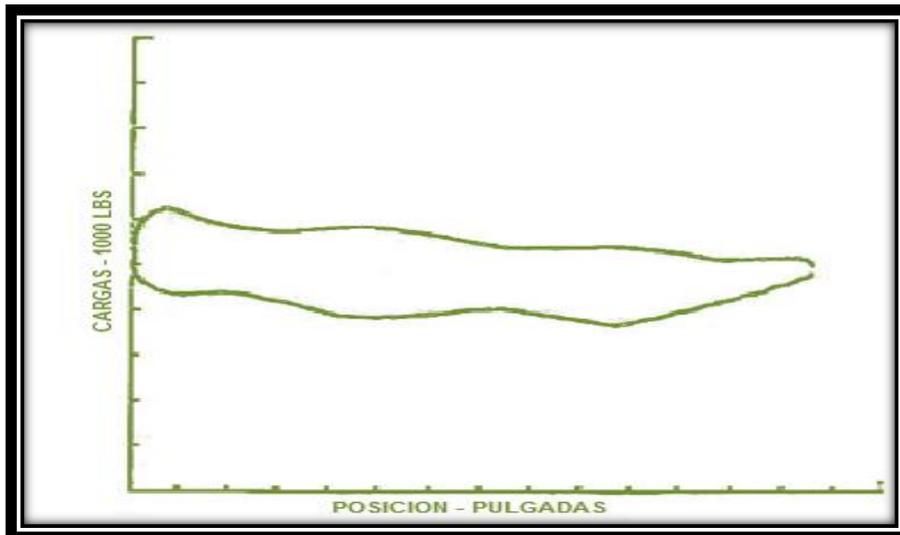


Fuente: Daniel Fernando Velasco Utreras. Estudio del método de producción de Bombeo mecánico mediante varillas de succión en el Ecuador.

➤ **Válvula fija dañada**

Cuando ocurre esta falla, al final de la carrera ascendente, se abre la válvula viajera y la transferencia de carga a la tubería de las varillas se presenta en forma progresiva como muestra la figura N°4-25.

Figura N° 4-25: Carta dinamométrica (Válvula fija dañada)

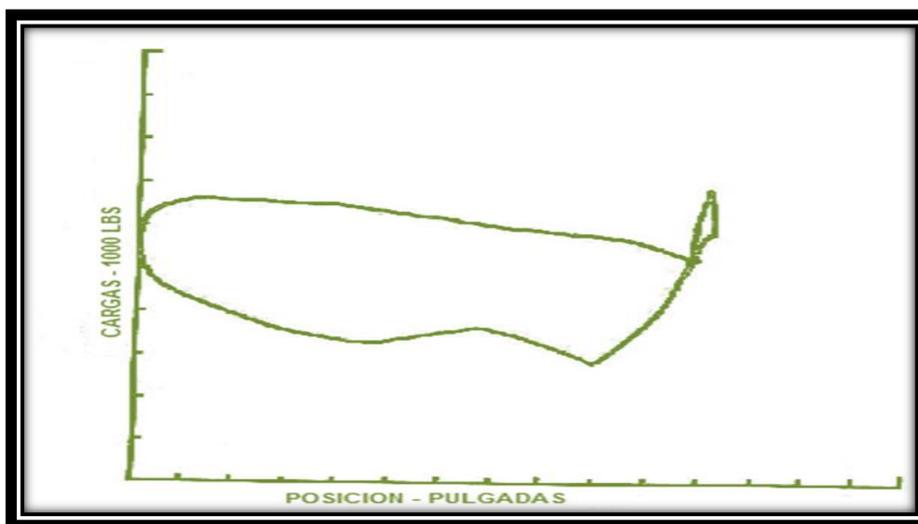


Fuente: Daniel Fernando Velasco Utreras. Estudio del método de producción de Bombeo mecánico mediante varillas de succión en el Ecuador.

➤ **Golpe del pistón al final del asiento**

El espaciamiento defectuoso, se nota por un incremento de la carga al final de la carrera ascendente como presenta la gráfica N°4-26.

Figura N° 4-26: Carta dinamométrica (Golpe de la bomba)

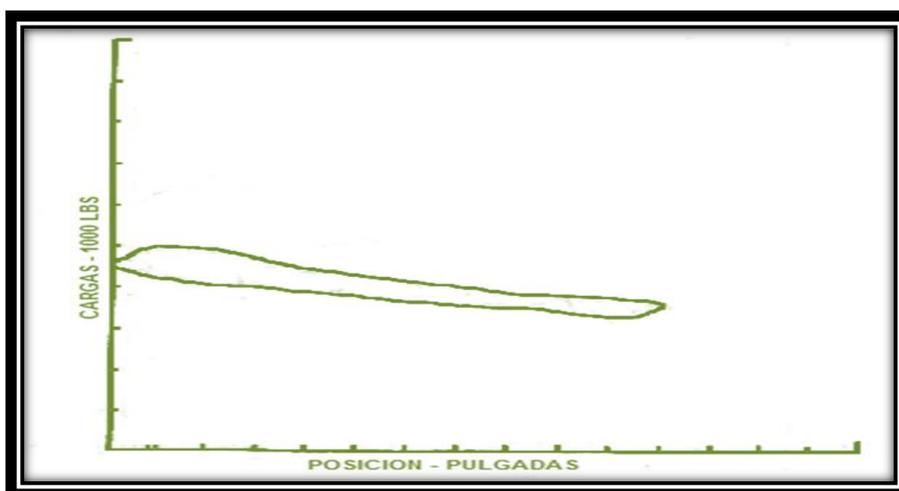


Fuente: Daniel Fernando Velasco Utreras. Estudio del método de producción de Bombeo mecánico mediante varillas de succión en el Ecuador.

➤ **Pozo agitado**

Si el pozo produce por agitación inducida por la bomba, el pozo fluye dejando las válvulas abiertas en ambas carreras, ya que la presión de fondo fluyente los mantiene abiertos.

Figura N° 4-27: Carta dinamométrica (Pozo agitado)

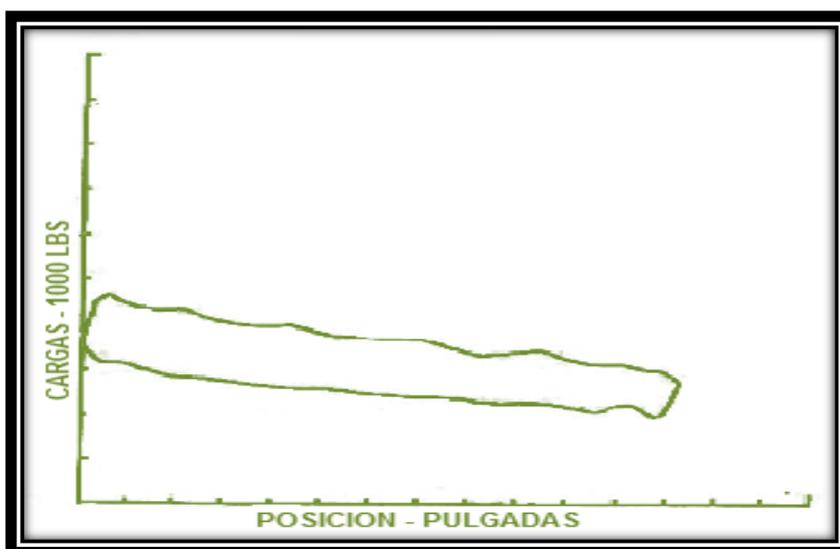


Fuente: Daniel Fernando Velasco Utreras. Estudio del método de producción de Bombeo mecánico mediante varillas de succión en el Ecuador.

➤ **Pozo fluyendo**

El pozo fluye por la tubería y por el espacio anular, esto puede ocurrir en pozos sometidos a inyección de vapor y el anular conectado a la línea de flujo.

Figura N° 4-28: Carta dinamométrica (Pozo fluyendo).



Fuente: Daniel Fernando Velasco Utreras. Estudio del método de producción de Bombeo mecánico mediante varillas de succión en el Ecuador.

CAPÍTULO V

VARILLAS DE BOMBEO DE FIBRA DE VIDRIO

Las varillas de bombeo de fibra de vidrio fueron desarrollados inicialmente en la década de 1970's, como un medio para reducir fallas de las varillas de acero en pozos de bombeo ácido y muy corrosivas. Pronto se hizo evidente que la fibra de vidrio tenía ventajas con respecto a las barras de acero, la ligereza y propiedades elásticas de la fibra de vidrio se identificaron como solución al aumento de las tasas de producción de fluidos en pozos de bombeo mecánico, sin necesidad de cambiar el equipo de bombeo de superficie.

Después de superar algunos problemas iniciales con el control de calidad de varilla, el mal diseño de sarta y malas aplicaciones, los sistemas de fibra de vidrio se han convertido en un método confiable de levantamiento artificial y es ampliamente utilizado debido a los bajos requisitos de costos de capital y costos operativos en comparación con otros sistemas de elevación.

Las varillas originales, fabricados entre 1975-1978, sufrieron fallas en las piezas de varillas, por los nudos y bolsas de gas en el cuerpo de las varillas de fibra de vidrio que se forman durante su fabricación en el inadecuado proceso de endurecimiento de las varillas, a partir de 1978, las fallas en las piezas de varillas aumentaron debido principalmente al estrangulamiento en las conexiones de los extremos de la varilla. Posteriormente se desarrolló un nuevo diseño de las varillas, que incorporó modificaciones importantes para corregir los problemas que tenía la varilla anterior.

Dos problemas principales con estas primeras varillas fueron: roturas del cuerpo de varilla y el final ajuste de estrangulamiento de los pines de metal. La rotura del cuerpo de la varilla se debió principalmente a un bucle o anudamiento de las fibras de vidrio durante la fabricación de la varilla por no estar bajo tensión, provocando un punto débil. Mejorando el proceso para mantener las fibras de vidrio en tensión durante la fabricación de la varilla superaron este problema.

El final ajuste de estrangulamiento del pin de metal fue eliminado al volver a diseñar el pin para distribuir mejor la carga en la varilla y por una mejor aplicación de epoxi (resina, polímero termoestable para protección de la corrosión) entre el metal y fibra de vidrio. Estas varillas de segunda generación aparecen en 1979 y han demostrado ser confiable en el campo.

Otros problemas al principio fueron el mal diseño de la sarta y la mala aplicación, ocasionando fracasos prematuros por la sobrecarga en las varillas. La sobrecarga se debió principalmente por la inexactitud del cálculo de tensiones del sistema de fibra de vidrio, calculado con la modificación de la técnica API empírica, que fue desarrollado para varillas de acero.

Una varilla de fibra de vidrio consiste en largas hebras paralelas de fibra de vidrio embebidas en una matriz de plástico. En los extremos de la varilla se colocan accesorios de acero, terminan en un pin estándar de varillas de bombeo API. Las varillas se pueden unir con los acoplamientos estándar para formar sartas de varillas.

Una sarta típica de varillas de fibra de vidrio reforzado contiene aproximadamente 50% a 90% varillas de fibra de vidrio en la parte superior de la sarta, y 50% a 10% de varillas de acero en la parte inferior. La masa de acero ayuda a las varillas de fibra de vidrio a mantenerlas en tensión durante la carrera descendente y lograr sobre carrera en su movimiento ascendente y descendente.

5.1. DIMENSIONES FÍSICAS DE LAS VARILLAS

API ha publicado una especificación para varillas de fibra de vidrio. Este documento cubre los materiales, rendimiento, control de calidad, dimensiones generales, el envasado, la inspección y la practica recomendada para el cuidado y manejo de varillas.

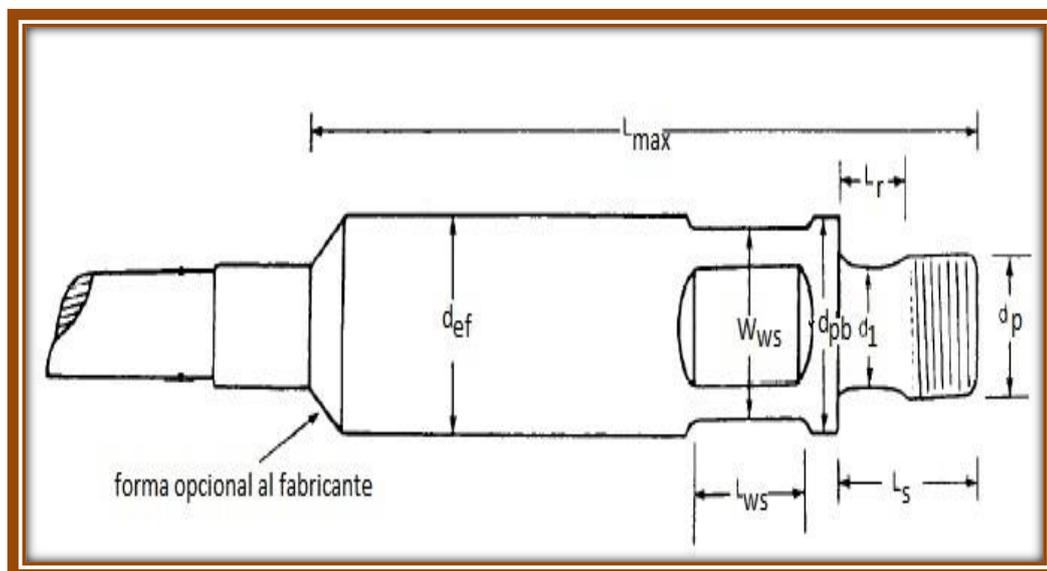
Las dimensiones generales de una varilla de fibra de vidrio, publicada por API, se muestran en la tabla N°5.1 y la figura N°5-2:

TABLA N° 5.1: DIMENSIONES GENERALES DE LAS VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO

| Diámetro nominal del cuerpo, ± 0.015 plg. (Plg.) | Tamaño del pin de la varilla (Plg.) | Diámetro nominal del pin (Plg.) | Pin Shoulder base del pin OD, d_{pb} , $+0.005$ plg. -0.010 plg. (Plg.) | Wrench square width Ancho del cuerpo cuadrado, W_{ws} (plg.) | Longitud del cuerpo cuadrado L_{ws} (Plg.) | Longitudes de pin a pin ± 0.5 plg. (pies) |
|--|-------------------------------------|---------------------------------|---|---|---|---|
| 0.625 | 1/2 | 3/4 | 1.000 | 7/8 | 1 1/4 | 25; 30; 37.5 |
| 0.750 | 5/8 | 15/16 | 1.250 | 1 | 1 1/4 | 25; 30; 37.5 |
| 0.875 | 3/4 | 1 1/16 | 1.500 | 1 5/16 | 1 1/4 | 25; 30; 37.5 |
| 1.000 | 7/8 | 1 13/16 | 1.625 | 1 5/16 | 1 1/4 | 25; 30; 37.5 |
| 1.250 | 1 | 1 3/8 | 2.000 | 1 1/2 | 1 5/8 | 25; 30; 37.5 |

Fuente: Manual de ingeniería de petróleo. Artículo: varillas de bombeo (sucker rods), por Dean E. Hermanson, LTV Energy Products Co.

