

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LA UNIDAD *LRP*<sup>®</sup>  
RESPECTO A LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL.**

**JORGE ENRIQUE HERNÁNDEZ BERNAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISIOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LA UNIDAD LRP®  
RESPECTO A LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL.**

**JORGE ENRIQUE HERNÁNDEZ BERNAL**

**Monografía de grado presentada como requisito para optar por el título de  
Especialista en producción de hidrocarburos**

**Director: Erik Giovany Montes Páez**

**Ingeniero de petróleos**

**Especialista en producción de hidrocarburos**

**M.Sc. en Ingeniería de Hidrocarburos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISIOQUIMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

**ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS**

**BUCARAMANGA**

**2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios y a mi familia por alimentar desde siempre el deseo de ser mejor persona cada día, por brindarme un inmenso apoyo y fortalecer mi voluntad.

A Unico Colombia S.A.S por promover mi crecimiento profesional, fomentar los espacios de formación y poner a disposición todas las herramientas necesarias para la consecución de un gran logro.

A la Universidad Industrial de Santander que a través de su planta docente soporta con seguridad y competencia la generación de conocimiento valioso.

*“La plenitud del conocimiento significa siempre una cierta comprensión de la profundidad de nuestra ignorancia, y siempre conduce a la humildad y la reverencia”*

*Robert Andrews Millikan (1953:1868)*

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	14
1. OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
2. GENERALIDADES DEL BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL (BMC).....	17
2.1 RESEÑA HISTORICA .....	17
2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL .....	18
2.3 PORCENTAJE DE POZOS CON BMC.....	19
2.4 RANGO DE APLICACIÓN .....	20
2.5 COMPONENTES DEL BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL .....	20
2.6 VENTAJAS DEL BMC .....	23
2.7 DESVENTAJAS DEL BMC .....	23
2.8 FALLAS COMUNES DEL SISTEMA.....	23
3. UNIDADES DE SUPERFICE .....	26
3.1 BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL.....	26
3.1.1 Designación api de la unidad de superficie.....	26
3.1.2 Geometría de la unidad. ....	27
3.1.3 Instalación.....	28
3.1.4 Operación.....	30
3.1.5 Mantenimiento. ....	31
3.1.6 Prestaciones de control. ....	33
3.1.7 Consumo energético.....	34
3.2 <i>LINEAR ROD PUMP (LRP®)</i> .....	39
3.2.1 Geometría de la unidad. ....	40
3.2.2 Principio de funcionamiento.....	41
3.2.3 Rango de aplicación.....	42
3.2.4 Instalación.....	43
3.2.5 Operación.....	47
3.2.6 Mantenimiento. ....	47

3.2.7 Prestaciones de control.....	48
3.2.8 Consumo energético.....	53
3.2.9 Ventajas de la unidad.....	64
3.2.10 Limitaciones de la unidad.....	65
4. CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	66
4.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE UNIDADES BMC Y <i>LRP</i> ®.....	66
4.2 RELACIÓN PROFUNDIDAD / TASA DE PRODUCCIÓN PARA UNIDADES <i>LRP</i> ® Y BMC.....	67
4.3 COSTOS ASOCIADOS A INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN POZO TIPO.....	68
4.3.1 Definición de pozo tipo y diseño de unidades de superficie.....	69
4.3.2 Relación de costos.....	74
5. SELECCIÓN DE LA UNIDAD DE SUPERFICIE.....	76
5.1 PROCEDIMIENTO.....	76
6. CONCLUSIONES.....	78
7. RECOMENDACIONES.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	80

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de un sistema de bombeo mecánico convencional.....	18
Figura 2. Estadística de pozos petroleros alrededor del mundo con SLA.....	19
Figura 3. Designación API de unidades de Bombeo Mecánico .....	27
Figura 4. Geometría de la unidad de superficie convencional BMC .....	27
Figura 5. Transporte de una unidad BMC.....	28
Figura 6. Instalación costa afuera de unidad BMC .....	29
Figura 7. Unidad BMC con encerramiento en malla .....	30
Figura 8. Caja de engranajes de unidad BMC .....	31
Figura 9. Variador de frecuencia inteligente con software fill pump especializado para Bombeo Mecánico .....	34
Figura 10. Variable dependiente F3/Skr, modelo API RP 11L .....	37
Figura 11. Comparativo dimensional de unidad BMC y unidad LRP®.....	39
Figura 12. Geometría de la unidad LRP®.....	40
Figura 13. Vista interna de la unidad LRP®.....	41
Figura 14. Rango de aplicación de la unidad LRP® .....	42
Figura 15. Transporte de unidad LRP® .....	43
Figura 16. Izaje de una unidad LRP®.....	43
Figura 17. Instalación de base sobre casing para unidad LRP® .....	44
Figura 18. Unidad LRP® instalada sobre casing .....	44
Figura 19. Reemplazo de unidades BMC por unidades LRP® en cluster.....	45
Figura 20. Unidades LRP® instaladas en áreas ambientalmente sensibles.....	46
Figura 21. Instalación de unidad LRP® en Nuevo México .....	46
Figura 22. Facilidades cambio de aceite en unidad LRP® .....	48
Figura 23. Control de velocidad "Soft Landing" de la unidad LRP®.....	50
Figura 24. Reporte de producción de la unidad LRP®.....	52
Figura 25. Arquitectura del sistema GMC para la unidad LRP®.....	53

Figura 26. Unidad BMC vs LRP®. Análisis de eficiencia energética en modo "Pump Fill Control" con variador de frecuencia regenerativo .....	55
Figura 27. Unidad BMC vs LRP®. Análisis de eficiencia energética en modo "Pump Fill Control" sin regeneración .....	57
Figura 28. Unidad BMC vs LRP®. Análisis de eficiencia energética en modo "Pump off Control" con variador de frecuencia regenerativo.....	59
Figura 29. Unidad BMC vs LRP®. Análisis de eficiencia energética en modo "Pump off Control" sin regeneración .....	61
Figura 30. Relación tasa de producción Vs Profundidad para unidades LRP® y BMC.....	67
Figura 31. Reporte de diseño de la herramienta Qrod para pozo tipo del Magdalena medio .....	70
Figura 32. Reporte de diseño de la herramienta LRP® Calculator para pozo tipo del Magdalena medio.....	71

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rango de aplicación del BMC .....	20
Tabla 2. Capacidad en galones de aceite para lubricación de cajas reductoras ...	32
Tabla 3. Data representativa de varillas API. ....	38
Tabla 4. Unidad BMC vs LRP®. Resultados de análisis de eficiencia energética .	63
Tabla 5. Especificaciones técnicas de unidades BMC y LRP® .....	66
Tabla 6. Data para diseño de unidad de superficie. Pozo tipo del Magdalena medio .....	69
Tabla 7. Relación de costos de instalación, operación y mantenimiento de unidades BMC y LRP® para pozo tipo .....	74
Tabla 8. Relación profundidad - Tasa de producción para unidad LRP® .....	76

## RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LA UNIDAD *LRP*<sup>®</sup> RESPECTO A LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL.

AUTOR: JORGE ENRIQUE HERNÁNDEZ BERNAL

PALABRAS CLAVE: Sistemas de levantamiento artificial (SLA), Bombeo mecánico convencional (BMC)

### DESCRIPCIÓN:

Los sistemas de levantamiento artificial (SLA) por Bombeo Mecánico Convencional mantienen en etapa productiva entre el 67 y 80 % de los pozos petroleros a nivel mundial. La óptima escogencia de las unidades de superficie usadas para transmitir el movimiento generado por la unidad motriz hasta la bomba en subsuelo repercute directamente en el aprovechamiento de recursos valiosos como la electricidad, de allí la importancia de realizar un buen proceso de selección según las condiciones de cada pozo; Los costos asociados a las actividades de instalación, operación y mantenimiento de los SLA son aspectos importantes a tener en cuenta cuando se evalúa la viabilidad de la instalación de una tecnología en campo, las innovaciones tecnológicas desarrolladas por los fabricantes y aplicadas a los equipos de superficie van orientadas a disminuir los recursos a invertir en los puntos previamente expuestos, además de aumentar la tasa de producción, reducir los tiempos de diferida, prevenir fallas comunes de la aplicación y ofrecer métodos de control que permitan manejar versátilmente tanto la unidad de superficie como el equipo en fondo. La masificación de nuevas unidades de bombeo mecánico que permitan una mejor administración del completamiento por medio de desarrollos tecnológicos aplicados a ellas debe sustentarse en un análisis técnico y económico que permita evidenciar claramente los pros y contras.

---

\* Monografía.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Especialización en producción de hidrocarburos, Director: Erik Giovany Montes Páez, Ingeniero de petróleos, Especialista en producción de hidrocarburos, M.Sc. en Ingeniería de Hidrocarburos.

## ABSTRACT

TITLE: COMPARATIVE ANALYSIS OF *LRP*<sup>®</sup> UNIT PERFORMANCE REGARDING CONVENTIONAL BEAM PUMPING UNITS.

AUTHOR: JORGE ENRIQUE HERNÁNDEZ BERNAL

KEY WORDS: Artificial Lift Systems (ALS), Beam Pumping Unit (BPU)

### DESCRIPTION:

The artificial lift systems based on conventional Beam Pumping Units keep productive phase around 67 to 80 % of oil wells worldwide. The optimum choosing of surface units used to transmit the movement generated by the motor unit to the subsoil impacts directly on the use of valuable resources such as electricity, from there the importance of making a good selection process according to the conditions of each well. Costs associated with the activities of installation, operation and maintenance of the ALS are important aspects to consider when the feasibility of installing a technology in field is evaluated. The technological innovations developed by manufacturers and applied to surface equipment have been intended to reduce the resources to invest in the points previously discussed, in addition to increasing the production rate, decrease down times, prevent common failures of the application and offer control modes that allows to administrate in a versatile way surface and downhole equipment.

The massive installation of new mechanical pumping units that allows a better management of completion through technological developments applied to it must be based in a technical and economic analysis to clearly demonstrate the pros and cons.

---

\* Monograph.

\*\* Physicochemical Engineering School. Specialization in hydrocarbons production. Director: Erik Giovany Montes Páez, Petroleum Engineer, Specialist in hydrocarbons production, M.Sc. in hydrocarbons engineering.

## INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos hechos en el área de levantamiento artificial por bombeo mecánico para la producción de hidrocarburos son una herramienta de gran utilidad cuando se tiene como objetivo optimizar un campo petrolero. La baja eficiencia energética respecto a la tasa obtenida (Kwh/bbl), el desaprovechamiento de crudo disponible para producción por falta de sensibilidad en los sistemas de control y la ausencia de *software* especializado 100% desarrollado para la aplicación BMC con características que permitan prevenir fallas comunes reduciendo tiempos de parada y costos en servicios a pozo son problemas identificados y comunes asociados al sistema en mención.

En el presente trabajo se realizará un análisis comparativo del desempeño de las unidades de superficie de bombeo mecánico convencional Vs la unidad *LRP*® (*Linear Rod Pump*, unidad mecánica de superficie que utiliza el mismo completamiento que el BMC pero ofrece mayores prestaciones en su rango de operación) en cuanto a eficiencia energética, características de funcionamiento, modos de control, costos asociados a la instalación, operación y mantenimiento generando así un instrumento de referencia para la óptima escogencia de la unidad según las características del pozo.

Con base en las especificaciones técnicas publicadas por los fabricantes en catálogos, libros y manuales, y mediante la realización de curvas de aplicación y operación de las unidades objeto del presente estudio, se evidenciarán sus rangos de aplicación según condiciones de yacimiento tales como profundidad, tasa de producción, gravedad API, además de tipo de completamiento, carga, entre otros. Se identificarán las labores a ejecutar al momento de instalar, operar y realizar mantenimiento a estos equipos para poder así avanzar hacia la realización de una evaluación económica.

La unidad *LRP*® ha sido instalada en varios países alrededor del mundo tales como Estados Unidos, Canadá, Rusia, Rumania, Inglaterra, Australia, Indonesia, Venezuela, Ecuador, Argentina y México entre otros arrojando resultados satisfactorios y en algunas ocasiones modificando el *software* para que se ajuste a necesidades muy particulares de los campos, reduciendo tiempos de diferida e incrementado tasa de producción, de allí la importancia de contar con un documento que sirva como guía para determinar cuando sea conveniente instalar este tipo de unidad en los campos petroleros colombianos.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Elaborar un análisis comparativo detallado del desempeño de las unidades convencionales de Bombeo mecánico Vs la unidad *LRP®* en los escenarios que afectan directamente los costos de producción asociados a los sistemas de levantamiento artificial.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Analizar las especificaciones técnicas de las unidades BMC y *LRP®* mediante la elaboración de un cuadro comparativo que permita identificar los puntos de impacto de estas unidades de superficie asociados a los costos de producción.

Definir la eficiencia de las unidades BMC y *LRP®* en su rango de operación mediante la realización de curvas que permitan demarcar los límites de aplicación de dichas unidades en cuanto a tasa de producción, profundidad y carga.

Identificar los recursos a utilizar durante la instalación, operación y mantenimiento de las unidades objeto de la presente monografía mediante la descripción detallada de procedimientos asociados permitiendo así determinar las implicaciones del uso de sistemas BMC y *LRP®*.

Realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de las prestaciones ofrecidas por las unidades BMC y *LRP®* para facilitar su escogencia con base en las condiciones específicas del pozo objeto de estudio.

## **2. GENERALIDADES DEL BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL (BMC)**

### **2.1 RESEÑA HISTORICA**

El Bombeo Mecánico Convencional nació prácticamente a la par con la industria petrolera, cuando el coronel Drake; perforo un pozo que era de su pertenencia ubicado en Pensilvania aproximadamente en 1859. El coronel Edwin Drake, a pesar de no ser geólogo ni minero, descubre una napa de petróleo a una profundidad de 21 metros utilizando una perforadora mecánica construida para la ocasión por el herrero William Smith, extrayéndolo mediante un rudimentario sistema de bombeo.

En aquella época la perforación se hacía con herramientas de percusión, donde la mecha se suspendía mediante una especie de balancín hecho con madera y se dejaba caer. Cuando el pozo moría, era más fácil usar el balancín de madera que había quedado en el sitio para operar la bomba de subsuelo; Así nació lo que hoy conocemos como BMC, aunque hoy en día no se usan balancines ni varillas de madera y mucho menos maquinas a vapor, los componentes del método aún se conservan.

El balancín, el cual es un símbolo reconocido a nivel mundial, del BMC; todavía se usa para convertir el movimiento rotatorio del motor en reciprocante y así impulsar la bomba. Al principio se utilizaban máquinas de bombeo que alcanzaban los 100 a 250 metros de profundidad, con un balancín de madera, sarta de varillas de acero y una bomba tipo molino de viento. Con el transcurso de los años la industria petrolera adopto este sistema y lo adaptó para profundidades cada vez mayores ubicándolo como uno de los métodos de levantamiento artificial más utilizados para la extracción de crudo<sup>1</sup>.

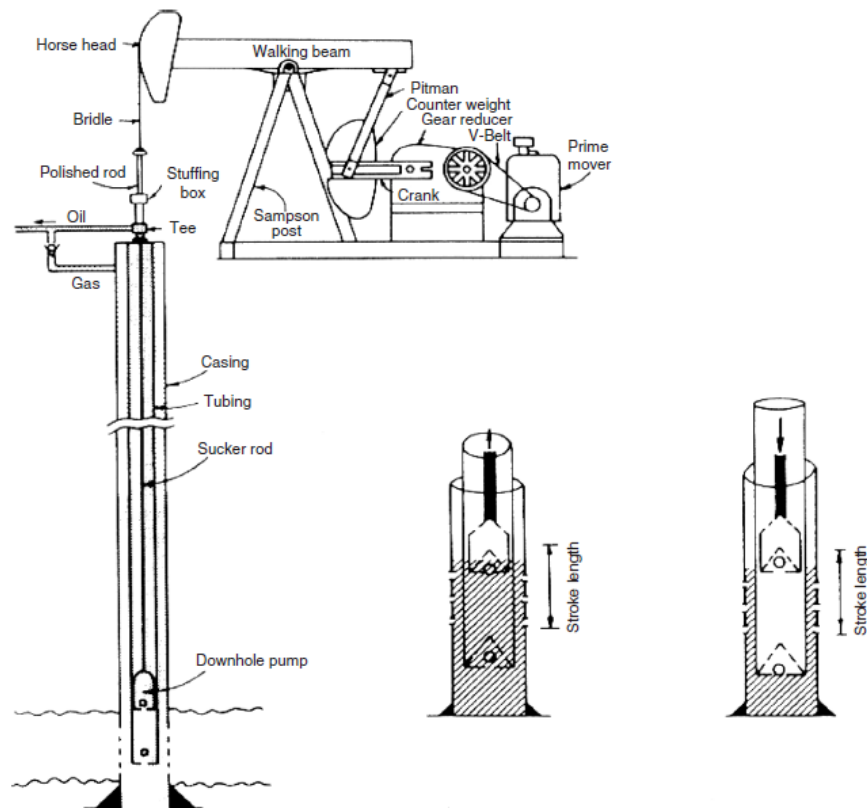
---

<sup>1</sup> RODRIGUEZ, A. S. Historia del bombeo mecánico. ITS Coatzacoalcos. ING Petrolera

## 2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL

El sistema de levantamiento artificial por bombeo mecánico permite succionar y transferir el fluido que se encuentra en fondo de pozo desde el nivel alcanzado por este a causa de la presión propia del yacimiento hasta superficie. Un elemento motriz genera el movimiento rotatorio que da inicio al funcionamiento de la unidad de superficie conocida como balancín; Por medio de una caja de engranajes que entrega el torque necesario para manejar las cargas esperadas, y un sistema de bielas, se transmite el movimiento rotatorio a la viga viajera que apoyada en un pivote aplica un movimiento reciprocante sobre la sarta de varillas conectada en fondo con la bomba.

