



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

AUTOMATIZACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO API DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO APLICANDO LA TÉCNICA SPLINE CÚBICO

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO PEROLERO

PRESENTA:

EDUARDO GONZÁLEZ CARMONA

ASESOR: ING. IVAN SANTAMARÍA VITE



MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA,

JUNIO 2009.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mis padres, Francisco González Ríos y Mariana Carmona Ortiz por todo el cariño, comprensión, apoyo y ejemplo que me han mostrado hasta el día de hoy.

A mis hermanos Eugenio, Alicia, Nancy Guadalupe, Francisco y Luisito por haber creído en mí en todo momento de mi vida y por todo su apoyo moral y económico, y particularmente a Eugenio que siempre ha sido un excelente hermano mayor.

A mi tía Cristina González Ríos por todo el apoyo que siempre ha brindado a mi familia,

A todos y cada una de las personas con quien compartí un instante inolvidable en mi estancia en la Facultad de Ingeniería, especialmente a mis amigos Miguel A. Chora, Oswaldo Barrón Parra, Ángel García Hernández, Antonio Murillo Pulido, Dorian Edgar Oliva Gutiérrez y por supuesto a mi tocayo Eduardo Angeles Ortega, quien siempre me ofreció el mejor de los consejos y su valiosa amistad incondicional.

A mis amigas Roxana López Dinorín e Ibeth López de la Rosa, quienes son las mujeres más leales y genuinas que he conocido.

A mi director de tesis, el Ing. Iván Santamaría Vite, por brindarme sus enseñanzas, su experiencia y una enorme disposición para la realización de este trabajo.

Al Dr. Néstor Martínez Romero por obsequiar sus conocimientos a los alumnos de la Facultad de Ingeniería.

A los ingenieros Alfonso Sánchez y Víctor Manjares que me dieron la visión de los retos que enfrentaría más adelante.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme proporcionado los recursos para estudiar una carrera profesional y por permitirme conocer la diversidad cultural que existe en su casa de estudios.

Gracias Totales

Eduardo González Carmona

ÍNDICE

	Pág.
Resumen	VIII
Introducción	IX
1. Selección del sistema artificial de producción	1
1.1. Sistemas artificiales de producción	1
1.1.1. Bombeo mecánico	2
1.1.2. Bombeo neumático	3
1.1.3. Bombeo electrocentrífugo	5
1.1.4. Bombeo hidráulico	6
1.1.5. Bombeo de cavidades progresivas	7
1.2. Mantenimiento de los sistemas artificiales de producción	8
1.3. Factores a considerar en la selección del sistema artificial de producción	9
2. Descripción del sistema de bombeo mecánico	12
2.1. Unidades de bombeo mecánico	12
2.1.1. Unidades de bombeo mecánico de balancín	13
2.1.2. Unidad de bombeo mecánico hidroneumática	16
2.1.3. Unidad de bombeo mecánico RotaFlex	19
2.2. Mecanismos superficiales	20
2.2.1. Grampa	21
2.2.2. Varilla pulida	21
2.2.3. Estopero	22
2.2.4. Válvulas de retención	23
2.2.5. Preventores	23
2.3. Varillas de succión	24
2.3.1. Composición metálica de las varillas de succión	24
2.3.2. Clases de varillas	26
2.4. Bomba subsuperficial	26
2.4.1. Bombas de tubería de producción	26
2.4.2. Bombas de inserción	27
2.4.3. Bombas de tubería de revestimiento	28
2.4.4. Elementos básicos de una bomba subsuperficial	28
2.4.5. Ancla de gas	28
2.4.6. El ciclo de bombeo	29
2.5. Motor principal	30

2.5.1. Motores de combustión interna	30
2.5.2. Motores eléctricos	32
2.6. Reductor de engranes	32
2.7. Tubería de producción	33
2.7.1. Ancla mecánica	34
2.7.2. Empacador	34
3. Análisis del sistema de bombeo mecánico	35
3.1. Geometría de las unidades de bombeo mecánico	35
3.1.1. Comparación del movimiento entre las unidades Mark II y Convencional	36
3.1.2. Aceleración de la varilla pulida	39
3.2. Selección del tamaño de la bomba	40
3.3. Sarta de varillas de succión (consideraciones generales)	46
3.3.1. Diseño de la sarta de varillas de succión	46
3.3.2. Diagrama modificado de Goodman	48
3.4. Movimiento de bombeo	49
3.4.1. Movimiento armónico simple	49
3.4.2. Movimiento de manivela y biela	50
3.4.3. Influencia del movimiento de bombeo en la varilla y en la carga estructural de una unidad de bombeo de balancín	52
3.5. Carrera efectiva del émbolo	55
3.5.1. Elongación de las varillas y de la tubería de producción en sartas de un solo diámetro	55
3.5.2. Elongación de las varillas (sartas telescopiadas)	58
3.5.3. Sobrecarrera del émbolo	58
3.6. Cálculos para el equipo superficial	62
3.6.1. Contrabalanceo	62
3.6.2. Consideraciones de torque	64
3.6.3. Factores de torque	66
3.7. Requerimientos de potencia del motor primario	66
3.7.1 Factor de carga cíclica	67
3.8. Clasificación API de las unidades de bombeo mecánico	68
4. Procedimiento de diseño de sistema de bombeo mecánico	70
4.1. Antecedentes del método API	70
4.2. Procedimiento API para el diseño del sistema de bombeo mecánico	70
4.3. Ejemplo de aplicación	80

4.4. Análisis del comportamiento del sistema de bombeo mecánico	82
4.4.1. Dinamómetro superficial	83
4.4.2. Cartas dinamométricas	83
5. Programa de cómputo aplicado al procedimiento de diseño API RP 11L	88
5.1. Interpolación	88
5.1.1. Interpolación funcional	88
5.1.2. Interpolación exacta	88
5.2. Técnica Spline cúbico	90
5.2.1. Subrutina Spline y función Seval	94
5.3. Descripción del programa de cómputo RodSystem	94
5.3.1. Objetivo	95
5.3.2. Datos requeridos	95
5.3.3. Ejecución de RodSystem	96
5.3.4. Ventana de diseño de RodSystem	97
5.3.5. Descripción de los campos del programa RodSystem	97
5.3.5.1. Información del archivo de diseño	97
5.3.5.2. Datos generales	98
5.3.5.3. Datos de la tubería de producción	99
5.3.6. Diseño del sistema de bombeo mecánico	99
5.3.6.1. Mensajes de alerta	100
5.3.7. Selección de la unidad de bombeo mecánico	100
5.3.8. Descripción del menú Archivo	101
5.3.8.1. Nuevo	101
5.3.8.2. Abrir	101
5.3.8.3. Guardar	102
5.3.8.4. Guardar como	102
5.3.8.5. Salir	103
5.3.9. Descripción del menú Ayuda	103
5.3.10. Limitaciones del programa de cómputo RodSystem	104
6. Validación del programa de cómputo RodSystem	105
6.1. Validación con base en literatura especializada	105
6.2. Validación con base en software especializado	108
6.3. Validación con base en datos reales de campo	110
7. Conclusiones y recomendaciones	115
7.1. Conclusiones	115

7.2. Recomendaciones	116
Apéndice A. Tabla de valores para varillas y bomba	117
Apéndice B. Tablas para el cálculo de factores adimensionales	121
Apéndice C. Subrutina <i>Spline</i> y función seval	127
Apéndice D. Catálogo Lufkin	131
Apéndice E. Construcción del Diagrama Modificado de Goodman	150
Apéndice F. Glosario	152
Referencias	157
Bibliografía	158

RESUMEN

Actualmente con la declinación de la producción de Cantarell- yacimiento que opera desde 1979 y que hasta los últimos años producía dos terceras partes de la producción de México- es imperativo tomar medidas provisorias que aseguren el bienestar de la economía nacional. El área de oportunidad en este sentido, es la aplicación de sistemas artificiales de producción en campos maduros, campos que fueron explotados antiguamente, pero que en su momento fueron cerrados debido a que dejó de ser costea su operación.

De todos los sistemas artificiales de producción existentes, el bombeo mecánico es uno de los más aplicados en los campos de petróleo, debido a su bajo costo, fácil operación y mantenimiento, es también uno de los más conocidos; los pozos que cuentan con este tipo de sistema, operan de manera eficiente, adaptable a varias condiciones operativas.

En el presente trabajo, primeramente se hace una descripción del sistema de bombeo mecánico, un análisis de los distintos parámetros de diseño del mismo y se presenta información relativa a las cartas dinamométricas -recursos por demás útiles en el diagnóstico y monitoreo del funcionamiento del sistema-.

Posteriormente y con el propósito de automatizar el procedimiento de diseño del sistema de bombeo mecánico, se presenta la conceptualización, descripción y desarrollo de un programa de cómputo-llamado RodSystem-que permite de una manera fácil, rápida y eficiente, determinar qué tipo de unidad de bombeo mecánico se requiere para un pozo determinado con base en las características del fluido y la geometría del pozo, el cual está sustentado en el procedimiento de diseño del Instituto Americano del Petróleo (API RP 11L) para el diseño de unidades de bombeo mecánico.

Finalmente los resultados del programa RodSystem, son validados por medio de ejemplos de literatura especializada, software comercial y datos de campo. De donde puede concluirse, que el programa apoyado en la técnica *spline cúbico* -para efectuar interpolaciones en tres dimensiones- es rápida y eficiente, dado que arroja resultados muy precisos de manera automática e inmediata.

Con base en lo anterior, puede señalarse que el trabajo desarrollado presenta resultados precisos, aceptables y confiables en el ejercicio del diseño del sistema de bombeo mecánico.

INTRODUCCIÓN

La creciente aplicación de los sistemas artificiales de producción en los campos petroleros de México demanda de manera urgente, el desarrollo de nuevas herramientas de cómputo que permitan el diseño de dichos sistemas de manera eficiente, rápida, dinámica y confiable. El presente trabajo tiene como propósito el desarrollo de un programa capaz de diseñar el sistema de bombeo mecánico a partir de datos básicos de diseño, el cual está orientado a diseñar unidades Convencionales, Mark II y Aerobalanceadas.

Con la finalidad de dar a conocer los diferentes sistemas artificiales de producción existentes en la actualidad y establecer los factores que influyen en su selección, en el Capítulo I se presenta la selección del sistema artificial de producción; así mismo, se incluyen las ventajas y desventajas de cada uno de éstos.

Mientras que en el Capítulo II, se realiza la descripción del sistema de bombeo mecánico, así como también se detallan las partes que lo conforman. Adicionalmente, se presenta la filosofía de operación de las unidades de bombeo mecánico no tan comunes como la unidad Hidroneumática y la Rotaflex.

Por lo que respecta al Capítulo III, éste muestra el análisis del sistema de bombeo mecánico, a partir del cálculo de los diferentes parámetros de diseño (se incluyen ejemplos y comentarios prácticos que ayudan a su comprensión).

Por otra parte, el Capítulo IV, describe paso a paso el procedimiento de diseño del sistema de bombeo mecánico, con base en la guía API RP 11L para el diseño de estos sistemas, el cual cuenta con correlaciones, además presenta un ejemplo ilustrativo, complementándolo con un estudio básico de cartas dinamométricas.

El programa de cómputo aplicado al procedimiento de diseño API RP 11L, se presenta en el Capítulo V, en el cual también se describe la teoría de la técnica numérica conocida como *Spline Cúbico*-interpolación en tres dimensiones-. También se detalla la descripción del programa de cómputo RodSystem y las subrutinas empleadas.

Con el propósito de validar los resultados de RodSystem, en el Capítulo VI se muestra un análisis comparativo entre el programa desarrollado-RodSystem-, con información publicada en la literatura, datos de campo y programas comerciales.

Finalmente, en el Capítulo VII, se establecen una serie de conclusiones y recomendaciones, determinadas a partir de los resultados obtenidos por el programa RodSystem, el análisis de estos con otros elementos y la experiencia del personal experto en el diseño, instalación, operación y mantenimiento de sistemas de bombeo mecánico.

1. SELECCIÓN DEL SISTEMA ARTIFICIAL DE PRODUCCIÓN

1.1 SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN

Si la presión de yacimiento no es suficiente para vencer la presión hidrostática, el petróleo no fluirá independientemente de la cantidad de petróleo en el yacimiento, por lo que es necesario implementar Sistemas Artificiales de Producción (SAP) para recuperar el petróleo que no fue posible extraer en la etapa natural del mismo. Estos sistemas involucran métodos de transmisión de energía al fondo del pozo para complementar el empuje natural del yacimiento.

En el diseño de un sistema artificial, el ingeniero está enfrentado a combinar las compatibilidades del sistema y la productividad del pozo, con el fin de obtener una instalación eficiente. En la actualidad con el incremento del costo de la energía, se hace énfasis en que debe obtenerse la mejor eficiencia posible, por lo que surge una pregunta básica: ¿cómo determinar cuál es el SAP más conveniente a aplicar en un campo determinado? La respuesta a esta pregunta nos lleva a una evaluación de factores, tanto físicos como económicos.

Por lo anterior, entre los aspectos más importantes a considerar están la presión de yacimiento y la productividad del pozo. En una gráfica de gasto contra presión de fondo fluyendo se pueden observar dos comportamientos. Por arriba de la presión del punto de burbuja la gráfica se comporta como una línea recta, y cuando la presión cae por debajo del punto de burbuja se presenta una curva como la descrita por Vogel. Algunos tipos de sistemas artificiales son capaces de reducir la presión de producción a un nivel más bajo en comparación con otros. La ventaja de lograr una presión de producción más baja depende del tipo de relación de productividad. Por ejemplo, un pozo con una presión de yacimiento de $2,000 \text{ lb/pg}^2$ y una presión en la cabeza de 500 lb/pg^2 estará produciendo a 75 % de su gasto máximo si el pozo tiene una relación de productividad en línea recta. Por otro lado si sigue un comportamiento de la curva de Vogel estará produciendo a 90% de su gasto máximo.

Se deben considerar las características de los fluidos de yacimiento y la producción de sólidos, como las parafinas y la arena. La relación gas-líquido es muy importante para el diseño del sistema artificial, debido a que el gas es un problema en todos los sistemas artificiales, excepto para el bombeo neumático, debido a que éste utiliza la energía contenida en el gas producido para complementar así la fuente de energía.

Otro aspecto que necesita considerarse es el comportamiento del yacimiento a largo plazo. En ocasiones se puede operar eficientemente a corto plazo, sin embargo, si no se considera un comportamiento a futuro, tal vez llegue el momento en que se tenga que cambiar el sistema artificial. Si se considera toda la vida productiva del yacimiento puede elegirse un sistema artificial que satisfaga la vida entera del yacimiento. El ingeniero de diseño debe considerar ambos aspectos, a largo plazo y a corto plazo.

La decisión para la implementación de SAP se sustenta en factores económicos. El costo de los equipos es alto, sin embargo, esta inversión es más que recompensada con el incremento de la producción; de hecho los SAP a menudo son usados para incrementar ésta cuando el pozo todavía es capaz de fluir.

Existen varios tipos de sistemas artificiales de producción, dentro de los más empleados en la industria del petróleo se tienen los siguientes:

- Bombeo mecánico
- Bombeo neumático
- Bombeo electrocentrífugo
- Bombeo hidráulico
- Bombeo de cavidades progresivas

1.1.1 Bombeo Mecánico (BM)

Es de los primeros sistemas artificiales de producción y por consiguiente el más ampliamente usado. “El 85 % de los pozos producidos artificialmente en Estados Unidos se operan con bombeo mecánico, de estos alrededor del 79 % producen menos de 10 barriles de aceite por día y son clasificados como pozos agotados” (Gipson, 1981). En México este sistema artificial representa el segundo más implementado- después del bombeo neumático-.

El bombeo mecánico puede operar eficientemente sobre un amplio rango de características de producción de pozo, se considera para levantar volúmenes moderados desde profundidades someras, y volúmenes pequeños desde profundidades intermedias. Si los fluidos del pozo no contienen ácido sulfúrico, o si se usan varillas de succión especiales, es posible levantar 1,000 bpd desde aproximadamente 14,000 pie. Si los fluidos del pozo contienen ácido sulfúrico, el sistema de bombeo mecánico puede levantar 1,000 bpd desde 4,000 pie y 200 bpd desde 10,000 pie. La mayoría de las partes del sistema de BM están

certificadas por estándares internacionales, los cuales han sido establecidos por el *American Petroleum Institute* (API). Numerosas refacciones pueden sustituir cada parte y todos sus componentes interconectados son estándar.

Ventajas:

- Tiene un diseño simple, lo cual permite ser familiar para ingenieros de diseño y el personal operativo.
- Baja inversión para producción de volúmenes bajos.
- Profundidades someras a intermedias (7,800 pie).
- Adaptable a pozos con una desviación moderada.
- Permite producir con niveles de fluidos bajos.
- Es adaptable a pozos con problemas de corrosión e incrustaciones.
- Es un sistema económico.

Limitaciones:

- La capacidad para manejar arena es limitada.
- La parafina y el sarro interfieren con la operación eficiente de estos sistemas.
- Se corre el riesgo de que el prensaestopas de la varilla pulida se salga de su lugar.

1.1.2 Bombeo Neumático (BN)

Bombeo Neumático Continuo (BNC). “Es recomendado para pozos de volumen y presión de fondo estática altos. Es una excelente aplicación para formaciones del tipo clástico marinas con empuje de agua” (Clegg, 1981), o yacimientos con inyección de agua con buen Índice de Productividad (IP) y alta Relación de Gas Aceite (RGA). “Cuando el gas está disponible a alta presión sin compresión o cuando el gas está a bajo costo, el bombeo neumático continuo es especialmente atractivo”(Clegg, 1981).

Ventajas:

- Es el mejor sistema artificial para manejar arena, debido a que ésta no causa ningún problema a las válvulas de bombeo.
- En pozos desviados el BN sólo tiene problemas menores, los cuales existen principalmente en plataformas marinas.
- El BN permite el uso de línea de acero para algunas reparaciones de rutina.

- La instalación típica permite el uso de medidores de presión de fondo, registros de producción, cortes de parafina, entre otros.
- La alta RGA de formación es una excelente ayuda.
- El equipo superficial es relativamente barato y el equipo subsuperficial es fácil de reparar y/o reemplazar.
- La instalación de BN es compatible con las válvulas superficiales de seguridad.

Limitaciones:

- Una contrapresión relativamente alta puede restringir seriamente la producción en el BNC.
- Los costos de compresión son relativamente altos.
- Se requiere de un suministro de gas durante toda la vida del proyecto.
- La operación y mantenimiento de compresores es caro.

Bombeo Neumático Intermitente (BNI). Es generalmente usado en pozos que producen bajos volúmenes de fluido y se recomienda en pozos de alto Índice de Productividad (IP) y baja presión de fondo de pozo, o bien, bajo IP y alta presión de fondo de pozo.

El BNI cuenta con ventajas y limitaciones similares al BNC:

Ventajas:

- El BNI tiene una presión de fondo fluyendo más baja que los métodos de flujo constante.
- Cuenta con la capacidad de manejar bajos volúmenes de fluido con baja presión de fondo fluyendo.

Limitaciones:

- El BNI está limitado a pozos de bajo volumen. Por ejemplo, un pozo de 8,000 pie con tubería de producción de 2 pg puede rara vez manejar un gasto por arriba de 200 bpd con una presión de producción promedio por abajo de 250 lb/pg².
- La variación entre el gasto y la presión de fondo puede ser perjudicial para pozos con control de arena, debido a que ésta puede taponar la tubería de producción o la válvula estacionaria de la bomba subsuperficial.

- El BNI requiere ajustes muy frecuentemente. El operador debe ajustar la velocidad de inyección para incrementar la producción y reducir el volumen de gas.