Figura N°5-2: Dimensiones generales de la varilla de fibra de vidrio.



Fuente: Manual de ingeniería de petróleo. Artículo: varillas de bombeo (sucker rods) por Dean E. Hermanson, LTV Energy Products Co.

5.2. CUIDADO, MANEJO Y ALMACENAMIENTO

La parte exterior de las varillas de fibra de vidrio se daña más fácilmente que las correspondientes en las varillas de acero. Por lo tanto, es importante evitar que las varillas de fibra de vidrio entren en contacto con el suelo o cualquier objeto que pueda rayar o dañar su superficie.

Las varillas de bombeo de fibra de vidrio son diseñadas, mantenidas y operadas de forma análoga a las varillas de acero. Cualquier tipo de impacto con un objeto contundente de cualquier material, causaría un punto débil que puede fallar en servicio. Las varillas se deben evitar poner o dejar caer sobre objetos punzantes, como rocas, para evitar daños. Evitar colocar las varillas en estante soportados solo en sus extremos para evitar la flexión en el tramo medio de la varilla, lo que le causaría daño. Evitar almacenar las varillas al exterior desprotegido de los rayos ultravioleta, que debilitan la resina plástica o proteger con una manta plástica oscura por algunos meses al ser almacenados al exterior.

5.3. PROPIEDADES DE LAS VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO Y VARILLAS DE ACERO

A diferencia de las varillas de acero, que tienen una vida de fatiga mucho más larga en un entorno no corrosivo por debajo del límite de resistencia, las de fibra de vidrio tienen una vida más corta. De aplicarse cíclicamente una carga máxima y mínima, las varillas de fibra de vidrio fallarán por fatiga en un futuro más cercano que las de acero. Si se aplica una combinación de carga superior al límite de resistencia, las varillas fallarán en menos ciclos. Además, estas varillas pierden resistencia a los esfuerzos con el aumento de temperatura.

Por su construcción, las varillas de fibra de vidrio tienen alta resistencia a la tracción y son anisotrópica (las propiedades de la materia que la constituyen varían con las diferentes direcciones que son examinados). La resistencia a la tracción en la dirección longitudinal difiere en la dirección transversal.

Las propiedades longitudinales están dominadas por las propiedades de fibra de vidrio, mientras que las transversales dependen de la resina y propiedades de la interface resina-vidrio.

Una comparación de las propiedades de la varilla estándar de 22 mm. (7/8pulg) se muestra en la tabla N°5.2, en la cual se puede apreciar que las diferencias importantes entre las varillas de fibra de vidrio y acero son el módulo de elasticidad y la densidad del material.

En las de fibra de vidrio el módulo de elasticidad (grado de estiramiento de un material) es de aproximadamente un cuarto del módulo de elasticidad del acero. Por lo tanto, las varillas de fibra de vidrio son aproximadamente cuatro veces más elásticas que las varillas de acero, mientras que el peso por unidad de longitud de la varilla de fibra de vidrio (incluyendo los accesorios de metal) es de aproximadamente 70% menos que la varilla de acero.

TABLA N° 5.2: PROPIEDADES DE LAS VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO Y VARILLAS DE ACERO

| Propiedades | Fibra de vidrio | Acero |
|--|-----------------|-----------------|
| Módulo de elasticidad (kg/m ²) | 4 E9 a 6 E9 | 2.14 E10 |
| Peso (kg/m) | 1.063 | 3.310 |
| Densidad (kg/m ³) | 2050 | 8490 |
| Tensión máximo (MPa) | 234.4 | 206.9 (grado D) |
| Resistencia mínima a la tracción (MPa) | 620.6 | 792.9 (grado D) |
| Temperatura máxima (°C) | 93 a 116 | -- |
| Longitud (m/varilla) | 11.43 | 7.62 |

Fuente: M.M Reynolds. Artículo: Fiberglass Sucker Rod Design Considerations.
Revista: JCPT- The Journal of Canadian Petroleum Technology – 1988

La longitud estándar de una varilla de fibra de vidrio es 11,43 m. (37,5 pies), de una varilla de acero es 7,62 m. (25 pies). La longitud extra de cada varilla de fibra de vidrio elimina un tercio de los acoplamientos en la sarta de varillas, ahorrando costos y peso.

En 1986, el API publicó una especificación general que rige los materiales, control de calidad y las dimensiones generales de varillas de fibra de vidrio. No se especificó el módulo de elasticidad, y esta tiene un gran rango entre los fabricantes dependiendo de la relación entre vidrio y resina en el cuerpo de la varilla.

En consecuencia algunas se estiran más que otras varillas, por lo que se debe tener cuidado para asegurar la varilla de fibra de vidrio óptima que se elige para un pozo en particular.

5.4. PROPORCIÓN DE FIBRA DE VIDRIO Y ACERO EN LA SARTA DE VARILLAS

Las sarta de varillas de fibra de vidrio no requieren ser combinadas con diferentes diámetros, porque el peso de las varillas es mucho más ligero.

Además, la diferencia de costo es insignificante. El estiramiento elástico es también mucho mayor con una varilla de menor diámetro.

Todos los sistemas de sarta varillas de fibra de vidrio son combinación de varillas de fibra de vidrio y varillas de acero. Las varillas de acero se utilizan en la parte inferior de la sarta de varillas de fibra de vidrio, para mantener la tensión y reducir la compresión de las varillas de la parte inferior en la carrera descendente, así, evitar daños por compresión en el cuerpo de la varilla de fibra de vidrio.

La proporción de varillas de fibra de vidrio y acero ha sido un punto de controversia. Sin embargo, como regla general, a más varillas de fibra de vidrio en el pozo, más estiramiento de varillas y mayor sobrecarrera del pistón de la bomba. La mayoría de sistemas de fibra de vidrio se componen de 50% a 90% de fibra de vidrio y 50% a 10% de varillas de acero.

En pozos de bajo volumen donde la economía es crítica, ahorros de costo se hace al usar 50% de fibra de vidrio de menor módulo de elasticidad para experimentar alguna sobrecarrera de la bomba y 50% de varillas de acero y ganar producción adicional.

En pozos de alto volumen donde se desea producción máxima, se recomienda una sarta de 80% a 90% de fibra de vidrio y 20% a 10% de acero. La gran cantidad de fibra de vidrio con un peso grande en la parte inferior maximiza el sobre viaje del pistón de la bomba y la producción.

Al concentrar el peso en la parte inferior de la sarta, las varillas de fibra de vidrio, durante la carrera ascendente, realizan pequeñas trayectorias helicoidales, resultando en una mayor sobrecarrera del pistón de la bomba.

La profundidad del pozo se debe considerar al elegir la relación fibra de vidrio y acero. Fibra de vidrio se ha utilizado con éxito en pozos profundos y pozos de poca profundidad, pero los beneficios aumentan con la profundidad del pozo. A fin de lograr mayor sobrecarrera del pistón de la bomba a poca profundidad, se debe utilizar una gran proporción de fibra de vidrio.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO

Debido a que las varillas de fibra de vidrio tienen un costo mayor a las varillas de acero, su uso debe de justificarse económicamente.

Las varillas de fibra de vidrio, inicialmente fueron desarrolladas para reducir las fallas de las varillas de acero relacionadas a la corrosión. Pronto se hizo evidente que las varillas de fibra de vidrio tienen otras ventajas con respecto a las varillas de acero.

6.1. REDUCCIÓN DE FALLAS POR CORROSIÓN

Las varillas de fibra de vidrio en combinación con pines de acero de grado "K" hicieron una sarta altamente resistente a la corrosión. De acuerdo a la estadística de varios pozos, los costos anuales de mantenimiento en sistemas con varillas de acero fueron cerca de \$/30000 cada uno por lo que fueron reemplazados con varillas de fibra de vidrio. Los costos anuales de mantenimiento se redujeron a cero para el resto del periodo de prueba. (Reynolds 1988 jcpt)

6.2. AUMENTO DE LA PRODUCCIÓN

Pozos donde se requiere mayor producción, por su alto nivel de fluido y alto índice de productividad, sería sobrecargar la unidad de bombeo de superficie existente:

Las propiedades de alta elasticidad de las varillas de bombeo de fibra de vidrio se podrían utilizar para obtener una mayor carrera del embolo de la bomba de fondo que sea de 20% a 50% más larga que la carrera del vástago pulido en superficie. El aumento de la carrera del pistón logra el aumento de la producción, de tal manera que un operador de Estados Unidos informó que el 95% de sus instalaciones de fibra de vidrio se encontraban en pozos que requerían mayor producción de fluido. (Reynolds 1988:2)

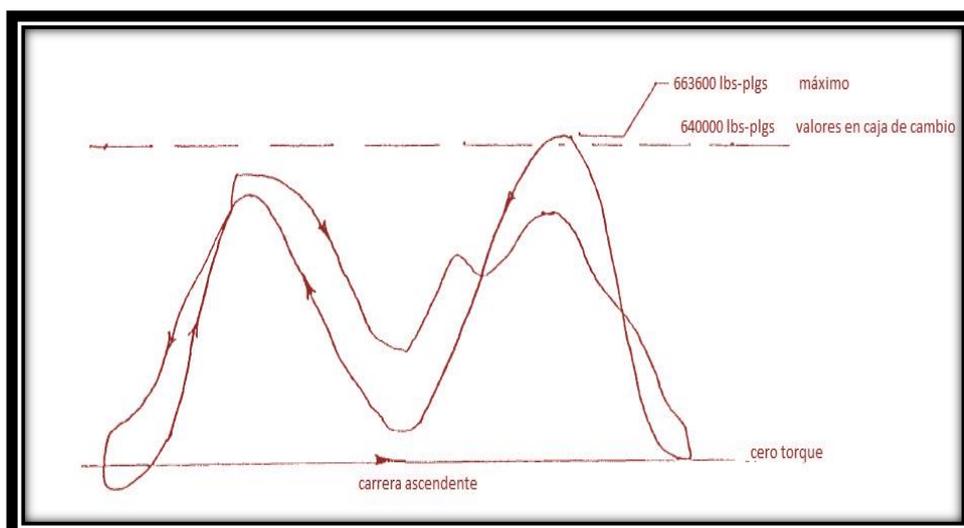
El aumento de la producción depende de varios factores, sobre todo: de la carga de fluido y la velocidad de la unidad de bombeo.

La experiencia en Petro Canadá fue de producir más con un sistema de bombeo usando varillas de fibra de vidrio que con unidades de bombeo API dos veces más grandes utilizando varillas de acero. Sobre la base de análisis por ordenador, el peso inferior de las varillas de fibra de vidrio puede permitir una unidad de bombeo más pequeño como API 228, producir tanto fluido como un API 320 o incluso un API 456 en las mismas condiciones de producción.

6.3. REDUCCIÓN DE TENSIONES EN EL SISTEMA DE BOMBEO DE SUPERFICIE

Desde que las varillas de fibra de vidrio son mucho más ligeras que las varillas de acero, ya que pesan aproximadamente 70% menos de una varilla de acero equivalente, el torque y la capacidad estructural de la unidad de bombeo se reducen considerablemente en condiciones equivalentes de producción. La figura N°6-1 muestra un análisis de torque en la caja de cambio, antes de instalar las varillas de fibra de vidrio. El torque fluctúa en gran medida, y podría causar excesiva tensión en la caja de engranaje.

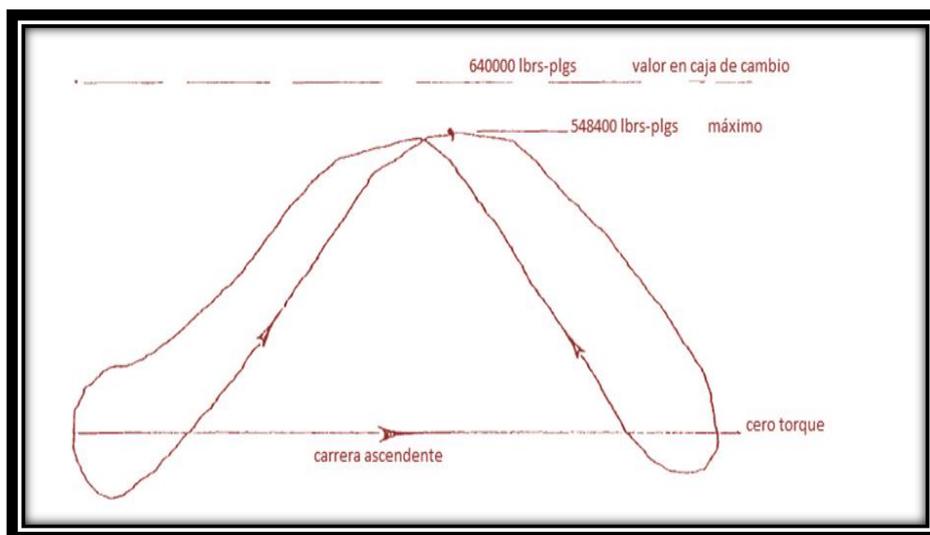
Figura N° 6-1: Análisis de torque con varillas de acero



Fuente: Treadway R. Amoco Production Company. In Fiberglass Sucker Rods A. Futuristic Solution to Today's Problem Wells. SPE 10251 Society of Petroleum Engineers .USA -1981

Pero, instalada la sarta de varillas de fibra de vidrio, el torque se distribuye más uniforme sin causar excesiva tensión, como muestra la figura N°6-2. Lo mencionado permite aumentar la velocidad de bombeo y la longitud de carrera de la bomba. La carrera más larga en el fondo del pozo y longitudes más cortas de recorrido en superficie, reduciendo aún más el torque en la unidad de bombeo.