Figura 1. Diagrama esquemático de un sistema de bombeo mecánico convencional



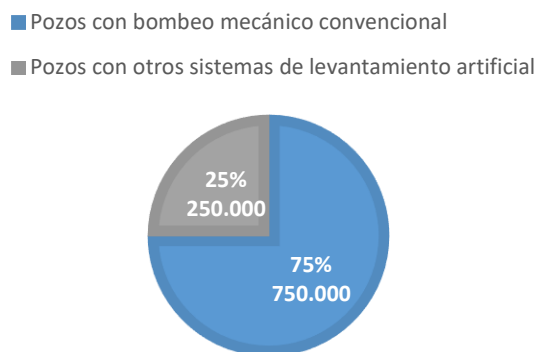
Fuente: *Well Performance*. Golan and Whitson. 1991

Este sistema es eficiente, simple y fácil de operar, es aplicable a altas temperaturas en fondo y maneja adecuadamente crudos viscosos. Las unidades de superficie están disponibles en un amplio rango de tamaños con distintas longitudes de carrera las cuales se pueden variar entre límites establecidos para cada modelo según la posición donde se acoplen las bielas con el “*Crank Arm*” en donde está ubicado el contrapeso del sistema.

### 2.3 PORCENTAJE DE POZOS CON BMC

Existen aproximadamente dos millones de pozos petroleros en operación alrededor del mundo. De ellos, más de un millón utilizan algún tipo de levantamiento artificial. Más de 750.000 pozos utilizan el bombeo mecánico convencional como método de producción. Tan solo en Estados Unidos, este sistema está instalado en aproximadamente 350.000 pozos. Estas estadísticas indican el dominio del BMC excepto en las operaciones costa afuera en donde el uso de sistemas *ESP* y *Gas Lift* es mucho más alto<sup>2</sup>.

Figura 2. Estadística de pozos petroleros alrededor del mundo con SLA



<sup>2</sup> Petrowiki. Artificial Lift. [Consulta en línea]. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2016].

[http://petrowiki.org/Artificial\\_lift](http://petrowiki.org/Artificial_lift)

## 2.4 RANGO DE APLICACIÓN

El sistema instalado debe ser capaz de manejar la producción disponible, soportar las cargas generadas por el fluido y el completamiento entre otros. La profundidad del pozo influye directamente en el peso a soportar y la eficiencia de la unidad es un factor importante a considerar al momento de sub o sobre dimensionar un bombeo mecánico convencional. Las bombas de fondo metálicas permiten manejar fluidos a altas temperaturas, su sistema de válvulas viajera y fija es sensible al bloqueo por gas, la sarta de varillas tiene límites en cuanto a la carga que puede manejar. Estos aspectos, entre otros van definiendo el rango de aplicación del SLA (Sistema de levantamiento artificial) por BMC (Bombeo Mecánico convencional).

Tabla 1. Rango de aplicación del BMC

<b>Gravedad API</b>	Entre 8,5 y 40 grados
<b>Profundidad</b>	Entre 400 y 9000 ft
<b>Relación Gas/Petroleo</b>	Hasta 500 ft <sup>3</sup> /bbl
<b>Tasa de fluido</b>	Entre 20 y 2000 Bpd
<b>Viscosidad (Fondo)</b>	Menor de 10000 cp

Fuente: Alexander Rojas. Curso de bombeo mecánico CMC. El Tigre VEN. 2014

## 2.5 COMPONENTES DEL BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL

Los componentes de un sistema de bombeo mecánicos pueden ser divididos en quipos de superficie y fondo. En superficie encontramos:

- a. **Motor:** Preferiblemente se utilizan motores eléctricos dada la facilidad de su automatización y control. Es la fuente de movimiento rotatorio que pone en funcionamiento el sistema completo alimentándose del suministro eléctrico disponible ya sea que sea una red convencional o generación a partir de combustibles como diésel o gas. El motor eléctrico generalmente va

acompañado de un variador de frecuencia el cual se encarga de dar un arranque suave reduciendo picos de corriente, variar la velocidad del motor según los SPM (Strokes per minute) requeridos, aportar funciones de telemetría, monitoreo y control entre otros. Los variadores de frecuencia especializados en aplicación petrolera cuentan con *software* detallado que permite modelar el sistema de levantamiento artificial para que finalmente este equipo optimice la producción de petróleo aumentando tasa de producción y previniendo fallas comunes de la aplicación.

- b. Caja de engranajes:** El reductor de velocidad puede ser simple, doble o triple siendo la reducción doble la más usada. Este componente reduce la velocidad y aumenta el torque transmitido a la unidad de superficie para manejar las cargas asociadas al proceso productivo.
  
- c. Contrapeso:** Están ubicadas en el extremo opuesto del cabezote y su función es la de balancear las cargas que aplican sobre el motor durante las carreras ascendentes y descendentes reduciendo así la potencia requerida ayudando al ahorro de energía. Una unidad desbalanceada supone un uso ineficiente de energía.

La viga viajera, el cabezote, la grapa y la barra pulida son componentes asociados a la unidad de superficie que en conjunto transmiten el movimiento recíprocante a la sarta de varillas que finalmente acciona el ciclo de bombeo. La sarta de varillas hace parte del conjunto de componentes en fondo, su integridad es crucial para lograr el bombeo efectivo y se ve afectada por las propiedades del fluido del pozo al igual que por los esfuerzos generados desde superficie para cargar y descargar la bomba.

- d. Sarta de varillas:** Es una serie de varillas interconectadas que transmiten el movimiento recíproco desde superficie hasta el pistón de la bomba en fondo. Deben soportar la carga asociada la cual es mayor en la carrera ascendente, parte del ciclo en el cual se está llevando el fluido a superficie siendo típico de las unidades BMC la producción por baches. Existen distintos tipos de varillas según el material de fabricación (C, D, K) y su longitud típica es de 25 a 30 pies por pieza las cuales se unen por medio de acopladores hasta alcanzar la profundidad deseada.
- e. Tubería de producción:** Serie de tubos usada para transportar el fluido bombeado hasta superficie. Aloja a la sarta de varillas sirviendo como guía o referencia. El barril de la bomba puede ir inserto en la tubería de producción o acoplado a esta como una pieza más de tubo. La tubería de producción debe ser correctamente dimensionada ya que al ser muy pequeña causa altas pérdidas por fricción y limita las instalaciones del sistema de levantamiento artificial, y al ser muy grande causa un flujo inestable y alta caída de presión.
- f. Bomba de subsuelo:** Es el primer elemento que se debe considerar al diseñar una instalación de bombeo mecánico para un pozo ya que del tipo, tamaño y ubicación de la bomba depende el resto de los componentes<sup>3</sup>. Está compuesta por un barril el cual almacena el fluido a producir durante el ciclo de bombeo y en el cual se encuentra la válvula fija, un embolo o pistón móvil que aloja a la válvula viajera.

---

<sup>3</sup> IVAN TORRES CABRERA. Bombeo mecánico convencional. Monografía. //es.scribd.com

Otros componentes como ancla de tubería y ancla de gas hacen parte de la instalación típica de fondo de un sistema de bombeo mecánico convencional.

## **2.6 VENTAJAS DEL BMC**

El bombeo mecánico es un sistema de levantamiento artificial bien conocido por el personal alrededor del mundo, además, es fácil de operar y analizar. Su diseño no es complicado y bajo condiciones promedio puede ser usada durante toda la vida productiva de los pozos hasta su abandono. La capacidad de bombeo puede ser modificada de forma sencilla dentro de los límites de cada unidad para acomodarse a los cambios en la tasa de producción. Los repuestos de estos sistemas son fáciles de encontrar<sup>4</sup>.

## **2.7 DESVENTAJAS DEL BMC**

La profundidad de aplicación del bombeo mecánico está limitada por la carga que puede soportar la sarta de varillas y esta depende directamente del material con el que estén fabricadas las mismas. La bomba de subsuelo puede presentar bloqueo por gas haciendo que la producción de crudo se reduzca dramáticamente. En pozos desviados, la fricción entre las piezas metálicas que componen el sistema puede generar fallas mecánicas, además, las unidades de superficie requieren de un gran espacio para su instalación.

## **2.8 FALLAS COMUNES DEL SISTEMA**

Los componentes propios de la aplicación generan fallas comunes que deben ser diagnosticadas y tratadas para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

---

<sup>4</sup> TAKÁCKS GÁBOR, PH.D. Sucker Rod Pumping Manual. Penwell 2002

Dada la amplia experiencia de la industria manejando equipo de BMC, se han identificado problemas asociados a distintas condiciones que se pueden presentar en los pozos.

- a. Golpe de fluido:** Fenómeno que se produce cuando la tasa de la bomba de fondo de pozo supera la tasa de producción de la formación. También se puede deber a la acumulación de gas a baja presión entre las válvulas. En la carrera descendente de la bomba, se comprime el gas, pero la presión dentro del barril no abre la válvula viajera hasta que esta golpea el líquido. Finalmente, cuando la válvula viajera se abre, el peso en la sarta de varillas puede dejar caer miles de libras en una fracción de segundo. Se debe evitar esta condición porque causa grandes esfuerzos, lo que podría generar fallas prematuras en el equipo. Una reducción de velocidad de la unidad de bombeo, el acortamiento de la longitud de carrera o la instalación de una bomba de fondo de pozo más pequeña pueden resolver este problema<sup>5</sup>.
  
- b. Fuga por deterioro de válvula viajera:** La pérdida de carga durante la carrera ascendente del ciclo de bombeo, es una condición característica de una válvula viajera deteriorada a través de la cual está ocurriendo una fuga de cierto volumen de fluido que debería ser llevado a superficie cuando la bomba se encuentre en condiciones óptimas.
  
- c. Fuga por deterioro de válvula fija:** Durante la carrera descendente, el fluido alojado dentro de la tubería de producción, se mantiene dentro de esta misma ayudado por la acción de tapón que genera la válvula fija. Cuando esta se encuentra deteriorada el sello no se realiza de forma adecuada y parte del

---

<sup>5</sup> SCHLUMBERGER. Oilfield Glossary. [Consulta en línea]. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2016]. [www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/f/fluid\\_pound.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/f/fluid_pound.aspx).

fluido se fuga a través de dicha válvula. Actualmente los variadores de frecuencia especializados hacen una prueba de válvulas automática en la cual determinan el volumen de líquido que se fuga.

**d. Bloqueo por gas:** Condición que se produce en ocasiones en un pozo de bombeo cuando el gas disuelto, liberado de la solución durante la carrera ascendente, aparece como gas libre entre las válvulas. En la carrera descendente, la presión dentro de un barril completamente lleno de gas es posible que no alcance nunca la presión necesaria para abrir la válvula viajera. En la carrera ascendente, la presión dentro del barril nunca disminuye lo suficiente para que la válvula estacionaria se abra y permita que el líquido ingrese a la bomba. Por lo tanto, no entra ni sale fluido de la bomba y la bomba se bloquea. En muchos casos de bloqueo por gas, el aumento en la presión de fondo del pozo puede superar la presión en el barril y el líquido puede ingresar a través de la válvula estacionaria. Después de algunas carreras, ingresa líquido suficiente en la bomba y se quiebra el bloqueo por gas, por lo que la bomba funciona normalmente.

**e. Interferencia por gas:** Fenómeno que se produce cuando el gas ingresa a la bomba de varilla de succión del subsuelo. Después de que comienza la carrera descendente, el gas comprimido alcanza la presión necesaria para abrir la válvula viajera antes de que esta llegue al líquido. La válvula viajera se abre lentamente sin el cambio de carga drástico experimentado en los golpes de fluido. No causa fallas prematuras en el equipo, pero puede indicar poca eficiencia de la bomba. Un separador de fondo de pozo o un ancla de gas pueden corregir una interferencia por gas<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> SCHLUMBERGER. OP CIT

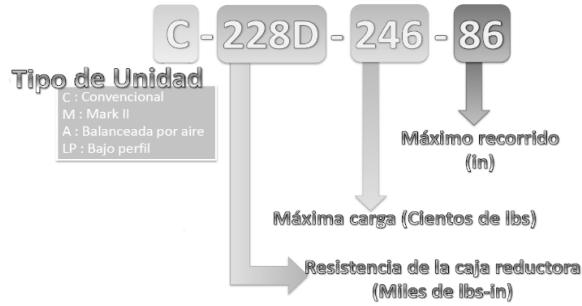
### 3. UNIDADES DE SUPERFICIE

#### 3.1 BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL

El peso de la columna de fluido, sumado al de la sarta de varilla y la bomba entre otros componentes propios del bombeo mecánico convencional, produce un desequilibrio en las fuerzas necesarias para realizar el ciclo de bombeo durante las carreras de subida y bajada, siendo requerida mucha más al momento de levantar el aparejo cuando se está llevando el fluido a superficie. Un contrapeso ayuda a solucionar este problema ejerciendo durante la carrera de subida una fuerza adicional generada por la acción de la gravedad sobre las pesas contribuyendo así al balanceo de la unidad. Este aspecto entre otros es tenido en cuenta en la geometría de la unidad de superficie.

**3.1.1 Designación api de la unidad de superficie.** El API ha desarrollado una nomenclatura estándar para la designación de unidades de superficie, la cual permite evidenciar fácilmente el tipo de unidad, la resistencia de la caja reductora, la máxima carga soportada por la unidad y su recorrido máximo, aspectos muy relevantes para el diseño de los sistemas BMC. Esto da una descripción general del equipo de superficie más la geometría detallada de cada equipo es suministrada por su fabricante el cual registra en su catálogo todas las posibles combinaciones a ofrecer para adaptarse a los requerimientos de los distintos pozos, requerimientos entre los cuales prima la profundidad desde la cual se debe levantar el crudo, y la tasa de producción. A medida que la carga a manejar aumenta, las unidades se hacen más robustas aumentando en dimensión. Aunque en la nomenclatura API estándar se registre solo una longitud de carrera que corresponde a la máxima que podría alcanzar la unidad, el recorrido se puede variar mecánicamente dentro de un rango pre establecido haciendo uso de un sistema de pines.

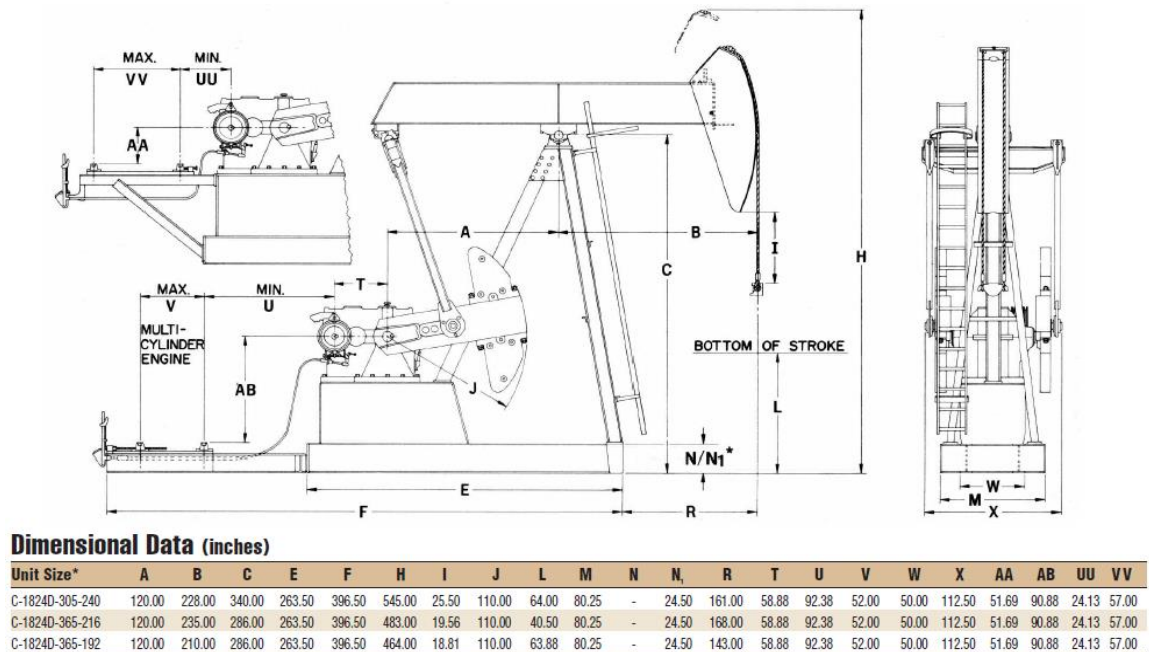
Figura 3. Designación API de unidades de Bombeo Mecánico



Fuente: Montes Páez E. G. Curso Bombeo Mecánico. UIS 2015

**3.1.2 Geometría de la unidad.** Las medidas en detalle de cada unidad son datos de entrada necesarios para los equipos de optimización tales como variadores de frecuencia.