1.1.3 Bombeo Electrocentrífugo (BEC)

“En abril de 1965 se construyó la compañía Thums Long Beach, la cual tenía como propósito perforar, desarrollar y producir 6,479 acre del campo Wilmington, a lo largo de la costa de California, E. U. A. Para llevar a cabo tal fin fue necesario elegir el mejor sistema artificial de producción para aproximadamente 1,100 pozos desviados por un periodo de 35 años, desde 4 islas principales en zona marina y una isla en la costa. Después de una minuciosa evaluación se determinó que el sistema de BEC era el más adecuado para explotar el campo”(Capps, 1981).

Ventajas:

- Adaptable a pozos altamente desviados, por arriba de 80°.
- Adaptable a cabezas de pozo subsuperficiales requeridas de 6 pg.
- Permite usar un espacio mínimo para controles subsuperficiales e instalaciones de producción asociadas.
- El sistema es silencioso, seguro, limpio y de fácil implementación en plataformas marinas
- Generalmente considera una bomba de volumen alto para incrementar el gasto.
- Permite poner el pozo en producción inmediatamente después de realizar actividades de perforación y/o terminación.
- Buena capacidad para producir volúmenes altos de fluido desde profundidades someras a intermedias.
- Baja inversión para profundidades someras.
- Adaptable a la automatización.
- Es aplicable a profundidades de hasta 4,200 m.

Limitaciones:

- Tolera porcentajes mínimos de producción de sólidos (arenas).
- Las operaciones de reparación son costosas.
- No se recomienda para volúmenes bajos (menores a 150 bpd).
- El cable eléctrico es la parte más débil del sistema.
- Poca flexibilidad para variar condiciones de producción.

- Tiempos de cierre prolongados.
- Requiere instalaciones de suministro de energía eléctrica.
- Los problemas de incrustaciones contraen muchos problemas en la operación.
- Dificultad para manejar volúmenes altos de gas.

1.1.4 Bombeo Hidráulico (BH)

Actualmente existen dos tipos de bombeo hidráulico en el mercado: Bombeo Hidráulico de Desplazamiento Positivo (BHDP) y Bombeo Hidráulico tipo Jet (BHJ). El BHDP consta de un motor hidráulico recíprocante directamente acoplado a un pistón o émbolo de la bomba. El fluido motor (aceite o agua) está por abajo de la sarta de la tubería de producción para operar el motor. El émbolo de la bomba arrastra fluido desde el agujero del pozo a través de una válvula estacionaria, luego entonces, el fluido de poder y la producción son regresados hacia arriba de la pequeña sarta de producción.

La bomba tipo Jet requiere de fluido a alta presión dirigido del fondo de la tubería de producción hacia la tobera, donde la presión se convierte en velocidad. Los fluidos disminuyen la velocidad al entrar en el cuello de la bomba, por lo que un difusor reduce la velocidad e incrementa la presión para permitir que la mezcla de fluidos suba hacia la superficie.

Ventajas:

- Es de uso frecuente en plataformas marinas, localizaciones remotas, áreas pobladas y de agricultura.
- La bomba de desplazamiento positivo es capaz de bombear en profundidades de hasta 17,000 pie, y más profundas.
- El bombeo puede ajustarse desde un 10% hasta un 100% de la capacidad de la bomba. El rango de velocidad óptimo es del 20 a 85 %.
- La bomba hidráulica no presenta problemas para pozos desviados.
- Debido a que las bombas tipo Jet no tienen partes móviles, pueden manejar muy bien arenas y otros sólidos.
- Puede manejar aceites viscosos sin dificultad.

Limitaciones:

- Las bombas de desplazamiento positivo, en promedio tienen vida más corta por reparaciones en comparación con los sistemas tipo Jet, mecánico y electrocentrífugo.
- Mientras que la bomba de desplazamiento positivo puede bombear a una presión de fondo muy baja, el bombeo tipo Jet no puede. El bombeo tipo Jet requiere aproximadamente una presión de fondo de 1,000 lb/pg² cuando se sitúa a 10,000 pie y aproximadamente 500 lb/pg² cuando se sitúa a 5,000 pie.
- Las bombas de desplazamiento positivo generalmente requieren personal de operación altamente calificado, sin embargo el tipo Jet no. Hay dos razones: primero, la velocidad de la bomba debe ser monitoreada diariamente debido a que no debe ser excesiva, y segundo, los sistemas de limpieza del fluido de poder necesitan frecuentemente monitoreo y ajuste para obtener una óptima efectividad.

1.1.5 Bombeo de Cavidades Progresivas (BCP)

Están diseñadas para operar en pozos de profundidades que van desde los 1,900 pie hasta 4,600 pie. Este sistema no es afectado por los candados de gas y es capaz de levantar sedimentos que se encuentran en el interior del pozo, como son: grumos de carbonato de calcio, polisulfuros, lútitas y/o arcilla, aceite viscoso, óxido de la tubería, entre otros.

Ventajas:

- Bajas inversiones para pozos someros y bajos volúmenes de fluido.
- Buena eficiencia hidráulica (50-70 %).
- Fácil de instalar y operar.
- Excelente para manejar arena.
- Opera en pozos con aceite viscoso, grumos de carbonato, lútitas y/o arena, polisulfuros, parafina y gas libre.
- El sistema de bombeo es impulsado por un motor eléctrico, por lo que requiere menos suministros de energía.
- El rango de bombeo se puede variar fácilmente cambiando poleas y bandas o utilizando un controlador de velocidad variable.
- El sistema es capaz de manejar un amplio rango de condiciones del pozo, utilizando solamente una bomba.

Limitaciones:

- Es un sistema relativamente nuevo, por lo que se debe capacitar al personal.
- Baja eficiencia para manejar gas.
- Profundidad limitada de bombeo; hasta ahora la máxima profundidad de bombeo es de 5,000 pie.
- Otra de las desventajas es la temperatura que se tiene en los pozos, debido a que la camisa de la bomba tiene un hule sintético que cuando rebasa la temperatura de 85°C se empieza a endurecer, incrementando así la fricción en el rotor de la bomba, que de continuar en tal situación, puede dañar el motor eléctrico instalado en la superficie.

1.2 MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN

Los problemas operativos como arena, parafina, sarro, corrosión, emulsiones, temperatura y clima superficial pueden ser factores críticos en muchos sistemas artificiales de producción; por ejemplo, la producción de arena causa problemas de erosión en todos los sistemas excepto en el neumático, debido a que en éste no se necesita que el fluido con arena pase a través de su mecanismo (válvulas). La acumulación de parafina en la parte superior de la tubería de producción, árbol de válvulas o líneas de descarga, causará una contrapresión que reducirá la eficiencia de cualquier sistema.

Los SAP requieren que sus elementos se mantengan en las mejores condiciones con el fin de rendir a la máxima eficiencia. La tubería del bombeo neumático puede obstruirse con la acumulación de sólidos, o bien presentar fugas o escurrimientos por desgaste y corrosión (causada por la interacción entre los diferentes tipos de metal con ácido sulfhídrico, bióxido de carbono, agua salada, entre otros). Las válvulas y asientos de las bombas se desgastan por la operación continua y la abrasión de la arena, y llega el momento en que no son efectivos para cerrar bajo las altas presiones impuestas sin escurrimiento. La holgura entre el émbolo de la bomba y el barril de trabajo o camisa puede aumentar por el desgaste, o las copas del émbolo pueden desgastarse y deformarse, de tal modo que el deslizamiento del aceite ocurre alrededor del émbolo. Por otro lado, el sarro adherido a la tubería de producción también reducirá el diámetro interior y además reducirá la eficiencia.

En el BM la sarta de varillas de succión genera fricción en el interior de la tubería de producción, provocando agujeros que se traducen en pérdidas de aceite, y en el peor de los casos las juntas de las varillas pueden desgastarse tanto que éstas se desprenden.

Estas dificultades son comunes en la operación de los pozos y requieren la atención continua de las cuadrillas de reparación. Los pozos que están inactivos debido a la falla del equipo de bombeo deben recibir atención inmediata, de manera que se pueda reanudar la producción tan pronto como sea posible. La observación continua del funcionamiento, medición del desempeño e inspección del equipo del pozo, con frecuencia dará señas de ineficiencias mecánicas y de deterioro, que origina reparación o reposición de las partes móviles, antes de que ocurra una falla más severa que ponga en riesgo la seguridad o la producción.

1.3 FACTORES A CONSIDERAR EN LA SELECCIÓN DEL SISTEMA ARTIFICIAL DE PRODUCCIÓN

Existen varios factores que deben considerarse en la selección y diseño de los sistemas artificiales de producción, dentro de los cuales podemos mencionar los siguientes:

Productividad del pozo. El gasto deseado es el factor más significativo para la selección de un método artificial de producción, por lo que es importante contar con los datos de producción necesarios para construir la gráfica del comportamiento de afluencia (IPR, conocido por sus siglas en inglés *Inflow Performance Relationship*) del pozo. Con esta gráfica se determina fácilmente la capacidad productiva del pozo y puede verificarse que el gasto deseado, sea menor que el gasto máximo del pozo. Para hacer una buena comparación, entre los gastos obtenidos por los diferentes métodos de producción artificial, es necesario establecer curvas de presión de fondo para cada método, mediante un análisis nodal. La intersección de cada una de estas curvas de presión, con la curva del IPR, mostrará el gasto para cada método en particular.

Presión de yacimiento. Los niveles estáticos y dinámicos del fluido en el pozo responden al grado de presión que haya en el yacimiento, este es el segundo factor más importante para hacer una buena selección del SAP y está relacionado directamente con el potencial de productividad del pozo.

Producción de gas esperada. El gas que pasa a través de un sistema artificial de producción, reduce considerablemente la cantidad de líquido producido en todos los sistemas de bombeo, dejando así al BN como el sistema con menos deficiencias en el manejo de altas RGA. En algunos sistemas se pueden presentar candados de gas, sin embargo, es un hecho que el volumen de gas aportado por el yacimiento se debe desplazar. En el caso del bombeo electrocentrífugo, éste pierde eficiencia cuando maneja un líquido

que contenga tan sólo un 10% de gas, mientras que con grandes producciones de gas, el bombeo mecánico puede presentar un candado de gas total. El bombeo hidráulico tipo pistón no presenta candado de gas, no obstante éste debe ser desplazado y esto reduce la cantidad de líquido. Finalmente, para el caso del bombeo tipo Jet el gas libre también reduce su capacidad al manejar líquidos.

Costo de producción. Este factor es de gran importancia económica y es de especial interés para el pozo productor, debido a que su ganancia se determina por la diferencia entre el precio de venta y el costo de producción. El productor de petróleo depende de los datos de costos para determinar cual de los diversos sistemas artificiales será el que representa más ventaja.

Profundidad de bombeo. Las bombas se colocan arriba del intervalo productor, a una distancia tal que la presión hidrostática que ejerce el fluido (en condiciones dinámicas) sea igual a la presión de fondo fluyendo del pozo (a este punto se le conoce como punto efectivo de colocación).

Flexibilidad. Este factor permite cambiar el gasto conforme las características del yacimiento varían. El gasto original puede cambiar por las razones siguientes: (a) disminución de la productividad del pozo, debido a la reducción de la presión estática de fondo; (b) Incremento de la productividad del pozo, debido a la implementación de un método de recuperación secundaria; (c) errores en los datos originales del pozo, o en correlaciones de flujo multifásico; (d) excesiva producción de arena, conificación, entre otros.

Espacio superficial. La localización del pozo puede ser crítica para algunos sistemas artificiales. Por ejemplo, el bombeo mecánico no se considera para pozos marinos, debido a que el espacio es reducido, además de que la mayoría de estos pozos presentan mayor ángulo de inclinación. El bombeo neumático, el electrocentrífugo y el hidráulico tipo pistón, son los sistemas más aceptados en pozos marinos donde la disponibilidad de espacio es crítica.

Aceite viscoso. La producción y el correcto manejo de aceites pesados es cada día más recurrente. La mayor parte de los yacimientos que tienen aceites pesados, producen con el sistema de bombeo mecánico. Sin embargo, el bombeo hidráulico ofrece una manera efectiva de mezclar un aceite ligero con un aceite viscoso, reduciendo la viscosidad del aceite producido, aunque esta práctica debe tomarse con reservas.

Clima. Para el caso de climas cálidos, en ocasiones se requieren sistemas especiales de enfriamiento. Por el contrario, los climas fríos causan congelamiento de combustible y fragilización en las conexiones eléctricas, por lo que se hace necesario la instalación de sistemas de calefacción y aislantes especiales. Por otra parte, el viento y el polvo también pueden ocasionar problemas de operación.

Temperatura de operación. Los pozos que presentan temperaturas altas en el fondo, reducen la vida productiva de algunos sistemas artificiales. El motor eléctrico y el cable conductor de corriente presentan graves problemas con temperaturas mayores a los 165 °C, por lo que se requieren sellos especiales en todo el equipo, incluyendo el empacador, la tubería, el cabezal, entre otros.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

El Sistema de Bombeo Mecánico (SBM) tiene como objetivo elevar los fluidos a la superficie cuando el pozo ha dejado de fluir por la presión natural del yacimiento con un mínimo de:

- Torsión.
- Carga en la varilla pulida.
- Rango de cargas en las varillas.
- Requerimientos de potencia del motor principal.
- Costos de combustible, instalación y mantenimiento de la unidad.
- Fallas de varillas.

Adicionalmente, el SBM debe ser resistente, de larga vida, eficiente y barato de transportar; silencioso, no contaminante, y seguro de instalar y de operar. Los componentes generales del SBM son:

- 1) La Unidad de Bombeo Mecánico (UBM).
- 2) Mecanismos superficiales.
- 3) Sarta de varillas de succión.
- 4) Bomba subsuperficial.
- 5) Motor principal.
- 6) Unidad de transmisión de potencia o reductor de velocidad.
- 7) Tubería de producción.

2.1 UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO (UBM)

Una UBM es un “mecanismo que imparte un movimiento reciprocante a una varilla pulida, la cual a su vez es suspendida a la sarta de varillas de succión, debajo del prensaestopas de la cabeza del pozo”(Griffin, 1989). Hoy en día están disponibles varios tipos de unidades, los componentes subsuperficiales de la mayoría son los mismos, sin embargo el arreglo de sus componentes superficiales difiere. El montaje en la mayoría de las UBM es el método de contrabalanceo, el cual en el mayor de los casos consta de pesos ajustables a las manivelas de rotación o bien de presión de aire empujado hacia arriba para levantar el balancín. Cualquier tipo de sistema de contrabalanceo se opone al peso de la sarta de varillas de succión y al de los fluidos.

En el presente trabajo se describen las UBM de balancín (Convencional, Mark II y Aerobalanceada), la UBM hidroneumática (también conocida como Tieben) y la UBM de banda (también conocida como RotaFlex).

2.1.1 Unidades de Bombeo Mecánico de Balancín (UBMB)

Este tipo de unidades tiene cinco elementos principales:

1. Estructura del balancín de bombeo.
2. Motor primario.
3. Caja de engranes.
4. Sarta de varillas de succión.
5. Bomba subsuperficial.

El motor primario es la máquina que proporciona la potencia primordial a toda la operación de bombeo; conectada a esta máquina está la banda en V que transmite la potencia del motor a la caja de engranes que se encarga de reducir la alta velocidad que genera el motor a la velocidad requerida por la UBM. La estructura del balancín se encuentra en superficie y convierte los efectos oscilatorios y rotatorios del balancín y del motor en el movimiento oscilatorio pero lineal de la varilla situada al frente. La primera varilla es el varilla pulida que se encuentra conectado a la sarta de varillas; la bomba subsuperficial se encuentra ubicada en el subsuelo, cerca del horizonte productivo. Además de los elementos esenciales mencionados arriba, las UBM de balancín cuentan con miembros estructurales, cojinetes o apoyos y un transmisor.

La estructura está conformada por el poste Sampson, el balancín, la cabeza de caballo, el igualador o compensador, y los brazos laterales (bielas). La base estructural sirve como un elemento rígido, el cual sostiene al poste Sampson, al reductor de engranes, y el motor primario.

El poste Sampson está constituido por tres o cuatro patas de acero, debe ser suficientemente rígido y fuerte para soportar por lo menos dos veces la carga máxima de la varilla pulida. El soporte central del poste Sampson soporta al balancín, éste debe resistir los esfuerzos causados por la carga del pozo por un lado y la fuerza actuante de las bielas por el otro.

La cabeza de caballo es suspendida al final del balancín y soporta la varilla pulida a través de una línea de acero y una barra portadora. La varilla pulida se mueve en una línea recta

tangente al arco de la cabeza de caballo; al otro lado del balancín está el igualador y los brazos laterales de la biela. El movimiento rotatorio de las manivelas, suspendidas al eje de baja velocidad del reductor, es transferido al balancín a través del igualador y las bielast.

La banda en "V" es el medio de transmisión entre el motor primario y el reductor de engranes de la UBM. Se provee una cubierta o guarda bandas para protegerla de los elementos y para la propia seguridad del personal. Así mismo la unidad está provista de cojinetes estructurales que sirven como ejes de rotación de los diferentes componentes de la unidad (ver Figuras 2.1 y 2.2).

UBM Convencional (UBMC)

Hoy en día es la UBM más usada, especialmente en cortas y medianas longitudes de carrera. La Figura 2.1 muestra este tipo de unidad, en donde la rotación de las manivelas, conectadas a los elementos laterales de la biela, causan que el balancín gire alrededor del soporte central, lo cual permite que la varilla pulida se mueva hacia arriba y hacia abajo a través de su conexión hacia la línea de acero y la cabeza de caballo; su rotación es en contra del sentido de las manecillas del reloj; los contrapesos ajustables, localizados sobre las manivelas son piezas fundidas de metal pesado.

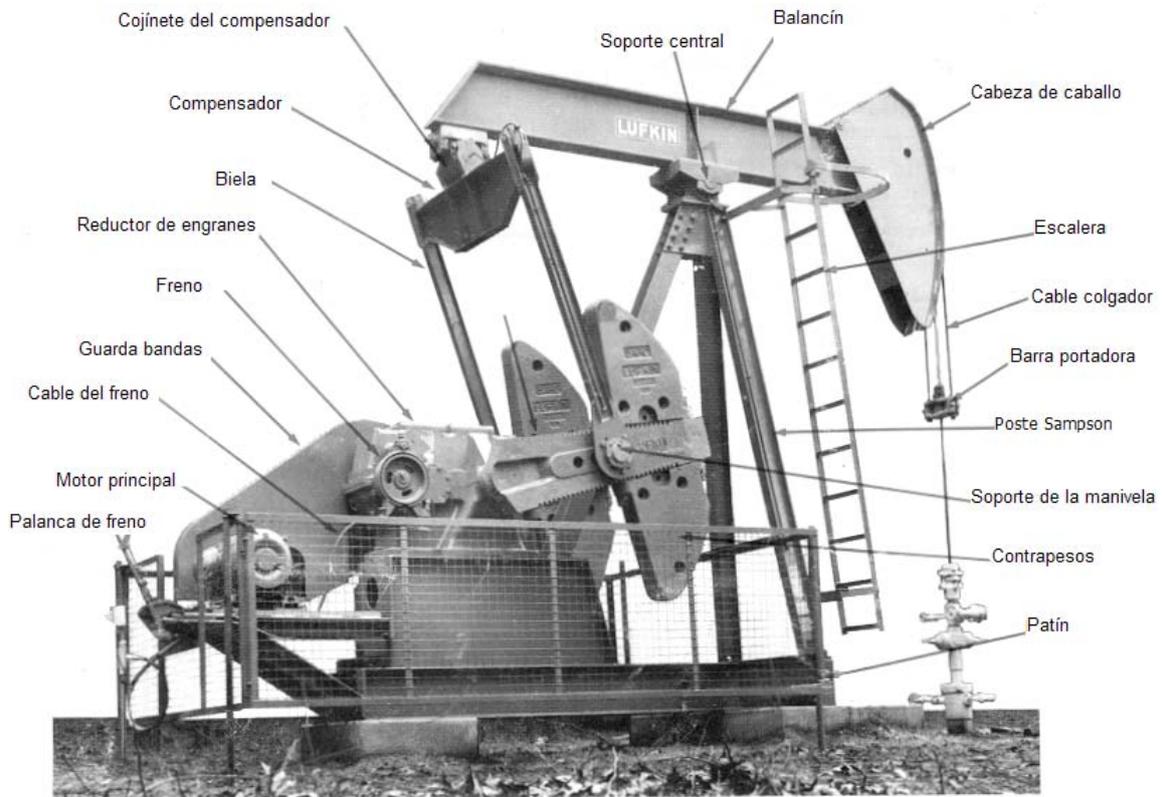


Figura 2.1. UBM Convencional.