Figura N° 6-2: Análisis de torque con varillas de fibra de vidrio/acero.



Fuente: Treadway Robert B Amoco Production Company. In Fiberglass Sucker Rods- Futuristic Solution to Today's Problem Wells.SPE 10251 (Society of Petroleum Engineers). Estados Unidos -1981

6.4. DISMINUCIÓN DE COSTO DE LEVANTAMIENTO

El peso total de la sarta de varillas se puede reducir hasta 50% empleando varillas de fibra de vidrio, reduciendo la energía requerida para funcionar la unidad de bombeo. Un estudio del empleo de varillas de fibra de vidrio, en comparación a las varillas de acero con unidades de bombeo convencional produjo ahorros de energía entre 26% y 39% por unidad de producción de fluido.

En otro estudio, con unidades de bombeo de tipo "Catalina" con varillas de fibra de vidrio en comparación con unidad de bombeo convencional con barras de acero, el ahorro de energía fue del 60%. (Reynolds 1988: 3).

La tubería de producción, correctamente anclada debe ser considerada para reducir al mínimo el desgaste de las varillas con la tubería.

Esto también extenderá la vida de las varillas de bombeo de fibra de vidrio y así disminuirá costos de mantenimiento.

6.5. CONTROL DE PARAFINAS EN POZOS CON VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO

Los depósitos de parafinas pueden causar problemas en pozos que producen a baja velocidad de bombeo. Mientras que el cuerpo liso de la varilla de fibra de vidrio no permite que se adhieran los cristales, estos tienden a la acumulación en los pines de metal.

La experiencia de Petro-Canadá en el campo Utikuma indica que [...] a tasas de producción por encima de aproximadamente 80 m³ (500 b/d), el control de parafinas puede ser eliminado. Esta tasa puede variar dependiendo del tipo y contenido del crudo: parafina, corte de agua. En tasas más altas, la velocidad del fluido no permitirá que la parafina se deposite y, sistemas de fibra de vidrio deben estar diseñados para altas tasas de producción de fluidos, si el pozo es capaz. (Reynolds 1988: 4)

6.6. VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO EN POZOS CON NIVEL DE FLUIDO MUY BAJO (“WELL PUMP-OFF”)

Los especialistas coinciden en decir hay que conocer antes el flujo máximo de los líquidos previo a la instalación de las varillas de fibra de vidrio:

Se precisa conocer el flujo máximo del pozo antes de la instalación de las varillas de fibra de vidrio. Si el pozo esta con nivel de líquido anular muy bajo y, el fluido no llena adecuadamente la bomba, los golpes de fluido causarían cargas de compresión en las varillas con posibles daños a la misma. Sin embargo, las altas velocidades que normalmente se experimentan con sistemas de fibra de vidrio, las cargas en la bomba causada por el golpe de fluido probablemente destruirán la bomba y no causaría daños en las varillas. En una nueva instalación de fibra de vidrio, los niveles de los líquidos anulares deben ser monitoreados de cerca hasta que el flujo de entrada se estabilice. (Reynolds 1988: 60)²

² Ver archivo en inglés: PETSOC-88-05-06 operaciones de producción.

6.7. VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO EN POZOS DESVIADOS

No es recomendable el empleo de las varillas de fibra de vidrio en caso de pozos desviados.

La fricción excesiva de las varillas con el tubo de producción, reduce la sobre carrera de la bomba y aumenta la carga de compresión sobre las varillas. “Un fabricante considera aceptable un ángulo de tres grados por cada 30,5 m, pero los resultados detallados de las pruebas no están disponibles. (Reynolds 1988:4)

Una posible solución a este problema, es el uso de acoplamientos de rodillos de ruedas de fibra de vidrio”. (Reynolds 1988:4)

6.8. CASOS DE ESTUDIOS Y PRUEBAS.

➤ Amoco Production Company, realizó pruebas de campo en ocho pozos a junio de 1977.”Durante el desarrollo de la prueba de sartas de varillas de fibra de vidrio, 11 sartas se probaron en ocho pozos productores durante 3 ½ años. Los pozos se seleccionaron por su historia de fracasos y tendencias corrosivas. Los pozos representaban una amplia gama de volúmenes de producción de fluidos.” (Watkins1978:1)³

La tabla N°6.1 muestra las profundidades de los pozos, las barras de peso utilizados y otros datos de prueba. Los pozos no tenían desviación apreciable de la vertical.

³ Ver archivo en inglés: SPE-6851-PA.

TABLA N° 6.1: DATOS DE LA SARTA DE VARILLAS EN LOS POZOS DE PRUEBA

| Sarta de varilla numero | Duración de prueba (días) | Profundidad de pozo (pies) | Barras de peso de 1 ¹ / ₂ plg. (pies) | Guías de varillas (número/varilla) |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------|---|------------------------------------|
| 1 | 131 | 4780 | 0 | 2 |
| 2 | 20 | 6360 | 975 | 2 |
| 3 | 12 | 5500 | 800 | 0 |
| 4 | 10 | 4510 | 725 | 0 |
| 5 | 484 | 4180 | 700 | 2 |
| 6 | 63 | 4780 | 775 | 0 |
| 7 | 111 | 4975 | 800 | 2 |
| 8 | 115 | 4780 | 750 | 0 |
| 9 | 93 | 4975 | 775 | 2 |
| 10 | 48 | 4510 | 400 | 2 |
| 11 | 182 | 4150 | 400 | 0 |

Fuente: Watkins, SPE-AIME, Amoco Production Co. Manufacturing and Supply Co. Fiberglass Sucker Rodin Beam- Pumped Oil Wells de la Revista: Journal of Petroleum Technology. Estados Unidos - 1978.

La tabla N° 6.2 muestra las cargas máximas y mínimas en los vástagos pulidos, y el torque máximo, antes y después de instalar las varillas de fibra de vidrio. En donde se ve la reducción significativa de la carga máxima en el vástago pulido, excepto el primero por utilizar una sarta parcial de cinco varillas de fibra de vidrio y 75 varillas de acero. La reducción media fue 26% incluyendo el primer pozo.

La carga mínima aumentó en algunos casos y disminuyó en otros, comparando la carga mínima al usar las varillas de acero.

El torque máximo se redujo en seis de siete pozos que se calcularon. Cuatro reducen hasta 65%, los otros dos la reducción fue más moderada y un pozo mostró un ligero aumento.

TABLA N° 6.2: COMPARACIÓN DE CARGAS EN SARTAS DE VARILLAS DE ACERO Y FIBRA DE VIDRIO

| Sarta de varilla número | Carga máxima en la varilla pulida (1000's de lb) | | Carga mínima en la varilla pulida (1000's de lb) | | Torque máximo (1000's de lb) | |
|-------------------------|--|-----------------|--|-----------------|------------------------------|-----------------|
| | Acero | Fibra de vidrio | Acero | Fibra de vidrio | acero | Fibra de vidrio |
| 1 ⁴ | 16.0 | 16.5 | 5.5 | 5.0 | --- | --- |
| 2 | 20.8 | 14.0 | 5.6 | 3.4 | 827 | 323 |
| 3 | 22.0 | 15.2 | 2.0 | 2.4 | 854 | 419 |
| 4 | 21.3 | 11.2 | 0.3 | 0.5 | 866 | 283 |
| 5 ⁵ | 16.8 | 11.8 | 3.8 | 2.8 | --- | 195 |
| 6 | 16.7 | 13.6 | 3.9 | 4.5 | --- | --- |
| 7 | 15.3 | 12.5 | 5.0 | 4.0 | --- | --- |
| 8 | 16.3 | 14.0 | 3.3 | 3.9 | 310 | 337 |
| 9 | 19.1 | 15.0 | 3.3 | 3.3 | 728 | 445 |
| 10 | 20.2 | 13.7 | 2.4 | 1.0 | 619 | 539 |
| 11 | 16.3 | 10.9 | 4.2 | 1.5 | 392 | 375 |

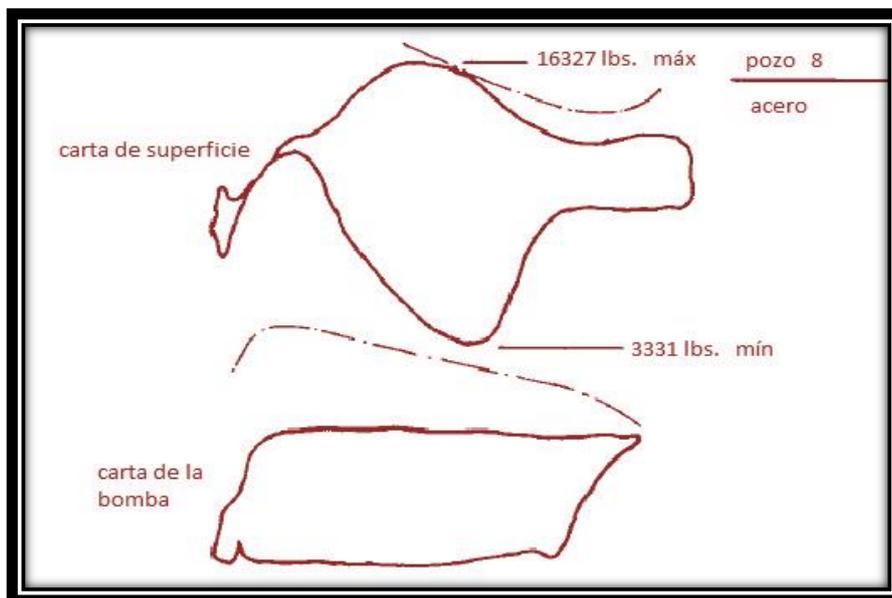
Fuente: Watkins, SPE-AIME, Amoco Production Co. Manufacturing and Supply Co. Fiberglass Sucker Rods in Beam- Pumped Oil Wells de la Revista: Journal of Petroleum Technology. Estados Unidos - 1978.

Las cartas dinamométricas de cuatro pozos de prueba antes y después de la instalación de varillas de fibra de vidrio se muestran en las figuras siguientes.

⁴ Cadena parcial. Cinco de fibra de vidrio con 75 varillas de acero

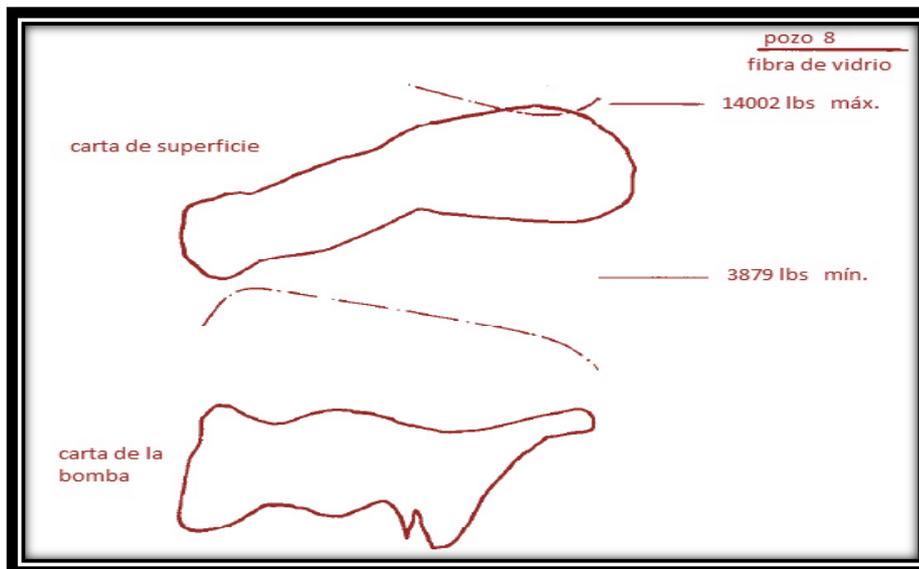
⁵ Tamaño de la bomba se redujo de 2 pulg a 1 ¾ pulg.