Figura 4. Geometría de la unidad de superficie convencional BMC



Fuente: Lufkin *General Catalog* 2008-2009

**3.1.3 Instalación.** El transporte de las unidades de Bombeo Mecánico Convencional hasta su sitio de instalación generalmente implica el uso de uno o más remolques de plataforma o cama baja haciendo que su desplazamiento en zonas montañosas o de difícil acceso sea una ardua labor.

Figura 5. Transporte de una unidad BMC



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

La unidad de superficie se instala sobre una loza de concreto de peso y dimensiones considerables la cual para efectos de logística se suma al peso del equipo entre cuyos componentes encontramos el contrapeso que hace un aporte significativo a la masa a ser transportada y manipulada. Al estar en sitio, se debe realizar el acople de la viga viajera y el “Horsehead” para dejar la unidad funcional. El contrapeso se debe graduar con base en la carga manejada por la unidad de forma tal que se aproveche la energía de la mejor manera posible. Posterior al anclaje de la sarta de varillas a la unidad de superficie se realiza la labor de espaciado cerciorándose de que el pistón de la bomba se desplace dentro de lo establecido en el diseño. La calibración del contrapeso y el cambio en la longitud de carrera de una unidad de este tipo están directamente relacionadas con la geometría de la misma e implican

la disposición de personal en campo para realizar estas tareas teniendo como costo sombra la producción diferida al tener que detener el bombeo para su ejecución.

Para la instalación de unidades costa afuera, se debe construir una plataforma que soporte al equipo, es común que al espacio ocupado en la estructura por la unidad, se deba adicionar el espacio ocupado por una unidad de generación de energía eléctrica a partir de combustibles como el gas o el diésel. Es estos casos cobra aún más importancia el espacio físico que será ocupado por la unidad a instalar pues este se verá directamente relacionado con las dimensiones y la robustez de la plataforma costa afuera, lo cual se traduce en costos.

Figura 6. Instalación costa afuera de unidad BMC



Fuente: Montes Páez E. G. Curso Bombeo Mecánico. UIS 2015

**3.1.4 Operación.** Durante la operación de los sistemas de Bombeo Mecánico Convencional, haciendo uso de un variador de frecuencia, se puede cambiar la velocidad de bombeo (*Strokes Per Minute*) de acuerdo a las condiciones del pozo. Dada la robustez de la unidad, su confiabilidad es alta. Durante su funcionamiento quedan partes móviles a la vista lo cual genera riesgo para el personal de operaciones, para la comunidad cercana a estas instalaciones al igual que para los animales comúnmente bovinos y equinos entre otros que pudieran acercarse al pozo, es por esto que como medida de seguridad se invierte en un encerramiento que limite el acceso e impida entrar en contacto con las partes continuamente en movimiento.

Figura 7. Unidad BMC con encerramiento en malla



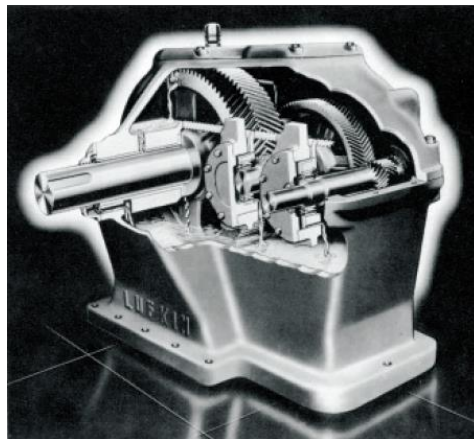
Fuente: SLA Bombeo mecánico convencional [En línea]. Edición 2. Venezuela Ed. Anzoátegui.  
[Fecha de consulta: 11 de abril de 2016]. Disponible en internet:  
[www.google.com.co/search?q=horse+head+bombeo+mecanico&biw=1280&bih=631&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwil5rLKxlnNAhVp4oMKHe86BiqQ\\_AUIBigB#tbm=isch&q=bombeo+mecanico+convencional&imgsrc=zPVhAKAVejZ21M%3>](http://www.google.com.co/search?q=horse+head+bombeo+mecanico&biw=1280&bih=631&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwil5rLKxlnNAhVp4oMKHe86BiqQ_AUIBigB#tbm=isch&q=bombeo+mecanico+convencional&imgsrc=zPVhAKAVejZ21M%3>)

Instrumentos de control tales como temporizadores, permiten dar versatilidad al sistema haciendo posibles controles como el “*Pump off*”. Otros sistemas más

avanzados generan herramientas de diagnóstico típicas como lo son los dinagramas. La toma de niveles haciendo uso de sistemas de resonancia permite al personal de producción determinar cuándo hacer cambios en el funcionamiento del BMC para mantener entre otros aspectos una sumergencia adecuada.

**3.1.5 Mantenimiento.** Respecto a la lubricación de la caja de engranajes, para temperaturas superiores o hasta 0°F, se debe usar aceite AGMA No. 5EP (ISO VG 220) *Premium Mild* para presión extrema con inhibidor de oxidación y agente antiespumante. El punto de fluidez del aceite debe ser de 5°F o menor. Para temperaturas inferiores a los 0°F y hasta -30°F, se debe usar aceite AGMA No. 4EP (ISO VG1 50) *Premium Mild* para presión extrema con inhibidor de oxidación y agente antiespumante. El punto de fluidez del aceite debe ser de -15°F o menor.

Figura 8. Caja de engranajes de unidad BMC



Fuente: Lufkin *General Catalog* 2008-2009

Para obtener una vida útil prolongada de la caja de engranajes, es necesario que el aceite usado para su lubricación sea de la viscosidad adecuada y esté libre de materiales extraños, lodo y agua. Cada seis meses se debe revisar el aceite en busca de suciedad, lodos, emulsión de agua u otras formas de contaminación. Si el

lubricante tiene apariencia u olor anormal debe considerarse su reemplazo. La cantidad de aceite a utilizar dependerá del tamaño de la caja.

Tabla 2. Capacidad en galones de aceite para lubricación de cajas reductoras

<b><i>Gear reducer size</i></b>	<b><i>Peak torque rating (in. Lbs.)</i></b>	<b><i>Gear ratio</i></b>	<b><i>Crankshaft diameter (in)</i></b>	<b><i>Gear reducer oil capacity (gallons)</i></b>
2560D	2.560.000	34.53:1	11.75	235
1824D	1.824.000	28.33:1	9	165
1280D	1.280.000	28.05:1	8.5	120
912D	912.000	28.78:1	7	107
640D	640.000	28.60:1	7	70
456D	456.000	29.04:1	7	55
320D	320.000	30.12:1	6.44	50
228D	228.000	28.45:1	6	34
160D	160.000	28.67:1	5.44	22
114D	114.000	29.40:1	4.44	17
80D	80.000	29.40:1	4.44	17
57D	57.000	29.32:1	4	13

Fuente: Lufkin *General Catalog* 2008-2009

Los cojinetes estructurales de la unidad son lubricados en fabrica, sin embargo, requieren lubricación periódica. En climas cálidos donde la temperatura anual más baja este por encima de los 0°F, los cojinetes de rodadura deben lubricarse cada seis meses usando grasa *Premium* NLGI No. 1 con aditivo para presión extrema y con aceite base de viscosidad equivalente a AGMA No. 7. Los cojinetes de bronce deben lubricarse según necesidad con el objetivo de mantener el nivel de aceite. Se debe usar aceite EP140 con aditivo para presión extrema y punto de fluidez de -15°F o menor. En climas fríos donde la temperatura anual más baja esta llegue a los -30°F, los cojinetes de rodadura deben lubricarse cada seis meses usando grasa *Premium* NLGI No. 0 con aditivo para presión extrema y con aceite base de viscosidad equivalente a AGMA No. 5. Los cojinetes de bronce deben lubricarse

según necesidad con el objetivo de mantener el nivel de aceite. Se debe usar aceite EP80 o EP90 con aditivo para presión extrema y punto de fluidez de -10°F o menor<sup>7</sup>.

**3.1.6 Prestaciones de control.** Las opciones de control para una unidad BMC cuya fuerza motriz provenga de un motor eléctrico, dependen del controlador que este gobernando dicho motor. El monitoreo remoto, los distintos perfiles de velocidad a manejar y la generación de dinagramas a partir de la data generada por una celda de carga son solo algunas de las prestaciones de control que actualmente se ofrecen en el mercado. En el Bombeo Mecánico Convencional el punto donde inician y finalizan las carreras ascendentes y descendentes depende de la ubicación del contrapeso de la unidad, es decir que no se puede cambiar el sentido de la carrera a voluntad del controlador, esto de varias formas limita el control obtenido sobre el sistema haciendo que la modificación de la longitud de carrera se deba hacer de forma mecánica e implicando una parada de pozo.

Un variador de frecuencia de propósito general puede controlar a un balancín, pero solo los equipos de control con *software* especializado para la aplicación podrán realizar la recolección y administración de datos que permita la toma de decisiones ya sea por parte del personal de producción o por el controlador mismo cuando su programación se lo permita. A un variador de frecuencia de propósito general se le puede sincronizar con un sistema experto que lo gobierne convirtiendo así al variador en simple hardware encargado de acelerar o desacelerar el motor con base en las decisiones tomadas por el *software* especializado, aunque es una opción válida para hacer un “*Upgrade*” de los sistemas de control instalados en un campo, la interconexión de estos equipos genera nuevos puntos de falla. Hoy en día algunos

---

<sup>7</sup> LUFKING. General Catalog 2008 – 2009

fabricantes de variadores de frecuencia (*VFD*) han sacado el mercado variadores de frecuencia que ya manejan de forma implícita en su programación un *software* especializado para BMC haciendo innecesaria su interconexión con dispositivo programables externos, proporcionando así un sistema robusto e integrado que toma decisiones y las ejecuta.

Figura 9. Variador de frecuencia inteligente con *software fill pump* especializado para Bombeo Mecánico



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Products brochure 2010*

Los periféricos como sensores de presión o temperatura y contactos *on/off* se conectan al variador para centralizar todo el control en un mismo dispositivo. Para monitoreo remoto se instala un radio conectado al sistema *SCADA*.

**3.1.7 Consumo energético.** Debido a las inexactitudes al utilizar procedimientos aproximados para calcular parámetros operacionales del bombeo mecánico, surgió la necesidad de desarrollar un método de predicción exacto y confiable el cual modelara por completo el sistema de bombeo. La compañía *Sucker Rod Pumping Research Inc.* fundada en 1954 y patrocinada por varias compañías fabricantes y operadoras del sector, tomo este enfoque y su única labor fue investigar los complejos problemas del sistema y desarrollar procedimientos precisos de cálculo. Como resultado de su trabajo se produjo un modelo eléctrico simple de utilizar y que

suministra datos de salida fáciles de procesar. El modelo en mención toma las siguientes suposiciones como requisito para su aplicación:

- Se asume que es una unidad de geometría convencional la que está actuando sobre la barra pulida
- Se asume un llenado de 100% líquido en la bomba para cada ciclo
- La tubería está anclada a la profundidad de asentamiento de la bomba
- Se usan varillas de acero
- El actuador primario presenta un bajo deslizamiento
- Se asume una fricción de fondo dentro de parámetros usuales

El trabajo útil de la unidad de bombeo mecánico es el hecho por la bomba de subsuelo cuando levanta la cantidad de líquido disponible desde fondo de pozo hasta superficie. Esta potencia hidráulica puede ser calculada con base en la profundidad de levantamiento efectiva y el volumen de líquido producido:

$$P_{hydr} = 7.36 \times 10^{-6} Q SpGr L_{dyn} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$P_{hydr}$  = Potencia hidráulica requerida para levantar la columna de fluido, HP

$Q$  = Tasa de producción, BPD

$SpGr$  = Gravedad específica del líquido producido

$L_{dyn}$  = Nivel dinámico de fluido en el pozo, ft

Las pérdidas de energía en el pozo están presentes en la bomba, la sarta de varillas y la columna de fluido. En la bomba, se producen pérdidas por fricción e hidráulicas al presentarse fuga del fluido. La sarta de varillas durante su movimiento recíprocante en el tubing, rozará contra la pared de la tubería causando fricción mecánica, lo cual puede incrementar significativamente las pérdidas en pozos

desviados. Todas estas pérdidas de energía, sumadas a la potencia requerida para el levantamiento de la columna hidráulica, deben ser superadas por el trabajo mecánico ejercido sobre la barra pulida. Así, La energía requerida en superficie para operar el sistema, es la suma del trabajo útil hecho por la bomba más las pérdidas de energía previamente descritas. La energía total es directamente proporcional a la potencia requerida en la barra pulida, un parámetro conocido como *PRHP* (*Polished Rod Horsepower*), el cual representa la potencia mecánica que deber ser aplicada sobre la barra pulida, la forma más confiable de encontrar su valor, es tomando una carta dinagráfica del pozo y calculando su área, en caso de no contar con el dinagrama, para su cálculo se puede utilizar el método descrito en el modelo predictivo API RP 11L:

$$PRHP = 2.53 \times 10^{-6} \frac{F3}{Skr} S^2 N Kr \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

*PRHP* = *Polished rod Horsepower*, HP

F3/Skr = Variable dependiente, leer de figura 9

S = Longitud de carrera, In

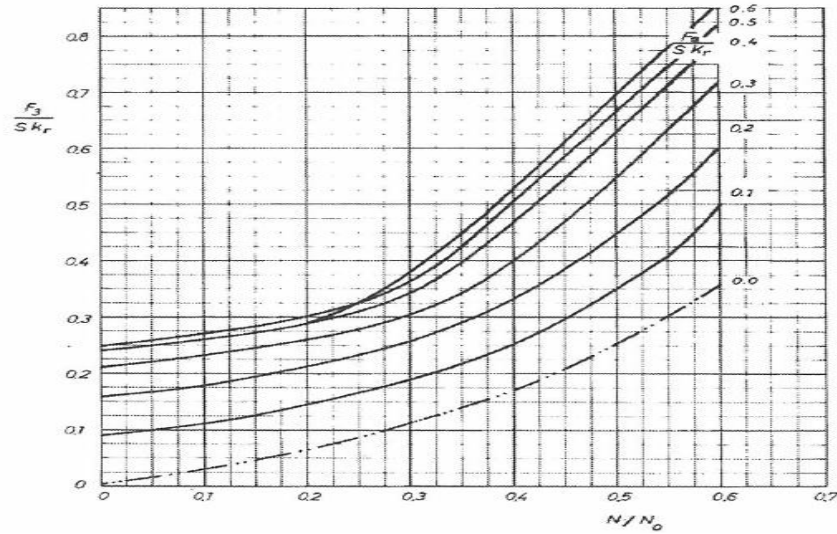
N = Velocidad de bombeo, SPM

Kr = Constante de elasticidad, lbs/in, ver ecuación 3

Algunos datos necesarios para la aplicación de este método son tomados de graficas que ayudan a agrupar las relaciones establecidas entre las variables. Estas son graficas típica del modelo API.

Los parámetros dependientes se toman de las gráficas expuestas en el modelo API RP 11L:

Figura 10. Variable dependiente  $F_3/Sk_r$ , modelo API RP 11L



Fuente: TAKÁCKS GÁBOR, PH. D *Sucker Rod Pumping Manual*. Penwell 2002

La constante de elasticidad  $K_r$ , es la fuerza en libras requerida para estirar la sarta de varillas por cada pulgada de varilla, dado que las secciones de la sarta están conectadas en serie, la constante neta de elasticidad se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{1}{K_r} = \sum_{i=1}^N L_i E_{ri} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$K_r$  = Constante de elasticidad de la sarta de varillas, lbs/in

$L_i$  = longitud de la  $i^{\text{na}}$  sección de la sarta de varilla, ft

$E_{ri}$  = Constante elástica de la  $i^{\text{na}}$  sección de la sarta de varilla, in/lbft

La constante de elasticidad, el peso en el aire y el área transversal para distintos tamaños de varillas se muestra a continuación<sup>8</sup>:

Tabla 3. Data representativa de varillas API.

<b>Tamaño de varilla</b>	<b>Área Metal</b>	<b>Peso en el aire</b>	<b>Constante elástica</b>
<i>In</i>	<i>In<sup>2</sup></i>	<i>lb/ft</i>	<i>In/(lbft)</i>
1/2	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 1/4	1.227	4.538	0.318 E-6

Fuente: TAKÁCKS GÁBOR, PH. *D Sucker Rod Pumping Manual*. Penwell 2002

Se puede observar de lo anteriormente expuesto que el consumo de energía en un pozo de bombeo mecánico está directamente relacionado con la profundidad de la arena productora y así de la profundidad a la cual se encuentra ubicada la bomba pues entre mayor sea esta, mayor será la cantidad de varillas a utilizar haciendo que la carga a manejar aumente, las pérdidas por fricción igualmente aumentan y esto se traduce en motores más potentes y unidades de superficie más robustas. Ahora, la viscosidad del crudo a levantar también afecta directamente el consumo de potencia pues para levantar crudos livianos, a una misma tasa de producción se requerirá menor potencia que para levantar crudos pesados o extra pesados. Se debe considerar también, aunque en menor medida, la inercia que debe vencer el motor al momento de arranque de 0 SPM, hasta llegar a la velocidad de trabajo, allí influyen las dimensiones de la unidad de superficie al igual que su geometría.