UBM Mark II (UBMM)

La Figura 2.2 muestra a la unidad Mark II con sus diversas partes etiquetadas. Su rotación es conforme a las manecillas del reloj, ya que su sistema de lubricación en el reductor es exclusivamente para esta rotación. El soporte de unión transversal, el cual es actuado por las bielas es movido hacia delante y es localizado muy cerca de la cabeza de caballo en lugar que directamente sobre el cigüeñal del reductor de engranes. Los torques pico normalmente más prominentes en la unidad convencional son reducidos en magnitud.

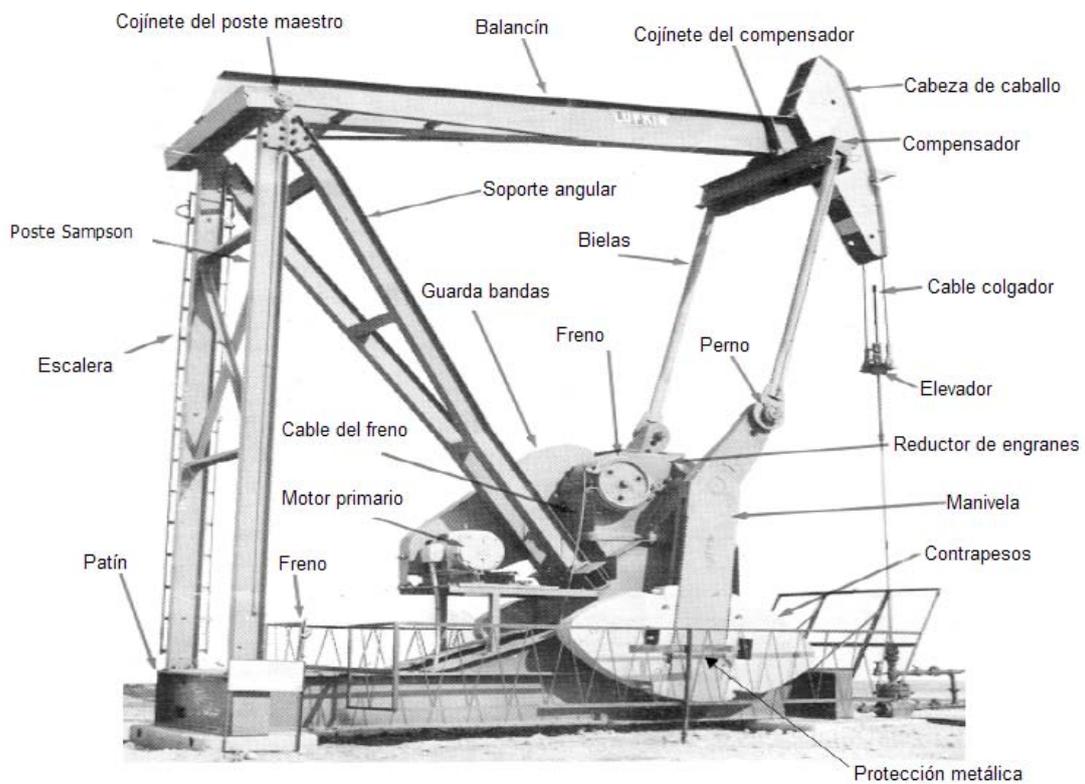


Figura. 2.2. UBM Mark II.

UBM Aerobalanceada (UBMA)

El balanceo de esta unidad es a través de aire suministrado por un motocompresor hacia un cilindro amortiguador (ver Figura 2.3). El motocompresor se calibra a un paro y a un arranque automático, dependiendo del peso de la sarta de varillas para que el motor principal opere sin esfuerzos. Su rotación y el sistema de lubricación del reductor son iguales al de la unidad convencional.

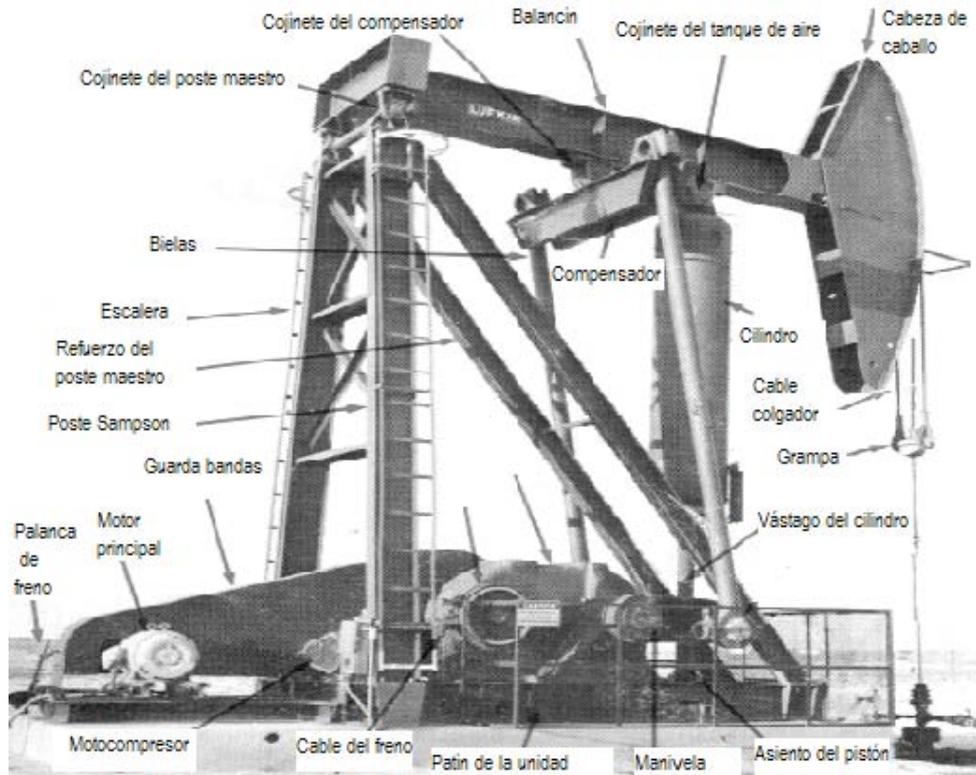


Figura 2.3. UBM Aerobalanceada.

2.1.2 Unidad de Bombeo Mecánico Hidroneumática (UBMH)

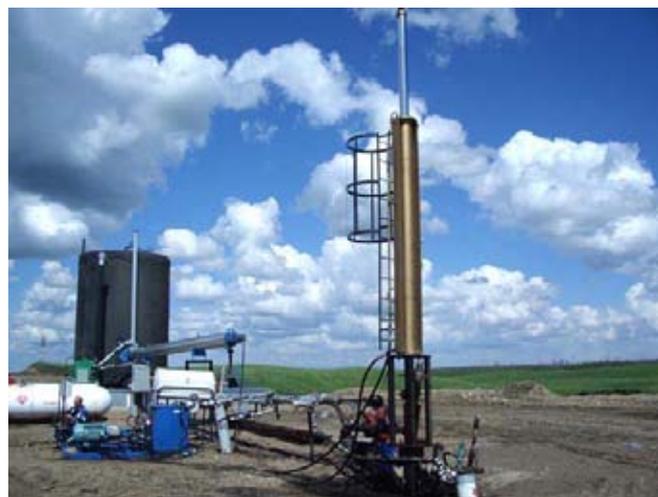


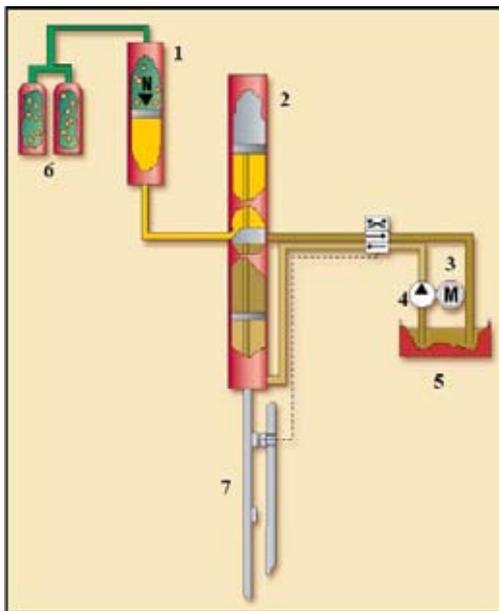
Figura. 2.4. UBM Hidroneumática.

Es un sistema alternativo para el movimiento de varillas, su principio de funcionamiento está basado en presiones hidráulicas compensadas por la compresión y expansión de

nitrógeno; este nitrógeno que se encuentra dentro de un acumulador soporta dos terceras partes de la carga total de la varilla pulida y reemplaza a los contrapesos de una UBM convencional.

Con el principio de la unidad hidroneumática se pueden levantar cargas de hasta 40,000 lb en el varilla pilida, con una carrera máxima de 120 pulgadas y con hasta ocho emboladas por minuto. Estas dos últimas variables pueden ser modificadas según se desee.

La Figura 2.5 muestra las partes principales de la UBM hidroneumática.



1. Acumulador.
2. Cilindro actuador.
3. Motor.
4. Bomba hidráulica.
5. Tanque de aceite hidráulico.
6. Botellas de carga de N₂.
7. Pedestal.

Figura 2.5. Partes principales de la UBM Hidroneumática.

El acumulador es el componente que proporciona el efecto de contrapeso a la unidad, es un cilindro con un pistón flotante en su interior, en el cual actúan aceite hidráulico y nitrógeno (N₂) comprimido. Por su parte el cilindro actuador tiene dos pistones solidarios a una barra pulida, estos generan tres cámaras en las cuales actuará el aceite hidráulico (ver Figura 2.6). El motor es el elemento que proporciona la potencia a la bomba hidráulica, la cual está conectada al tanque de aceite hidráulico.

El pedestal es una torre de 7 m de altura en donde se alojan los sensores de proximidad para el cambio de dirección de la carrera. En él también se acopla el cilindro actuador dando una altura total de 13 m para las unidades de 120 pg.

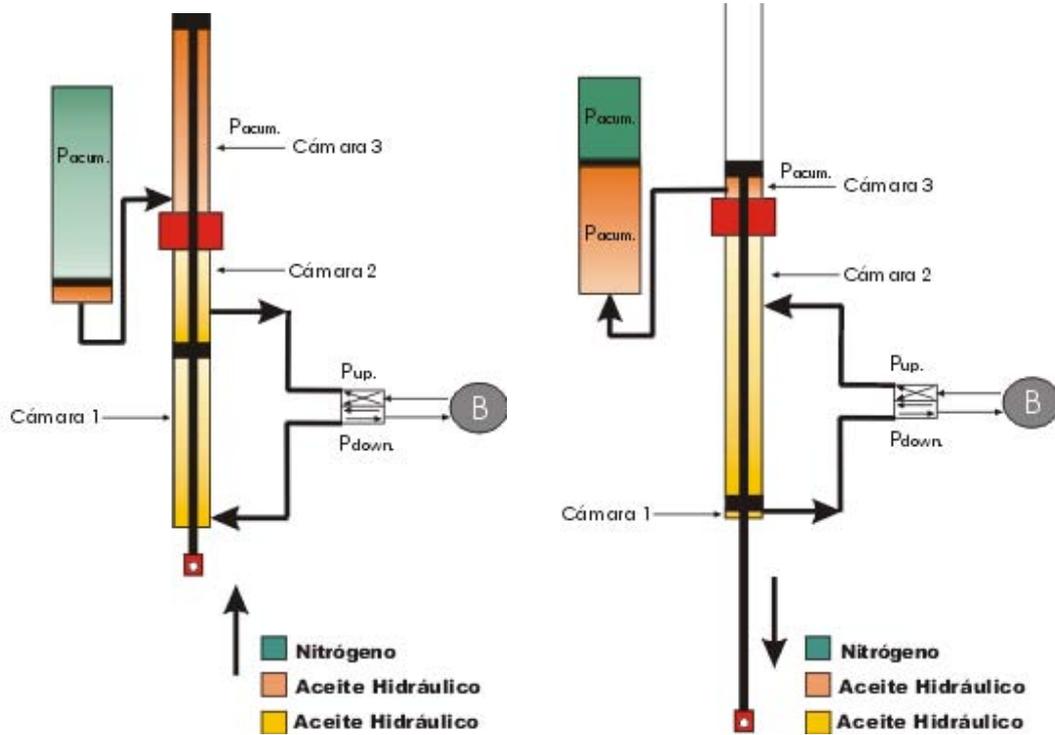


Figura 2.6. A. Carrera ascendente.

Figura 2.6. B. Carrera descendente.

Figura 2.6. Operación de la UBM Hidroneumática.

Filosofía de operación de la UBMH (Tieben)

El N₂ empuja hacia abajo el pistón flotante del acumulador, el cual presiona al aceite hidráulico a circular hacia la cámara superior del cilindro actuador, al mismo tiempo la bomba hidráulica suministra aceite a la cámara inferior del cilindro actuador y de esta forma es levantada la varilla pulda, esto es hasta que el sensor superior recibe la señal para finalizar la carrera ascendente. El sensor superior emite una señal la cual genera el cambio de dirección del fluido hidráulico proveniente de la bomba hidráulica.

Al invertir la circulación del fluido hidráulico se comienza a llenar la cámara intermedia del cilindro actuador, obteniendo que la varilla pulda comience a descender. El fluido hidráulico de la cámara superior del cilindro actuador, que provenía del acumulador, comienza a ingresar nuevamente a este último comprimiendo al N₂. La carrera descendente llega a su fin cuando el carro colgador sensa el sensor inferior, el cual emite una señal para que se realice la carrera ascendente.

2.1.3 Unidad de Bombeo Mecánico RotaFlex (UBMR)



Figura 2.7. UBM RotaFlex.

Este tipo de unidad opera con contrapesos de hierro, al igual que las unidades de balancín, pero a diferencia de estas el contrabalanceo tiene una trayectoria vertical de ascenso y descenso. Está diseñada para altos volúmenes de producción y tienen una carrera de 288 y 306 pulgadas. Esta carrera más larga permite que se trabaje a menores regímenes, esto redundaría en una mayor vida útil de la instalación, especialmente de la tubería de producción y las varillas de bombeo, sometidas a cargas cíclicas.

El mecanismo de inversión de la carrera trabaja a través de una cadena que es accionada por la caja reductora a través de una corona. El diámetro de esta corona es de 18 pulgadas, permitiendo que se pueda trabajar con cajas reductoras de menor capacidad que un aparato convencional de proporciones similares.

La Figura 2.8 muestra los componentes básicos y su mecanismo de inversión.

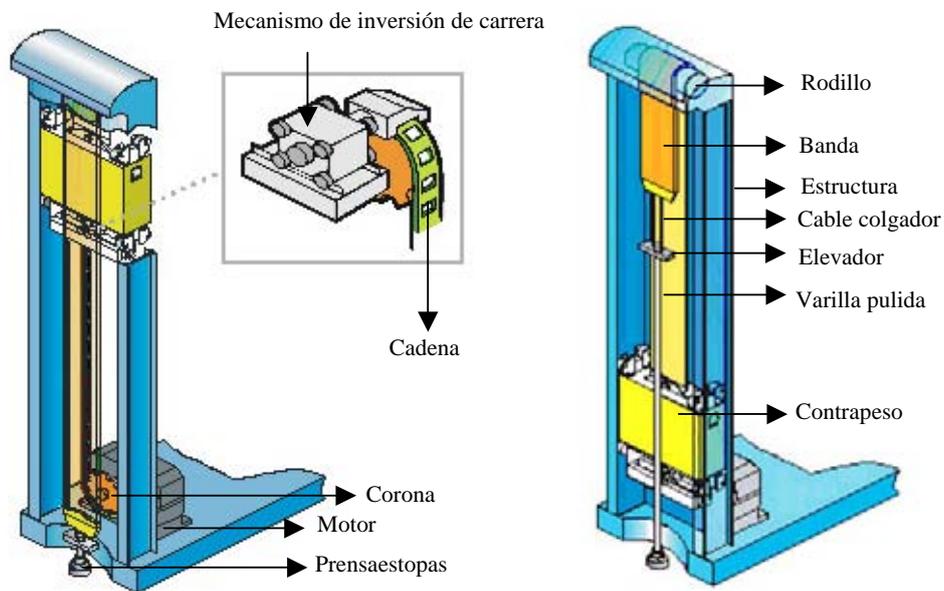


Figura 2.8. Unidad de Bombeo Mecánico RotaFlex.

Solidario a uno de los eslabones de la cadena está conectado el carro que transmite a la cadena la carga de la caja de contrapesos. La caja de contrapesos está unida a la banda flexible que se desliza sobre la polea superior (rodillo) durante el ciclo de bombeo, esta transmite la fuerza a la varilla pulida mediante el cable colgador.

El sistema de contrapesos es tal que permite un fácil y preciso contrabalanceo. La cadena viaja a una velocidad relativamente constante, mientras que en los límites de las carreras ascendente y descendente experimenta un cambio de velocidad.

Un motor eléctrico está montado en la base de la estructura, éste suministra la potencia necesaria a la unidad durante la carrera ascendente y descendente. El torque que debe transmitir la caja reductora es prácticamente constante a lo largo del ciclo, contrariamente al torque de un aparato convencional, en el que el torque tiene una forma aproximadamente senoidal.

2.2 MECANISMOS SUPERFICIALES

El SBM está provisto de diversos elementos superficiales que son elegidos conforme al diseño del propio sistema. Entre los más importantes se encuentran los siguientes:

- Grampa
- Varilla pulida
- Estopero
- Válvulas de retención y
- Preventores

2.2.1 Grampa

Este dispositivo (ver Figura 2.9) sirve para sujetar la varilla pulida por apriete. Se coloca en forma permanente cuando se le ha dado el espaciamiento adecuado a la bomba subsuperficial para que la UBM quede operando en condiciones normales. También se utiliza para movimientos que se efectúan con la sarta de varillas, ya sea para eliminar un golpe en la bomba subsuperficial, sacar un registro dinamométrico o reanclar una bomba. Cuando quedan permanentes cargan junto con el cable colgador todo el peso de la sarta de varillas y el peso del fluido. Estas grampas pueden usar uno, dos o tres tornillos para el apriete, incrementándose la seguridad con el número de los mismos.

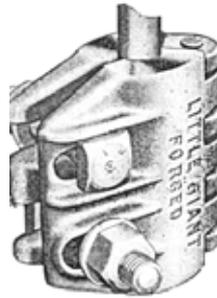


Figura 2.9. Grampa.

2.2.2 Varilla pulida

Es la unión directa entre la sarta de varillas de succión y el equipo superficial, pasa a través de las conexiones verticales del árbol y del estopero. Está fabricada en acero aleado al manganeso, níquel y molibdeno. Superficialmente, la varilla pulida tiene acabado espejo con el propósito de no dañar los sellos del estopero, el cual está fijo al árbol de válvulas en el movimiento ascendente y descendente de la UBM.



Figura 2.10. Varilla pulida.

2.2.3 Estopero

Es un mecanismo de seguridad que se localiza en la parte superior del árbol de válvulas para pozos con SBM y cuya función principal es la de contener los fluidos para que no se manifiesten a su exterior por medio de un conjunto de sellos construidos con materiales resistentes al rozamiento, los cuales se ajustan al diámetro de la varilla pulida de $1\frac{1}{2}$ pg. Debido al movimiento ascendente y descendente los sellos sufren desgaste por lo que es necesario sustituirlos periódicamente, esto se lleva a cabo deteniendo la operación de la UBM.