Figura N° 6-3: Cartas dinamométricas .Pozo 8: varillas de acero



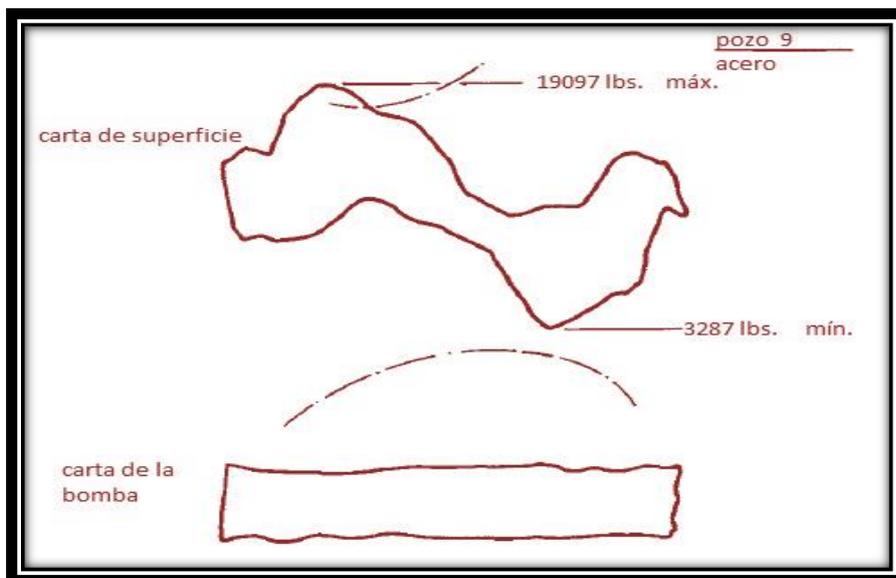
Fuente: Watkins, SPE-AIME, Amoco Production Co. Manufacturing and supply Co. Fiberglass Sucker Rods in Beam- Pumped Oil Wells de la Revista: Journal of Petroleum Technology. Estados Unidos - 1978.

Figura N° 6-4: Cartas dinamométricas. Pozo 8: Varillas fibra de vidrio



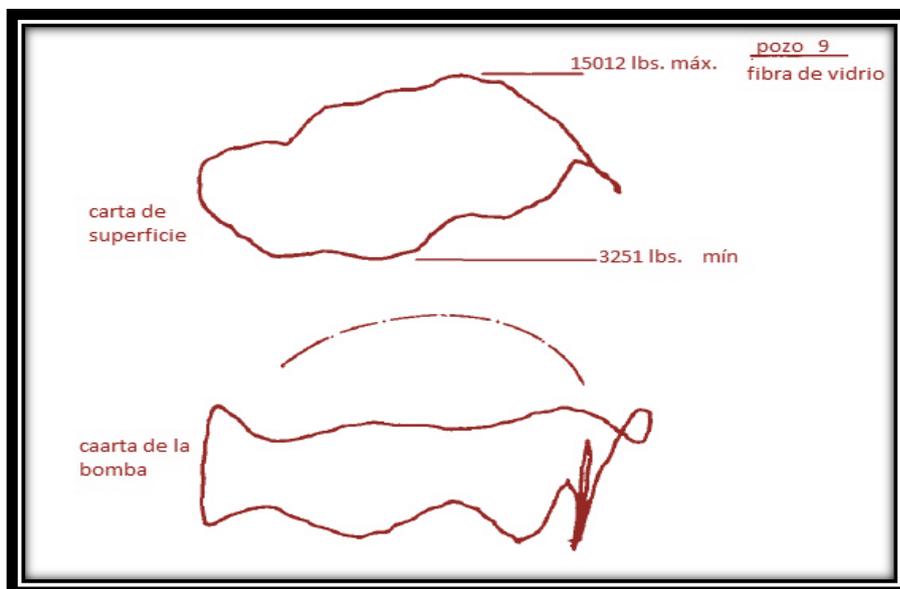
Fuente: Watkins, SPE-AIME, Amoco Production Co. Manufacturing and Supply Co. Fiberglass Sucker Rods in Beam- Pumped Oil Wells de la Revista: Journal of Petroleum Technology. Estados Unidos - 1978.

Figura N° 6-5: Cartas dinamométricas. Pozo 9: varillas de acero



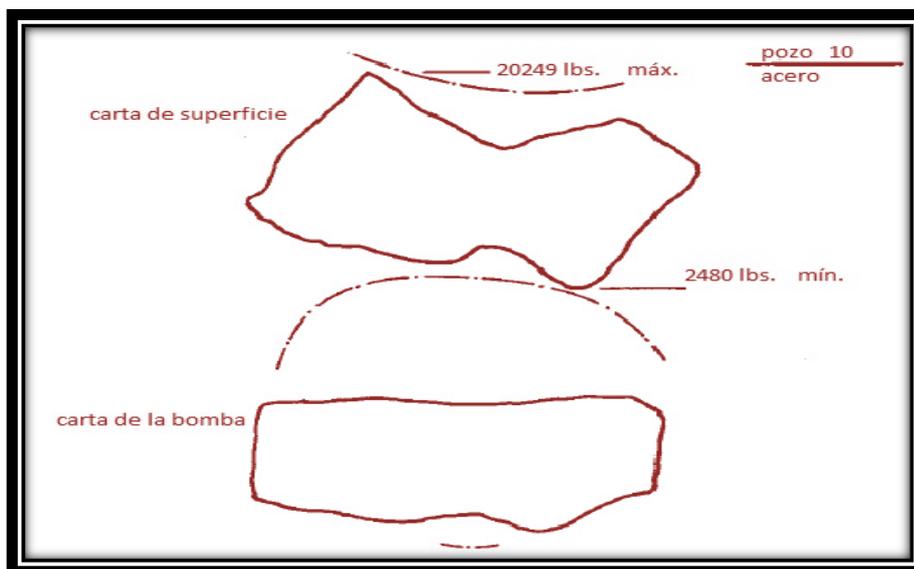
Fuente: Watkins, SPE-AIME, Amoco Production Co. Manufacturing and Supply Co. Fiberglass Sucker Rods in Beam- Pumped Oil Wells de la Revista: Journal of Petroleum Technology. Estados Unidos - 1978.

Figura N° 6-6: Cartas dinamométricas. Pozo 9: varillas fibra de vidrio



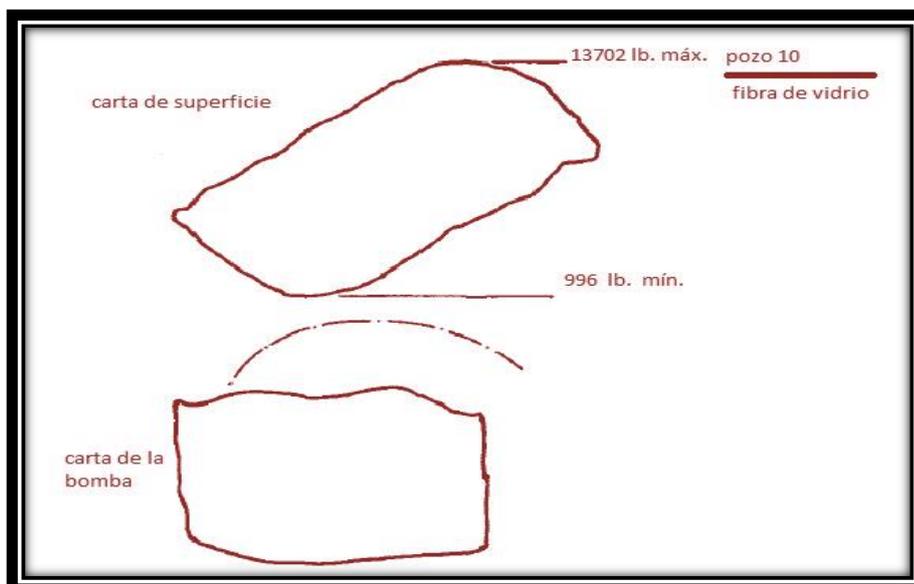
Fuente: Watkins, SPE-AIME, Amoco Production Co. Manufacturing and Supply Co. Fiberglass Sucker Rods in Beam- Pumped Oil Wells de la Revista: Journal of Petroleum Technology. Estados Unidos - 1978.

Figura N° 6-7: Cartas dinamométricas. Pozo 10: varillas de acero



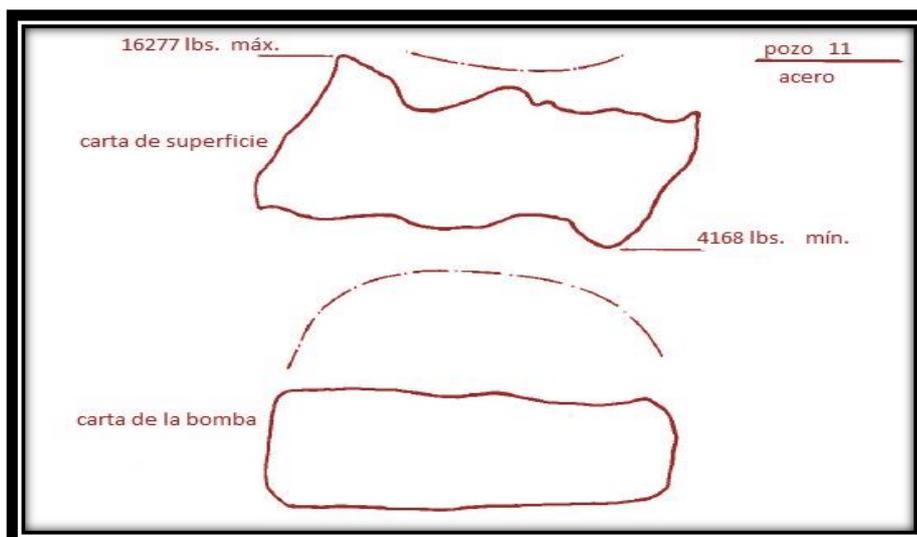
Fuente: Watkins, SPE-AIME, Amoco Production Co. Manufacturing and Supply Co. Fiberglass Sucker Rods in Beam- Pumped Oil Wells de la Revista: Journal of Petroleum Technology. Estados Unidos - 1978.

Figura N° 6-8: Cartas dinamométricas. Pozo 10: varillas fibra de vidrio



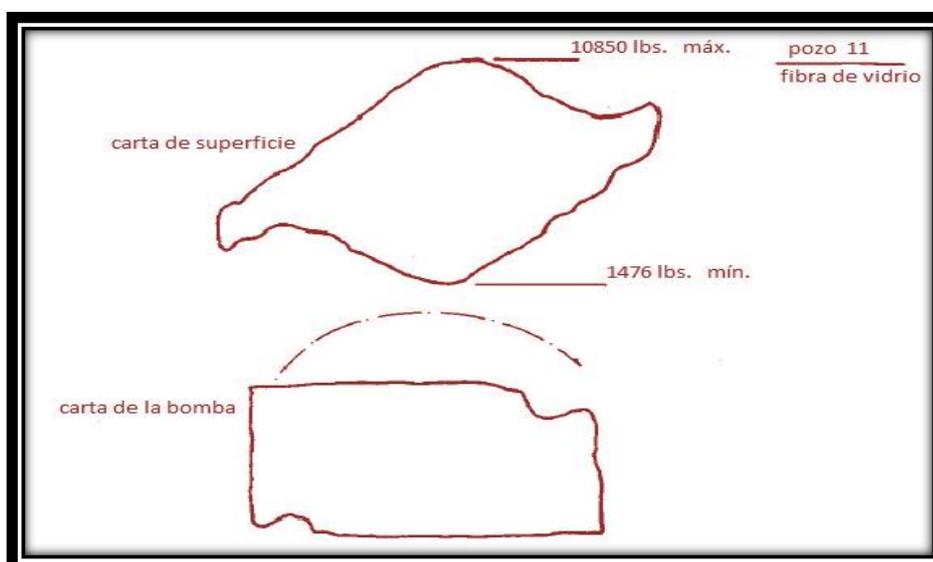
Fuente: Watkins, SPE-AIME, Amoco Production Co. Manufacturing and Supply Co. Fiberglass Sucker Rods in Beam- Pumped Oil Wells de la Revista: Journal of Petroleum Technology. Estados Unidos - 1978.

Figura N° 6-9: Cartas dinamométricas. Pozo 11: varillas de acero



Fuente: Watkins, SPE-AIME, Amoco Production Co. Manufacturing and Supply Co. Fiberglass Sucker Rods in Beam- Pumped Oil Wells de la Revista: Journal of Petroleum Technology. Estados Unidos - 1978.

Figura N°6-10: Cartas dinamométricas- Pozo11: varillas fibra de vidrio



Fuente: Watkins, SPE-AIME, Amoco Production Co. Manufacturing and Supply Co. Fiberglass Sucker Rods in Beam- Pumped Oil Wells de la Revista: Journal of Petroleum Technology. Estados Unidos - 1978.

Las cartas dinamométricas muestran gráficos horizontales o con ligera pendiente hacia abajo a la derecha con varillas de acero, mientras que con las varillas de fibra de vidrio, las tarjetas muestran gráficos con pendiente hacia arriba a la derecha. Se esperaba este cambio con las varillas de fibra de vidrio, por el aumento de dimensiones de la varilla, por su estiramiento, además, la velocidad del sonido disminuye en la de vidrio y en consecuencia se puede evitar la resonancia que puede causar prematura falla de la sarta por fatiga, influenciada por el módulo de elasticidad más bajo de la varilla de fibra de vidrio. En la tabla N° 6.3 se muestran datos de producción, antes y después de instalada las varillas de fibra de vidrio. Se notaron cambios menores en la producción y pocos pozos requieren aumento en la velocidad de bombeo o más tiempo de bombeo para compensar los efectos del aumento del tramo de varilla. Se confirma que el aumento de la carrera de la bomba con las barras de peso compensará con los efectos de aumento de la varilla por estiramiento.

TABLA N° 6.3: DATOS DE PRODUCCIÓN

| Sarta de varilla número | Con varillas de acero | | Con varillas fibra de vidrio | |
|-------------------------|----------------------------|----------------|------------------------------|-----------------|
| | Producción de fluido (B/D) | Strokes/minuto | Producción de fluido (B/D) | Strokes /minuto |
| 1 | 382 | 9.2 | 380 | 9.2 |
| 2 | 231 | 8 | 228 | 9.5 |
| 3 | 384 | 10 | 321 | 9.5 |
| 4 | 420 | 10 | 399 | 10 |
| 5 | 222 | 12 | 256 | 12 |
| 6 | 314 | 10.2 | 336 | 10.7 |
| 7 | 332 | 11.3 | 365 | 11.3 |
| 8 | 271 | 10.5 | 317 | 10.6 |
| 8 | 440 | 10.2 | 492 | 10.2 |
| 10 | 648 | 10 | 660 | 10 |
| 11 | 352 | 6.6 | 357 | 6.7 |

Fuente: Watkins, SPE-AIME, Amoco Production Co. Manufacturing and Supply Co. Fiberglass Sucker Rods in Beam- Pumped Oil Wells de la Revista: Journal of Petroleum Technology. Estados Unidos - 1978.