---

<sup>8</sup> TAKÁCKS GÁBOR, PH.D. *Sucker Rod Pumping Manual*. Penwell 2002

### 3.2 LINEAR ROD PUMP (LRP®)

El sistema *LRP*® es una unidad de bombeo lineal que toma ventaja del giro en reversa del motor y del servo posicionamiento el cual es capaz de otorgar el variador de frecuencia especializado acoplado a la unidad para controlar directamente el movimiento de la sarta de bombeo usando un simple mecanismo de piñón y cremallera. Esta unidad de superficie presenta una baja inercia comparada con una unidad de bombeo convencional y comparada con una unidad hidráulica su control es mucho más preciso al ser electrónico. La unidad *LRP*® se monta directamente sobre cabeza de pozo sin requerir lozas de concreto para su instalación. Un motor de inducción acoplado al sistema por medio de una caja de engranajes transmite el movimiento recíprocante a la sarta de varillas. La unidad no cuenta con contrapeso por lo cual las longitudes de carrera ascendentes y descendentes pueden variar según las necesidades determinadas por el *software* experto. El completamiento del pozo es exactamente igual al instalado con una unidad BMC haciendo posible retirar una unidad de bombeo mecánico convencional e inmediatamente instalar en el mismo pozo una unidad *LRP*®.

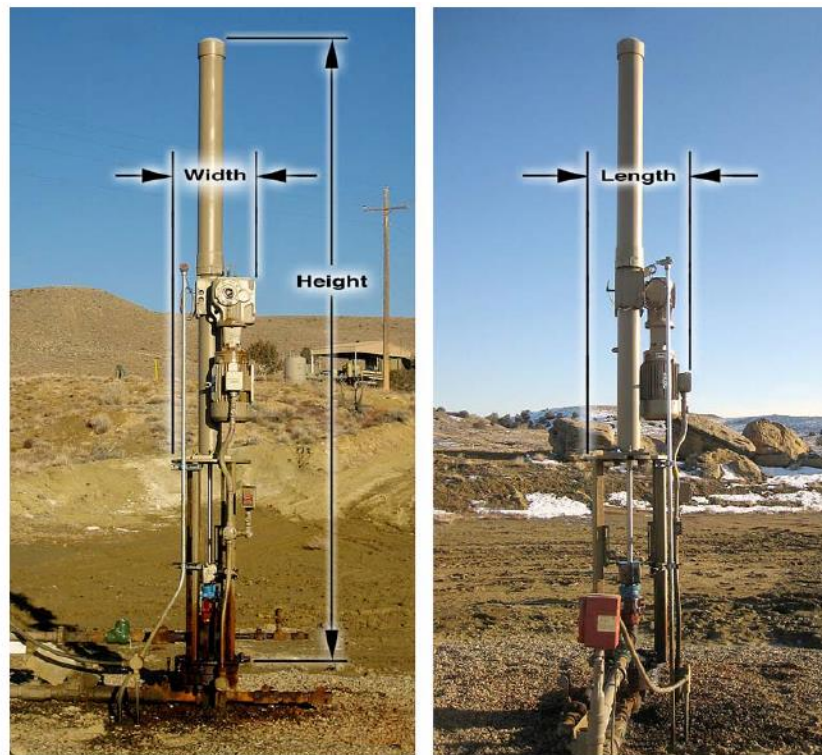
Figura 11. Comparativo dimensional de unidad BMC y unidad *LRP*®



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. LRP*® Brochure

**3.2.1 Geometría de la unidad.** La geometría de la unidad *LRP*® facilita las labores de servicio a pozo, sus dimensiones y pesos varían según la capacidad de longitud de carrera y la carga a manejar. Internamente el sistema de piñón cremallera se encuentra lubricado por aceite. Puede ser instalada en lugares cercanos a lugares poblados dado que no modifica significativamente el ambiente donde se encuentre funcionando y al no tener partes móviles expuestas disminuye los riesgos asociados a este factor.

Figura 12. Geometría de la unidad *LRP*®

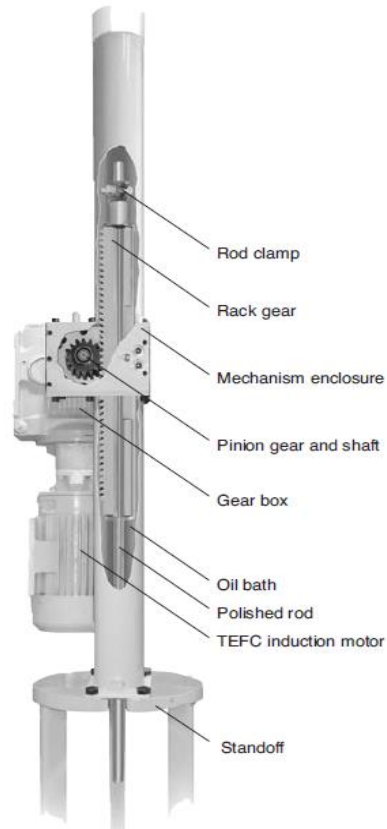


Stroke Inches	Height Inches	Height/ Stroke	Width Inches	Width/ Stroke	Length Inches	Length/ Stroke
32.00	156.00	488%	22.00	69%	27.00	84%
44.00	180.00	409%	22.00	50%	27.00	61%
56.00	204.00	364%	22.00	39%	27.00	48%
68.00	228.00	335%	22.00	32%	27.00	40%
120.00	300.00	250%	26.00	22%	26.00	22%

Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

### 3.2.2 Principio de funcionamiento. A continuación, se muestra la estructura de la unidad *LRP*®

Figura 13. Vista interna de la unidad *LRP*®



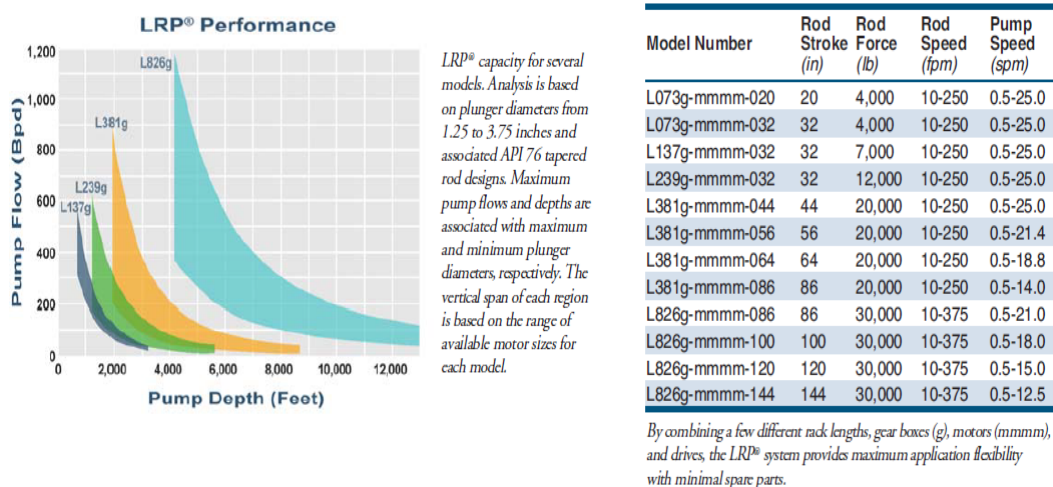
Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. LRP*® Brochure

El control velocidad (*SPM*) de esta unidad se hace por medio de un variador de frecuencia con *software* especializado para sistemas de levantamiento artificial por bombeo mecánico. La fuerza motriz generada por un motor eléctrico de inducción es transmitida al piñón de ataque a través de una caja de engranajes que entrega a la unidad el torque necesario para manejar las cargas asociadas a la labor de bombeo. El piñón previamente mencionado se acopla directamente a un “*Rack*” dentado que según el sentido de giro del motor va a iniciar su carrera ascendente o

descendente, dentro de este *rack* va inserta la barra pulida la cual se apoya sobre el mismo haciendo uso de una grapa convencional transmitiendo así el movimiento recíprocante a la sarta y finalmente a la bomba en fondo. Todo el sistema móvil es protegido por una cubierta metálica. Internamente el mecanismo de piñón cremallera se encuentra lubricado por aceite. De acuerdo al modo de funcionamiento que puede variar entre “*Single*”, “*Dual*” y “*Optimized*”, el variador de frecuencia ira modificando la velocidad de bombeo y la longitud de carrera dentro de rangos predeterminados por medio del giro inverso del motor. Un sensor de proximidad, detecta las muescas hechas al principio y al final del *rack* para así determinar cuando la unidad llega a la posición más alta durante la carrera de subida y a la más baja durante la carrera de bajada.

**3.2.3 Rango de aplicación.** Al manejar longitudes de carrera más bajas que las grandes unidades de bombeo mecánico convencional, la unidad *LRP*® compensa este aspecto con los distintos perfiles de velocidad que puede manejar operando desde 0,5 a 12,5 spm. Como limitante del sistema las cargas soportadas van hasta las 30000 lb.

Figura 14. Rango de aplicación de la unidad *LRP*®



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. LRP® Brochure*

**3.2.4 Instalación.** Las dimensiones y pesos relativamente bajos de la unidad *LRP*<sup>®</sup> afectan la logística de transporte e instalación de forma positiva, incluso las unidades pequeñas pueden ser transportadas en vehículos “*Pick up*”.

Figura 15. Transporte de unidad *LRP*<sup>®</sup>



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

Estas unidades generalmente se instalan en menos de un día haciendo uso de un camión grúa pequeño o de un vehículo monta cargas adecuado.

Figura 16. Izaje de una unidad *LRP*<sup>®</sup>



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

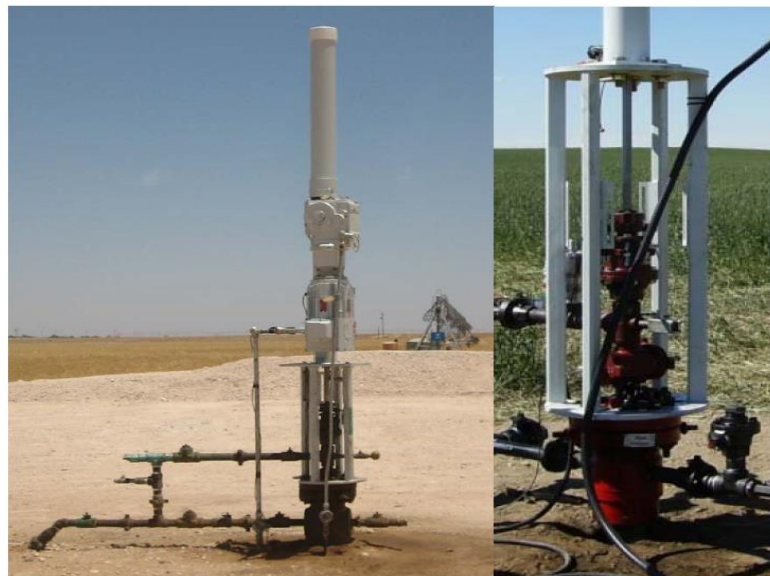
La base de esta unidad encaja en los distintos modelos de Casing comúnmente usados haciendo así un montaje directo sobre las facilidades ya existentes eliminando la necesidad obra civil durante su montaje. Las unidades más pequeñas también pueden ser instaladas acoplándose a la tubería de producción.

Figura 17. Instalación de base sobre *casing* para unidad *LRP*®



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

Figura 18. Unidad *LRP*® instalada sobre *casing*



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

Estas ventajas no solo son benéficas para optimizar la labor de instalación, sino que también mejoran el aspecto del “Cluster” y facilitan la logística de intervención a pozo al dejar disponible un mayor espacio para realizar las operaciones.

Figura 19. Reemplazo de unidades BMC por unidades LRP® en cluster



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

En áreas ambientalmente sensibles o con presencia de población cercana, la instalación de la unidad y su posterior operación, no interfieren de forma dramática con su entorno.

Figura 20. Unidades *LRP*® instaladas en áreas ambientalmente sensibles



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

La unidad *LRP*® se puede instalar incluso antes de remover por completo la unidad original agilizando así la puesta en marcha.

Figura 21. Instalación de unidad *LRP*® en Nuevo México



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

**3.2.5 Operación.** Durante la operación de la unidad *LRP*® el ruido generado es significativamente menor al generado por una unidad de bombeo mecánico convencional. El variador de frecuencia de esta unidad cuenta con *software* especializado desarrollado específicamente para la aplicación. En funcionamiento continuo el sistema puede ser monitoreado de forma remota haciendo uso del sistema “SCADA” que se tenga implementado en sitio, al igual que por medio del *software* propio de la aplicación que más allá del monitoreo permite el control remoto de sistema de levantamiento artificial. Si el modo “*Optimized*” se encuentra activado, durante la operación normal se podrán observar cambios de velocidad durante las carreras de subida y bajada ya que el equipo variara los *SPM* automáticamente dentro de un rango pre establecido con el fin de alcanzar un porcentaje de llenado de la bomba “*Target*” previamente determinado por el personal de producción y programado por el operador.

**3.2.6 Mantenimiento.** El mantenimiento de la *LRP*® básicamente consta del cambio de aceite que lubrica el sistema “*Rack*” y piñón de ataque el cual se encuentra alojado dentro del cuerpo de la unidad, una válvula de fácil acceso permite realizar esta labor sin dificultad y evitando derrame al drenar el aceite a reemplazar. El aceite SAE 140 cumple a cabalidad la función de lubricación cuando el sistema está instalado a temperaturas por encima de los cero grados centígrados, 7.5 galones serán suficientes, deben vestirse en la unidad al momento de la instalación y debe reemplazarse cada 6 meses, esta labor requiere un logística y utilización de recursos mínima, el tiempo de parada de pozo es sumamente reducido minimizando así el problema de producción diferida. La caja de engranajes internamente viene lubricada con aceite y cada 2 años se debe reemplazar dicho lubricante. 5 galones de aceite sintético SHC630 funcionarán correctamente cuando el equipo se encuentre instalado a temperaturas entre los -40 y los 80 grados centígrados.

Figura 22. Facilidades cambio de aceite en unidad *LRP*®



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

**3.2.7 Prestaciones de control.** Dado que el *software* instalado en el variador de frecuencia que controla a la unidad *LRP*®, ha sido desarrollado específicamente para esta aplicación, se pueden aprovechar al máximo las características del sistema tales como la baja inercia y el giro inverso del motor para optimizar la producción de crudo, prolongar la vida útil del completamiento, prevenir fallas y diagnosticar el pozo entre otros. Algunos problemas comunes de sistema de levantamiento artificial por bombeo mecánico, han sido abordados en busca de solución o mitigación de los mismos y se ha logrado llegar a modos de funcionamiento y perfiles de velocidad que benefician la operación del pozo.

**a. *Single speed***

El modo de funcionamiento “*Single speed*” tomo como referencia una única velocidad tanto para la carrera ascendente como para la carrera descendente, así la tasa de producción dependerá de la velocidad programada la cual sería determinada por el personal que conozca las características del pozo.

**b. *Dual speed***

Al elegir el perfil de velocidad “*Dual Speed*”, la unidad tomara referencias distintas para la velocidad de subida y para la velocidad de bajada siendo normalmente la velocidad durante la carrera ascendente mayor a la velocidad manejada durante la carrera descendente obteniendo como resultado final el aumento de las SPM promedio.

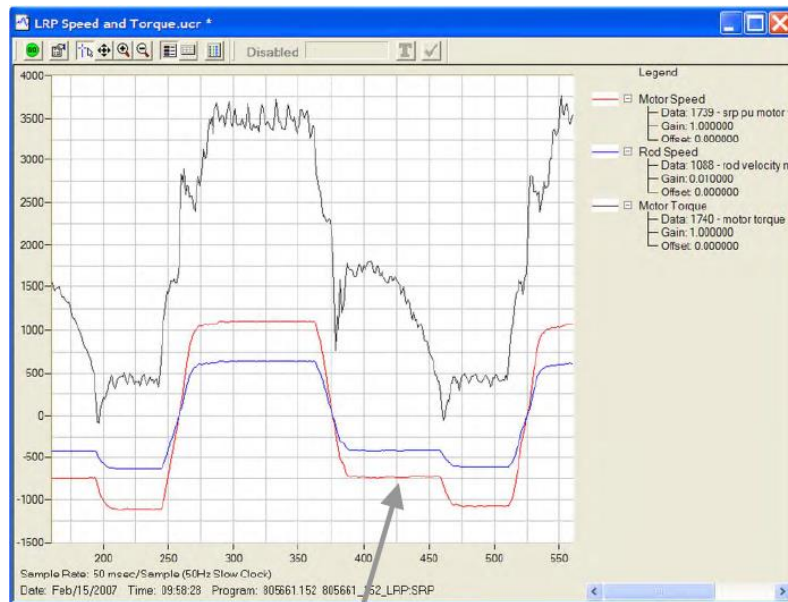
**c. *Optimized speed***

Datos de completamiento de pozo y de yacimiento deben ser cargados en el *software* de control antes de seleccionar el modo “*Optimized speed*”, ahora se programará un “*Target*” de llenado de la bomba en puntos porcentuales y se seleccionará el rango de velocidades dentro del cual se le permite a la unidad realizar variaciones en las SPM. De forma automática basándose en mediciones de corriente, torque y calculos matemáticos el sistema determinara el porcentaje de llenado actual y realizara cambios de velocidad hasta llegar al porcentaje de llenado deseado en la bomba. La medición es continua y la respuesta en tiempo real de los cambios de velocidad optimiza la producción de crudo y contribuye al aprovechamiento eficiente de la energía eléctrica.