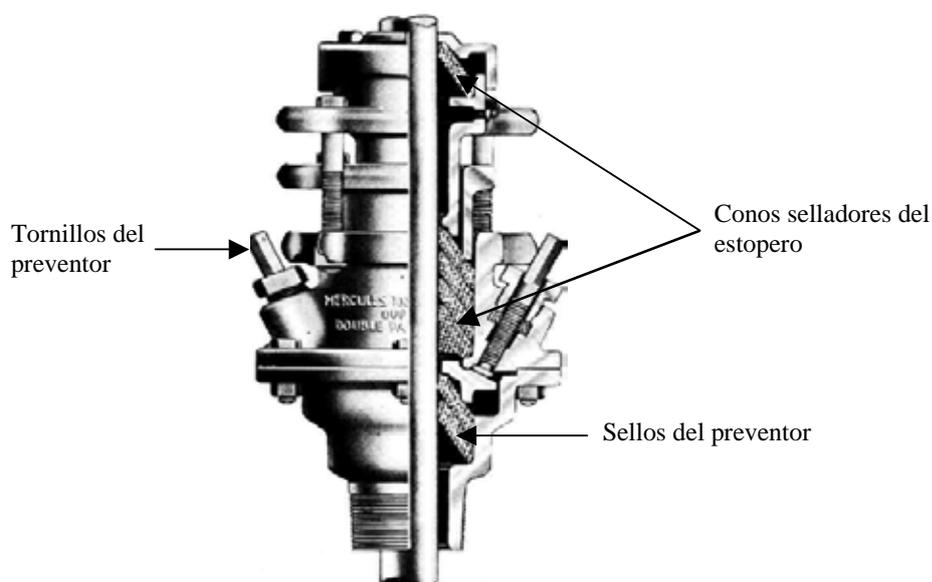


Figura 2.11. Estopero.

2.2.4 Válvulas de retención

El objetivo principal de este tipo de válvulas, conocidas como *check* o válvulas de retención, es el de permitir el paso de un flujo por una línea en una sola dirección, impidiendo así, el regreso del fluido cuando se presenten contrapresiones altas (ver Figura 2.12).

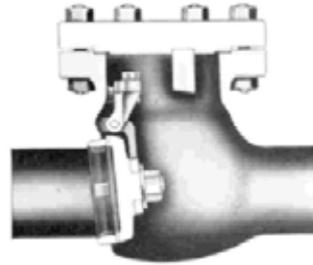
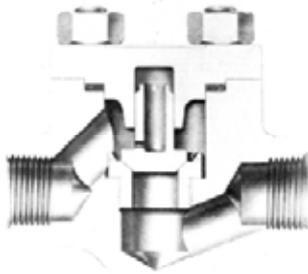


Figura 2.12 a. Válvula tipo pistón.

Figura 2.12 b. Válvula tipo charnela.

Figura 2.12. Válvulas de retención.

2.2.5 Preventores

Son mecanismos de seguridad que han sido diseñados para impedir en caso necesario el paso de fluidos al exterior. Sólo se pueden accionar cuando la UBM no está operando, debido a que en su interior tiene unos sellos de hule llamados "*Rams*", los cuales aprietan a la varilla pulida para sellar y evitan el paso de los hidrocarburos.

Los preventores son vitales para llevar a cabo el cambio de hules (sellos) del estopero colocado en la parte más alta del árbol; también son esenciales para evitar la salida de los hidrocarburos a la atmósfera, cuando por alguna fractura de la varilla pulida ésta se precipite al interior del pozo junto con la sarta de varillas.



Figura 2.13. Preventor Hércules 530.

2.3 VARILLAS DE SUCCIÓN

Este elemento constituye el enlace conector entre la UBM superficial y la bomba subsuperficial, la cual se coloca en o cerca del horizonte productor. El movimiento vertical de la UBM superficial es transferido a la bomba subsuperficial por medio de las varillas de succión.

Hoy en día se usan dos tipos de varillas de succión: las varillas de acero y las de fibra de vidrio. Las varillas de acero se fabrican en longitudes de 25 ó 30 pie y las varillas de fibra de vidrio en longitudes de 37 ½ ó 30 pie. Ambos tipos de varillas son conectadas por un cople de 4 pg de longitud, los extremos de la junta macho de la varilla son unidos a las roscas internas del cople (ver Figura 2.14). Las varillas individuales se interconectan para formar sarta de varillas que pueden variar en longitud, desde algunos cientos de pies para pozos poco profundos y hasta más de 10,000 pie para pozos más profundos.

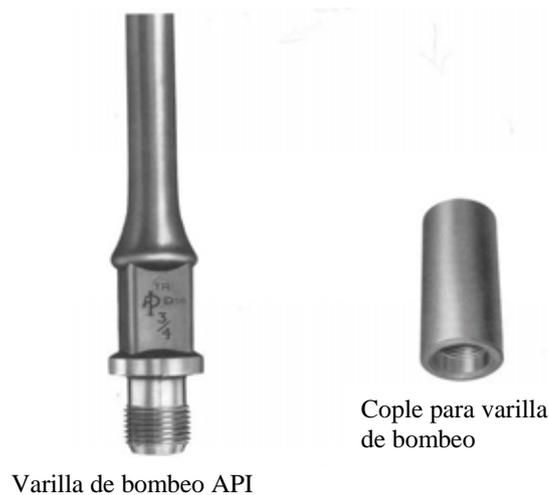


Figura 2.14. Varilla de succión y cople.

2.3.1 Composición metálica de las varillas de succión

El principal componente de la sarta de varillas de succión es el acero. Muchas varillas contienen arriba del 90% de este material en su composición, pero esto les da una consistencia suave y débil, por lo que es recomendable agregar otros elementos para proporcionarle la fuerza necesaria que debe tener, así como otras propiedades.

Los diferentes materiales que pueden ser agregados para lograr una cierta aleación con acero son los siguientes:

Carbón.- Este elemento es agregado para incrementar la fuerza, la dureza y la susceptibilidad para tratamiento con calor, sin embargo, al incrementarse el contenido de carbón la resistencia a la corrosión, la ductilidad y el impacto a la resistencia tienden a decrecer.

Manganeso.- Hace al acero menos quebradizo y actúa como un desoxidante para reducir la formación del óxido de acero, el cual tiende a debilitar la aleación. Algunas varillas contienen arriba del 1% de manganeso.

Silicón.- Es muy parecido al manganeso, es útil como un desoxidante en la refinación de aceros de alto grado. Algunas varillas contienen alrededor de 0.15 al 0.35% de este elemento.

Níquel.- Es agregado para combatir las condiciones corrosivas encontradas en los pozos de aceite, también tienen un efecto de endurecimiento sobre el acero para evitar la disolución del hierro.

Vanadio.- Incrementa el endurecimiento del acero aún cuando se presente en pequeñas cantidades, fomenta una estructura granular buena y retarda el ablandamiento del acero cuando se somete a altas temperaturas.

Cobre.- Es agregado para resistir los ambientes corrosivos. Los aceros que contienen más del 0.6% de cobre tienen una tendencia muy pronunciada hacia el endurecimiento precipitado.

Boro.- Es usado para incrementar el endurecimiento del acero, es muy poderoso y únicamente se agrega en porcentajes del 1%.

Cromo.- Contribuye al endurecimiento del acero y mejora la resistencia a la corrosión del acero en el aire y en otros ambientes, aunque el níquel es más efectivo.

Molibdeno.- Es uno de los agentes más potentes que se agrega como elemento de aleación, aunque no es tan efectivo como el carbón, es un refuerzo en la sarta de varillas para evitar su respuesta al tratamiento con el calor.

2.3.2 Clases de varillas

Clase K.- Son varillas de níquel-molibdeno. Son resistentes a la corrosión y su resistencia mínima a la tensión es de 82,000 lb/pg².

Clase C.- Son varillas de aleación carbón-manganeso. Son para trabajo pesado y medio; su inhibición contra la corrosión es muy efectiva, su resistencia mínima a la tensión es de 90,000 lb/pg². En la mayoría de los pozos se utiliza este tipo de varilla.

Clase D.- Son varillas de aleación níquel-cromo-molibdeno. Su resistencia mínima a la tensión es de 115,000 lb/pg². Estas varillas se utilizan donde las varillas tipo C quedan en punto crítico, generalmente para pozos de alta producción y que no manejen ácido sulfhídrico.

2.4 BOMBA SUBSUPERFICIAL

La diferencia básica entre una bomba de tubería de producción y una bomba de inserción es la manera en que está instalado el barril de trabajo. En la primera el barril de trabajo es conectado al fondo de la tubería de producción y es corrido dentro del pozo como una parte integral de la sarta de tubería de producción mientras que en las bombas de inserción, el barril de trabajo es una parte integral del ensamble de la bomba subsuperficial y es corrida como una unidad en la sarta de varillas de succión adentro de la sarta de la tubería de producción o de la tubería e revestimiento.

2.4.1 Bombas de tubería de producción

Una de las ventajas básicas de estas bombas es que tienen un desplazamiento mayor que los tipos de inserción, debido a que se pueden usar diámetros más grandes del émbolo dentro de los barriles de trabajo. Sin embargo, las bombas de tubería de producción tienen la desventaja de que la sarta de tubería de producción entera debe ser extraída del pozo para mantenimiento del barril de trabajo. Por esta razón, este tipo de bombas son generalmente usadas cuando la producción deseada no es obtenida con una bomba de inserción.

2.4.2 Bombas de inserción

La ventaja de este tipo de bomba es que se conectan a la sarta de varillas de succión, y el montaje completo puede ser retirado del pozo simplemente al extraer la sarta de varillas. Con este tipo de bomba, el barril de trabajo es bajado en las varillas; consecuentemente, algunos medios pueden ser suministrados para asegurar el barril en el fondo de la tubería de producción ya sea nariz de anclaje o un ancla empacador.

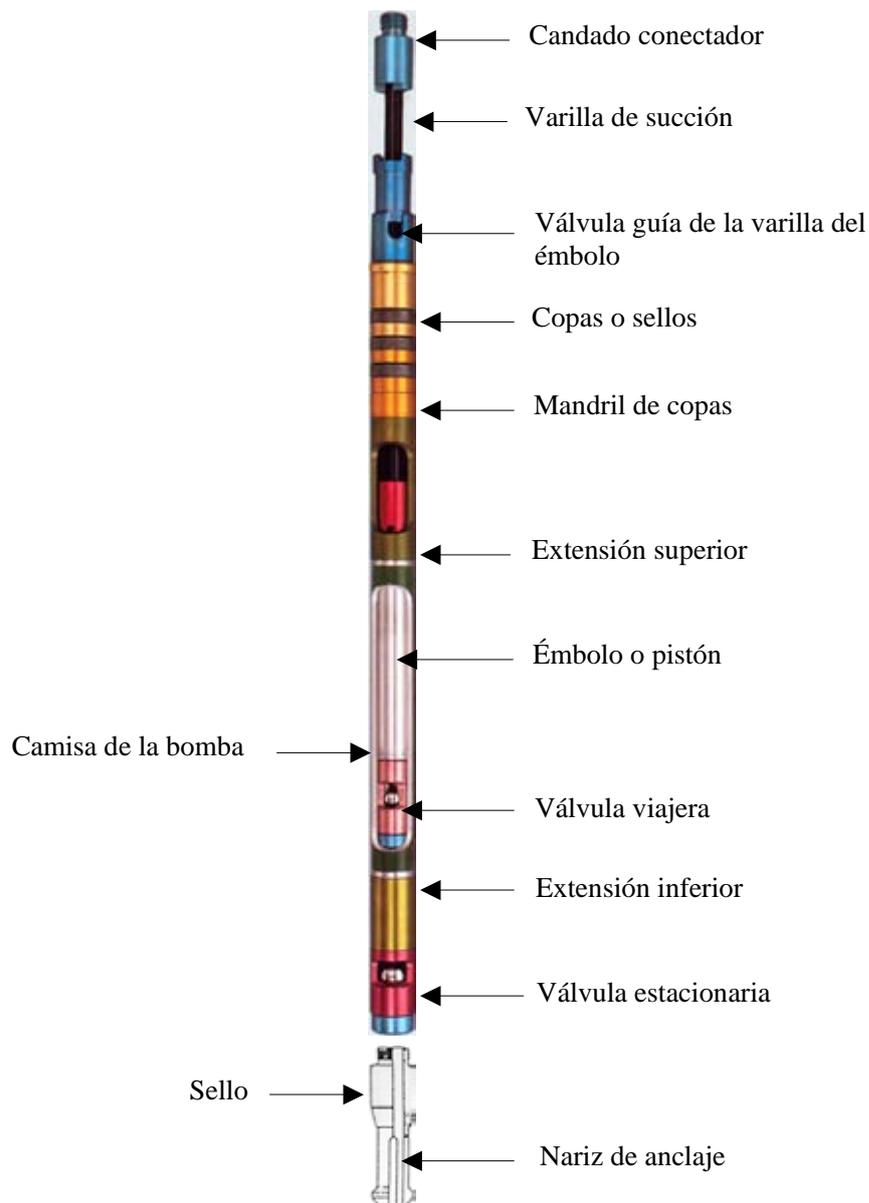


Figura 2.15. Bomba Subsuperficial de inserción.

2.4.3 Bombas de tubería de revestimiento

Este grupo de bombas incluye todas las bombas que usan la tubería de revestimiento en lugar de la tubería de producción, por medio de la cual el fluido es bombeado hacia la superficie. Es solamente una versión aumentada de la bomba de inserción (incluso es instalada y operada esencialmente de la misma manera). La bomba de tubería de revestimiento es para bombas poco profundas y particularmente ajustables a instalaciones en las cuales se requieren gastos de producción altos.

2.4.4 Elementos básicos de una bomba subsuperficial

Cualquier bomba de varillas consiste de cuatro elementos esenciales:

1. Barril de trabajo. Este elemento es un cilindro dentro del cual el fluido del pozo es admitido y desplazado por un pistón de compactación o émbolo.

2. Émbolo. Es un pistón de compactación adaptado con una válvula *check* para desplazar fluido del pozo desde el barril de la bomba. Este puede ser totalmente de metal o equipado con copas, anillos u otros empaques de fondo para formar un sello con el barril.

3. Válvula de admisión (válvula estacionaria). Ésta generalmente consta de una válvula *check* con sello de bola. El montaje de la válvula permanece estacionaria durante el ciclo de bombeo (ver Figura 2.16).

4. Válvula de escape (Válvula viajera). Ésta es una válvula de descarga que se mueve con el émbolo de la bomba de barril estacionario (ver Figura 2.16).

5. Ancla de asiento. Es un dispositivo para retener una bomba de varillas en su posición de trabajo. Puede ser colocada ya sea en el tope o en el fondo de una bomba de barril estacionario.

2.4.5 Ancla de gas

Cuando las condiciones son tales que existe una cantidad considerable de gas libre en los fluidos del pozo, es recomendable instalar un ancla de gas, la cual tiene la función de separar el gas libre y desviarlo hacia el espacio anular.

Este dispositivo trabaja bajo el principio de que el gas, siempre más ligero que el aceite, se eleva conforme los fluidos entran al ancla. Los fluidos deben entrar a un niple perforado y circular hacia abajo antes de entrar al tubo del ancla de gas, el cual se aloja a la entrada de la bomba. Esto da al gas libre una oportunidad para separarse y elevarse a las partes más altas en el niple perforado donde puede retornar al espacio anular, de esta manera todo o casi todo el gas escapa antes de que los líquidos (aceite o aceite y agua) entren a la bomba, de otra manera la misma trabajaría con altos volúmenes de gas lo que disminuiría su eficiencia de bombeo considerablemente.

2.4.6 El Ciclo de bombeo

En la Figura 2.16 se tiene una válvula estacionaria situada en el fondo de la tubería de producción y una válvula viajera en el extremo final de la sarta de varillas. Debido a que el émbolo es parte integral del sistema de varillas, todos los fluidos de la tubería de producción que viajen desde algún punto por debajo de la válvula viajera deberán necesariamente pasar por ella. El fluido que está por encima de la válvula estacionaria sube a través de la válvula viajera; la válvula estacionaria está cerrada porque está soportando el peso de la columna del fluido dentro de la tubería de producción (a). Aquí el émbolo llega al final de su carrera y comienza a subir; ahora la válvula viajera se cierra, ya que el émbolo está levantando el peso del fluido que está por encima de ella (b). Tan pronto como la presión existente en el espacio que hay entre las válvulas disminuya a un nivel por debajo de la que los fluidos ejercen desde la formación, la válvula estacionaria se abre y los fluidos provenientes de la formación suben a través de ella. Los fluidos del pozo son elevados una carrera completa durante el movimiento ascendente del émbolo (c), una vez que éste llega a la parte alta de su carrera su movimiento se invierte, la válvula viajera se abre, la válvula estacionaria se cierra (d) y el ciclo se repite.

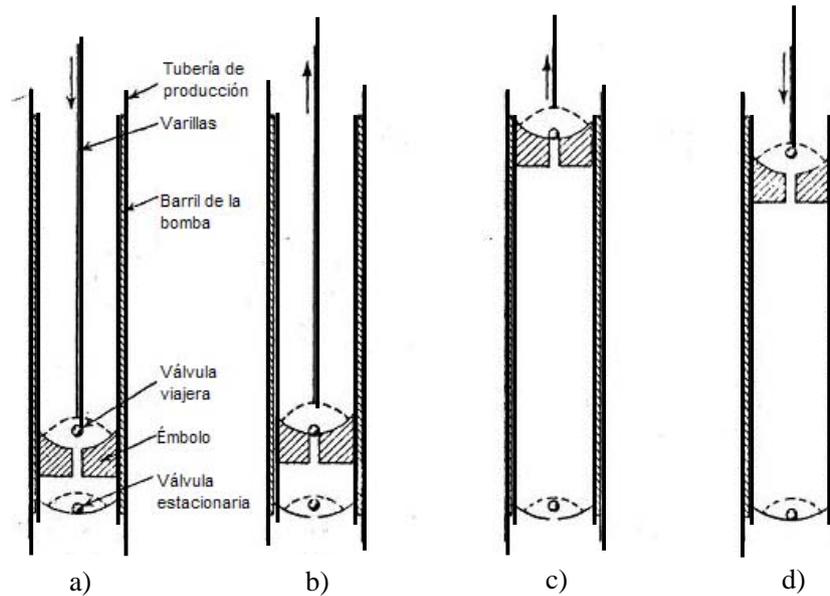


Figura 2.16. Ciclo de bombeo.

2.5 MOTOR PRINCIPAL

Su función es proporcionar energía mecánica a la instalación, que eventualmente será transmitida a la bomba y usada para elevar el fluido. El motor principal seleccionado para una unidad dada debe tener suficiente potencia para elevar el fluido al ritmo deseado y desde el nivel de trabajo del fluido en el pozo.

La selección óptima del tipo y tamaño del motor primario es uno de los aspectos más importante del diseño de la instalación de bombeo. Hay dos tipos que son comúnmente usados:

- Motores de combustión interna.
- Motores eléctricos.

2.5.1 Motores de combustión interna

Es un motor en el cual la energía que trabaja es producto de la combustión del aire y del combustible; esta combustión generalmente se lleva a cabo en el cilindro de trabajo.

Entre los motores de combustión interna, se tienen:

- Motores diesel o motores por compresión.
- Motores de gasolina o motores de explosión por chispa.

Básicamente los motores de combustión interna usados en las unidades de bombeo mecánico son divididos en dos clasificaciones: de velocidades baja y alta. Los motores de velocidad baja son aquellos con uno o dos cilindros, los cuales generalmente tienen una velocidad de cigüeñal máxima de 750 rev/min o menos. Los motores de velocidad alta son multicilindros (usualmente 4 o 6 cilindros) y tienen una velocidad promedio de más de 750 a 2,000 rev/min.