Las fallas de las varillas de fibra de vidrio fueron causadas por la introducción de un bucle o nudo en uno o más de las mechas de fibra de vidrio en la fabricación de la varilla. La falla no afecta a la resistencia de tracción de manera significativa. Sin embargo, sometidas a cargas cíclicas, como el bombeo mecánico, los nudos se enderezan y provocan tensiones de corte cerca de la falla, lo que origina agrietamiento en la varilla y su fracaso. El examen cuidadoso de los 26 fracasos, demostró que era el resultado de un defecto de bucle o nudo. Se realizaron cambios en el manipular las mechas para corregir este problema. El control de calidad puede evitar los problemas experimentados con estas varillas.

En *Amoco Production Company* distrito Andrews en los condados de Texas, Estados Unidos, se analizaron trece instalaciones de varillas de fibra de vidrio de tercera generación, los resultados de las trece instalaciones de bombeo mecánico con varillas de fibra de vidrio se muestran en la tabla N° 6.4. Cinco de las trece instalaciones no tuvieron éxito. Las trece instalaciones fueron diseñadas y ejecutadas antes del desarrollo del nuevo diagrama de rango de carga producido empíricamente por Joslyn utilizando 140 instalaciones de varillas de fibra de vidrio.

TABLA N°6.4: COMPARACION DE LAS VARILLAS DE ACERO Y VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO EN SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

| Sarta de varillas N° | Tiempo total de ejecución (meses) | Producción con varillas | | | | Fallas total ^d |
|----------------------|-----------------------------------|-------------------------|------|-----------------|------|---------------------------|
| | | Acero | | Fibra de vidrio | | |
| | | BOPD | BWPD | BOPD | BWPD | |
| 1U ^b | 2 | 24 | 215 | 22 | 210 | 3(1) |
| 2U ^c | 0.5 | 44 | 34 | 10 | 36 | 0 |
| 3U | 5 | 121 | 121 | 145 | 110 | 6 |
| 4U | 1.5 | 50 | 271 | 30 | 418 | 2(2) |
| 5U | 1 | 77 | 360 | 75 | 377 | 1(1) |
| 6S ^d | 18 ^e | 41 | 61 | 102 | 118 | 2 |
| 7S | 12 ^e | 38 | 129 | 36 | 168 | 2 |
| 8S | 15 ^e | 72 | 48 | 66 | 172 | 1 |
| 9S | 10 ^e | 150 | 0 | 175 | 4 | 3(2) |
| 10S | 6(SI) | 0.8 | 576 | 0 | 715 | 3(3) |
| 11S | 12 ^e | 52 | 427 | 30 | 330 | 1(1) |
| 12S | 4 ^e | 201 | 0 | 309 | 0 | 0 |
| 13S | 4.5 | 80 | 135 | 50 | 65 | 1(1) |

Fuente: Artículo SPE- 8246 – PA, Utilización de varillas de bombeo de fibra de vidrio, por Harry E. Saúl III, Jerry A. Detterick, Amoco Production Co. 18 de diciembre de 1979

Los paréntesis indican fallas de las varillas cortas

U^b = sin éxito.

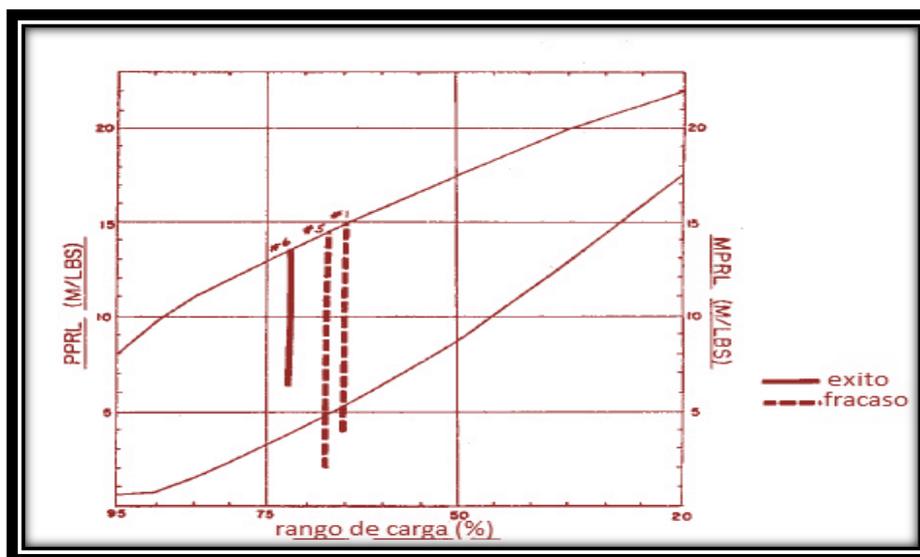
U^c = las varillas en este pozo no bajarían correctamente.

S^d = éxito.

e = estos pozos siguieron utilizando varillas de bombeo de fibra de vidrio.

Tres de los cinco fracasos (pozos 1, 4, 5 tabla N°6.4), fue por operar fuera del diagrama de rango de carga. Los rangos para los pozos 1, 5 y 6 se representan en la fig. N° 6-11 es evidente que el fracaso de los pozos 1 y 5 se habría evitado si el diagrama de rango de carga hubiera estado disponible.

Figura N° 6-11: Diagrama de rango de carga de Joslyn



Fuente: Artículo SPE- 8246 – PA, Utilización de varillas de bombeo de fibra de vidrio, por Harry E. Amoco Production Co. 18 de diciembre de 1979

La instalación del pozo 3 operó dentro del rango de carga, pero, el nivel de líquido varió sustancialmente por los gases en la cabeza de pozo, dando lugar a fluctuaciones de rango de carga. El examen mostró, por el golpe severo, la rotura de la parte superior de la bomba y se apagó. El segundo pozo con una terminación dual sin un ancla de la tubería, se instaló las varillas de fibra de vidrio.

Se hicieron varios intentos infructuosos de poner suficiente peso en la varilla de modo que caerían en este pozo, pero no se logró instalar la bomba. En el pozo 6 (tabla N° 6.5) con varillas de fibra de vidrio, han aumentado la producción de 102 a 220 BOPD (120%), sin cambiar el equipo de bombeo de superficie, reduciendo así la energía por barril requerida para bombear un pozo. La figura N° 6-12 muestra las cartas dinamométricas antes y después de la instalación de varillas fibra de vidrio en el pozo 6, con una ligera pendiente a la derecha y arriba con las varillas de fibra de vidrio. Con este aumento de producción, el excedente de \$4378 de la inversión inicial del costo de las varillas de acero grado D de 7/8", se pagó en 7,2 días. El incremento de ganancia anual por el incremento de producción de 9.77 carreras/min es \$233000.

TABLA N° 6.5: INSTALACIÓN Y RESULTADOS DEL POZO 6

| Parámetro | Acero | Fibra de vidrio |
|---|--------|-----------------|
| Diseño de sarta de varillas | 86 | P677 |
| Longitud de carrera (plg) | 120 | 120 |
| Golpes por minuto | 7.5 | 9.7 |
| Profundidad de bomba (pies) | 8843 | 8843 |
| Fluido encima de la bomba (pies) | 2241 | 1805 |
| Carga máxima en la varilla pulida (lbf) | 21500 | 13500 |
| Carga mínima en la varilla (lbf) | 14250 | 6250 |
| Carga en la válvula estacionaria (lbf) | 16750 | 9417 |
| Carga en la válvula viajera (lbf) | 17250 | 10733 |
| Tensión máxima (psi) | 27389 | 23945 |
| Torque máximo (lb-plg) | 228375 | 224700 |
| Diámetro de la bomba (plg) | 1.25 | 1.25 |
| Rango de carga (lbf) | 7250 | 7133 |
| Porcentaje de rango de carga | 33.7 | 53 |
| Caballos de fuerza en varilla pulida | 7.8 | 14.32 |
| Producción de fluido (B/D) | 102 | 220 |

Fuente: Artículo SPE- 8246 – PA, Utilización de varillas de bombeo de fibra de vidrio, por Harry E. Saúl III, Jerry A. Detterick, Amoco Production Co. 18 de diciembre de 1979

Figura N° 6-12: Cartas dinamométricas pozo 6



Fuente: Artículo SPE- 8246 – PA, Utilización de varillas de bombeo de fibra de vidrio, por Harry E. Amoco Production Co. 18 de diciembre de 1979

Para fundamentar las ventajas del uso de la varilla de fibra de vidrio hemos utilizado información estadística y gráficos para dar a conocer el funcionamiento de las varillas que son de este material. La tabla N° 6.6 que viene a continuación da un resumen estadístico muy importante y la figura N° 6-13 muestra de manera gráfica las cartas dinamométricas en el pozo 7.

Las cifras finales de producción de este pozo muestran que las varillas de bombeo de fibra de vidrio con la mayor velocidad admisible de 9,6 carreras/min levantó 75% más fluido que con las varillas de acero a un limitado 8 carreras/min.

La producción promedio con varillas de fibra de vidrio aumentó de 30 a 38 BOPD y de 86 a 129 BWPD. Por lo tanto, se obtiene mayor producción con varillas de bombeo de fibra de vidrio.

TABLA N° 6.6: INSTALACIÓN Y RESULTADOS DEL POZO 7

| Parámetro | Acero | Fibra de vidrio |
|---|--------|-----------------|
| Diseño de sarta de varillas | 76 | P677 |
| Longitud de carrera (plg) | 120 | 120 |
| Golpes por minuto | 8 | 10 |
| Profundidad de bomba (pies) | 8695 | 8738 |
| Fluido encima de la bomba (pies) | 1885 | 1847 |
| Carga máxima en la varilla pulida (lbf) | 20408 | 12792 |
| Carga mínima en la varilla (lbf) | 10925 | 5657 |
| Carga en válvula estacionaria (lbf) | 14125 | 8729 |
| Carga en válvula viajera (lbf) | 15367 | 9814 |
| Tensión máxima (psi) | 33957 | 22791 |
| Torque máximo (lb-plg) | 294167 | 213849 |
| Diámetro de la bomba (plg) | 1.25 | 1.25 |
| Rango de carga (lbf) | 9483 | 7129 |
| Porcentaje de rango de carga | 46 | 56 |
| Caballos de fuerza en varilla pulida | 9.78 | 10.86 |
| Producción de fluido (B/D) | 167 | 204 |

Fuente: Artículo SPE- 8246 – PA, Utilización de varillas de bombeo de fibra de vidrio, Por Harry E. Saúl III, Detterick, J.Amoco Production Co. 18 de diciembre de 1979

Figura N° 6-13: Cartas dinamométricas pozo 7



Fuente: Artículo SPE- 8246 – PA, Utilización de varillas de bombeo de fibra de vidrio, por Harry E. Saúl III, Jerry A. Detterick, Amoco Production Co. 18 de diciembre de 1979

El pozo 8 con varillas de fibra de vidrio obtuvo favorable producción como muestra la tabla N° 6.7 siguiente y la figura N° 6-14 muestra las tarjetas del dinamómetro. La producción media antes de instalar las varillas de bombeo de fibra de vidrio fue de 72 BOPD y 48 BWPD. Menos de una semana después de instaladas las varillas de fibra de vidrio, se realizó un trabajo de acidificación por un problema grave de emulsión. Después de un mes, el corte de agua pasó de 40% del periodo anterior de 12 meses a 78%. Esto es posiblemente por la comunicación entre las formaciones estratificadas de producción del horizonte Wolfcamp. El pozo 8 produce en promedio de 66 BOPD y 172 BWPD cuando funciona a la mayor velocidad de 9,77 carreras/min con varillas de fibra de vidrio. Es un aumento del 98% de la producción total de líquido sobre la producción con varillas de acero. Desde el punto de vista de producción de líquidos, esta instalación es satisfactoria.

TABLA N° 6.7: INSTALACIÓN Y RESULTADOS DEL POZO 8

| Parámetro | Acero | Fibra de vidrio |
|---|--------|-----------------|
| Diseño de sarta de varillas | 76 | P677 |
| Longitud de carrera (plg) | 120 | 120 |
| Golpes por minuto | 7.5 | 9.8 |
| Profundidad de bomba (pies) | 8472 | 8472 |
| Fluido encima de la bomba (pies) | 1859 | 1608 |
| Carga máxima en la varilla pulida (lbf) | 21250 | 12843 |
| Carga mínima en la varilla (lbf) | 11393 | 6093 |
| Carga en válvula estacionaria (lbf) | 14643 | 8756 |
| Carga en válvula viajera (lbf) | 15300 | 10119 |
| Tensión máxima (psi) | 27350 | 22894 |
| Torque máximo (lb-plg) | 300000 | 212625 |
| Diámetro de la bomba (plg) | 1.5 | 1.5 |
| Rango de carga (lbf) | 9857 | 6750 |
| Porcentaje de rango de carga | 46.6 | 53 |
| Caballos de fuerza en varilla pulida | 8.84 | 9.97 |
| Producción de fluido (B/D) | 119.6 | 227.4 |

Fuente: Artículo SPE- 8246 – PA, Utilización de varillas de bombeo de fibra de vidrio, por Harry E. Amoco Production Co. 18 de diciembre de 1979

Figura N° 6-14: Cartas dinamométricas pozo 8



Fuente: Artículo SPE- 8246 – PA, Utilización de varillas de bombeo de fibra de vidrio, por Harry E., Amoco Production Co. 18 de diciembre de 1979

Amoco Production Company en el distrito Odessa en Texas, Estados Unidos tiene la siguiente afirmación:

Para evaluar de manera efectiva las varillas de bombeo de fibra de vidrio, hay que iniciar un gran programa ambicioso para probar el funcionamiento de varias sartas de varillas en pozos de diferentes condiciones. La tabla N°6.8 incluye datos de estas pruebas. En todos los casos, se instalaron varillas de fibra de vidrio de 1", todas ellas resultaron ser más económicos sin experimentar un solo desperfecto o fallo de las varillas.