#### d. *Soft landing*

El golpe de fluido es un problema derivado de un bajo o medio llenado de la bomba y produce un desgaste prematuro del sistema. La característica “*Soft landing*” es una prestación de control del *software* que determina en qué punto de la carrera se produce el impacto con el fluido dentro de la bomba para así previo a este impacto reducir la velocidad de funcionamiento del sistema para minimizar el golpe y tras detectar que ya se superó ese punto, de inmediato retornar a la velocidad de operación normal. Este “*Feature*” del *software* se puede habilitar o deshabilitar sin importar en que perfil de velocidad este corriendo el equipo (*Single, Dual* o *Optimized*).

Figura 23. Control de velocidad “*Soft Landing*” de la unidad LRP®



**Reducción de Velocidad antes del impacto con el fluido dentro de la bomba**

Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. LRP® Brochure*

#### e. *Pump clean mode*

La acumulación de sólidos y parafinas dentro de la bomba a lo largo de la operación normal del sistema de bombeo mecánico puede llevar al bloqueo de

las válvulas fija y viajera con todos los problemas y perdidas que esto implica. La característica de control "*Pump clean*" hace que la bomba oscile 10 veces a una velocidad por encima de la velocidad de operación con una aceleración programable y progresivamente la unidad va reduciendo la longitud del stroke haciendo que las válvulas abran y cierren a frecuencias más altas de las usuales usando así la misma bomba para limpiar su interior y prevenir el bloque de las mismas. Esta característica fue desarrollada para campo que presentan este tipo de problemas y sus pruebas arrojaron resultados positivos especialmente cuando se programa la unidad para que de forma automática corra esta rutina de limpieza una vez al día. Al finalizar la rutina la unidad regresa de forma automática a su funcionamiento normal.

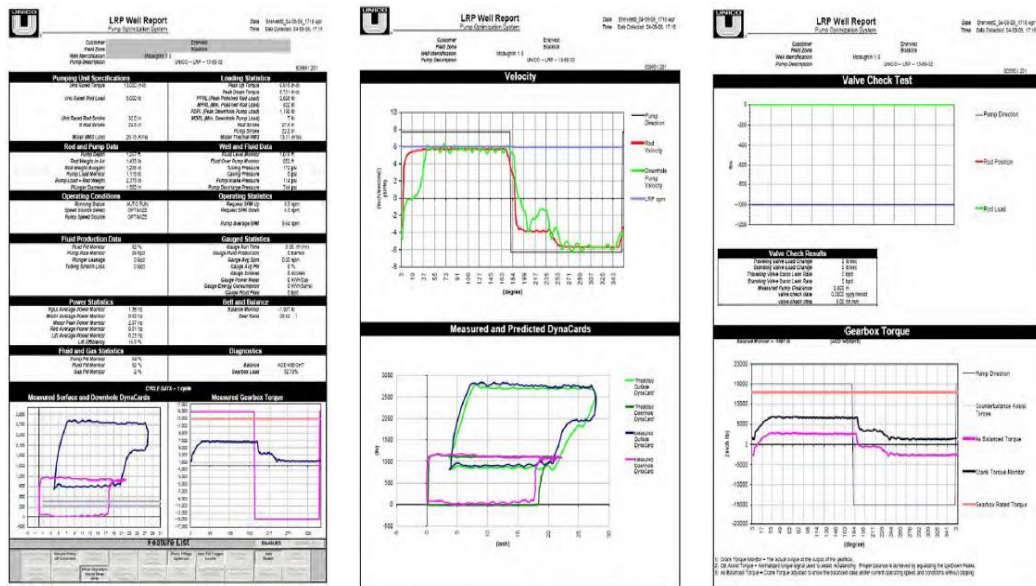
#### **f. *Bridle control***

Cuando se manejan crudos de alta viscosidad con sistemas de bombeo mecánico, durante la carrera de bajada la sarta de varillas puede presentar una flotabilidad suficiente para hacer que la grapa se separe del elemento del sistema que transmite el movimiento al pistón, así se observará en el caso de la unidad *LRP*® que el rack sigue bajando mientras que la grapa se separa y la sarta queda flotando bajando así más lentamente, ahora cuando el sistema empieza su carrera de subida, se va a encontrar con la grapa que aún está bajando y generará un fuerte impacto que desgasta el sistema, afecta el llenado de la bomba y hasta podría desplazar la grapa. Con lecturas en tiempo real de corriente y torque, el sistema de control de la unidad *LRP*® identifica el momento exacto en el cual la sarta de varillas debido a la flotabilidad se separa del *rack*, en ese momento la unidad disminuye su velocidad esperando a que la grapa se vuelva a asentar sobre el *rack* para posteriormente continuar su operación normal evitando así el impacto mecánico y prolongando la vida útil del sistema.

## g. Well Production report

El software de control continuamente esta almacenando lecturas de las variables de operación significativas y administra dicha información para generar un reporte de producción extraíble a cualquier computador personal. Este reporte es de gran ayuda para que el personal de producción diagnostique el pozo y tome decisiones con base en datos reales. Entre los datos registrados en el “Well Production Report” se encuentran las cartas dinografica de fon y superficie (Sin necesidad de instalar celdas de carga), La tasa de producción inferida, las cargas máximas y mínimas manejadas durante las carreras ascendentes y descendentes, sumergencia, porcentaje de llenado de la bomba, consumo de energía por barril producido, entre otros.

Figura 24. Reporte de producción de la unidad LRP®



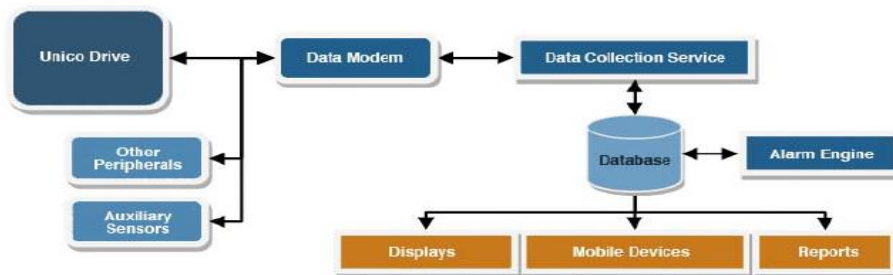
Fuente: Unico Inc. Drives and Systems. LRP® Brochure

## h. Global monitoring and control

El monitoreo remoto de pozos es una opción para estar siempre conectado a los aspectos críticos de operación de los pozos. La data se recolecta en formato digital y se almacena en servidores desde donde la aplicación la administra y

finalmente la muestra de forma organizada y práctica. La unidad *LRP*<sup>®</sup> puede ser monitoreada por un sistema *GMC* (*Global Monitoring and Control*) que permite acceder a una vista de parámetros en tiempo real del pozo desde cualquier sitio donde se cuente con conexión a internet. Los reportes de producción (*WPR*) se pueden programar para que sean leídos y mostrados en pantalla de forma periódica en el sistema *GMC* y guardando el histórico de los mismos. Notificaciones de falla o warnings pueden ser enviadas via mail para dar rápida respuesta y disminuir la producción diferida.

Figura 25. Arquitectura del sistema *GMC* para la unidad *LRP*<sup>®</sup>



Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. GMC Brochure*

**3.2.8 Consumo energético.** La unidad *LRP*<sup>®</sup> fue originalmente desarrollada como una opción con una mejor relación beneficio/costo que los sistemas de bombeo mecánico convencional en pozos relativamente someros donde se encontró que, dadas sus condiciones, podían operarse fácilmente sin necesidad de tener un contrapeso en la unidad de superficie. Las unidades *LRP*<sup>®</sup> sin contrapeso son rentables, pero requieren algo de potencia adicional para el levantamiento de la carga. Este tipo de unidades con automatización avanzada embebida en el variador de frecuencia, pueden presentar una mejor eficiencia energética que los sistemas de bombeo mecánico convencional en pozos someros. A medida que la profundidad de los pozos aumenta, el uso de un variador de frecuencia regenerativo puede incrementar significativamente la eficiencia del sistema incluso sin contra peso.

Las mayores contribuciones de la automatización avanzada de la unidad *LRP*® a la eficiencia energética del sistema son el “*Rod Load Damping*” (Amortiguación de la carga en la varilla), “*Rod velocity profiling*” (Perfiles de velocidad de la varilla), velocidades de subida y bajada independientes, y control de llenado para coincidir con la afluencia a la entrada de la bomba reduciendo la interferencia por gas.

En una instalación típica de campo donde se reemplaza una unidad BMC por una unidad *LRP*® se compararon los consumos energéticos y las eficiencias de los sistemas mencionados en modos de control “*Pump fill control*” y “*Pump off control*”, con y sin variador de frecuencia regenerativo. La automatización de la unidad BMC para que opere en los modos mencionados se hace utilizando un controlador externo que permite recopilar la data necesaria para llevar a cabo el proceso comparativo. El *software* de control haciendo uso de la data de reservorio y de completamiento del pozo, calcula los parámetros necesarios para el análisis.

La figura 26, muestra los resultados de la evaluación de los sistemas BMC y *LRP*® corriendo en modo “*Pump fill control*” y utilizando un variador de frecuencia regenerativo, data como la profundidad de la bomba, tasa de producción, potencia del motor, longitud de la sarta de varilla y velocidad de bombeo, entre otros, se relacionan allí para identificar el pozo tipo o pozo de estudio. Se debe prestar especial atención a los parámetros relacionados con el consumo eléctrico.

Esto permite observar la aplicabilidad de estos dos tipos de unidades que aunque utilizan el mismo completamiento, presentan varios cambios en su principio de funcionamiento y los modos de control ofrecidos.

Figura 26. Unidad BMC vs LRP®. Análisis de eficiencia energética en modo "Pump Fill Control" con variador de frecuencia regenerativo

Surface Parameters	SRP	Units	LRP	Units
Pumping Unit Stroke	53.1	Inches	44.0	Inches
Pump Base Flow	240	Bpd	120	Bpd
Pump Off Time	0.0	Minutes	0.0	Minutes
Motor Run Speed	1,175	Rpm	1,655	Rpm
Motor Base Speed	1,175	Rpm	1,175	Rpm
Motor Rated Power	20.0	Hp	20.0	Hp
Motor Efficiency	85%		95%	
Energy Regeneration	100%		100%	
Counterbalance Ratio	40%		0%	
Pump Fill Ratio	67%		95%	
Tubing Pressure	58.0	Psi		
Casing Pressure	5.0	Psi		
Electrical Power Cost	\$0.060	\$/Kwh		
<b>Downhole Parameters</b>				
	SRP	Units		
Rod String Length	2,940	Feet		
Sinker Bar Length	0	Feet		
Tubing Anchor Point	0	Feet		
Fluid Over Pump	0	Feet		
Upper Rod Diameter	0.875	Inches		
Lower Rod Diameter	0.750	Inches		
Sinker Bar Diameter	1.500	Inches		
Upper Rod Fraction	30.3%			
Lower Rod Fraction	69.7%			
Plunger Diameter	2.250	Inches		
Tubing Diameter	2.375	Inches		
Casing Diameter	4.970	Inches		
Rod Friction	100	Pounds		
Pump Friction	0	Pounds		
Pump Efficiency	99%			
<b>Reservoir Parameters</b>				
	SRP	Units		
Reservoir Static Head	1,000	Feet		
Reservoir Max Flow	100	Bpd		
Water Cut Ratio	60%			
Water Specific Gravity	1.100			
API Oil Grade	35.0			

Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

Figura 26. (Continuación)

Calculated Parameters	SRP	Units	LRP	Units
Overall Gear Ratio	102.5		16.52	
Pump Depth	2,940	Feet		
Pump On Level	0.0	Feet	0.0	Feet
Well Time Constant	266.6	Minutes		
Pump On Time	0.0	Minutes	0.0	Minutes
Pump Cycle Time	0.0	Minutes	0.0	Minutes
Rod Stretch Ratio	0.232			
Oscillation Ratio	0.128			
Oscillation Frequency	89.69	Spm		
Pump Base Speed	11.46	Spm	7.68	Spm
Pump Run Speed	11.46	Spm	10.82	Spm
Peak Rod Speed	31.86	In/Sec	19.83	In/Sec
Fluid Specific Gravity	1.000			
Rod String Load	4,613	Pounds		
Fluid Column Load	5,272	Pounds		
Counterbalance Force	2,900	Pounds	0	Pounds
Up Direction Force	9,985	Pounds		
Down Direction Force	4,513	Pounds		
Up Stroke Torque	2,039	In*Lbs	1,343	In*Lbs
Down Stroke Torque	464	In*Lbs	607	In*Lbs
Motor RMS Torque	1,157	In*Lbs	1,036	In*Lbs
Motor Rated Torque	1,073	In*Lbs	1,073	In*Lbs
Fluid Lift Power	3.48	Hp	3.48	Hp
Polished Rod Power	5.74	Hp	6.26	Hp
Motor RMS Power	3.24	Hp	0.97	Hp
Dynamic Brake Power	0.00	Hp	0.00	Hp
Electrical Input Power	8.97	Hp	7.23	Hp
Energy Consumption	160.6	Kwh/Day	129.4	Kwh/Day
System Efficiency	38.8%		48.1%	
Total Power Cost	\$289	\$/Mon	\$233	\$/Mon
Brake Power Cost	\$0	\$/Mon	\$0	\$/Mon
Fluid Power Cost	\$0.06	\$/Bbl	\$0.05	\$/Bbl
Oil Power Cost	\$0.15	\$/Bbl	\$0.12	\$/Bbl
Fluid Stretch	12.3	Inches		
Friction Stretch	0.0	Inches		
Tubing Stretch	4.9	Inches		
System Stretch	17.3	Inches		
Pump Stroke	35.8	Inches	26.7	Inches
Pump Fluid Flow	160.8	Bbl/Day	160.6	Bbl/Day
Pump Oil Flow	64.3	Bbl/Day	64.2	Bbl/Day

Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

La figura 27 muestra los efectos de no regenerar energía en el proceso cuando no se cuenta con los equipos que lo permitan.

Figura 27. Unidad BMC vs LRP®. Análisis de eficiencia energética en modo "Pump Fill Control" sin regeneración

<b>Surface Parameters</b>	<b>SRP</b>	<b>Units</b>	<b>LRP</b>	<b>Units</b>
Pumping Unit Stroke	53.1	Inches	44.0	Inches
Pump Base Flow	240	Bpd	120	Bpd
Pump Off Time	0.0	Minutes	0.0	Minutes
Motor Run Speed	1,175	Rpm	1,655	Rpm
Motor Base Speed	1,175	Rpm	1,175	Rpm
Motor Rated Power	20.0	Hp	20.0	Hp
Motor Efficiency	85%		95%	
Energy Regeneration	0%		0%	
Counterbalance Ratio	40%		0%	
Pump Fill Ratio	67%		95%	
Tubing Pressure	58.0	Psi		
Casing Pressure	5.0	Psi		
Electrical Power Cost	\$0.060	\$/Kwh		
<b>Downhole Parameters</b>				
	<b>SRP</b>	<b>Units</b>		
Rod String Length	2,940	Feet		
Sinker Bar Length	0	Feet		
Tubing Anchor Point	0	Feet		
Fluid Over Pump	0	Feet		
Upper Rod Diameter	0.875	Inches		
Lower Rod Diameter	0.750	Inches		
Sinker Bar Diameter	1.500	Inches		
Upper Rod Fraction	30.3%			
Lower Rod Fraction	69.7%			
Plunger Diameter	2.250	Inches		
Tubing Diameter	2.375	Inches		
Casing Diameter	4.970	Inches		
Rod Friction	100	Pounds		
Pump Friction	0	Pounds		
Pump Efficiency	99%			
<b>Reservoir Parameters</b>				
	<b>SRP</b>	<b>Units</b>		
Reservoir Static Head	1,000	Feet		
Reservoir Max Flow	100	Bpd		
Water Cut Ratio	60%			
Water Specific Gravity	1.100			
API Oil Grade	35.0			

Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems*. Installation records 2009

Figura 27. (Continuación)

<b>Calculated Parameters</b>	<b>SRP</b>	<b>Units</b>	<b>LRP</b>	<b>Units</b>
Overall Gear Ratio	102.5		16.52	
Pump Depth	2,940	Feet		
Pump On Level	0.0	Feet	0.0	Feet
Well Time Constant	266.6	Minutes		
Pump On Time	0.0	Minutes	0.0	Minutes
Pump Cycle Time	0.0	Minutes	0.0	Minutes
Rod Stretch Ratio	0.232			
Oscillation Ratio	0.128			
Oscillation Frequency	89.69	Spm		
Pump Base Speed	11.46	Spm	7.68	Spm
Pump Run Speed	11.46	Spm	10.82	Spm
Peak Rod Speed	31.86	In/Sec	19.83	In/Sec
Fluid Specific Gravity	1.000			
Rod String Load	4,613	Pounds		
Fluid Column Load	5,272	Pounds		
Counterbalance Force	2,900	Pounds	0	Pounds
Up Direction Force	9,985	Pounds		
Down Direction Force	4,513	Pounds		
Up Stroke Torque	2,039	In*Lbs	1,343	In*Lbs
Down Stroke Torque	464	In*Lbs	607	In*Lbs
Motor RMS Torque	1,157	In*Lbs	1,036	In*Lbs
Motor Rated Torque	1,073	In*Lbs	1,073	In*Lbs
Fluid Lift Power	3.48	Hp	3.48	Hp
Polished Rod Power	5.74	Hp	6.26	Hp
Motor RMS Power	3.24	Hp	0.97	Hp
Dynamic Brake Power	6.73	Hp	7.62	Hp
Electrical Input Power	15.71	Hp	14.85	Hp
Energy Consumption	281.2	Kwh/Day	265.8	Kwh/Day
System Efficiency	22.2%		23.4%	
Total Power Cost	\$506	\$/Mon	\$478	\$/Mon
Brake Power Cost	\$217	\$/Mon	\$246	\$/Mon
Fluid Power Cost	\$0.10	\$/Bbl	\$0.10	\$/Bbl
Oil Power Cost	\$0.26	\$/Bbl	\$0.25	\$/Bbl
Fluid Stretch	12.3	Inches		
Friction Stretch	0.0	Inches		
Tubing Stretch	4.9	Inches		
System Stretch	17.3	Inches		
Pump Stroke	35.8	Inches	26.7	Inches
Pump Fluid Flow	160.8	Bbl/Day	160.6	Bbl/Day
Pump Oil Flow	64.3	Bbl/Day	64.2	Bbl/Day

Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems*. Installation records 2009

Las figuras 28 y 29 muestra los resultados del análisis hecho con las unidades corriendo en modo "Pump Off Control" con y sin variador de frecuencia regenerativo.