Motores Diesel

Se llama motor diesel a todo motor de combustión interna en el cual el combustible se inyecta cuando la compresión está a punto de terminarse, y el combustible entra en ignición, únicamente debido al calor producido por la compresión del aire carburante. En este tipo de motores sólo se aspira aire inicialmente y se comprime unas 16 veces su volumen inicial, quedando, por lo tanto, contenido en muy poco espacio. Al hallarse de esta forma comprimido, el aire aumenta mucho su densidad, así como su presión y temperatura, llegando a alcanzar valores de 600° C. Al final de esta compresión, cuando el cilindro está aproximadamente en el punto muerto superior, se inyecta dentro del cilindro un combustible pesado que puede ser aceite crudo, residuos de refinería o aceites destilados, el cual, al entrar en contacto con el aire muy caliente que se halla comprimido, produce la combustión, quemándose las partículas de combustible a medida que van entrando en la cámara. Al mismo tiempo que esto ocurre, el émbolo se va moviendo, aumentando el volumen de la cámara de combustión.

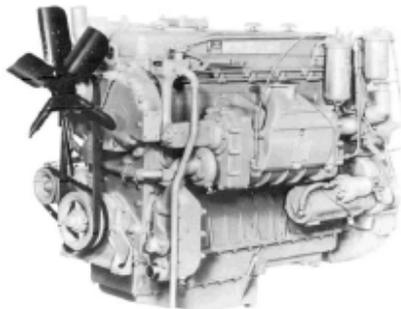


Figura 2.17. Motor de combustión interna Diesel.

Motor de Gasolina

En este tipo de motores se aspira una mezcla de aire–carburante, la cual comprime unas seis veces su volumen inicial. La combustión se provoca mediante una chispa eléctrica que salta y enciende la mezcla.

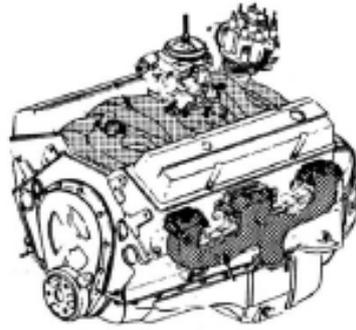


Figura 2.18. Motor de Combustión Interna de Gasolina.

2.5.2 Motores Eléctricos

Es una máquina que convierte la energía eléctrica en movimiento rotatorio o energía mecánica, con objeto de que efectúe un trabajo útil. Los motores elementales funcionan a base de la interacción de dos campos magnéticos: uno se produce alrededor de un conductor que lleva corriente y otro es un campo magnético fijo. Un motor práctico debe producir movimiento rotatorio continuo. Esto lo hace originando una fuerza de giro, sobre un conductor que lleva corriente, al cual se le ha dado forma de espiral. Entre los motores eléctricos se tienen:

- Motor de corriente continua
- Motor de corriente alterna

2.6 REDUCTOR DE ENGRANES

Su función es reducir la velocidad del motor principal a una velocidad de bombeo adecuada. Es necesario determinar exactamente la probable torsión máxima a la que estará sujeto el reductor de engranes, ya que el método API usa la torsión máxima como base para el rango de las unidades de bombeo. La designación del API para una unidad es simplemente la torsión máxima permisible en el reductor de engranes en miles de $\text{pg} \cdot \text{lb}$.

Por ejemplo: una unidad API tamaño 114, tiene un rango de torsión máximo de 114,000 $\text{pg} \cdot \text{lb}$.

La polea del reductor de engranes es el elemento que recibe la potencia del motor principal a través de bandas. La relación del diámetro de la polea del reductor de engranes al diámetro de la polea del motor, y la reducción de velocidad en el reductor de engranes, determinan la reducción total de velocidad del motor principal hasta la varilla pulida. Una reducción del radio de alrededor de 30:1 quiere decir que si la velocidad de la potencia de entrada es de 300 a 600 rev/min , la velocidad de la potencia de salida o velocidad de bombeo de la unidad será de 10 a 20 carreras por minuto.

2.7 TUBERÍA DE PRODUCCIÓN

Es aquella por la cual se conducen los líquidos y gases producidos por el pozo hasta la superficie. La sarta de varilla se instala en el interior de la tubería de producción; el diámetro de ésta varía de acuerdo al diámetro de la bomba y por ende de la producción. Los fluidos serán producidos por el espacio que existe entre las varillas y el diámetro interior de la tubería de producción durante el ciclo de bombeo.

La tubería de producción se instala ya sea con ancla mecánica o empacador. En ambos casos la tubería de producción se fija para obtener un buen desplazamiento de la sarta de varillas.

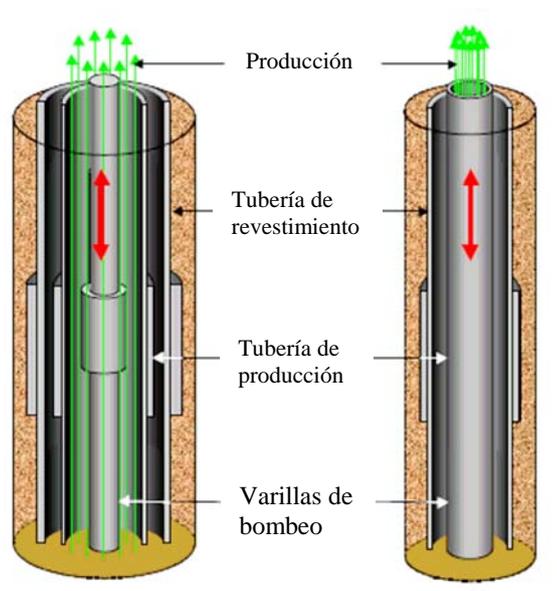


Figura 2.19. Modelo del arreglo de varillas y tubería de producción.

2.7.1 Ancla Mecánica

Es un mecanismo que va alojado a determinada profundidad del pozo, en la sarta de tubería de producción, ligeramente debajo de la bomba. Este mecanismo no lleva hules como el empacador, por lo que existe comunicación entre la tubería de revestimiento y la tubería de producción. Su objetivo principal es sujetar la tubería de producción ya tensionada. Al mantener la tubería de producción fija no existen elongaciones de esta, con lo que se asegura una carrera efectiva del émbolo de la bomba resultando en una buena eficiencia de la misma, además de que al no haber movimiento se disminuyen el desgaste de las varillas y de las tuberías de producción y de revestimiento.

2.7.2 Empacador

Es un mecanismo que al igual que el ancla mecánica tiene el objetivo de mantener tensionada la tubería de producción, con la diferencia de que el empacador lleva hules que no permiten la comunicación entre la tubería de producción y la tubería de revestimiento, por lo que la producción fluye solamente a lo largo de la tubería de producción.

3. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

3.1 GEOMETRÍA DE LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO

a) Clase I

Este tipo de unidades tiene el reductor de engranes colocado en la parte trasera con apoyo a la mitad del balancín, está representada por la unidad convencional. En la Figura 3.1 se aprecia el apoyo, F, cerca del centro, el esfuerzo del motor principal, E, aplicado en el extremo posterior del balancín y la resistencia de la carga del pozo, R, está aplicada en el extremo opuesto del balancín.

UBM Convencional (UBMC). Esta unidad ha sido el tipo más usado en los campos petroleros. La rotación de los contrapesos hace que el balancín oscile sobre el eje del rodamiento central, moviendo la varilla pulida hacia arriba y hacia abajo a través de sus diferentes conexiones. Los contrapesos localizados en la manivela son bloques pesados de hierro fundido, por lo que estos pueden moverse a lo largo de la manivela para producir mayor o menor efecto de contrapeso.



Figura 3.1. UBM Convencional.

b) Clase III

Este tipo de unidades tienen el reductor de engranes colocado al frente de la unidad, está representada por las unidades Mark II y Aerobalanceada. En las Figuras 3.2 y 3.3 puede observarse que para ambas unidades el esfuerzo, E, y la resistencia, R, se aplican en el mismo extremo del balancín con relación al apoyo, F, que se encuentra en el otro extremo.

UBM Mark II (UBMM). El reductor de velocidad de esta unidad se encuentra al frente y el punto de rotación está hacia atrás, los contrapesos están montados hacia el frente también. La geometría poco usual del Mark II genera una carrera ascendente más lenta y una carrera descendente más rápida con una reducción en la aceleración cuando la carga es mayor, esto resulta en menos cargas máximas, una vida más larga de las varillas y menor esfuerzo de torsión máximo y menos caballos de fuerza.

UBM Aerobalanceada (UBMA). En esta unidad se usa la compresión y expansión del aire dentro del cilindro como contrapeso; el empleo del aire comprimido en lugar de los contrapesos de hierro permite un control más preciso del contrabalance, la presión se introduce al cilindro mediante un compresor, además se reduce en gran medida el peso de la unidad con lo que se disminuyen los costos de transporte e instalación. Se emplea en bombeo de altos volúmenes, con carreras largas y en bombeo de crudos pesados, en muchos casos no existe más alternativa que el uso de estas unidades. Por ejemplo, la unidad convencional de mayor tamaño que se construye hoy en día, es la C-1,824D-365-192. En el tipo de unidad Mark II, la más grande es la M-1,824D-427-216. En cambio, la unidad aerobalanceada se fabrica hasta el tamaño A-2,560D-470-240. Esta unidad tiene 240 pg de carrera máxima con un torque de 2,560,000 lb·pg, es decir, casi el doble de capacidad de torque que la unidad Mark II que existe.

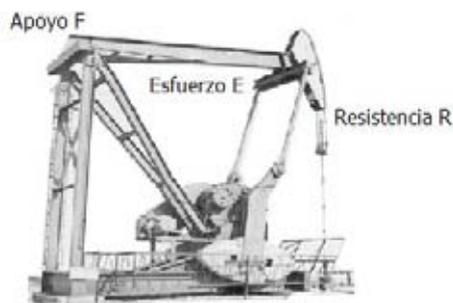


Figura 3.2. UBM Mark II.



Figura 3.3. UBM Aerobalanceada.

3.1.1 Comparación del movimiento entre las unidades Mark II y Convencional

Las diferentes distribuciones de palancas y cojinetes en el balancín con relación a la flecha de la manivela, dan como resultado las distintas geometrías. Para ilustrar la diferencia, en la Figura 3.4 se presenta un modelo de unidad clase III con el cojinete desplazado de la vertical con respecto a la flecha de la manivela y otro modelo de unidad convencional, con el cojinete directamente arriba de la flecha de la manivela.

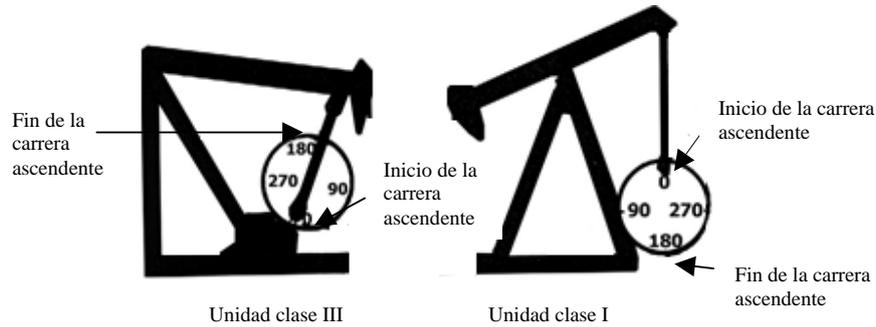


Figura 3.4. Ambas unidades están en posición para iniciar la carrera ascendente.

Mientras que en la Figura 3.5 se aprecia que al iniciar la carrera ascendente, el movimiento de la varilla pulida de la unidad Clase III se queda atrás de la unidad convencional, dando por resultado una menor aceleración desde el fondo cuando se está elevando la máxima masa de varillas y fluido. Esta aceleración reducida de la primera unidad producirá, en la mayoría de los casos, una menor carga pico sobre la varilla pulida en comparación con la producida por la unidad convencional. En el caso de que la máxima carga pico soportada por la varilla pulida sea excesiva en cualquiera de las unidades, la velocidad de bombeo debe reducirse.

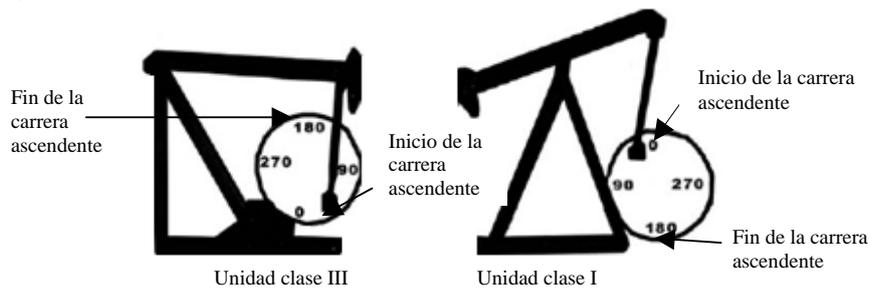


Figura 3.5. Inicio del movimiento ascendente.

Por otra parte, en la Figura 3.6, a los 90° de rotación de la manivela, la unidad convencional ha pasado su periodo de aceleración ascendente y reduce su velocidad preparándose para detenerse en la parte superior de la carrera. La unidad Clase III no iniciará su desaceleración hasta que haya pasado la marca de los 90°.

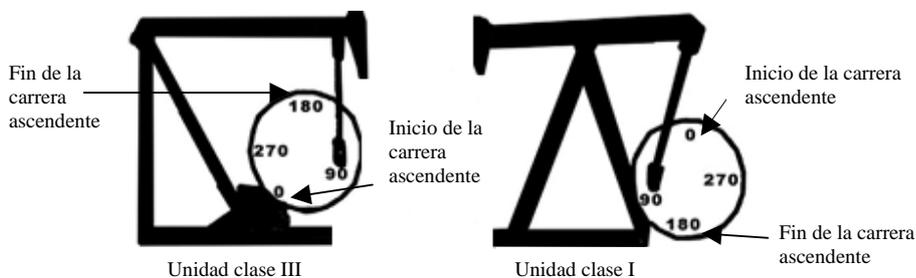


Figura 3.6. Movimiento de bombeo a los 90°.

La unidad convencional alcanza la parte superior de la carrera a los 180°, como se muestra en la Figura 3.7, entonces empieza a descender. La unidad Clase III no llegará al tope de la carrera ascendente hasta que la manivela se haya desplazado 195° de rotación.

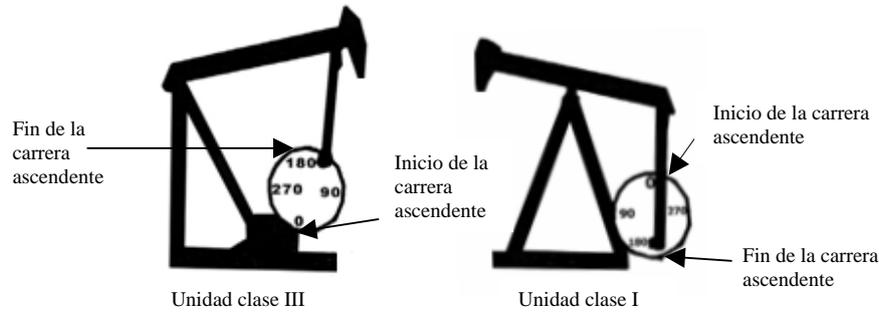


Figura 3.7. Movimiento de bombeo a los 180°.

En la Figura 3.8, a los 225°, se muestra la unidad Clase III cuando ha iniciado la carrera descendente. La unidad convencional ha realizado casi una cuarta parte de su viaje en descenso. De manera que la unidad Clase III debe acelerarse para alcanzar a la unidad convencional al terminar el ciclo.

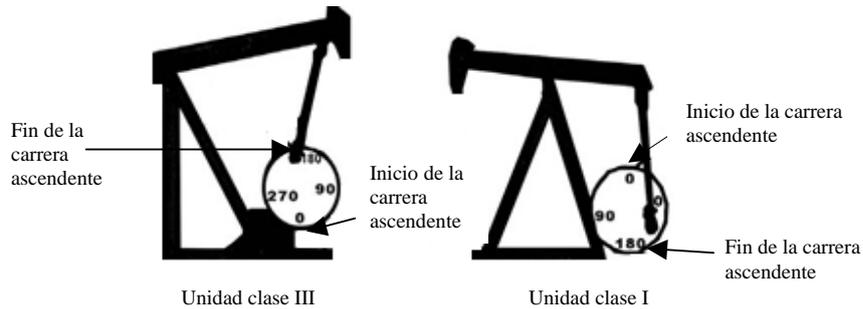


Figura 3.8. Movimiento de bombeo a los 225°.

A los 270°, en la Figura 3.9, la unidad Clase III ha rebasado la carrera de la unidad convencional y rápidamente empieza a reducir su velocidad.

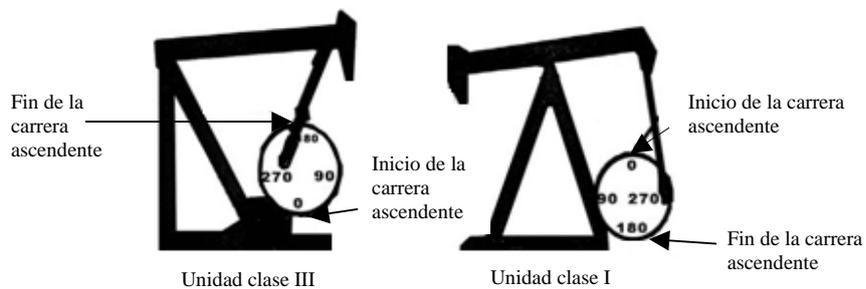


Figura 3.9. Movimiento de bombeo a los 270°.

La longitud de la carrera de las dos unidades casi es la misma a los 315° de desplazamiento de la manivela, ver Figura 3.10.

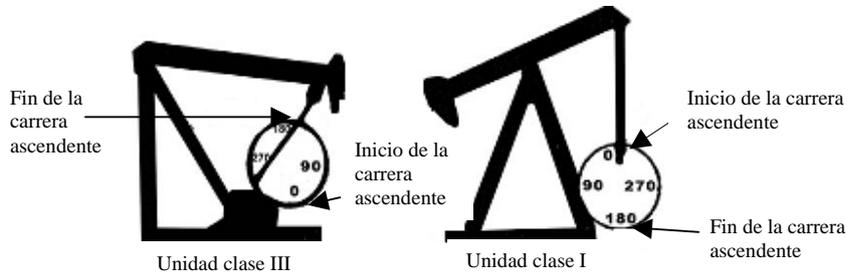


Figura 3.10. Movimiento de bombeo a los 315°.

Al complementarse el ciclo de la manivela las dos unidades llegan simultáneamente al fondo de la carrera descendente como se muestra en la Figura 3.11.

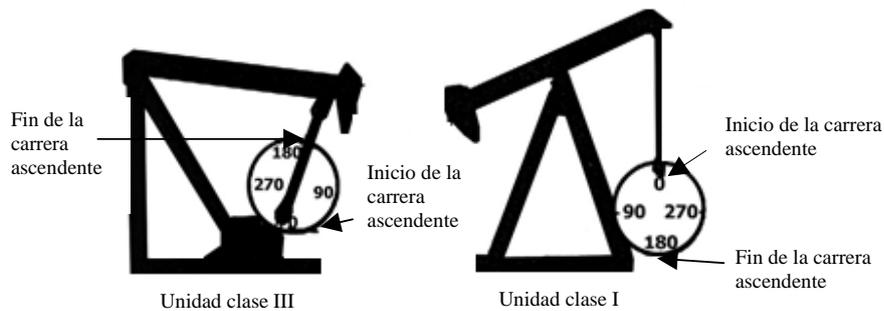


Figura 3.11. Fin del ciclo.

La velocidad angular constante de la manivela en la unidad convencional (Clase I), hace que la inversión de movimiento de la varilla pulida en el fondo, se realice con aceleración relativamente alta y la inversión de movimiento en la parte superior, con aceleración relativamente baja. En las UBM Mark II y balanceadas por aire (Clase III), las características de aceleración son opuestas. Esta geometría hace que el sistema realice la inversión de movimiento en el fondo con baja aceleración y en la parte superior con un poco más de aceleración que en la UBM convencional.