A continuación la Tabla N° 6.8 donde se compara los comportamientos de las varilla de fibra de vidrio en diferentes condiciones y con todos los indicadores necesarios para su funcionamiento.

TABLA N° 6.8: RESUMEN DE DATOS DE CAMPO VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO

| Campo de prueba N° | Profun. (pies) | Unid. de bombeo | Torque máx. (lbs-plg) | Velocid. de bombeo stk/min | Longitud de carrera (plg) | Carga máx varilla pulida (lbs) | Carga mín varilla pulida (lbs) | Prod. (BFPD) |
|--------------------|----------------|-----------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|
| 100%acero | 5400 | A456 | 561400 | 10.8 | 120 | 19138 | 5661 | 489 |
| F vidrio/acero | 5400 | A456 | 430920 | 12 | 120 | 16529 | 2140 | 590 |
| 100%acero | 8960 | **6 | | | | | | |
| F vidrio/acero | 8960 | C320 | 313000 | 11 | 120 | 21496 | 7890 | 130 |
| 100%acero | 5500 | C456 | 386600 | 7.8 | 144 | 16617 | 5363 | 387 |
| F vidrio/acero | 5500 | C456 | 364000 | 7.8 | 144 | 12608 | 2739 | 695* |
| 100%acero | 6400 | A456 | 524000 | 8 | 144 | 24976 | 8364 | 290 |
| F vidrio/acero | 6400 | A456 | 405800 | 10.5 | 144 | 15697 | 4512 | 345 |
| 100%acero | 8900 | ** | | | | | | |
| F vidrio/acero | 8900 | C320 | 265000 | 10 | 100 | 22000 | 9681 | 160 |
| 100%acero | 5100 | A640 | 871000*** | 10.5 | 145.2 | 21301 | 3380 | 780 |
| F vidrio/acero | 5100 | A640 | 627000 | 11 | 145.2 | 15683 | 1487 | 790 |
| 100%acero | 5100 | A640 | 663000 | 9.5 | 168 | 23592 | 3100 | 754 |
| F vidrio/acero | 5100 | A640 | 548000 | 11 | 168 | 14994 | 1925 | 770 |
| E.S.P. | 7100 | | | | | | | 400 |
| F vidrio/acero | 7100 | C320 | 321000 | 12 | 100 | 17065 | 3072 | 400 |

Fuente: Robert B. Treadway and Ken R. Focazio, Amoco Production Company. Artículo: Fiberglass Sucker Rods- A Futuristic Solution to Today's Problem Wells. Revista: SPE 10251 (Society of Petroleum Engineers).USA 1981

⁶ *Instalación de varillas de fibra de vidrio en pozo permitía para algunos flujos. A veces tanto como 900 BFPD. **Pozo nuevo. No hay datos anteriores.

***Condición temporal.

La sociedad de ingenieros de petróleo de Estados Unidos publicó un artículo muy interesante respecto a las ventajas de las varillas de fibra de vidrio sobre las varillas de acero respecto al bombeo mecánico de líquido residual.

Este estudio es uno de los que profundizan en las comparaciones y se detienen a aplicar las pruebas en diferentes pozos, por lo cual nos parece que es uno de los trabajos más exhaustivo que fundamenta las propuestas de esta tesis.

- ✚ El primer pozo, en menos de un año experimentó seis fallas de las varillas de acero. El pozo tenía un historial de altos niveles de fluido. No se disponía de una unidad más grande y, el uso de una bomba más grande habría sobrecargado gravemente la caja de cambios, este pozo se seleccionó para probar las varillas de fibra de vidrio.
- ✚ El 22 de mayo de 1980, un segundo pozo se equipó con una sarta de varillas de fibra de vidrio/acero, porque el equipo con sarta de varillas 100% de acero no era capaz de producir el fluido disponible.
- ✚ La tercera instalación de varillas de fibra de vidrio fue en junio de 1980, porque el equipo instalado no podía bajar el nivel excesivo de líquido en el pozo. La nueva sarta de varillas fibra de vidrio/ acero bajó suficientemente el nivel de líquido para que fluya bien, resultando en un aumento de más del 300BFPD. (Treadway 1981:3)

Los autores de dicho trabajo son Robert Treadway y Ken Focazio de la empresa *Amoco Production Company*, quienes continúan las pruebas en 5 pozos más y van describiendo los resultados que damos a conocer textualmente:

- ✚ El cuarto pozo experimento cinco intentos fallidos con varillas de acero de 7/8", por el sobreesfuerzo sometido en siete meses. El 6 de agosto de 1980,
- ✚ Un quinto pozo se equipó con una sarta de varillas fibra de vidrio/acero, porque el equipo con 100% de varillas de acero, no podía producir el fluido disponible. El 20 de agosto de 1980.
- ✚ Se instala la sexta sarta de varillas fibra de vidrio/acero, las razones es por la historia de fallas de las varillas de acero, por tensión (cinco en 1979, cuatro en 1980), un alto nivel de líquido y una caja de engranaje sobrecargado. Para reducir el nivel de líquido, se instala una bomba de tubería de 2 1/2" con una sarta de varillas 100% de acero. Logran producir más y reducir el nivel de líquido, pero, es drásticamente sobrecargada la caja de cambio.
- ✚ El 29 de agosto 1980, inician la séptima prueba de varillas de fibra de vidrio, la sarta anterior de 100% de acero, había fracasado cinco veces en once meses. El pozo también mostraba alto nivel de fluido.
- ✚ El 9 de septiembre de 1980, se instala la octava sarta de varillas fibra de vidrio. En este caso, una bomba electro sumergible (BES), que había fallado dos veces y cambiado de tamaño una vez, fue cambiado por una unidad de bombeo y una sarta de varillas de fibra de vidrio/acero. El grupo de ingeniería lo consideró como una solución. Esto se comprobó correcto, cuando la sarta de varillas fibra de vidrio/acero produjeron más que BES sin experimentar un solo fallo. (Treadway 1981: 4)

Cabe mencionar que también hubo experimentos donde las varillas de fibra de vidrio no dieron resultado pero fueron por causas externas al material de las varillas, y tiene que ver con el exceso de exigencia y la fuerza de comprensión más allá de lo recomendable.

También intervino un tercer factor que fue la contextura del terreno donde ya se había reportado meses antes presencia de arena en grandes cantidades lo que intervino como un factor limitante: “ Antes de la prueba, dos sartas de varillas de fibra de vidrio de 7/8” que se probaron, fracasaron. El primero [...] fue por sobrecarga del límite máximo recomendado [...] ocurrió en un nudo o bucle. El otro fallo ocurre en un pozo con una historia de producción de arena, donde el embolo de la bomba se había pegado y las varillas fueron sometidos a fuerzas de compresión extremas.” (Treadway 1981: 4) Los problemas se pudieron superar señalan Treadway y Focazio cuando ambas instalaciones lo reemplazan con varillas de fibra de vidrio de 1” y han bombeado sin fracaso.

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS ECONÓMICO

El software Qrod 2.4 es utilizado para diseñar el sistema de bombeo mecánico, con varillas de acero, también, con varillas de fibra de vidrio. El programa determina el diseño en base al tipo de unidad de superficie, profundidad de la bomba, carrera del balancín, tamaño del pistón de la bomba, diámetro de la tubería de producción, sarta de varillas de bombeo, presiones en el pozo y la gravedad específica del fluido de producción, velocidad de bombeo. El análisis lo hace a condiciones ideales asumiendo fricciones bajas en la sarta de varillas y en la bomba. En los parámetros de entrada, como se muestra en la tabla N° 7.1 se considera que el fluido de producción es agua, que es la que tiene mayor gravedad específica:

TABLA N° 7.1: VALORES DE ENTRADA PARA EL PROGRAMA QROD

| Parámetros de entrada | Varillas de acero | Varillas de fibra de vidrio y acero |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Tipo de balancín | CWConv | CWConv |
| Profundidad de la bomba (pie) | 8843 | 8843 |
| Carrera del balancín (plg.) | 120 | 120 |
| Diámetro del pistón (plg.) | 1.250 | 1.250 |
| Diámetro de la tubería | 2.875"(6.4 lb/ft)2.441"ID | 2.875"(6.4 lb/ft)2.441"ID |
| Tubería anclada | Si | Si |
| Tamaños de las varillas (plg.) | Numero API 86 | FV = 1.000 y Ac = 1.250 |
| Clase de varillas | D | ----- |
| Porcentaje (%) | ----- | F.V = 90 |
| Gravedad específica del fluido | 1 | 1 |
| Presión de la tubería (psi) | 80 | 80 |
| Presión del revestidor (psi) | 700 | 700 |
| Presión de entrada de la bomba (psi) | 700 | 700 |
| Presión del yacimiento (psi) | 1000 | 1000 |
| Índice de productividad (bbl/dia/psi) | 2.000 | 2.000 |
| Velocidad de bombeo (spm) | 7.5 | 9.7 |

Fuente: Amoco Production Company –distrito de Andrews condado Texas Estados Unidos, pozo 6

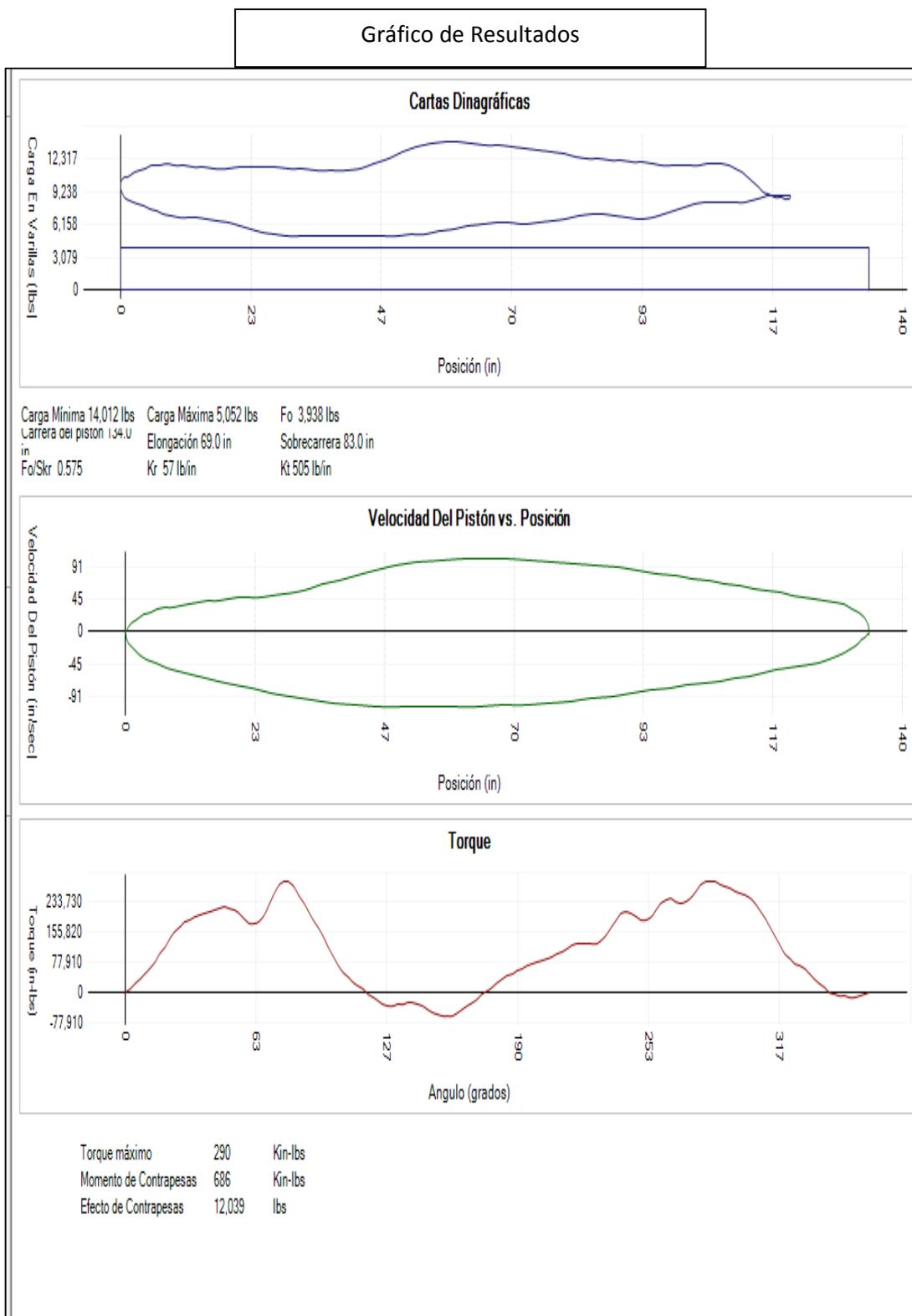
Luego de ingresar los datos, se selecciona calcular para obtener los resultados. Los resultados del programa QRod para el sistema de bombeo mecánico con varillas de fibra de vidrio y el sistema con varillas de acero muestran en las siguientes figuras:

Figura N°7-1: Datos de entrada y resultados del programa QRod para el sistema de bombeo mecánico con varillas de fibra de vidrio.

| Título: Pozo VF01 | | Datos de Entrada y Resultados | |
|--|------------------------------|--|-------------------|
| Parametros de Entrada | | Resultados | |
| Tipo de Balancín | CWConv | Caudal (100% eficiencia bomba) | 237 bbl/day |
| Profundidad de la Bomba | 8,843 ft | Caudal (95 % eficiencia bomba.) | 225 bbl/day |
| Carrera del balancín | 120 in | % varillas para cada sección | 90.0, 10.0 |
| Diámetro del Pistón | 1.250 in | Carga de las varillas en superficie | 74.0 % |
| Diámetro de la Tubería | 2.875" (6.4 lb/ft) 2.441" ID | Capacidad (API) mínima balancín | 320-143-120 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Tubería anclada | | Capacidad mínima potencia motor | 22.8 hp |
| Varillas <input type="radio"/> Varillas de acero <input checked="" type="radio"/> Varillas fibra de vidrio y acero | | Potencia en barra pulida | 15.9 hp |
| Tamaño vidrio | 1.000 in | Carga válvula viajera | 11,329 lbs |
| Tamaño acero | 1.250 in | Carga válvula fija | 7,391 lbs |
| Porcentaje | 90 | Carga máxima varillas vidrio | 5,413 lbs |
| | | Carga mínima varillas vidrio | 481 lbs |
| | | Esfuerzo máximo vidrio | 7,031 psi |
| | | Esfuerzo máximo acero | 625 psi |
| | | Carga varillas vidrio | 51.3 % |
| | | Calcular en base a SPM o Caudal deseado | |
| | | <input checked="" type="radio"/> Velocidad de bombeo | < 9.7 > SPM |
| | | <input type="radio"/> Caudal deseado | < 225 > bbl/day |
| | | <input type="button" value="Calcular"/> | |
| Valores de Ajuste Predeterminados | | | |
| Peso total barras de lastre | 0 lbs | Factor de amortiguamiento | 0.1 |
| Gravedad específica del fluido | 1 H ₂ O = 1 | Eficiencia del balancín | 95 % |
| Presión de la tubería | 80 psi | Eficiencia de la bomba | 95 % |
| Presión del revestidor | 700 psi | | |
| La presión de entrada de la bomba puede introducirse directamente o calcularse a partir de la presión de vaciamento e índice de productividad. | | | |
| <input checked="" type="radio"/> Presión de entrada de la bomba | 700 | <input type="radio"/> Presión de Yacimiento | 1000 psi |
| | | Índice de Productividad | 2.000 bbl/day/psi |

Fuente: Programa QRod -Echometer

Figura N°7-2: Gráfico de los resultados del programa QRod para el sistema de bombeo mecánico con varillas de bombeo de fibra de vidrio



Fuente: Programa QRod -Echometer

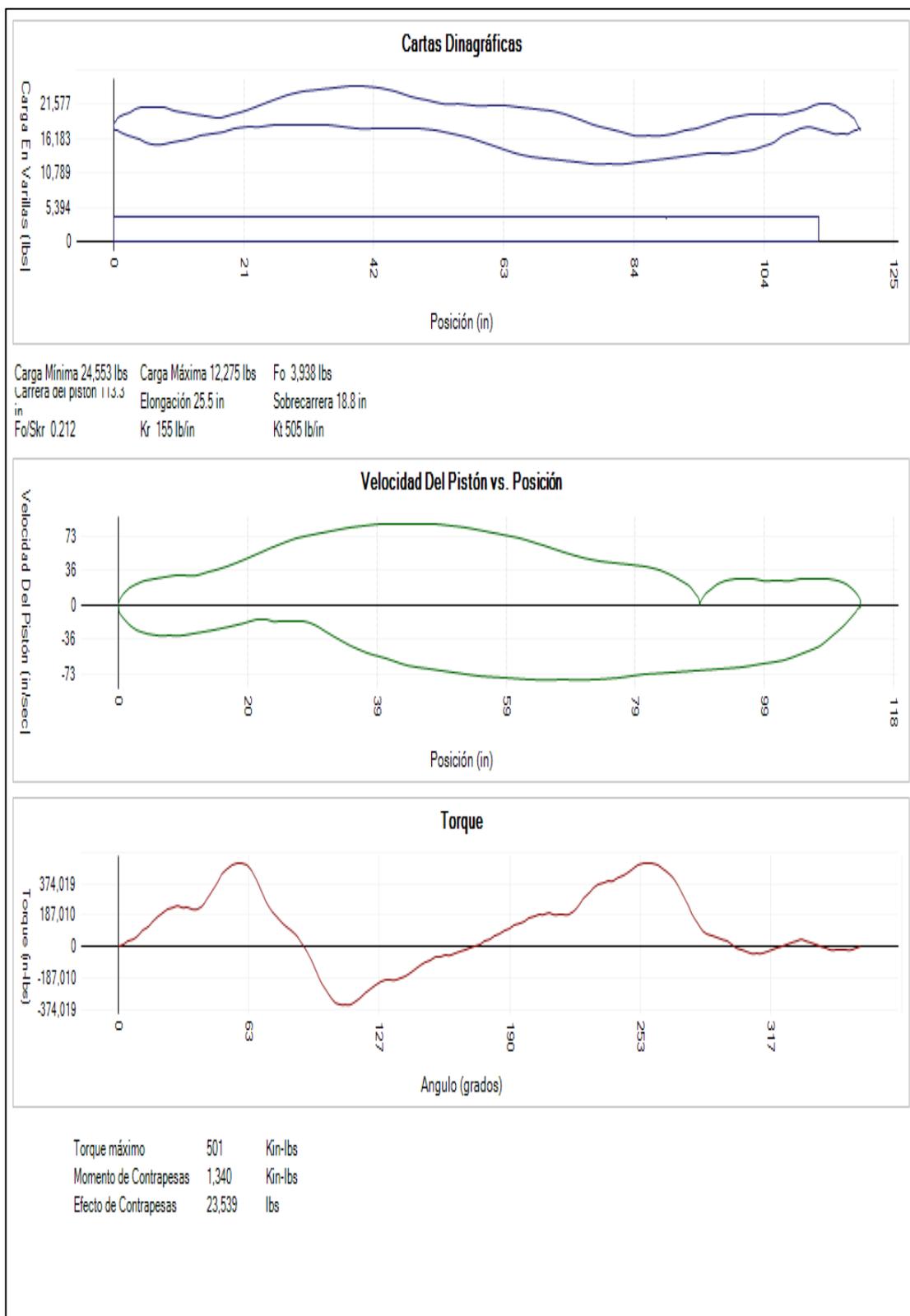
Figura N° 7-3: Datos de entrada y resultados del programa QRod para el sistema de bombeo mecánico con varillas de acero.

Datos de Entrada y Resultados

| Título <input type="text" value="Pozo VA01"/> | | | |
|--|--|---|--|
| Parametros de Entrada | | | |
| Tipo de Balancín | <input type="text" value="CWConv"/> | | |
| Profundidad de la Bomba | <input type="text" value="8,843"/> ft | | |
| Carrera del balancín | <input type="text" value="120"/> in | | |
| Diámetro del Pistón | <input type="text" value="1.250"/> in | | |
| Diámetro de la Tubería | <input (6.4="" 2.441"="" ft)="" id"="" lb="" type="text" value="2.875"/> | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Tubería anclada | | | |
| Varillas | | | |
| <input checked="" type="radio"/> Varillas de acero | | | |
| <input type="radio"/> Varillas fibra de vidrio y acero | | | |
| Número API | <input type="text" value="86"/> | | |
| Clase de varillas | <input type="text" value="D"/> | | |
| Resultados | | | |
| Caudal (100% eficiencia bomba) | 155 bbl/day | | |
| Caudal (95 % eficiencia bomba.) | 147 bbl/day | | |
| % varillas para cada sección | 24.5, 24.2, 51.2 | | |
| Carga de las varillas en superficie | 83.3 % | | |
| Capacidad (API) mínima balancín | 640-256-120 | | |
| Capacidad mínima potencia motor | 27.2 hp | | |
| Potencia en barra pulida | 11.1 hp | | |
| Carga válvula viajera | 20,246 lbs | | |
| Carga válvula fija | 16,308 lbs | | |
| Calcular en base a SPM o Caudal deseado | | | |
| <input checked="" type="radio"/> Velocidad de bombeo | <input type="text" value="7.5"/> SPM | | |
| <input type="radio"/> Caudal deseado | <input type="text" value="147"/> bbl/day | | |
| <input type="button" value="Calcular"/> | | | |
| Valores de Ajuste Predeterminados | | | |
| Peso total barras de lastre | <input type="text" value="0"/> lbs | Factor de amortiguamiento | <input type="text" value="0.1"/> |
| Gravedad específica del fluido | <input type="text" value="1"/> H ₂ O = 1 | Eficiencia del balancín | <input type="text" value="95"/> % |
| Presión de la tubería | <input type="text" value="80"/> psi | Eficiencia de la bomba | <input type="text" value="95"/> % |
| Presión del revestidor | <input type="text" value="700"/> psi | | |
| La presión de entrada de la bomba puede introducirse directamente o calcularse a partir de la presión de vaciamento e índice de productividad. | | | |
| <input checked="" type="radio"/> Presión de entrada de la bomba | <input type="text" value="700"/> | <input type="radio"/> Presión de Yacimiento | <input type="text" value="1000"/> psi |
| | | Índice de Productividad | <input type="text" value="2.000"/> bbl/day/psi |

Fuente: Programa QRod- Echometer

Figura N°7-4: Gráfico de los resultados del programa QRod para el sistema de bombeo mecánico con varillas de bombeo de acero.



Fuente: Programa QRod 2.4 Echometer

Se determina la pérdida de fricción desde la bomba hasta la superficie. El valor del factor está en el rango de 0.05 a 0.5 y el valor normal esta de 0.1 a 0.15. Los resultados que se obtienen se muestran en la siguiente tabla

TABLA N°7.2: RESUMEN DE RESULTADOS DEL PROGRAMA QROD

| Parámetros | Varillas de acero | Varillas fibra de vidrio |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------------|
| Caudal (100% eficiencia bomba) | 155 bbl/día | 237 bbl/día |
| Caudal (95% eficiencia bomba) | 147 bbl/día | 225 bbl/día |
| % varillas para cada sección | 24.5, 24.2, 51.2 | 90.0, 10.0 |
| Carga de las varillas en superficie | 83.3 % | 74.0 % |
| Capacidad (API) mínima balancín | 640-256-120 | 320-143-120 |
| Capacidad. mínima potencia motor | 27.2 hp | 22.8 hp |
| Potencia en vástago pulido | 11.1 hp | 15.9 hp |
| Carga válvula viajera | 20246 lbs | 11329 lbs |
| Carga válvula fija | 16308 lbs | 7391 lbs |
| Caudal deseado | 147 bbl/día | 225 bbl/día |
| Carga máxima | 24553 lbs | 14012 lbs |
| Carga mínima | 12275 lbs | 5052 lbs |
| Carrera del pistón | 113.3 plgs | 134.0 plgs |
| Elongación | 25.5 plgs | 69.0 plgs |
| Sobrecarrera | 18.0 plgs | 83.0 plgs |
| Torque máximo | 501 Klbs-plgs | 290 Klbs-plgs |
| Momento de contrapesas | 1340 Klbs-plgs | 686 Klbs-plgs |
| Efecto de contrapesas | 23539 lbs | 12039 lbs |

Fuente: Elaboración propia con información Programa QROD.

En base a estos resultados se puede comparar el sistema de bombeo mecánico con varillas de acero y otro con varillas de fibra de vidrio; con las varillas de fibra de vidrio aumenta de producción diaria, reduce las cargas y por lo tanto reduce las potencias requeridas, tiene menor torque, mayor elongación y mayor sobrecarrera. Desde el punto de vista técnico, las varillas de fibra de vidrio incorporan mejoras al sistema de bombeo mecánico.

Entonces, se tiene la unidad de superficie y el diseño del sistema, por lo que se puede hacer una evaluación económica comparativa con precios de costos referenciales como se muestra a continuación.