Figura 28. Unidad BMC vs LRP®. Análisis de eficiencia energética en modo "Pump off Control" con variador de frecuencia regenerativo

<b>Surface Parameters</b>	<b>SRP</b>	<b>Units</b>	<b>LRP</b>	<b>Units</b>
Pumping Unit Stroke	53.1	Inches	44.0	Inches
Pump Base Flow	240	Bpd	120	Bpd
Pump Off Time	30.0	Minutes	0.0	Minutes
Motor Run Speed	1,175	Rpm	975	Rpm
Motor Base Speed	1,175	Rpm	1,175	Rpm
Motor Rated Power	20.0	Hp	20.0	Hp
Motor Efficiency	85%		95%	
Energy Regeneration	100%		100%	
Counterbalance Ratio	40%		0%	
Pump Fill Ratio	67%		95%	
Tubing Pressure	58.0	Psi		
Casing Pressure	5.0	Psi		
Electrical Power Cost	\$0.060	\$/Kwh		
<b>Downhole Parameters</b>				
	<b>SRP</b>	<b>Units</b>		
Rod String Length	2,940	Feet		
Sinker Bar Length	0	Feet		
Tubing Anchor Point	0	Feet		
Fluid Over Pump	0	Feet		
Upper Rod Diameter	0.875	Inches		
Lower Rod Diameter	0.750	Inches		
Sinker Bar Diameter	1.500	Inches		
Upper Rod Fraction	30.3%			
Lower Rod Fraction	69.7%			
Plunger Diameter	2.250	Inches		
Tubing Diameter	2.375	Inches		
Casing Diameter	4.970	Inches		
Rod Friction	100	Pounds		
Pump Friction	0	Pounds		
Pump Efficiency	99%			
<b>Reservoir Parameters</b>				
	<b>SRP</b>	<b>Units</b>		
Reservoir Static Head	1,000	Feet		
Reservoir Max Flow	100	Bpd		
Water Cut Ratio	60%			
Water Specific Gravity	1.100			
API Oil Grade	35.0			

Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

Figura 28. (Continuación)

<b>Calculated Parameters</b>	<b>SRP</b>	<b>Units</b>	<b>LRP</b>	<b>Units</b>
Overall Gear Ratio	102.5		16.52	
Pump Depth	2,940	Feet		
Pump On Level	106.4	Feet	0.0	Feet
Well Time Constant	266.6	Minutes		
Pump On Time	19.5	Minutes	0.0	Minutes
Pump Cycle Time	49.5	Minutes	0.0	Minutes
Rod Stretch Ratio	0.232			
Oscillation Ratio	0.128			
Oscillation Frequency	89.69	Spm		
Pump Base Speed	11.46	Spm	7.68	Spm
Pump Run Speed	11.46	Spm	6.37	Spm
Peak Rod Speed	31.86	In/Sec	11.68	In/Sec
Fluid Specific Gravity	1.000			
Rod String Load	4,613	Pounds		
Fluid Column Load	5,272	Pounds		
Counterbalance Force	2,900	Pounds	0	Pounds
Up Direction Force	9,985	Pounds		
Down Direction Force	4,513	Pounds		
Up Stroke Torque	2,039	In*Lbs	1,343	In*Lbs
Down Stroke Torque	464	In*Lbs	607	In*Lbs
Motor RMS Torque	456	In*Lbs	409	In*Lbs
Motor Rated Torque	1,073	In*Lbs	1,073	In*Lbs
Fluid Lift Power	2.05	Hp	2.05	Hp
Polished Rod Power	3.32	Hp	3.69	Hp
Motor RMS Power	1.28	Hp	0.38	Hp
Dynamic Brake Power	0.00	Hp	0.00	Hp
Electrical Input Power	4.59	Hp	4.07	Hp
Energy Consumption	82.2	Kwh/Day	72.8	Kwh/Day
System Efficiency	44.6%		50.3%	
Total Power Cost	\$148	\$/Mon	\$131	\$/Mon
Brake Power Cost	\$0	\$/Mon	\$0	\$/Mon
Fluid Power Cost	\$0.05	\$/Bbl	\$0.05	\$/Bbl
Oil Power Cost	\$0.13	\$/Bbl	\$0.12	\$/Bbl
Fluid Stretch	12.3	Inches		
Friction Stretch	0.0	Inches		
Tubing Stretch	4.9	Inches		
System Stretch	17.3	Inches		
Pump Stroke	35.8	Inches	26.7	Inches
Pump Fluid Flow	94.6	Bbl/Day	94.6	Bbl/Day
Pump Oil Flow	37.9	Bbl/Day	37.8	Bbl/Day

Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

Figura 29. Unidad BMC vs LRP®. Análisis de eficiencia energética en modo "Pump off Control" sin regeneración

	SRP	Units	LRP	Units
<b>Surface Parameters</b>				
Pumping Unit Stroke	53.1	Inches	44.0	Inches
Pump Base Flow	240	Bpd	120	Bpd
Pump Off Time	30.0	Minutes	0.0	Minutes
Motor Run Speed	1,175	Rpm	975	Rpm
Motor Base Speed	1,175	Rpm	1,175	Rpm
Motor Rated Power	20.0	Hp	20.0	Hp
Motor Efficiency	85%		95%	
Energy Regeneration	0%		0%	
Counterbalance Ratio	40%		0%	
Pump Fill Ratio	67%		95%	
Tubing Pressure	58.0	Psi		
Casing Pressure	5.0	Psi		
Electrical Power Cost	\$0.060	\$/Kwh		
<b>Downhole Parameters</b>				
Rod String Length	2,940	Feet		
Sinker Bar Length	0	Feet		
Tubing Anchor Point	0	Feet		
Fluid Over Pump	0	Feet		
Upper Rod Diameter	0.875	Inches		
Lower Rod Diameter	0.750	Inches		
Sinker Bar Diameter	1.500	Inches		
Upper Rod Fraction	30.3%			
Lower Rod Fraction	69.7%			
Plunger Diameter	2.250	Inches		
Tubing Diameter	2.375	Inches		
Casing Diameter	4.970	Inches		
Rod Friction	100	Pounds		
Pump Friction	0	Pounds		
Pump Efficiency	99%			
<b>Reservoir Parameters</b>				
Reservoir Static Head	1,000	Feet		
Reservoir Max Flow	100	Bpd		
Water Cut Ratio	60%			
Water Specific Gravity	1.100			
API Oil Grade	35.0			

Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

Figura 29. (Continuación)

Calculated Parameters	SRP	Units	LRP	Units
Overall Gear Ratio	102.5		16.52	
Pump Depth	2,940	Feet		
Pump On Level	106.4	Feet	0.0	Feet
Well Time Constant	266.6	Minutes		
Pump On Time	19.5	Minutes	0.0	Minutes
Pump Cycle Time	49.5	Minutes	0.0	Minutes
Rod Stretch Ratio	0.232			
Oscillation Ratio	0.128			
Oscillation Frequency	89.69	Spm		
Pump Base Speed	11.46	Spm	7.68	Spm
Pump Run Speed	11.46	Spm	6.37	Spm
Peak Rod Speed	31.86	In/Sec	11.68	In/Sec
Fluid Specific Gravity	1.000			
Rod String Load	4,613	Pounds		
Fluid Column Load	5,272	Pounds		
Counterbalance Force	2,900	Pounds	0	Pounds
Up Direction Force	9,985	Pounds		
Down Direction Force	4,513	Pounds		
Up Stroke Torque	2,039	In*Lbs	1,343	In*Lbs
Down Stroke Torque	464	In*Lbs	607	In*Lbs
Motor RMS Torque	456	In*Lbs	409	In*Lbs
Motor Rated Torque	1,073	In*Lbs	1,073	In*Lbs
Fluid Lift Power	2.05	Hp	2.05	Hp
Polished Rod Power	3.32	Hp	3.69	Hp
Motor RMS Power	1.28	Hp	0.38	Hp
Dynamic Brake Power	2.66	Hp	4.49	Hp
Electrical Input Power	7.25	Hp	8.56	Hp
Energy Consumption	129.8	Kwh/Day	153.2	Kwh/Day
System Efficiency	28.3%		23.9%	
Total Power Cost	\$234	\$/Mon	\$276	\$/Mon
Brake Power Cost	\$86	\$/Mon	\$145	\$/Mon
Fluid Power Cost	\$0.08	\$/Bbl	\$0.10	\$/Bbl
Oil Power Cost	\$0.21	\$/Bbl	\$0.24	\$/Bbl
Fluid Stretch	12.3	Inches		
Friction Stretch	0.0	Inches		
Tubing Stretch	4.9	Inches		
System Stretch	17.3	Inches		
Pump Stroke	35.8	Inches	26.7	Inches
Pump Fluid Flow	94.6	Bbl/Day	94.6	Bbl/Day
Pump Oil Flow	37.9	Bbl/Day	37.8	Bbl/Day

Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

En este pozo relativamente somero, la unidad *LRP*® trabaja con una eficiencia energética más alta en tres de los cuatro modos de operación estudiados, incluso sin contrapeso.

Tabla 4. Unidad BMC vs *LRP*®. Resultados de análisis de eficiencia energética

<b>Control mode</b>	<b>Pump flow</b>	<b>SRP power</b>	<b>SRP effic</b>	<b>LRP power</b>	<b>LRP effic</b>
<i>Pump fill regen</i>	161 Bpd	8.97 Hp	38.8 %	7.23 Hp	48.1 %
<i>Pump fill non regen</i>	161 Bpd	15.71 Hp	22.2 %	14.85 Hp	23.4 %
<i>Pump off regen</i>	95 Bpd	4.59 Hp	44.6 %	4.07 Hp	50.3 %
<i>Pump off non regen</i>	95 Bpd	7.25 Hp	28.3 %	8.56 Hp	23.9 %

Fuente: Unico Inc. *Drives and Systems. Installation records 2009*

Sin embargo, se puede observar que en general las diferencias en cuanto al consumo energético no son muy grandes. En otras palabras, en ausencia del contrapeso, la unidad *LRP*® puede ser igual o más eficiente energéticamente que una unidad de bombeo mecánico convencional equivalente, pero esta diferencia en consumo de energía puede ser probablemente insignificante si se compara con otros factores como la reducción de costos en intervención a pozos con equipos de Workover por deterioro acelerado de componentes de fondo causado por problemas comunes como el golpe de fluido y el bloque por gas, aspectos críticos de este sistema de levantamiento artificial que son mitigados por el control especializado de la unidad *LRP*® lo cual ya se ha explicado en detalle con anterioridad.

Ahora, un ahorro significativo en consumo de energía se puede dar en casos donde la tasa de producción del pozo ha ido cayendo a lo largo del tiempo hasta el punto en que la unidad BMC diseñada para las condiciones iniciales de producción ha quedado sobre dimensionada para la nueva afluencia del pozo. En esta situación específica, es muy viable trasladar esa unidad robusta de bombeo a un pozo con mayor potencial y en su lugar instalar una unidad *LRP*® con un motor de entre un medio y un tercio de la potencia con la que se venía trabajando, sin necesidad de

cambiar los equipos de fondo ya que la longitud de carrera de la unidad *LRP*® podrá variar en un amplio rango según la necesidad de llenado y la tasa de producción al no depender de la posición de un contrapeso para determinar cuándo inician y terminan sus carreras de bajada y subida manejando así un comportamiento dinámico. La eficiencia del SLA aumentara notablemente y se mitigaran los problemas de golpe de fluido e interferencia y/o bloqueo por gas.

**3.2.9 Ventajas de la unidad.** Las bondades de la unidad *LRP*® abarcan importantes aspectos a tener en cuenta cuando se requiere seleccionar una unidad de superficie para el levantamiento artificial por bombeo mecánico.

- Peso y dimensiones reducidas
- Logística simple de transporte e instalación
- Usa el mismo completamiento que el bombeo mecánico convencional
- Instalación rápida que no involucra obra civil
- *Software* desarrollado específicamente para la unidad
- Generación de cartas dinograficas sin requerir celda de carga
- Perfiles de velocidad *Single, Dual y Optimized*
- Generación de reporte de producción
- *Features* de control *Soft landing, Bridle control y Pump clean*
- Monitoreo y control remoto
- Mantenimiento reducido
- Facilita las intervenciones a pozo
- Instalación en áreas ambientalmente sensibles con impacto reducido
- Alta adaptación a las distintas características de pozos candidatos
- Plataformas costa afuera de tamaños reducidos para su instalación
- Versatilidad en su diseño

**3.2.10 Limitaciones de la unidad.** Las limitaciones de la unidad *LRP*® radican en su esencia misma pues al mantenerse en sus diseños el principio de ser una solución de dimensiones y pesos reducidos, las cargas a manejar al igual que las longitudes de carrera ofrecidas, son también reducidas en comparación con las unidades de bombeo mecánico convencional. A medida que aumenta la profundidad de las arenas productoras, la sarta de varillas se hace más larga y en general el completamiento se hace más pesado e igualmente los requerimientos de torque en la caja de engranajes se incrementan, si a esto le agregamos el peso de la columna hidráulica a levantar, encontramos en la profundidad y en la tasa de producción los mayores limitantes de la *LRP*®. Dado que la unidad no cuenta con un contrapeso, para pozos someros y de baja producción los motores utilizados son de baja potencia pues las cargas asociadas al proceso productivo no son altas, ahora, cuando el pozo productor presenta profundidad y producción medias y altas, la potencia de los motores a utilizar en las unidades *LRP*® es mayor a la de los motores a utilizar en una unidad BMC equivalente precisamente por la ausencia del contrapeso que ayudado por la gravedad reduce los requerimientos de energía del sistema. El consumo de energía eléctrica es un aspecto sumamente representativo al momento de evaluar la viabilidad de una unidad a ser instalada en campo y posteriormente masificada, y aunque la ausencia de contrapeso en varios escenarios podría ser una desventaja para el consumo energético, por otro lado, la baja inercia a vencer en los arranques de la *LRP*® y su modo de funcionamiento optimizado en el cual se aumenta la tasa de producción, son aspectos que ponen el balance beneficio / costo a favor de esta unidad cuando se utiliza dentro de los rangos establecidos.