3.1.2 Aceleración de la varilla pulida

El movimiento recíprocante de las UBM Clase I y Clase III, presenta valores máximos de aceleración al inicio de la carrera ascendente y de la descendente, lo cual puede entenderse fácilmente al compararlo con el Movimiento Armónico Simple (MAS).

Si se considera que la varilla pulida se está moviendo hacia arriba y hacia abajo con MAS, la máxima aceleración se presentaría cuando se inicia el movimiento ascendente de la varilla pulida y, la máxima aceleración se presenta nuevamente al inicio del movimiento descendente con valores iguales. En el MAS, la máxima velocidad en la carrera ascendente es igual a la máxima velocidad en la carrera descendente y se presenta a la mitad de la carrera. El tiempo en que se realizan ambas carreras es exactamente el mismo. Sin embargo, el movimiento ideal no se logra; en la UBM convencional, la manivela gira con velocidad angular constante, acelera hacia arriba con la máxima carga de varillas y fluido más rápido que en el MAS, pero en el punto superior de la carrera, la aceleración hacia abajo es menor que en el MAS.

En las UBM balanceadas por aire y Mark II, las características de movimiento se invierten. Éstas mueven la máxima carga de varillas y fluido hacia arriba con menor aceleración, mientras que en la parte superior de la carrera, el movimiento hacia abajo tiene mayor aceleración que el MAS.

La carga pico en la varilla pulida está controlada por la magnitud de la aceleración en el fondo de la carrera ascendente. Mayor aceleración se traduce en mayor carga pico, y en consecuencia, se incrementa el esfuerzo en las varillas y la carga en la estructura de la unidad. En el levantamiento de la máxima carga de varillas y fluido desde el fondo, al componente de inercia se suma el peso estático. Al invertirse el movimiento en la parte superior de la carrera, el componente de inercia se resta del peso de las varillas flotando es decir, el valor de la carga pico en la varilla pulida y en la estructura, se tiene al invertirse el movimiento en el fondo de la carrera, mientras que el valor mínimo de carga se tiene al invertir el movimiento en la parte superior de la carrera.

3.2 SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE LA BOMBA

Para una profundidad de bombeo dada y volumen de fluido a ser producido, existe un tamaño óptimo del calibre de la bomba, el cual resultará en una carrera del émbolo efectiva y mantenimiento de velocidad moderada de operación. Si el émbolo es largo, innecesariamente las cargas altas serán impuestas sobre el equipo y el viaje descendente del émbolo puede resultar en operaciones ineficientes. Por otro lado, si el émbolo es pequeño las velocidades de bombeo llegan a ser también altas y los efectos de aceleración incrementada pueden resultar en cargas pico incrementadas sobre el equipo. El factor básico en la selección de un tamaño de bomba adecuado, es el volumen de fluido desplazado por la bomba por pulgada de cada una de las carreras. Este desplazamiento de volumen dependerá del diámetro del émbolo de la bomba.

El desplazamiento total de la bomba teórico puede ser determinado por:

$$PD = A_p(pg^2) \times S_p \left(\frac{pg}{carrera} \right) \times N \left(\frac{carreras}{min} \right) \times \frac{1,440 \left(\frac{min}{día} \right)}{9,702 \left(\frac{pg^3}{bl} \right)} \quad (3.1)$$

$$PD = 0.1484 A_p S_p N \text{ (bpd)} \quad (3.2)$$

Donde:

PD.- Desplazamiento total de la bomba, bpd.

A_p .- El área de la sección transversal del émbolo de la bomba, pg^2 .

S_p .- Carrera efectiva del émbolo, pg.

N.- Velocidad de bombeo, rpm.

La constante de la bomba, K, para cualquier tamaño del émbolo dado está determinada por:

$$K = 0.1484 A_p \quad (3.3)$$

Así, para un tamaño de émbolo, una velocidad de bombeo y/una carrera determinados, puede calcularse el desplazamiento de la bomba como:

$$PD = K S_p N \quad (3.4)$$

LA Tabla 3.1 muestra las áreas del émbolo y constantes para varios tamaños de bombas.

Diámetro, Dp pg	Área, Ap pg ²	Constante de la bomba, K bpd/pg/rpm
5/8	0.3070	0.046
3/4	0.4420	0.066
15/16	0.6900	0.102
1	0.7850	0.116
1 1/16	0.8860	0.131
1 1/8	0.9940	0.148
1 1/4	1.2270	0.182
1 1/2	1.7670	0.262
1 3/4	2.4050	0.357
1 25/32	2.4080	0.369
2	3.1420	0.466
2 1/4	3.9760	0.590
2 1/2	4.9090	0.728
2 3/4	5.9400	0.881
3 3/4	11.045	1.639
4 3/4	17.721	2.630

Tabla 3.1. Valores para las constantes K, para varios diámetros de bombas¹.

Ejemplo 3.1²

Calcular la constante de la bomba, K, para un émbolo de 1 1/2 pg.

Solución:

$$K=0.1484 A_p$$

¹ Tomada de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

² Tomado de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

$$A_p = (\pi/4)(1.5^2) = 1.767 \text{ pg}^2$$

Así

$$K = 0.1484(1.767)$$

$$K = 0.262 \text{ bl/d/pg/rpm}$$

El gasto actual en la superficie Q , puede ser menor que el desplazamiento teórico total de la bomba, debido a la eficiencia volumétrica de la bomba, E_v , definida como:

$$E_v = \frac{Q}{PD}, \text{ de donde; } Q = E_v \times PD \quad (3.5)$$

La eficiencia volumétrica puede variar en un rango amplio pero es comúnmente del orden del 70 al 80 % y es principalmente afectada por el deslizamiento de la bomba y las propiedades del fluido, tales como el contenido de gas y las características espumantes del fluido.

Una consideración importante en los pozos de bombeo mecánico es el encogimiento, es decir, la disminución de volumen que experimenta la fase líquida por efecto de la liberación del gas disuelto y por su contracción térmica, esto tiene lugar a lo largo de la tubería de producción. Como los fluidos son levantados y el gas se libera de la solución, existe una diferencia significativa entre el desplazamiento volumétrico de la bomba de fondo y el volumen de fluidos recuperados en la superficie. Éste efecto es denotado por un factor de encogimiento más grande que 1.0, indicando que la bomba de fondo debe desplazar más fluido por el mismo porcentaje adicional, que el volumen recuperado en superficie. Por ejemplo un factor de encogimiento de 1.15 significa que la bomba de fondo debe desplazar 115 barriles de fluido, para recuperar 100 barriles de fluido en superficie.

Ejemplo 3.2³

Un pozo es equipado con un émbolo de diámetro de $1 \frac{1}{2}$ pg., la velocidad de bombeo es 20 rpm y la carrera efectiva del émbolo es 55 pg. La producción en la superficie son 210 bpd de fluido de gravedad específica 0.85. Calcular el desplazamiento total de la bomba y la eficiencia volumétrica de la bomba.

Solución:

$$PD = K S_p N$$

³ Tomado de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

de la Tabla 3.1, $K = 0.262$ para un émbolo de $1 \frac{1}{2}$ pg.

Entonces;

$$PD = (0.262)(55)(20) = 288 \text{ bpd}$$

Mientras que la eficiencia volumétrica, E_v , es:

$$E_v = (Q/PD)100 = (210/288)100; E_v = 72.9 \%$$

Ejemplo 3.3⁴

El desplazamiento teórico de la bomba son 250 bpd y la eficiencia de la bomba es 75%. Calcular el ritmo de producción superficial.

Solución:

$$E_v = Q/PD$$

Despejando al gasto, Q , de la ecuación:

$$Q = P D E_v = (250) (0.75); Q = 187.5 \text{ bpd}$$

Simplemente considerando un tamaño de bomba, velocidad, y una combinación de la carrera no necesariamente se asegurará que haya sido seleccionado un tamaño apropiado de la bomba, para una instalación de bombeo dada. Se debe de considerar el gasto deseado y el potencial de producción del pozo. La selección del tamaño del émbolo óptimo para la producción deseada de algunas profundidades también será importante en la obtención de eficiencia altas y en la prevención de cargas innecesarias sobre la sarta de varillas y el equipo superficial.

La Tabla 3.2 puede usarse como una guía para la determinación de los tamaños del émbolo de la bomba para condiciones "óptimas" cuando la carrera superficial es menor que 74 pg.

⁴ Tomado de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

Levantamiento del fluido, pie	Producción de fluido - barriles por día -80% de eficiencia									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000
2,000	1 1/2	1 3/4	2	2 1/4	2 1/2	2 3/4	2 3/4	2 3/4	2 3/4	2 3/4
	1 1/4	1 1/2	1 3/4	2	2 1/4	2 1/2				
3,000	1 1/2	1 3/4	2	2 1/4	2 1/2	2 1/2	2 3/4	2 3/4	2 3/4	2 3/4
	1 1/4	1 1/2	1 3/4	2	2 1/4	2 1/4	2 1/2			
4,000	1 1/4	1 3/4	2	2 1/4	2 1/4	2 1/4	2 1/4	2 1/4		
		1 1/2	1 3/4	2	2					
5,000	1 1/4	1 3/4	2	2	2 1/4	2 1/4				
		1 1/2	1 3/4	1 3/4	2					
6,000	1 1/4	1 1/2	1 3/4	1 3/4						
		1 1/4	1 1/2							
7,000	1 1/4	1 1/2								
	1 1/8	1 1/4								
8,000	1 1/4									
	1 1/8									

Tabla 3.2. Tamaños del émbolo de la bomba, recomendados para condiciones óptimas⁵.

Ejemplo 3.4⁶

Una bomba es instalada en un pozo al nivel de fluido de trabajo de 4,000 pie. Es deseable producir 400 bpd de fluido en la superficie. Si la experiencia local indica que la eficiencia de la bomba es 80% ¿qué tamaño de bomba recomendaría para éste pozo?

Solución:

El levantamiento para éste pozo es 4,000 pie. Así, de la Tabla 3.2 el tamaño de la bomba sugerida a ser instalada es de 2 pg ó 2 1/4 pg. El tamaño exacto dependerá de otros factores

⁵ Tomado de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Desing and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

⁶ Tomado de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Desing and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

y otras consideraciones. Por ejemplo, la velocidad de bombeo y la carrera efectiva del émbolo.

También se puede hacer una selección inicial del diámetro del émbolo de la bomba a partir de la Ecuación 3.4, la cual puede ser escrita en la forma:

$$\begin{aligned} PD &= 0.1484 A_p S_p N = K S_p N \\ &= (0.1484)(\pi/4)(D_p^2) S_p N \\ PD &= 0.1166 D_p^2 S_p N \end{aligned} \quad (3.6)$$

La carrera efectiva del émbolo debe ser alrededor del 80% o más de la carrera superficial ($S_p/S = 0.80$). Así, la Ecuación 3.6 puede escribirse como:

$$D_p^2 = \frac{PD}{(0.1166)(0.8 S) N}, \quad \text{o bien; } D_p^2 = \frac{10.72 (PD)}{S N} \quad (3.7)$$

Donde:

D_p^2 .- Diámetro del émbolo al cuadrado, pg^2 .
S.- Carrera superficial, pg .

3.3 SARTA DE VARILLAS DE SUCCIÓN (CONSIDERACIONES GENERALES).

La sarta de varillas de succión es un sistema vibratorio complejo, el cual transmite energía desde el equipo superficial hasta la bomba subsuperficial. El diseño de una instalación de bombeo, incluyendo el equipo superficial y subsuperficial, requiere la selección de una sarta de varillas de succión apropiada.

3.3.1 Diseño de la sarta de varillas de succión

Para profundidades mayores a 3,500 pie, es usualmente deseable usar una sarta telescopiada, la cual se compone de varillas de varios diámetros. Las varillas más pequeñas deben colocarse en el fondo de la sarta y las de mayor diámetro deben colocarse en el tope de la sarta, donde la carga es mayor.

Existen dos métodos generales para diseñar una sarta de varillas telescopiadas:

1. Asignar a cada sección de la sarta su esfuerzo máximo. En otras palabras un punto en la sarta en el cual el esfuerzo en la varilla es igual al esfuerzo de trabajo máximo. De este punto hacia arriba debe usarse un tamaño de varilla mayor.
2. Diseñar la sarta de manera que los esfuerzos de la unidad sean iguales en la varilla tope de cada una de las secciones de los diferentes tamaños de la sarta.

El segundo método es el más usado y se considera el más seguro.

El porcentaje de cada uno de los tamaños de la varillas en una sarta telescopiada puede determinarse a partir de la Tabla A1, ver Apéndice A.

En el diseño de una sarta de varillas óptima, debe considerarse el sistema de bombeo entero, incluyendo el equipo superficial y subsuperficial.

En el diseño de una sarta de varillas telescopiadas, debe verificarse el esfuerzo anticipado máximo, para certificar que no se exceda el esfuerzo de trabajo permisible. El esfuerzo máximo en el tope de la sarta de varillas entera será la carga pico en la varilla pulida dividida por el área de la sección transversal de la sección tope de varillas, es decir:

$$\text{Esfuerzo en el tope} = \frac{W_{\text{máx}}}{A_{\text{top}}} \quad (3.8)$$

Si el esfuerzo calculado de la Ecuación (3.8), es más grande que el esfuerzo de trabajo permisible (usualmente 30,000 lb/pg²), la sarta de varillas debe ser rediseñada.

Ejemplo 3.5⁷

Una bomba con un émbolo de 2 pg ha sido instalada a 6,050 pie usando varillas telescopiadas de tres diámetros, 3/4 pg, 7/8 pg y 1 pg. Las varillas de succión están disponibles en 25 pie de longitud. Determine la longitud de cada una de las secciones de la sarta de varillas telescopiada.

Solución:

De la Tabla A1, ver Apéndice A (elegir la varilla, No. 86);

R1= 32.8% de varillas de 1pg.

R1= 33.2% de varillas de 7/8 pg.

R1= 33.9% de varillas de 3/4 pg.

Entonces;

L1= 6,050 (0.328) = 1984.4 pie

L2= 6,050 (0.332) = 2008.6 pie

⁷ Tomado de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

$$L3 = 6,050 (0.339) = 2051 \text{ pie}$$

Así, en incrementos de 25 pie,

$$L1 = 2,000 \text{ pie}$$

$$L2 = 2,000 \text{ pie}$$

$$L3 = 2,050$$

3.3.2 Diagrama modificado de Goodman

En cuanto al diseño de la sarta de varillas, es necesario tomar en cuenta un factor que influye sobre el nivel de resistencia del acero llamado, límite de resistencia a la fatiga, este factor es el rango de esfuerzo bajo el cual pueden operar las varillas dentro del límite de esfuerzos permisibles. El diagrama modificado de Goodman, relaciona la carga máxima en la varilla pulida con el rango de cargas permisible, es decir, la diferencia entre la carga máxima y carga mínima. En la medida que la carga pico en la varilla pulida es menor al esfuerzo para el que fue fabricada, la seguridad de operación será cada vez mayor.

La Ecuación (3.8) da los valores reales en la varilla superior de la sarta, dicho cálculo está basado en la carga máxima que se tiene en esa varilla entre el área de su sección transversal. Este esfuerzo nunca debe exceder el máximo esfuerzo permisible para el grado particular de varillas que esté en uso, ni el rango de esfuerzo permisible debe excederse. Para las varillas API Grado C (fuerza de tensión mínima de 90,000 lb/pg², el esfuerzo permisible máximo está dado por la relación:

$$S_A = \left(\frac{T}{4} + MS_{mín} \right) \times S.F = \left(\frac{90,000}{4} + 0.5625 S_{mín} \right) \times S.F \quad (3.9)$$

o bien;

$$S_A = (22,500 + 0.5625 S_{mín}) \times S.F$$

Para las varillas API Grado D, la relación es:

$$S_A = \left(\frac{T}{4} + MS_{mín} \right) \times S.F = \left(\frac{115,000}{4} + 0.5625 S_{mín} \right) \times S.F \quad (3.10)$$

o bien;

$$S_A = (28,750 + 0.5625 S_{mín}) \times S.F$$

Donde:

S_A . – Esfuerzo máximo permisible, lb/pg²

S.F – Factor de servicio (ver Tabla 3.3)

$S_{mín.}$ – Esfuerzo de varillas mínimo (ya sea calculado o medido), lb/pg²

M.- Pendiente de la curva del esfuerzo permisible, SA

Ambiente	API C	API D
No corrosivo	1.00	1.00
Salmuera	0.65	0.90
Acido sulfúrico	0.50	0.70

Tabla 3.3. Factores de servicio⁸.

El rango de esfuerzo máximo permisible debe determinarse para cualquier diseño de sarta de varillas, de acuerdo a la relación:

$$\Delta SA = SA - S_{min} \quad (3.11)$$

Donde:

ΔSA . – Rango de esfuerzo máximo permisible, lb/pg²

$S_{mín.}$.- Carga mínima de la varilla pulida dividida por el área transversal de la varilla tope, lb/pg².

En el Apéndice E, se presenta el procedimiento de la construcción del diagrama de Goodman para un tipo de varilla en particular, cabe mencionar que el diagrama responde a las Ecuaciones 3.9 a 3.11, por lo que al aplicarlas se puede prescindir de dicho diagrama.

3.4 MOVIMIENTO DE BOMBEO

El movimiento operativo de la UBM de tipo balancín puede ser entendido a través del estudio de dos movimientos básicos: (1) movimiento armónico simple y (2) movimiento del conjunto manivela y biela. El movimiento de bombeo es importante, debido a que controla las velocidades y aceleraciones de la varilla pulida, las cuales influyen en las cargas de la misma y de la estructura, el rango de cargas y el desplazamiento de la bomba de fondo.

⁸ Tomada de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

3.4.1 Movimiento Armónico Simple (MAS)

Este tipo de movimiento es uniforme y periódico, ver Figura 3.12. Suponer que se traza una proyección perpendicular P' - P desde el eje vertical D - B hacia la circunferencia, donde termina el punto P . Si P viaja alrededor del círculo de la manivela con una velocidad angular constante, entonces el punto P' se mueve hacia arriba y hacia abajo sobre el eje vertical D - B periódicamente con MAS. Con este tipo de movimiento, P' inicia su movimiento en el tope hacia abajo y hacia arriba desde el fondo con el mismo valor de aceleración máxima. La aceleración de P' al alcanzar la posición 0 en el punto medio del eje vertical es cero, debido a que cambia de aceleración a desaceleración. En este sistema teórico básico, si el tope de la sarta de las varillas de succión fueran suspendidas al punto P' serían movidas arriba y abajo con un MAS.

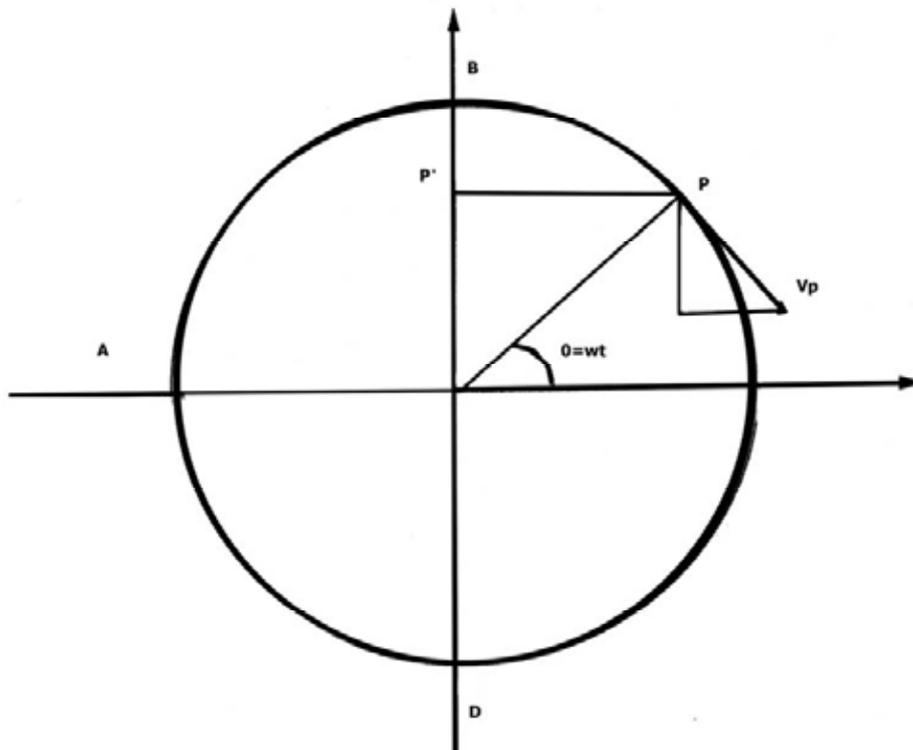


Figura. 3.12. Movimiento Armónico Simple (MAS).