TABLA N° 7.3: COSTOS DE LOS MATERIALES DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

| EQUIPAMIENTO COMPARATIVO | | | MATERIALES | | COSTOS | |
|--|--------|---------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| | | | P Varilla ACERO | P Varilla FIBRA V. | P Varilla ACERO | P Varilla FIBRA V. |
| Pozo | | | VA01 | VF01 | VA01 | VF01 |
| NA (ft) | | | 8,843 | 8,843 | | |
| Línea Flujo (m) | | | 1000 | 1000 | | |
| | Unidad | Costo U. (\$) | | | | |
| 1) MATERIALES | | | | | | |
| Tubing 2 7/8", J-55 | Mt | 16.07 | 2695.3 | 2695.3 | 43314.2 | 43314.2 |
| Niple de asiento 2 7/8" | Un | 44.52 | 1 | 1 | 44.5 | 44.5 |
| Perforado 2 7/8", J-55, confección local | Un | 15.00 | 1 | 1 | 15.0 | 15.0 |
| Cople cruceta de 2 7/8", confección local | Un | 4.00 | 1 | 1 | 4.0 | 4.0 |
| Varillas 1" x25' Grado "D" | | 58.50 | 87 | | 5089.5 | |
| Varillas 7/8" x25' Grado "D" | Un | 48.85 | 87 | | 4233.4 | 0.0 |
| Varillas 3/4" x25' Grado "D" | Un | 38.93 | 181 | | 7046.3 | 0.0 |
| Varillas 1" x37' Fibra Vidrio | Un | 180.75 | | 215 | 0.0 | 38878.2 |
| Barra de peso 1 1/2" x25' Grado "D" | Un | 122.13 | | 35 | 0.0 | 4274.4 |
| Centralizador de caucho ranurado 1" x 2 7/8" | | 9.30 | 22 | 54 | 204.6 | 502.2 |
| Centralizador de caucho ranurado 7/8" x2 7/8" | Un | 9.24 | 22 | 0 | 203.3 | 0.0 |
| Centralizador de caucho ranurado 3/4" x2 7/8" | Un | 9.21 | 45 | 0 | 414.5 | 0.0 |
| Anda de tubos de 2 7/8" x5 1/2" | Un | 1,400.00 | 1 | 1 | 1400.0 | 1400.0 |
| Bomba 1 1/2", 20150RHAC1654 c/rv | Un | 3,500.00 | 1 | 1 | 3500.0 | 3500.0 |
| Unidad de bombeo C640-256-120 | Un | 132,000.00 | 1 | 0 | 132000.0 | 0.0 |
| Unidad de bombeo C320D-143-120 | Un | 92,000.00 | 0 | 1 | 0.0 | 92000.0 |
| Cabeza colgadora 5 1/2" X 2 7/8" | Un | 1,189.95 | 1 | 1 | 1190.0 | 1190.0 |
| Varilón 1 1/4"x22'x7/8" | Un | 455.00 | 1 | 1 | 455.0 | 455.0 |
| Grampa para varilón de 1 1/4" | Un | 221.31 | 1 | 1 | 221.3 | 221.3 |
| Motor Eléctrico 50 HP | Un | 3,236.55 | 1 | 1 | 3236.6 | 3236.6 |
| Tablero Arranque Motor 50 HP | Un | 1,467.40 | 1 | 1 | 1467.4 | 1467.4 |
| Equipamiento sistema POC-Materiales | Gl. | 5,700.00 | 1 | 1 | 5700.0 | 5700.0 |
| Puente de Producción - Materiales | Gl. | 1,120.00 | 1 | 1 | 1120.0 | 1120.0 |
| Tubería Línea de flujo 2" x 12m, SCH40 | Mt | 6.80 | 1000 | 1000 | 6800.0 | 6800.0 |
| Materiales para electrificación | Gl. | 8,100.00 | 1 | 1 | 8100.0 | 8100.0 |
| 2) SERVICIOS | | | | | | |
| Transporte y Montaje de AIB en pozo nuevo | Un | 2,169.00 | 1.0 | 1.0 | 2169.0 | 2169.0 |
| Instalación puente de producción | Un | 180.00 | 1.0 | 1.0 | 180.0 | 180.0 |
| Obras eléctricas - Servicios | Un | 8,600.00 | 1.0 | 1.0 | 8600.0 | 8600.0 |
| Servicio Montaje de motor-Tablero | Un | 700.00 | 1.0 | 1.0 | 700.0 | 700.0 |
| POC - Mano de obra Instrumentación, obra civil | Un | 2,315.91 | 1.0 | 1.0 | 2315.9 | 2315.9 |
| Mano de obra línea de conducción | Mt | 5.50 | 1,000.0 | 1,000.0 | 5500.0 | 5500.0 |

TOTAL: 245224.4 231687.7

Fuente: Elaboración Propia en base a información bibliográfica

Las diferencias que se observan son:

La cantidad de centralizadores, la sarta de varillas de fibra de vidrio requiere menor cantidad que las de acero.

Capacidad de unidad de bombeo, la sarta de varillas de fibra de vidrio requiere menor capacidad y esto es de menor costo.

El costo de las sartas de varillas, las varillas de fibra de vidrio son más costosas (se consideró un costo mayor de tres veces del costo de varilla de acero)

Con el cambio de sarta de varillas de acero a varillas de fibra de vidrio se obtiene una reducción de costo de \$ 13536.7

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES

1.-En base a los resultados se puede comparar los sistemas de bombeo mecánico con varillas de acero y con varillas de fibra de vidrio; los sistemas con varillas de fibra de vidrio aumentan de producción diaria, reduce las cargas y por lo tanto reduce las potencias requeridas, tiene menor torque, mayor elongación y mayor sobrecarrera. Desde el punto de vista técnico, las varillas de fibra de vidrio incorporan mejoras al sistema de bombeo mecánico.

2.-Los problemas iniciales de las varillas de fibra de vidrio se originaron durante la fabricación por la introducción del bucle o nudo en las mechas de fibra de vidrio, un adecuado control de calidad es vital para el desarrollo de varillas de fibra de vidrio de alto rendimiento.

3.-La sarta de varillas de bombeo de fibra de vidrio, por su bajo peso y su menor resistencia a la compresión, necesita adicionar barras de acero o de peso, para que la sarta de varillas fibra de vidrio pueda caer al fondo del pozo y permanecer en tensión y así evitar cargas de compresión que puedan originar falla prematura.

4.-Las altas temperaturas reducen la resistencia de esfuerzos de las varillas de fibra de vidrio. El factor limitante es la temperatura que alcanza el conector final de fibra de vidrio más bajo. En estos pozos calientes, las varillas de acero se utilizan en la parte inferior de la sarta para reducir los efectos negativos de la temperatura en el funcionamiento de las conexiones de las varillas de fibra de vidrio.

5.-El reducido módulo de elasticidad de la varilla de fibra de vidrio aumenta la carrera del pistón de la bomba y aumenta la longitud de la sarta de varillas causada por la carga de fluido de la bomba. Para reducir los efectos del aumento de la sarta de varillas, aplicaciones con niveles de líquido por encima de la bomba, con bomba de menor calibre y profundidades muy por encima de 3000 pies son más favorables a una mayor longitud de carrera de la bomba de fondo de pozo.

6.-En algunos casos, el mantenimiento de una película inhibidor de la corrosión puede no ser necesaria. La resistencia a la corrosión de la varilla de fibra de vidrio puede reducir los costos de tracción y el tiempo de inactividad. Los conectores son de acero, y la corrosión puede ocurrir en este accesorio.

7.-Las tensiones en los conectores son relativamente bajas, y la corrosión en general no afecta en su desempeño.

8.-El menor peso de las varillas de fibra de vidrio, siendo aproximadamente del 30% del peso del acero, se puede traducir en ahorros de costos. El efecto total de la dinámica se reduce, lo que a su vez requiere menos potencia y los costos de consumo de energía más bajos. El peso ligero de la sarta de varillas permite usar unidades de bombeo de menor tamaño. Esto indica la reducción de torque de la unidad de bombeo para instalaciones nueva y eliminar la necesidad de comprar unidades de bombeo de mayor tamaño en instalaciones existentes.

9.-Dos varillas de fibra de vidrio de 37.5 pies de longitud, hacen la misma longitud de tres varillas de acero estándar, esto reduce una conexión.

10.-La eliminación de una conexión por cada dos varillas de fibra de vidrio reduce el costo de la sarta, debido a que los conectores es la parte de mayor costo de la varilla.

11.-Los máximos beneficios de las varillas de bombeo de fibra de vidrio se obtienen en pozos con las siguientes características

- Alto nivel de fluido.
- Alto índice de productividad (IP)
- Unidad de bombeo convencional.
- Tubería correctamente anclada.
- Rango de carga de varillas de bombeo de fibra de vidrio calculado que cae dentro de las pautas del diagrama de rango de carga.

12.-El alto nivel de fluido y alto IP, producirá un aumento de la producción que paga pronto el costo incremental de las varillas de bombeo de fibra de vidrio.

13.-Se debe considerar la tubería de producción correctamente anclada para minimizar el desgaste de las varillas con la tubería de producción. Esto extenderá la vida productiva de las varillas y optimizar los viajes netos del pistón de la bomba.

BIBLIOGRAFIA

ACTUALIZACIÓN TECNOLÓGICA APLICADA A LA INDUSTRIA Vol.2
B.A. (2010). Exploración y Producción de Petróleo: bombeo mecánico.

ADIMRA – CATALOGO: Asociación de Industriales Metalúrgicos de la República Argentina: Componentes típicos de un cabezal de pozo con bombeo mecánico convencional

<http://www.catalogometalurgico.com/products/view/1307>

Artigas, M. (2010) Producción de Petróleo: actualización tecnológica aplicada a la industria y bombeo mecánico: 1º edición. Editorial: CABA (Cámara Argentina Buenos Aires). Fundación YPF. B.A – Volumen2. Argentina

http://www.fundacionypf.org/publicaciones/Educacion/EDUCACION_FET_Actualizacion_Tecnologica_2.pdf

Holden W. B.C. Craft & W.R. (1962) Design Drilling and production. Petroleum Engineering Department Louisiana State University & E.D. Graves, Jr. Prentice – Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

Campos O.; PANCHI R. (2011) Tesis: Estudio para el cambio de Sistema de levantamiento artificial a bombeo mecánico en el campo Lago Agrio operado por EP - Petroecuador. Escuela Politécnica Nacional- Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. Ecuador.

<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4222>

<http://educaciones.cubaeduca.cu/medias/pdf/2421.pdf>

Centro de Capacitación Petroperú (1981). Programa de capacitación integral progresiva en ingeniería de petróleo fase i. investigación y desarrollo, Edición y revisión: Cap. IV. Sección A: Sistema de bombeo mecánico. A. Introducción Pág. IV.A.1.

Dover N. Company-AESC (Association of Energy Service Companies (2000–2007) Análisis de las fallas de las varillas de bombeo.

<http://www.oilproduction.net/cms3/files/Analisis%20de%20fallas%20en%20varillas%20de%20bombeo-Norris.pdf>.

Dover N. Company- AESC (Association of Energy Service Companies). Una serie en cuatro partes reimpresa de la revista Well Servicing El cuidado y manejo de las varillas de succión.

Partidas, H. (2003) ESP OIL INTERNATIONAL TRAINING GROUP Presenta el WorkShop International – Programa de Adiestramiento: “Bombeo Mecánico. Optimización, Diagnóstico y Operación”. Venezuela.
<https://christian3306.files.wordpress.com/2010/10/bombemecanico-optimizacion-diagnostico-y-operacion.pdf>

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL- FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS. (2011) Proyecto para obtener título de ingenieros en petróleo. Total de páginas: 203. Ecuador.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4222>

Erazo, A. Facultad de petróleo. Universidad Nacional de Ingeniería Sistemas Artificiales de Producción Fuente: Curso Producción II. Lima.

Ospino, R. Badillo D. (2010) Tesis: Estudio técnico-económico de la aplicación del sistema de levantamiento artificial DYNAPUMP en un campo de producción de petróleo. Universidad: Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería de Petróleo .Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleo. Total de páginas: 243. Bucaramanga Colombia:
<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/handle/123456789/799>

Raga, J. (2001) Tesis: Manual de selección de unidades de bombeo mecánico del activo de producción Poza Rica región norte. Universidad: universidad veracruzana. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Trabajo práctico técnico para optar al título de Ingeniero Mecánico Eléctrico. Total de páginas: 206. Veracruz – México-
<http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/31194/1/RagaMtz.pdf>

Reynolds, M. (1988) Fiberglass Sucker Rod Design Considerations Revista: JCPT- The Journal of Canadian Petroleum Technology. Editorial: Board. Volumen 27, Nº 5 Ver archivo en inglés: PETSOC-88-05-06 operaciones de producción. Ver archivo traducido: 88-05-06 operaciones de producción. Canadá.

Rodríguez R. (2000) tesis Optimización del bombeo mecánico del campo Tigre. Tesis para obtener el título de: Ingeniero de petróleo. Escuela superior politécnica del litoral. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra Guayaquil – Ecuador.

Saskatchewan. Oil report. (2015) Identificación de varillas de bombeo de acero API.
<http://saskatchewanoilreport.com/penta-completions-provides-entire-rod-pumping-optimization-and-design/>

T.E.W. Nind Trent University, Ontario, (1987) Canadá. Fundamentos de producción y mantenimiento de pozos petroleros capítulos 9 y 10 Editorial: LIMUSA. Versión española realizada por Julio Fournier González. Primera edición:—. Pág. total: 477. México

<http://es.scribd.com/doc/36093750/Fundamentos-de-Produccion-y-Mantenimiento-de-Pozos-Petroleros#scribd>

Treadway, R. and. Focazio, K. Amoco Production Company (1981) Artículo: Fiberglass Sucker Rods- A Futuristic Solution to Today's Problem Wells. De la Revista: SPE 10251 (Society of Petroleum Engineers). Artículo: 6, Estados Unidos.

T.S.U. Sánchez, Y. (2010) Evaluación del comportamiento de producción en pozos con unidad de bombeo hidráulico

CORLIFT. Universidad: Universidad del Zulia- Programa de Ingeniería de Petróleo. Comité Técnico del Programa de Ingeniería – Costa Oriental del Lago. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleo. Total de páginas: 140. Venezuela

http://oilproduction.net/cms3/files/Trabajo%20Especial%20de%20Grado_YoeI%20Sanchez%202010.pdf

Velasco, D. (2009) Tesis: Estudio del método de producción de bombeo mecánico mediante varillas de succión en el Ecuador. Tesis de Grado para obtención del título de Tecnólogo en Petróleo. Universidad Tecnológica Equinoccial. Facultad de Ciencias de la Ingeniería petrolera. Total de páginas: 218. Quito- Ecuador.

<http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/5881/1/378891.pdf>

Villegas, V. (2014) Tesis: Aplicación de un nuevo sistema de bombeo mecánico no convencional con tubería flexible para la exploración de pozos de crudo pesado. Universidad: Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis para obtener el título de Ingeniero de Petróleo. D.F Total de páginas: 220. México.

<http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/3276>

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/3276>

Watkins, D.L Haarsma, J. SPE-AIME, Amoco Production Co. (1978). Manufacturing and Supply Co. Artículo: Fiberglass Sucker Rods in Beam-Pumped Oil Wells. Revista: Journal of Petroleum Technology. USA.