- 30000 mil libras como máxima carga soportada
- Longitud de carrera máxima de 144 pulgadas
- Entre 8000 a 7000 pies máxima producción de 100 a 300 BPD

## 4. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Respecto a las unidades *LRP*® y BMC algunos aspectos representativos al momento de seleccionar la mejor opción a utilizar en un pozo se pueden identificar en las etapas de instalación y operación al igual que en su posterior mantenimiento. Los recursos a utilizar, los tiempos tomados en intervenciones, y la complejidad de los procedimientos, son entre otros aspectos, relevantes para la selección de una unidad de superficie. Ahora, la capacidad del sistema para operar a la profundidad deseada y manejando la tasa de producción requerida son puntos claramente importantes. Tras cumplir con los requerimientos de estos aspectos críticos, la prolongación de la vida útil del SLA, las prestaciones de control, la versatilidad de la unidad y el consumo energético, son factores que podrían determinar la diferencia entre elegir uno u otro sistema

### 4.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE UNIDADES BMC Y *LRP*®

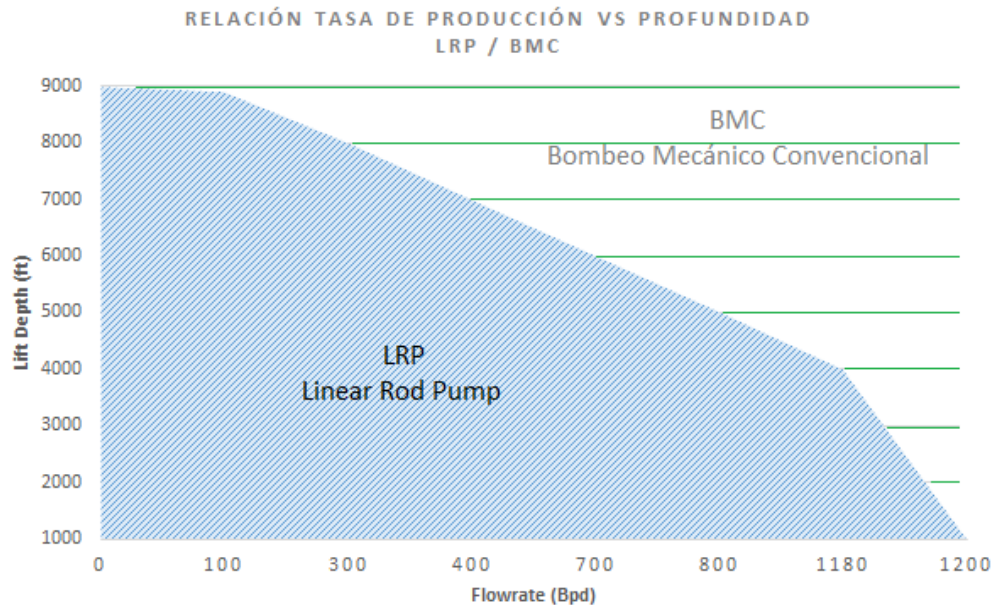
Tabla 5. Especificaciones técnicas de unidades BMC y *LRP*®

<b>Parámetros de operación</b>	<b>Bombeo Mecánico Convencional (BMC)</b>	<b>Linear Rod Pump (<i>LRP</i>®)</b>
Resistencia caja reductora (lbs-in)	57000 - 1824000	7300 - 82600
Carga soportada (lbs)	7600 - 42700	4000 - 30000
Recorrido (in)	23 - 240	20 - 144
Tasa de producción (BPD)	20 - 2000	20 - 1200
Profundidad (ft)	400 - 9000	400 - 7000
Motor	Eléctrico	Eléctrico
Controlador	General o especializado con requerimiento de periféricos	Especializado sin requerimiento de periféricos

## 4.2 RELACIÓN PROFUNDIDAD / TASA DE PRODUCCIÓN PARA UNIDADES *LRP*<sup>®</sup> Y BMC

Gráficamente se puede establecer la zona de aplicación de la unidad *LRP*<sup>®</sup> como punto de partida para el proceso de selección. El rango de profundidad vs producción en el cual se podría usar cualquiera de los dos tipos de unidades es amplio, más al sobrepasar los 9000 ft de profundidad y los 1200 BPD de producción, el diseño de la unidad *LRP*<sup>®</sup> ya requeriría adicionarle un sistema de contrapeso, como por ejemplo el balanceo por aire. Este tipo de unidades se pueden diseñar bajo requerimiento, al igual que unidades *LRP*<sup>®</sup> con doble motor y con vientos para su anclaje a tierra al manejar altos recorridos en su ciclo de bombeo. Es importante tener en cuenta que la calidad de la caja reductora a medida que aumenta la profundidad de los perforados y la tasa de producción, es un aspecto clave pues un desgaste uniforme de los engranajes representa una vida útil más larga para el sistema.

Figura 30. Relación tasa de producción Vs Profundidad para unidades *LRP*<sup>®</sup> y BMC



### **4.3 COSTOS ASOCIADOS A INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN POZO TIPO**

El transporte de materiales y equipos, el desplazamiento de personal, su nivel de competencia, la disponibilidad de insumos, las vías de acceso a pozo, las condiciones de seguridad en la locación, los acuerdos comerciales con empresas locales, entre otros, son aspectos que modifican directamente los costos asociados a las labores de instalación, operación y mantenimiento de unidades de superficie en pozos con sistema de levantamiento artificial por bombeo mecánico. Para el presente análisis se seleccionó un pozo real de un campo colombiano ubicado en la región del Magdalena medio en donde las condiciones de seguridad permiten el normal desarrollo de las operaciones y las vías de acceso terrestre se encuentran en buen estado facilitando la ejecución de actividades propias para el desarrollo del campo. En dicho pozo se tenía instalada una unidad de bombeo mecánico M-640D-305-168 con un motor de 50 HP y tras encontrarse que la tasa de producción real fue menor a la esperada, al no conseguir el resultado deseado del proceso de estimulación por inyección cíclica de vapor, dicha unidad terminó estando sobre dimensionada para las condiciones del pozo y presentaba problemas como golpe de fluido y bloqueo por gas. El pozo se encontraba trabajando por ciclos deteniendo de forma manual el bombeo para que se recuperara la sumergencia y posteriormente poniendo de nuevo en funcionamiento la unidad. Adicional a los inconvenientes mencionados, dado el sobredimensionamiento de la unidad, la eficiencia del sistema era muy baja. Se hará mención a este pozo de ahora en adelante como “Pozo Tipo” para efectos de análisis y estudio. En dicho “Pozo Tipo”, se analizaron las condiciones para determinar la viabilidad de instalar allí una unidad *LRP*® que se ajustara mejor a las condiciones de producción. La unidad BMC se movería a otro pozo de mayor potencial y durante un tiempo de tres a seis meses se evaluaría el desempeño de la unidad *LRP*® con miras a instalar esta tecnología en varios pozos más donde se presentan problemas similares para el mejoramiento en la operación del campo.

**4.3.1 Definición de pozo tipo y diseño de unidades de superficie.** La data del “Pozo Tipo” se muestra a continuación. Por sus características, en este se podría instalar tanto una unidad de bombeo mecánico convencional como una unidad *LRP®*.

Tabla 6. Data para diseño de unidad de superficie. Pozo tipo del Magdalena medio

Item	Parámetro	Unidad	Valor	Item	Parámetro	Unidad	Valor
1	Profundidad de la bomba	ft	2605	14	Longitud de varilla sección 2	ft	2490
2	Diámetro externo del <i>tubing</i>	in	2.875	15	Diámetro de varilla sección 2	in	0,875
3	Diámetro interno del <i>casings</i>	In	6.366	16	Tipo de varilla sección 3	Grado	D
4	Presión en el <i>tubing</i>	psi	100	17	Longitud de varilla sección 3	ft	75
5	Presión en el <i>casings</i>	psi	5	18	Diámetro de varilla sección 3	in	1,25
6	Diámetro pistón de la bomba	in	2	19	Corte de agua	%	15
7	Longitud del pistón	in	24	20	Gravedad API	API	12
8	Eficiencia de la bomba	%	60	21	Gravedad específica agua	NA	1
9	Número de secciones de varilla	Und	3	22	Fricción de las varillas	lb	200
10	Tipo de varilla sección 1	Grado	D	23	Fricción de la bomba	lb	150
11	Longitud de varilla sección 1	ft	20	24	Viscosidad del fluido	cps	1900
12	Diámetro de varilla sección 1	in	1,25	25	Profundidad de perforados	ft	2100
13	Tipo de varilla sección 2	Grado	D	26	Producción requerida	BPD	40

Fuente: Estado mecánico. Dpto. de producción. Campo Colombiano del Magdalena medio en Colombia

Para determinar que unidad de bombeo mecánico convencional se adapta a las condiciones del pozo tipo, se hará uso de la herramienta “Qrod”, un *software* libre para el diseño y predicción del desempeño de unidades de bombeo mecánico del cual se podrán obtener datos como la máxima carga a manejar, graficas de torque y una carta dinagráfica de la operación normal del sistema. Esta herramienta entrega un modelo API de unidad a utilizar según los datos ingresados. Ahora, para el diseño de la unidad *LRP®*, se hará uso del “*LRP® Calculator*”, herramienta de diseño específicamente desarrollada para este propósito de la cual se obtendrán resultados similares al de la herramienta Qrod, pero orientados a la unidad *LRP®*. Como resultado del diseño, la herramienta Qrod arroja la unidad **C-80D-109-48** como óptima para cumplir con los requerimientos del pozo. A continuación, se evidencia el resultado en mención:

Figura 31. Reporte de diseño de la herramienta Qrod para pozo tipo del Magdalena medio

## QRod

### Pozo\_Tipo\_Magdalena\_Medio\_Col

#### Results

Rate (100% pump volumetric eff.)	66.7 BBL/D
Rate (60% pump volumetric eff.)	40.0 BBL/D
Rod Taper	100.0%
Top Steel Rod Loading	48.2 %
Min API Unit Rating	80-109-48
Min NEMA D Motor Size	2.24 HP
Polished Rod Power	1.33 HP
TVLoad	8,782 lb
SVLoad	5,123 lb

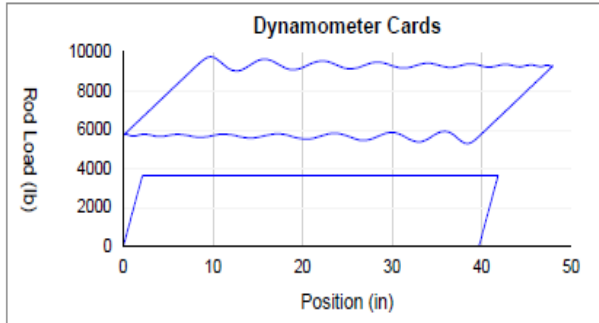
#### Design Inputs

Unit	CWConv
Pump Depth	2,605 ft
Target Rate	40.00 bbl/day
Stroke Rate (SPM)	3.60 SPM
Surface Stroke Length	48.00 in
Pump Diameter (D)	2.000 in
Tubing Size	2.875" (6.40 lb/ft) 2.441" ID
Anchored Tubing	No
Rod Type	Steel Rods
API Rod Number	77
API Rod Grade	D

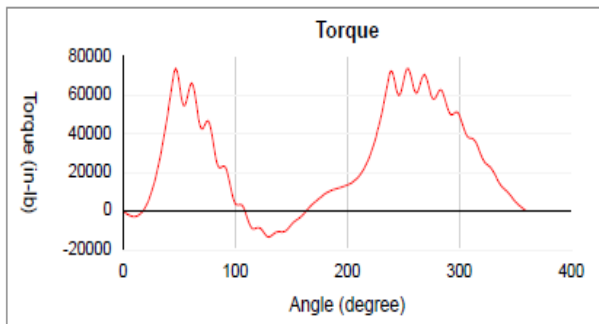
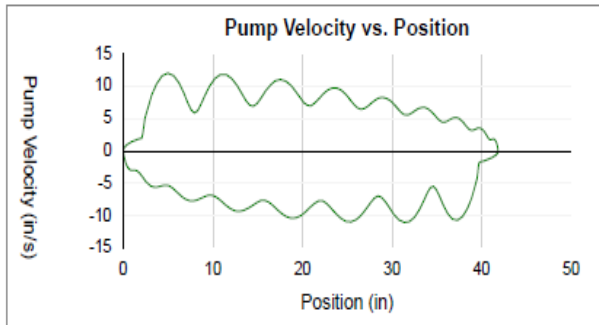
#### Default Settings

Total Sinker Bar Weight	638.7 lb
Fluid Specific Gravity	0.99 Sp.Gr.H2O
Tubing Pressure	100.00 psi
Casing Pressure	5.00 psi
Damping Factor	0.010
Surface Unit Efficiency	85 %
Pump Volumetric Efficiency	60.00 %
Pump Intake Pressure	50.00 psi

#### Plots



PPRL	9,776.1 lb	MPRL	5,288.0 lb	Fo	3,658.7 lb
Pump Stroke Length	39.69 in	Static Stretch	6.19 in	Overtravel	0.01 in
Fo/Skr	0.129	Kr	591 lb/in	Kt	1716 lb/in

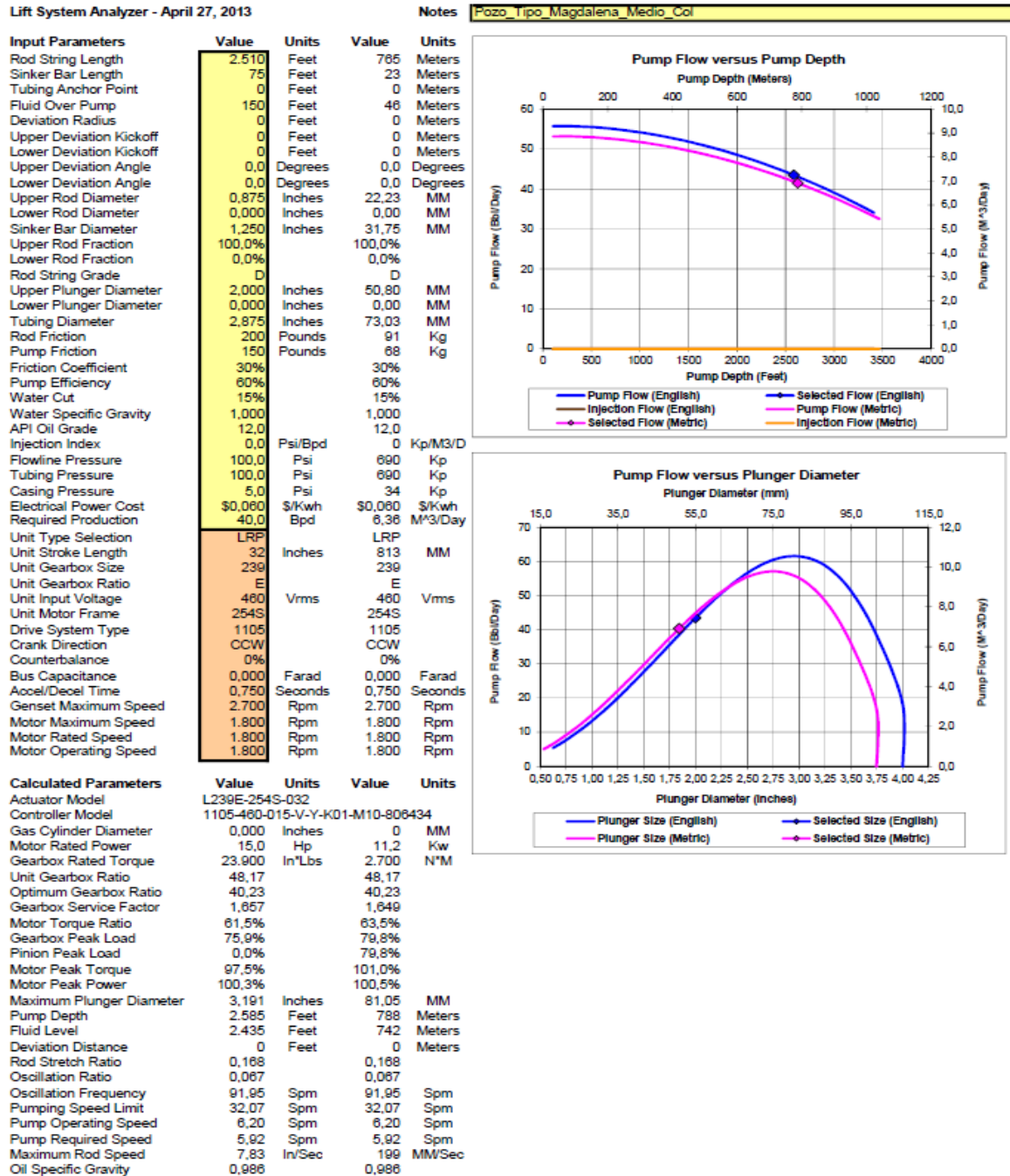


Peak GearBox Torque	74 Kin-lb
Counter Balance Moment	197 Kin-lb
Counter Balance Effect	7,062.4 lb

Fuente: *Echometer* Qrod 3.0.11.1. *Software* libre

La herramienta de diseño “LRP® Calculator” arroja la unidad **L239E-254S-032** con un motor de 15 HP como óptima para cumplir con los requerimientos del pozo.

Figura 32. Reporte de diseño de la herramienta LRP® Calculator para pozo tipo del Magdalena medio



Fuente: LRP® Calculator, Lift System Analyzer. Unico Inc.