3.4.2 Movimiento de manivela y biela

La manivela es conectada por medio de un perno (ver Figura 3.13) a un miembro rígido llamado biela, el cual conduce el movimiento de bombeo al balancín. Por conveniencia, la conexión de la biela superior, V , llamada ecualizador, se asume que se mueve hacia arriba y abajo en línea recta. El movimiento de la conexión de la biela superior o ecualizador, no es un MAS, aún cuando la manivela esté rotando con una velocidad angular constante. Como el punto P describe un movimiento uniforme alrededor del ciclo de la manivela, el

ecualizador describe un movimiento recíprocante que puede diferir substancialmente del MAS del punto P'. Esto es debido a la angulosidad del mecanismo biela – manivela.

En la Figura 3.13, cuando el perno de la manivela, P, se mueve alrededor del ciclo de A a B y de ahí a C, el ecualizador se mueve verticalmente desde a' a b', lo cual corresponde al viaje del perno de la manivela, P, de C a D y de regreso a A. Esto es debido a que el viaje del ecualizador está en función de los componentes verticales de la manivela, \overline{BP} , y la biela, \overline{PV} . En los cuadrantes superiores del ciclo de la manivela, los componentes verticales viajeros de la manivela y de la biela son sumados en los dos cuadrantes inferiores restados. Esta modificación del MAS de la manivela-biela, puede tener un efecto importante sobre la velocidad y las características de aceleración del ecualizador transmitidas al balancín. Esto es, debido a que el punto P viaja en el ciclo a una velocidad angular constante, el tiempo necesario para cubrir cada uno de los cuadrantes es el mismo. Sin embargo, la distancia que el ecualizador desarrolla de b' a a' es mucho más larga que de a' a d', aún así, las velocidades del fondo y del tope del ciclo son cero, además, la aceleración es substancialmente mayor de b' a a' que de d' a a'.

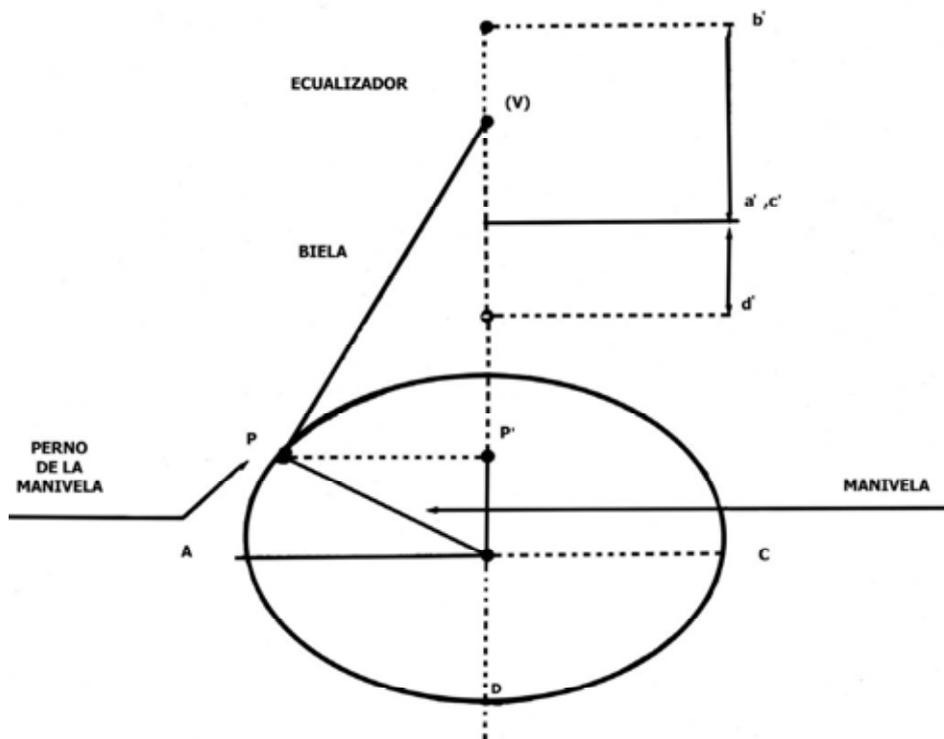


Figura 3.13. Movimiento Manivela-biela.

Esta anomalía cinemática tiene consecuencias importantes, dado que el perno de la manivela cubre los dos cuadrantes superiores del ciclo, el ecualizador se mueve hasta el tope de su carrera con una desaceleración máxima relativamente alta y comienza a descender con una aceleración máxima igualmente alta, pero como también el perno de la

manivela cubre los dos cuadrantes inferiores del ciclo, el ecualizador desacelera hacia el fondo de la carrera con un valor máximo relativamente menor, mientras que la aceleración hacia arriba tiene un valor similar al anterior, con lo que se reduce la aceleración máxima relativamente menor, mientras que la aceleración hacia arriba tiene un valor similar al anterior, con lo que se reduce; la aceleración del ecualizador juega un papel muy importante en la selección de la varilla, en la estructura de la misma y en los valores de los rangos de carga de la varilla.

3.4.3 Influencia del movimiento de bombeo en la varilla y en la carga estructural de una unidad de bombeo de balancín

Una UBM para levantar la carga la varilla pulida, debe ejercer una fuerza hacia arriba más grande que el "peso muerto" de las varillas y el fluido. Esta fuerza es conocida como la carga pico en la varilla pulida (PPRL) por sus siglas en inglés *Peak Polished Rod Load* y consta de dos componentes: (1) el peso estático de las varillas y el fluido, y (2) una fuerza adicional, la cual es a menudo expresada como un porcentaje o fracción del peso estático de las varillas y el fluido, y es llamado factor de aceleración. Para un peso estático de las varillas y el fluido determinado, la carga máxima de la varilla pulida tiene lugar al comienzo de la carrera ascendente, cuando la carga estática máxima (varillas + fluido) está siendo levantada con la aceleración máxima.

La carga mínima en la varilla pulida (MPRL) por sus siglas en inglés *Minimum Polished Rod Load*, resulta de la componente de la fuerza inercial máxima en el movimiento descendente. La carga mínima ocurre cerca del tope de la carrera en el momento en que las varillas están comenzando a descender, debido a que éste es el punto de aceleración máxima en la carrera descendente.

El método más usado comúnmente para calcular las cargas máximas y mínimas de la varilla pulida son las ecuaciones de Mills, las cuales asumen un MAS de la sarta de varillas. El factor de aceleración de Mills está dado por:

$$\alpha = \frac{SN^2}{70,500} \quad (3.12)$$

Donde:

S.- Longitud de la carrera, pg.

N.- Velocidad de bombeo, carreras por minuto (rpm)

Las ecuaciones de Mills para calcular las cargas máxima y mínima de la varilla pulida están dadas por lo siguiente:

Para la UBM convencional:

$$PPRL = W_f + W + W(\alpha) \text{ , o bien; } PPRL = W_f + W(1+\alpha) \quad (3.13a)$$

$$MPRL = W(1-\alpha) - \left[\frac{62.4GW}{490} \right] \quad (3.14)$$

o bien;

$$MPRL = W(1-\alpha-0.127G) \quad (3.15a)$$

Donde:

G.- Gravedad específica del fluido.

W.- Peso estático de las varillas en el aire, lb.

490.- Densidad de las varillas de acero, lb/pie³.

Wf.- Peso del fluido, lb.

Para UBM aerobalanceadas:

$$PPRL = W_f + W(1 + 0.7\alpha) \quad (3.13b)$$

El factor 0.7 es una constante de ajuste de su inversión de movimiento en el fondo de descendente a ascendente, con sólo el 70% de la aceleración de una unidad convencional.

$$MPRL = W(1 - 1.3\alpha - 0.127G) \quad (3.15b)$$

La UBM aerobalanceada hace su inversión del movimiento en el tope hacia abajo 30% más rápido que la UBM convencional, así que el 30% debe adherirse al factor de aceleración, para obtener una carga mínima más exacta.

Para las UBM Mark II:

$$PPRL = W_f + W_r(1+0.6\alpha) \quad (3.13c)$$

Mientras que el factor 0.6 es una constante de ajuste de inversión de movimiento en el fondo de descendente a ascendente, con sólo el 60% de la aceleración de una UBM convencional.

$$MPRL = W_r(1 - 1.4\alpha - 0.127G) \quad (3.15c)$$

La UBM Aerobalanceada hace su inversión del movimiento en el tope hacia abajo 40% más rápido que la unidad convencional, así que el 40% debe adherirse al factor de aceleración para obtener una carga mínima más exacta.

La carga del fluido, W_f , es el peso de la columna de fluido soportada por el área neta del émbolo:

$$W_f = 0.433 G L (A_p - A_r) \quad (3.16)$$

Donde:

L.- Longitud de la sarta e varillas, pie.

A_p .- Área total del émbolo, pg^2 .

A_r .- Área promedio de la sección transversal de las varillas, pg^2 .

El peso del fluido puede expresarse como:

$$W_f = 0.433G (L A_p - 0.294W) \quad (3.17)$$

Ejemplo 3.6⁹

Considerando el Ejemplo 3.5, en el que se determinó la longitud de cada sección de una sarta de varillas telescopiada, revisar esta sarta de varillas para determinar si el esfuerzo máximo está o no dentro del esfuerzo de trabajo permisible (asumirlo de $30,000 \text{ lb/pg}^2$). Considerar una gravedad específica del fluido de 0.89, una velocidad de bombeo de 18 rpm, y una longitud de la carrera de 54 pg.

Solución:

De la TABLA 3.1, el área de la varilla tope, $A_{top} = 0.785$

W_{r1} (varillas de 1pg) = 2.90 lb/pie

W_{r2} (varillas de $7/8$ pg) = 2.22 lb/pie

W_{r3} (varillas de $3/4$ pg) = 1.63 lb/pie

$$W_f = 0.433 G (L A_p - 0.294W) = 0.433 (0.89) [6,050 (3.142) - 0.294 (13,582)] = 5,787 \text{ lb}$$

⁹ Tomado de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

$$W_{\text{máx}} = \text{PPRL} = W_f + W(1 + \alpha)$$

$$\alpha = \frac{SN^2}{70,500} = \frac{54(18^2)}{70,500} = 0.248$$

Así,

$$W_{\text{máx}} = 5,787 + 13,582 (1 + 0.248) = 22,737 \text{ lb}$$

$$\text{Esfuerzo} = \frac{W_{\text{máx}}}{A_{\text{top}}} = \frac{22,737}{0.785} = 28,964 \text{ lb/pg}^2$$

3.5 CARRERA EFECTIVA DEL ÉMBOLO

Existe una diferencia considerable entre la longitud de la carrera de la varilla pulida y la longitud del recorrido del émbolo de la bomba. El punto de interés es la distancia que el émbolo viaja en el barril de trabajo. Este movimiento relativo entre el émbolo y el barril de trabajo resulta en la carrera efectiva del émbolo, el cual difiere del movimiento de la varilla pulida debido a los siguientes factores:

- Elongación y contracción de la varilla y la tubería de producción.
- Sobrecarrera del émbolo debido a las cargas dinámicas y la naturaleza elástica de las varillas.
- Efectos de vibración de las varillas.
- Efectos de fricción subsuperficial.
- Cantidad de gas en el barril de la bomba.

La mayoría de las fórmulas usadas comúnmente para determinar la carrera efectiva del émbolo, consideran sólo la extensión de varilla y tubería de producción, y la sobrecarrera del émbolo. El efecto de elongación de las varillas y la tubería de producción disminuye la carrera del émbolo, y el efecto de sobrecarrera del émbolo incrementa la carrera del émbolo. Una simple aproximación para la carrera efectiva del émbolo está dada por:

$$S_p = S + e_p - (e_t + e_r) \quad (3.18)$$

Donde:

S_p -Carrera efectiva del émbolo, pg.

S - Carrera de la varilla pulida, pg.

e_p - Sobrecarrera del émbolo, pg.

e_t - Elongación de la tubería, pg.

e_r - Elongación de la varilla, pg.

3.5.1 Elongación de las varillas y de la tubería de producción en sargas de un solo diámetro

La elongación de la varilla y tubería es causada por la transferencia cíclica de la carga del fluido desde la válvula de pie hasta la válvula viajera. La elongación de la varilla es el resultado de los pesos de la varilla y de la columna del fluido en la tubería de producción sobre la sarga de varillas cuando la válvula viajera cierra en el fondo de la carrera.

En el tope de la carrera, la válvula viajera abre y el peso de la columna del fluido es transferido hacia la válvula estacionaria (así regresa a la tubería). Las elongaciones de la sarga de varillas y la tubería pueden ser determinadas a partir de tablas proporcionadas por algunos de los fabricantes de varillas de succión, o pueden calcularse a partir de las fórmulas siguientes:

La elongación de la varilla está dada por:

$$e_r = \frac{12W_f L}{A_r E} \quad (3.19)$$

Donde:

e_r .- Elongación de la varilla, pg.

W_f .- Carga del fluido sobre el émbolo, lb.

L .- Longitud de la sarga de varillas de succión, pie.

A_r .- Área promedio de la sección transversal de las varillas, pg^2 .

E .- Módulo de elasticidad para el acero (aproximadamente 30×10^6 lb/pg²).

La carga del fluido para la Ecuación (3.19) puede determinarse a partir de la Ecuación (3.16) o la Ecuación (3.17). Por lo que, el resultado es la ecuación para elasticidad de varillas presentada por Marsh, es:

$$e_r = \frac{5.20GL^2(A_p - A_r)}{A_r E} \quad (3.20)$$

La Ecuación (3.20) asume que la bomba es puesta en el nivel del fluido de la tubería de revestimiento, es decir, que el pozo está fuera de bombeo.

El peso del fluido puede ser expresado de la siguiente manera:

$$W_f = \frac{62.4 G D A_p}{144} = 0.433 D G A_p \quad (3.21)$$

Donde:

D.- Profundidad del nivel del fluido de trabajo en el espacio anular, pie.

La gravedad específica del fluido, G, puede determinarse a partir de la expresión dada para obtener la densidad en grados API, como:

$$G = \frac{141.5}{131.5 + \text{°API}}$$

Por lo que la ecuación para calcular la elongación de las varillas puede escribirse de la siguiente forma:

$$e_r = \frac{12 \times 0.433 \text{ G D } A_p L}{A_r E}, \text{ o bien; } e_r = \frac{5.20 \text{ G D } A_p L}{A_r E} \tag{3.22}$$

Esta ecuación es general y puede usarse para el caso en que la profundidad de colocación de la bomba es más baja que el nivel del fluido en el espacio anular.

La elongación de la tubería de producción puede determinarse de manera similar:

$$e_t = \frac{5.20 \text{ G D } A_p L}{A_t E} \tag{3.23}$$

o de acuerdo a la Ecuación (3.20):

$$e_t = \frac{5.20G(A_p - A_r)L^2}{A_t E} \tag{3.24}$$

El módulo de elasticidad puede consultarse de la Tabla 3.4.

Tamaño de tubería, pg.	Diámetro exterior, pg.	Diámetro interior, pg.	Área de metal, $\frac{\text{pg}^2}{\text{pg}}$	Constante de elasticidad, E, $\frac{\text{pg}}{\text{lb} \cdot \text{pie}}$
1.900	1.900	1.610	0.800	0.500×10^{-6}
$2 \frac{3}{8}$	2.375	1.995	1.304	0.307×10^{-6}
$2 \frac{7}{8}$	2.875	2.441	1.812	0.221×10^{-6}
$3 \frac{1}{2}$	3.500	2.992	2.590	0.154×10^{-6}
4	4.000	3.476	3.077	0.130×10^{-6}
$4 \frac{1}{2}$	4.500	3.958	3.601	0.111×10^{-6}

Tabla 3.4. Datos de tubería de producción¹⁰.

En pozos someros, la elongación de la tubería de producción puede ser muy pequeña comparada con la de las varillas y frecuentemente se desprecia. En particular, si la tubería es apropiadamente anclada, la elongación de la tubería de producción es cero (es decir, $e_t = 0$).

3.5.2 Elongación de varillas (sartas telescopiadas)

Para el caso de una sarta de varillas telescopiadas, esto es, una sarta compuesta de diferentes diámetros de varillas, la Ecuación (3.19), puede ser aplicada a cada sección de varillas de la manera siguiente:

$$e_1 = \frac{12WfL_1}{A_1E}, e_2 = \frac{12WfL_2}{A_2E}, \dots, e_n = \frac{12WfL_n}{A_nE}$$

Donde L_1, L_2, \dots, L_n , son las longitudes de cada sección con sus áreas respectivas, A_1, A_2, \dots, A_n . La elongación total de una sarta de varillas telescopiadas se puede escribir:

$$e_r = e_1 + e_2 + \dots + e_n, \text{ o bien; } e_r = \frac{12Wf}{E} \left[\frac{L_1}{A_1} + \frac{L_2}{A_2} + \dots + \frac{L_n}{A_n} \right] \quad (3.25)$$

3.5.3 Sobrecarrera del émbolo

Otro tipo de elongación se presenta cuando las varillas al estar en movimiento presentan una aceleración. Esta elongación adicional resulta del peso muerto de las varillas más las carga debido a la aceleración de la sarta de varillas y es conocido como sobrecarrera del émbolo, e_p .

Coberly, define a la sobrecarrera del émbolo como:

$$e_p = 1.93 \times 10^{-11} (LN)^2 S \quad (3.26)$$

¹⁰ Tomada de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

Donde:

e_p .- Sobrecarrera del émbolo, pg.

S .- Longitud de la carrera de la varilla pulida, pg.

N .- Velocidad de bombeo, emboladas por minuto.

L .- Longitud de la sarta de varillas, pie.

La Ecuación (3.26), es valida para una sarta de varillas simple.

Para ver los efectos de la aceleración más claramente, la Ecuación (3.26) puede expresarse como:

$$e_p = 1.36 \times 10^{-6} L^2 \left(\frac{SN^2}{70,500} \right) \quad (3.27)$$

Donde el último término, es el factor de aceleración:

$$\alpha = \frac{SN^2}{70,500}$$

Así, puede escribirse:

$$e_p = \frac{40.8 L^2 \alpha}{E} \quad (3.28)$$

o bien;

$$e_p = 1.36 \times 10^{-6} L^2 \alpha \quad (3.29)$$

La Ecuación (3.29) es la fórmula presentada por Craft, Holden, y Graves, la cual es sencillamente la fórmula de Coberly, cuando $E = 30 \times 10^6 \text{ lb/pg}^2$.

En el desarrollo de esta ecuación los efectos de la geometría y la posibilidad de sartas telescopiadas fue ignorada. Cuando estos factores son considerados, la carrera del émbolo puede ser totalmente diferente al calculado por estas fórmulas. Sin embargo, debido a estos inconvenientes se han desarrollado ecuaciones que satisfacen estos efectos. Dichas ecuaciones se presentan a continuación y son de uso general.

$$e_p = 1.55 \left[\frac{L}{1,000} \right]^2 \left[\frac{SN^2}{70,500} \right] \quad (3.30)$$

o bien;

$$e_p = \frac{46.5L^2 \alpha}{E} \quad (3.31)$$

o bien;

$$e_p = 2.2 \times 10^{-11} S(LN)^2 \quad (3.32)$$

Ejemplo 3.7¹¹

Una instalación de bombeo consta de una bomba de 2 ¼ pg, instalada a 7,080 pie en una tubería de 2 ⅞ pg (diámetro interior de 2.441 pg, y diámetro exterior de 2.875 pg). El aceite tiene una gravedad específica de 0.81 y está a un nivel de 5,800 pie en el espacio anular. La unidad utiliza una sarta de varillas de ¾ pg y ⅞ pg y opera a 16.8 rpm. La eficiencia de la bomba es 75% y se obtienen en superficie 55 bpd.