Figura 32. (Continuación)

Fluid Specific Gravity	0,988		0,988	
Pump Intake Pressure	69,2	Psi	477	Kp
Pump Discharge Pressure	1.141,9	Psi	7.873	Kp
Pump Injection Pressure	0,0	Psi	0	Kp
Gas Compressor Flow	0,0	Mcf/Day	0	M³/Day
Counterbalance Pressure	0,0	Psi	0	Kp
Counterbalance Force	0	Pounds	0	Kg
Rod String Force	5.000	Pounds	2.267	Kg
Fluid Column Force	3.572	Pounds	1.620	Kg
Fluid Injection Force	0	Pounds	0	Kg
Rod Compression Force	-123	Pounds	-56	Kg
Rod Up Stroke Force	8.921	Pounds	4.046	Kg
Rod Down Stroke Force	4.650	Pounds	2.109	Kg
Maximum Rod Load	9.382	Pounds	4.255	Kg
Minimum Rod Load	4.243	Pounds	1.924	Kg
Gearbox Ave Up Torque	17.112	In*Lbs	1.933,4	N*M
Gearbox Ave Down Torque	10.765	In*Lbs	1.216,2	N*M
Gearbox Peak Torque	19.064	In*Lbs	2.153,9	N*M
Gearbox RMS Torque	14.497	In*Lbs	1.638,0	N*M
Motor Up Stroke Torque	418	In*Lbs	47,3	N*M
Motor Down Stroke Torque	221	In*Lbs	25,0	N*M
Motor Accel Torque	231	In*Lbs	26,1	N*M
Motor Rated Torque	540	In*Lbs	61,0	N*M
Motor RMS Torque	332	In*Lbs	37,5	N*M
Electrical Input Power	5,06	Hp	3,78	Kw
Dynamic Brake Power	2,31	Hp	1,73	Kw
Bus Capacitor Power	0,00	Hp	0,00	Kw
Gas Compressor Power	0,00	Hp	0,00	Kw
Polished Rod Power	1,83	Hp	1,36	Kw
Fluid Lift Power	0,77	Hp	0,57	Kw
Fluid Injection Power	0,00	Hp	0,00	Kw
Input Power Cost	\$163	\$/Mon	\$163	\$/Mon
Brake Power Cost	\$75	\$/Mon	\$75	\$/Mon
Fluid Power Cost	\$0,13	\$/Bbl	\$0,79	\$/M³
Oil Power Cost	\$0,15	\$/Bbl	\$0,93	\$/M³
Energy Storage Capacitor	0,099	Farad	0,099	Farad
Energy Storage Inertia	6,657	In*Lb*S²	0,752	Kg*M²
Backspin Braking Power	1,02	Hp	0,76	Kw
Backspin Braking Speed	323	Rpm	323	Rpm
Dynamic Brake Factor	15,4%		15,4%	
System Efficiency	15,2%		15,2%	
Polished Rod Stress	7.270	Psi	2.534	Kn/M²
Coupling Stress	7.273	Psi	2.535	Kn/M²
Max Upper Rod Stress	14.838	Psi	5.170	Kn/M²
Min Upper Rod Stress	7.733	Psi	2.695	Kn/M²
Max Lower Rod Stress	0	Psi	0	Kn/M²
Min Lower Rod Stress	0	Psi	0	Kn/M²
Polished Rod Stress	7,7%		7,7%	
Coupling Stress	7,7%		7,7%	
Upper Rod Stress	12,9%		12,9%	
Lower Rod Stress	0,0%		0,0%	
Upper Rod Service Factor	44,8%		44,8%	
Lower Rod Service Factor	0,0%		0,0%	
Fluid Load Stretch	5,4	Inches	136,7	MM
Friction Stretch	0,5	Inches	11,5	MM
Tubing Stretch	2,0	Inches	50,8	MM
Static Stretch	7,8	Inches	199,0	MM
Pump Stroke	25,1	Inches	636,9	MM
Pump Production Flow	43,5	Bbl/Day	6,92	M³/Day
Pump Injection Flow	0,0	Bbl/Day	0,00	M³/Day
Pump Oil Flow	37,0	Bbl/Day	5,88	M³/Day

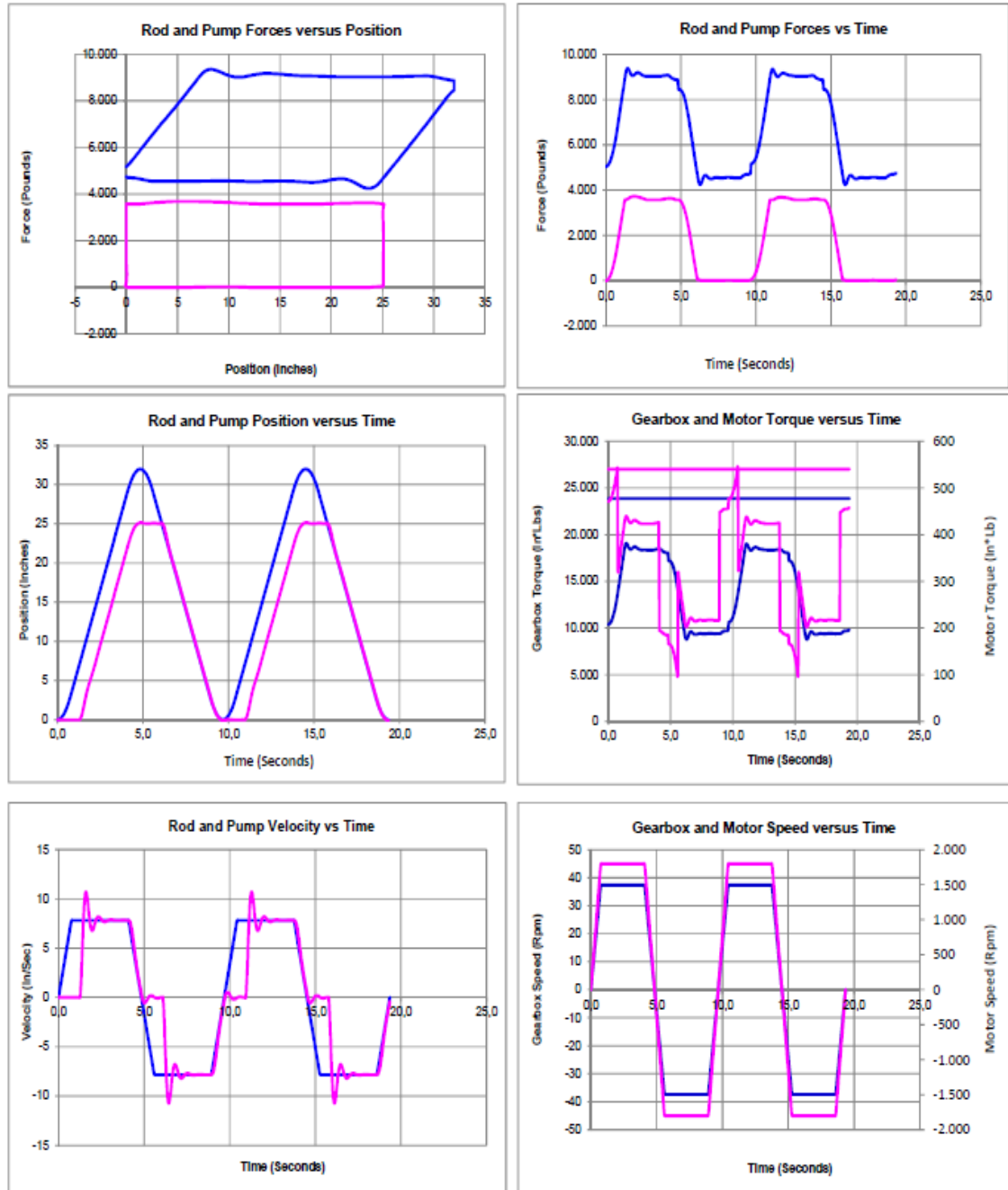
Nema Frame Motor Model Numbers			
Motor	TEFC	TEFC	
Rated	Class 1	Explosion	
Power	Division 2	Proof	
5 Hp	184S	184E	
10 Hp	215S	215E	
15 Hp	254S	254E	
20 Hp	256S	256E	
25 Hp	284S	284E	
30 Hp	286S	286E	
40 Hp	324S	324E	
50 Hp	326S	326E	
60 Hp	364S	364E	
75 Hp	365S	365E	
100 Hp	405S	405E	
125 Hp	444S	444E	
150 Hp	445S	445E	
200 Hp	447S	447E	
250 Hp	449S	449E	

Square Frame Motor Model Numbers				PM
Motor	TEFC	TEBC	DPFV	TEBC
Rated	Class 1	Class 1	Class 1	Class 1
Power	Division 2	Division 2	Division 2	Division 2
15 Hp	1852			
20 Hp	2162			
25 Hp	2168			
30 Hp	2173	2169		1855
40 Hp	2570	2174		2165
50 Hp	2578	2571		2171
60 Hp	2586	2579	2572	2176
75 Hp	2890	2587	2580	2581
100 Hp	3203	2899	2588	2589
125 Hp			2884	2885
150 Hp			2892	2893
200 Hp			3205	
250 Hp			3215	

Maximum Rod Service Factors		
Type of Service	API C	API D
Non-Corrosive	100%	100%
Salt Water	65%	90%
Hydrogen Sulfide	50%	70%

Fuente: LRP® Calculator, Lift System Analyzer. Unico Inc.

Figura 32. (Continuación)



Fuente: LRP® Calculator, Lift System Analyzer. Unico Inc.

**4.3.2 Relación de costos.** Con las unidades de bombeo BMC y *LRP*® seleccionadas, se procede a verificar los costos de instalación, operación y mantenimiento para las dos opciones de reemplazo con el fin de determinar la viabilidad para cada sistema. Para el sistema BMC, los valores registrados a continuación se obtienen por retroalimentación del personal de producción del campo colombiano en donde se encuentra ubicado el pozo definido como pozo tipo. Para la unidad *LRP*® los costos son información conocida por el autor.

Tabla 7. Relación de costos de instalación, operación y mantenimiento de unidades BMC y *LRP*® para pozo tipo

Equipo / Materiales / Labor	Costo en USD asociado a la unidad C-80D-109-48	Costo en USD asociado a la Unidad L239E-254S-032
Unidad de bombeo	30.000	27.000
Motor eléctrico	3.000	3.000
Transporte local de la unidad	2.500	1.000
Equipo para izaje de unidad	3.500	2.000
Plataforma de concreto para unidad	7.000	0
Cuadrilla para ensamble de unidad en sitio	7.500	1.000
Variador de frecuencia (General/Especializado)	6.500	10.000
Control adicional para optimizar producción	10.000	0
Servicio de programación y arranque	1.000	1.400
Lubricación anual caja de engranajes y cojinetes	4.000	2.000
Sub Total en USD	75.000	47.400
Ahorro en USD de inversión con unidad <i>LRP</i> ®		27.600
Ahorro en USD por masificación con 100 unidades <i>LRP</i> ®		2.760.000

Se puede observar que de elegir la unidad *LRP*® se estaría teniendo un ahorro del 36.8 % en la inversión. Beneficios adicionales en cuanto a costos se verían reflejados en el aumento de producción ofrecido por el *software* especializado para bombeo mecánico de la unidad *LRP*® (Siempre y cuando la curva IPR del pozo indique que es posible) y en la generación periódica y automatizada de reportes de producción que permiten identificar posibles causas de falla o problemas de forma temprana e intervenirlas a tiempo para evitar pérdidas en la producción. En cualquier pozo candidato para la posible instalación de una unidad *LRP*® o BMC, la

tasa de producción que pueda dar el pozo no va a ser ampliamente mayor o menor dependiendo de la unidad que se elija pues el incremento de producción que ofrece el *software* especializado de la unidad *LRP*® se basa en realizar una mejor administración del completamiento para trabajar con base en un porcentaje de llenado objetivo o “*Target*” de la bomba haciendo más eficiente el sistema, más no puede compararse con un proceso de recobro mejorado en el cual se modifican las condiciones petrofísicas del yacimiento incrementando dramáticamente la tasa de producción. Partiendo de que muchos de los pozos donde se tienen instalados sistemas de levantamiento artificial por bombeo mecánico, ya se encuentran en condiciones de operación donde se está aprovechando al máximo o casi al máximo la afluencia del pozo, la diferencia en cuanto a costos entre instalar una unidad de superficie *LRP*® o *BMC*®, radicaría en:

- Costo de la unidad
- Costos de instalación
- Costos de mantenimiento
- Consumo energético
- Aplicabilidad de los “*Features*” de control al pozo candidato

El costo de la unidad de *BMC* dependerá claramente de su marca y calidad. El costo de la unidad *LRP*® será el entregado por su único fabricante. Los costos de instalación, operación y mantenimiento han sido tratados en el presente análisis para un caso específico y serán distintos para cada campo petrolero según su ubicación y facilidades dispuestas para la operación, al igual que el consumo energético. De lo anteriormente expuesto se puede concluir que es en los costos fijos en donde se encuentra el ahorro al instalar una unidad *LRP*®, por lo cual no se requiere un análisis de la relación beneficio costo por medio del valor presente neto de ingresos y egresos para concluir en qué casos sería conveniente optar por este tipo de unidades.

## 5. SELECCIÓN DE LA UNIDAD DE SUPERFICIE

Con la información previamente expuesta, se puede generar a un procedimiento que permita determinar en qué casos conviene usar una unidad BMC y en cuales sería mejor instalar una unidad *LRP*®. En gran parte esta decisión depende de si son aplicables o no en el pozo candidato los “*Features*” de control y optimización ofrecidos por la unidad *LRP*®.

### 5.1 PROCEDIMIENTO

- A. Determine la profundidad de la bomba y la tasa de producción esperada del pozo
- B. Si se cumple la siguiente relación entre profundidad y tasa de producción, solicite diseño tanto de unidad BMC como de unidad *LRP*® para efectos de comparación

Tabla 8. Relación profundidad - Tasa de producción para unidad *LRP*®

Rango de profundidad (ft)	Rango de producción (BPD)
400 – 1500	800 - 5
1501 – 5500	1200 – 10
5501 – 7000	400 – 20

- C. Si la relación profundidad/tasa de producción y/o la carga máxima de 30.000 lb a manejar por la unidad *LRP*® son excedidas, se debe continuar el proceso de selección considerando únicamente las unidades BMC.
- D. Si se cumplen las condiciones previas, se tendrán diseños satisfactorios tanto para unidad BMC como para unidad *LRP*®

- E. Evalúe en qué punto de la curva IPR está operando el pozo para determinar si es posible o no aprovechar el incremento en la tasa de producción ofrecido por la unidad *LRP*®. La cuantificación de este incremento de producción se realiza durante la corrida de diseño del *LRP*® Calculator
- F. Considere la potencia del motor a instalar con cada unidad, entre mayor sea esta, mayor será el consumo de energía eléctrica
- G. Con base en el comportamiento histórico del pozo si se tiene, o de un pozo similar, cuantifique los beneficios ofrecidos por las prestaciones de control ofrecidas por la unidad *LRP*® tales como el perfil de velocidad “*Optimized Speed*” y los *feature* “*Soft Landing*”, “*Pump Clean Mode*” y “*Well Production Report*” según apliquen o no al pozo candidato
- H. En caso de que la aplicabilidad de las prestaciones de control ofrecidas por la unidad *LRP*® afecte considerablemente los costos de operación beneficiando la misma, proceda a realizar el análisis beneficio/costo para cada unidad teniendo en cuenta el incremento de producción esperado y contemplando como mínimo los aspectos previamente expuestos concernientes a la instalación, operación y mantenimiento de las unidades, además de los puntos tratados en los literales F, G y H de este procedimiento
- I. En caso de que los “*Features*” de control de la unidad *LRP*® no apliquen al pozo candidato, el ahorro entre adquirir uno u otro tipo de unidad se verá reflejado en los costos fijos por lo cual no se requeriría un análisis de la relación beneficio/costo para llegar a una conclusión. Simplemente observe el costo de la unidad y los costos de operación y mantenimiento para una misma tasa de producción.
- J. Con base en los resultados obtenidos seleccione la unidad que más convenga para el pozo candidato

## 6. CONCLUSIONES

La unidad *LRP*® es aplicable a un amplio rango de profundidades, cargas y tasas de producción en pozos donde normalmente se instalan unidades de bombeo mecánico convencional.

La selección de una unidad *LRP*® como unidad de superficie, siempre que sea posible, en lugar del BMC, se verá reflejada en ahorros en costos fijos para las etapas de instalación, operación y mantenimiento y en costos variables cuando existe la posibilidad de incrementar la tasa de producción y aplicar las prestaciones especializadas de control del sistema *Linear Rod Pump*.

Las unidades BMC son la mejor opción para pozos con sistemas de levantamiento artificial por bombeo mecánico que manejen profundidades superiores a los 7.000 ft, tasas de producción mayores a los 1200 BPD y cargas por encima de las 30.000 lb, siendo estos parámetros excluyentes para la instalación de una unidad *LRP*®.

El monitoreo remoto, los reportes de producción en tiempo real, la mitigación del golpe de fluido y el bloqueo por gas, el control de separación de grapa y los distintos perfiles de velocidad ofrecidos por la unidad *LRP*® alargan la vida útil del sistema de levantamiento artificial por bombeo mecánico y disminuye las intervenciones a pozo.

Cuando la producción de un pozo ha declinado en el tiempo y la unidad BMC ha quedado sobredimensionada para la nueva afluencia del pozo, el cambio de unidad de superficie por una *LRP*® representa una disminución importante en el consumo de energía aumentando así la eficiencia del sistema.

## 7. RECOMENDACIONES

En caso de que apliquen al pozo candidato, una o más de las prestaciones de control de la unidad *LRP*® se recomienda cuantificar su impacto en la operación y tomar en cuenta estos costos para realizar un proceso de selección objetivo y acertado para la unidad de superficie.

En el campo petrolero objeto de estudio, verifique las condiciones de operación de las unidades de bombeo mecánico convencional y determine cuántas se encuentran sobredimensionadas para la tasa de producción y condiciones actuales del pozo. Posteriormente evalúe el aumento de eficiencia y la reducción de costo al migrar a una unidad *LRP*® en dichos pozos.

Contar con medidores de energía por *cluster*, permite determinar fácilmente si hubo o no un ahorro de energía al migrar de un sistema a otro.

## BIBLIOGRAFÍA

GOLAN AND WHITSON. *Well Performance*. 1991

IVAN TORRES CABRERA. Bombeo mecánico convencional [En línea]. Colombia. Monografía. [Fecha de consulta: 14 de abril de 2016]. Disponible en internet: <[Https://es.scribd.com/doc/63582639](https://es.scribd.com/doc/63582639) >

LUFKING. General Catalog 2008 – 2009

MONTES PÁEZ E. G. Curso Bombeo Mecánico. UIS 2015

RODRIGUEZ, A. S. Historia del bombeo mecánico. ITS Coatzacoalcos. ING Petrolera

SCHLUMBERGER. *Oilfield Glossary*.

TAKÁCKS GÁBOR, PH.D. *Sucker Rod Pumping Manual*. Penwell 2002

UNICO INC. *Drives and Systems. GMC brochure* 2010.

UNICO INC. *Drives and Systems. Installation records* 2009

UNICO INC. *Drives and Systems. LRP® brochure*.

UNICO INC. *Drives and Systems. Products brochure* 2010.