Determinar:

- a) Carrera efectiva del émbolo.
- b) Elongación de la tubería.
- c) Elongación de la varilla telescopiada.
- d) Carrera de la varilla pulida.
- e) Sobrecarrera.

Solución:

a)

$$PD = 0.1484 A_p S_p N$$

$$Q = PD E_v = 0.1484 A_p S_p N E_v$$

$$S_p = \frac{Q}{0.1484 A_p N E_v}$$

De la TABLA 3.1, $A_p = 3.976 \text{ pg}^2$

¹¹ Tomado de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

$$S_p = \frac{55}{(0.1484)(3.976)(16.8)(0.75)}, \text{ por lo tanto; } S_p = 7.4 \text{ pg}$$

b)

$$e_t = \frac{5.20GD_{Ap}L}{EA_t}$$

$$A_t = 1.812 \text{ pg}^2$$

$$e_t = \frac{(5.20)(0.81)(5,800)(3.976)(7,080)}{(30 \times 10^6)(1.812)}; \quad e_t = 12.65 \text{ pg}$$

c)

$$e_r = \left(\frac{5.20GD_{Ap}}{E} \right) \left(\frac{L_1}{A_1} + \frac{L_2}{A_2} \right)$$

Suponiendo que $L_1 = 3,788$ pie y $L_2 = 3,292$ pie

$$e_r = \frac{(5.20)(0.81)(5,800)(3.976)}{(30 \times 10^6)} \left(\frac{3,788}{0.442} + \frac{3,292}{0.601} \right); \quad e_r = 45.48 \text{ pg}$$

d)

$$S_p = S + e_p - e_t - e_r$$

$$e_p = 1.55 \left(\frac{L}{1,000} \right)^2 \alpha = 1.55 \left(\frac{L}{1,000} \right)^2 \left(\frac{SN^2}{70,500} \right)$$

$$S = 7.4 + 12.65 + 45.48 - e_p$$

$$S = 65.53 - e_p$$

$$S = 65.53 - 1.55 \left(\frac{7,080}{1,000} \right)^2 \left[\frac{S(16.8)^2}{70,500} \right] = 65.53 - 0.311 S$$

$$S + 0.311 S = 65.53 ; \quad S = 50 \text{ pg}$$

e)

$$\begin{aligned}
 e_p &= 1.55 \left(\frac{L}{1,000} \right)^2 \alpha \\
 &= 1.55 \left(\frac{7,080}{1,000} \right)^2 \left[\frac{(50.0)(16.8)^2}{70,500} \right] ; e_p = 15.6 \text{ pg}
 \end{aligned}$$

3.6 CÁLCULOS PARA EL EQUIPO SUPERFICIAL

3.6.1 Contrabalanceo

Los contrapesos nivelan la carga de trabajo impuesta al motor. Si no se proporcionara un efecto de contrapeso a la varilla pulida, en el ascenso, el motor primario tendría que efectuar un trabajo enorme y se ejercería un torque excesivo en los engranes, esto requeriría de un motor grande y de una caja de engranes inmensa. En la carrera descendente cuando se reduce sustancialmente la carga el motor trabajaría muy poco debido a que la fuerza de gravedad atrae a las varillas y a la bomba. Los contrapesos, por tanto se agregan a la unidad para darle a la varilla pulida un efecto de contrapeso, esto a su vez reduce el tamaño del motor y le aplica una carga más uniforme a la caja de engranes. Los contrapesos ayudan al motor en la carrera ascendente y a su vez son levantados durante la descendente. Para fines de diseño puede hacerse un estimado del efecto ideal del contrapeso. El efecto de contrapeso ideal es el que logre que el trabajo realizado por el motor durante el ascenso sea igual al del descenso. Esto significará también que la torsión neta que se aplique a los engranes será aproximadamente la misma en cada mitad del ciclo.

Para reducir el tamaño del motor primario y el reductor de engranes, el sistema es equipado con contrapesos aproximadamente iguales al peso de las varillas flotando más la mitad del peso de los fluidos. Esto significa que el contrabalanceo ideal requerido puede ser aproximadamente igual a la carga promedio a través de todo el ciclo. Esto es:

$$CBE = \frac{PPRL + MPRL}{2} \quad (3.33)$$

Donde:

CBE= efecto de contrabalanceo ideal, lb

La PPRL dada por la ecuación de Mills, desprecia los efectos de flotación y de fricción, sin embargo, para el cálculo del contrabalanceo se consideran todos los factores.

Carga máxima= $W_f + W(1+\alpha)$ - flotación + fricción

Carga mínima= $W(1+\alpha)$ -flotación- fricción

Carga promedio= $\frac{\text{carga máxima} + \text{carga mínima}}{2}$

$$= \frac{[W_f + W(1+\alpha) + W(1-\alpha) - 2(\text{flotación})]}{2}$$

$$= \frac{[W_f + W + W\alpha + W - W\alpha - 2(\text{flotación})]}{2} = \frac{[W_f + 2W - 2(\text{flotación})]}{2}$$

o bien;

$$\text{CBE} = \frac{W_f}{2} + W - \text{flotación}$$

$$\text{CBE} = \frac{W_f}{2} + W - 0.127 G W$$

$$\text{CBE} = 0.5W_f + W (1 - 0.127 G) \quad (3.34)$$

La Ecuación (3.34) puede escribirse de la forma:

$$\text{CBE} = \frac{W_f}{2} + W_2 \quad (3.35)$$

Donde:

W_2 .- Peso de las varillas flotando, lb.

En la carrera ascendente, el primer motor es asistido por este efecto de contrabalanceo para levantar el peso combinado de las varillas y el fluido, resultando una fuerza no balanceada equivalente sólo a la mitad del peso de los fluidos. Así, durante la carrera ascendente el primer motor necesita levantar sólo esta fuerza no balanceada, esto es:

Carga en la carrera ascendente - Contrabalance= Fuerza no balanceada

$$(W_2 + W_f) - \left(W_2 + \frac{W_f}{2} \right) = \frac{W_f}{2}$$

En la carrera descendente, el peso de las varillas flotando es opuesto a los contrapesos, resultando una fuerza no balanceada otra vez igual a la mitad del peso de los fluidos.

Así,

Contrabalance - Carga en la carrera descendente = Fuerza no balanceada, o bien;

$$\left(W_2 + \frac{W_f}{2} \right) - W_2 = \frac{W_f}{2}$$

3.6.2 Consideraciones de torque

La torsión es igual a la fuerza que actúa sobre un brazo de palanca a ángulos rectos multiplicada por la longitud del brazo. La torsión tiende a producir una rotación en la conexión; por ejemplo, si se aplica torsión al perno del neumático de nuestro automóvil cuando se aprieta, la torsión que nos concierne en lo particular es la impuesta a la manivela a través del engrane de baja velocidad. La torsión que proporciona la flecha se transmite a la manivela, la cual a su vez hace operar la bomba, y debe ser suficiente para hacerla funcionar de manera continua bajo condiciones normales de operación. Esa torsión la proporciona el motor que actúa a través de la caja de engranes, es decir:

Torsión neta en la caja de engranes = Torsión causada por la carga en el vástago pulido
- Torque causado por el contrapeso

Debido a que la magnitud de estos dos términos cambia durante el ciclo de la bomba, se define a la torsión máxima como, la torsión más alta que ocurre durante el ciclo de bombeo.

La torsión efectiva suministrada por los contrapesos en cualquier posición del ciclo de bombeo se ilustra en la Figura 3.14. Cuando los contrapesos están en la parte superior de su ciclo, contribuyen a que la torsión sea cero al iniciar el proceso de elevación. La torsión suministrada por los contrapesos se incrementa conforme éstos se mueven hacia la posición de 90°, en la que se tiene la torsión máxima efectiva. A partir de esta posición, la torsión efectiva disminuye hasta que los contrapesos llegan a los 180° de desplazamiento, en donde la torsión vuelve a ser de cero.

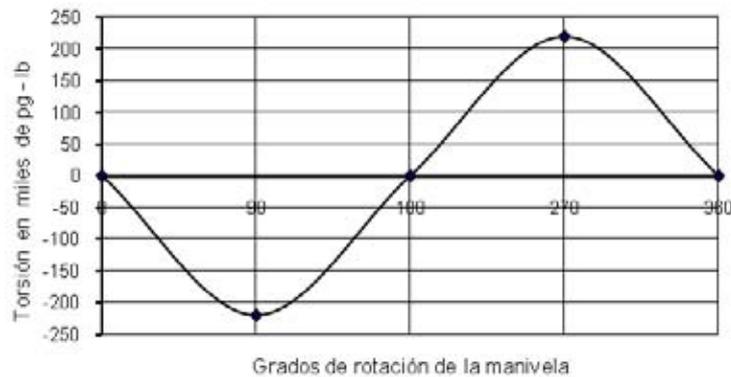


Figura 3.14. Curva de torsión de una unidad convencional.

En la segunda parte del ciclo, que es la carrera descendente, la torsión impuesta por los contrapesos se considera positiva, debido a que éstos deben ser elevados. Entonces es cuando el sistema almacena energía que será utilizada posteriormente en la carrera ascendente del ciclo.

La carrera ascendente es la parte de la curva de torsión que está por debajo de la línea de cero, y se considera negativa debido a que los contrapesos ayudan a elevar la carga existente sobre la varilla pulida. La curva de torsión por arriba de la línea cero, corresponde a la carrera descendente y es positiva ya que ahora los contrapesos serán levantados por el sistema.

En las UBM Clase III, el contrabalanceo está colocado afuera de la línea central de la manivela, así que cuando ésta se encuentra en la posición del fondo de la carrera, el contrapeso aún está siendo elevado para almacenar energía potencial. Esto da como resultado que la curva de torsión de las UBM Clase III, sea diferente de la curva para la UBM convencional.

La comparación de las curvas de torsión para las dos clases de UBM se muestra en la Figura 3.15, en la que se aprecia que el contrapeso colocado fuera de la línea central de la manivela, mueve a la curva de torsión de la UBM Clase III, 30° a la derecha de la curva de torsión para la UBM convencional. Esta diferencia de torsión por contrabalanceo se refleja en la torsión neta impuesta sobre el reductor de engranes, y consecuentemente, en la demanda de potencia del motor principal.

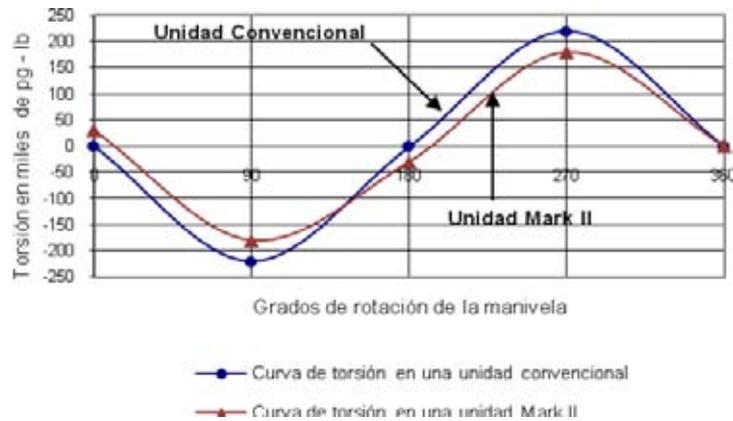


Figura 3.15. Comparación de curvas de torsión.

Los valores de carga sobre la varilla pulida, se obtienen mediante un dinamómetro que se instala en el equipo superficial para construir una carta dinamométrica.

3.6.3 Factores de torque

Uno de los conceptos más importantes en una UBM es el factor de torsión. La razón de su importancia se debe a que sin él, sería imposible determinar la carga de torsión exacta que la sarta de varillas impone sobre el reductor de engranes en cualquier posición de la manivela.

Para convertir las cargas registradas en la varilla pulida a datos de torsión por carga, el diagrama se marca cada 15° de desplazamiento de la manivela. Entonces, las cargas sobre la varilla pulida, en cada marca, se multiplican por el factor de torsión para obtener la torsión por carga impuesta sobre el reductor de engranes en cada uno de esos puntos del ciclo de bombeo.

El factor de torsión utilizado, es la relación de torsión por carga sobre el reductor de engranes a la carga sobre la varilla pulida. El *American Petroleum Institute* (API), requiere que para cada tamaño de UBM existente en el mercado, los fabricantes publiquen una lista de factores de torsión.

3.7 REQUERIMIENTOS DE POTENCIA DEL MOTOR PRIMARIO

Los caballos de fuerza totales que requiere el motor, HP_{np} , pueden ser determinados a partir de la siguiente expresión:

$$HP_{np} = \frac{(PRHP) (FCC)}{E_s} \quad (3.36)$$

Donde:

PRHP.- Caballos de fuerza en la varilla pulida.

FCC.- Factor de carga cíclica.

Es.- Eficiencia superficial de la unidad de bombeo.

La potencia de la varilla pulida PRHP, consta de dos componentes:

$$PRHP = HP_h + HP_f$$

Donde:

HP_f.- Potencia por fricción.

HP_h.- Potencia hidráulica (potencia para levantar un volumen de fluido verticalmente).

Si la eficiencia estructural se asume que es del 100% la PRHP puede determinarse a partir de:

$$PRHP = \frac{(\text{Torque neto})_{avg} \times N}{63,025} \quad (3.37)$$

En una forma más rigurosa, la PRHP puede estimarse a partir de la siguiente ecuación:

$$HP_h = \frac{Q \times L_n \times (350 \text{ lb/bl}) \times G}{(33,000 \text{ pie. lb/min/HP})(24)(60)} \quad (3.38)$$

$$HP_h = 7.36 \times 10^{-6} QGL_n$$

Donde:

L_n.- Levantamiento neto, pie.

Q.- Gasto en la superficie, bpd.

Los caballos de fuerza por fricción se calculan de la siguiente manera:

$$HP_f = \frac{(W/8) (2 S) (N)}{(33,000) (12)} \quad (3.39)$$

Donde:

HPf.- Potencia debida a la fricción.

W.- Peso de las varillas, lb.

S.- Longitud de la carrera, pg.

N.- Velocidad de bombeo, rpm.

La Ecuación (3.39) puede escribirse; como:

$$HPf = 6.31 \times 10^{-7} W S N \quad (3.40)$$

Para las UBM Aerobalanceada y Mark II:

$$HPf = 6.25 \times 10^{-7} W S N \quad (3.41)$$

3.7.1 Factor de Carga Cíclica (FCC)

En una UBM, el motor primario debe liberar la potencia suficiente para satisfacer los requerimientos de potencia hidráulica, las pérdidas por equipo superficial (es decir, bandas, apoyos, engranes, estopero, entre otros), pérdidas subsuperficiales, y la potencia de reserva adicional para manejar la naturaleza cíclica de la carga de bombeo. Esta última componente es llamada factor de carga cíclica.

La experiencia ha mostrado que los factores de carga cíclica promedio para UBM de torque no uniformes (UBM Aerobalanceada y Convencional) son los siguientes:

FCC=1.375, para motores eléctricos NEMA "D" y máquinas de velocidad baja.

FCC= 1.897, para motores eléctricos NEMA "C" y máquinas multicilindros.

Para UBM de torque uniforme (Mark II), el factor de carga cíclica promedio es:

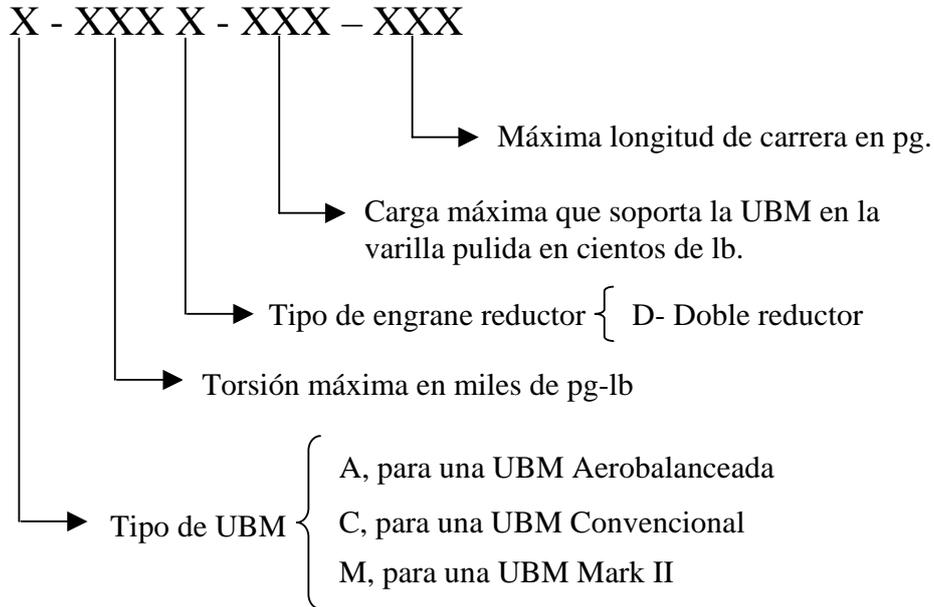
FCC= 1.10, para motores eléctricos NEMA "D" y máquinas de velocidad baja.

FCC= 1.517, para motores eléctricos NEMA "C" y máquinas multicilindros.

3.8 CLASIFICACIÓN API DE LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO

Antes de atender el procedimiento de diseño y la selección de una instalación de bombeo es pertinente definir la clasificación API de dicha UBM y el significado de los códigos de especificación de las mismas.

La clasificación de una unidad de bombeo es un código alfanumérico de 11 caracteres que definen la geometría y las condiciones mecánicas operativas para las cuales fue construida la UBM, como se indica a continuación:



Ejemplo 3.8.1

Para el código C-228D-200-74 indicar cuáles son las características de la UBM propuesta.

Solución:

Es una UBM Convencional, que soporta un torque máximo de 228,000 pg-lb y que tiene doble reductor; dicha UBM está fabricada para soportar una carga máxima en la varilla pulida de 20,000 lb y puede manejar una carrera máxima de 74 pg.

4. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

4.1 ANTECEDENTES DEL MÉTODO API

Es el método empleado para el diseño del sistema de BM más difundido en el mundo, tuvo su origen en 1954, cuando un grupo de usuarios y constructores de unidades de bombeo mecánico efectuó un estudio a fondo de la problemática asociada con este sistema de producción artificial, el cuál posteriormente se dio a conocer como el estándar del API conocido como API RP 11L. El trabajo de investigación consistió en utilizar una computadora analógica para simular un sistema de bombeo mecánico, los resultados se relacionaron por medio de una familia de curvas. De las cuales se determinaron valores adimensionales que al ser utilizados en las fórmulas de cálculo correspondientes se obtuvieron los siguientes parámetros: longitud de la carrera del émbolo, desplazamiento de la bomba, máxima y mínima carga en la varilla pulida, torque máximo, potencia en la varilla pulida y contrapesos requeridos.

4.2 PROCEDIMIENTO API PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

En general se requieren tres pasos:

- 1) Se debe hacer una selección preliminar de los principales componentes para el sistema.
- 2) Se calculan las características de operación de la selección preliminar con el uso de fórmulas, tablas y figuras.
- 3) El desplazamiento de la bomba y las cargas calculadas se comparan con los volúmenes, rango de cargas, esfuerzos y otras limitaciones de la selección preliminar.

En realidad el procedimiento API es un método a prueba y error, dado que al finalizar el diseño se deben analizar los resultados a fin de determinar si el diseño de varillas fue el adecuado, si lo es se determina la unidad y demás elementos del sistema, de lo contrario será necesario redefinir un nuevo arreglo de varillas y comenzar de nuevo el procedimiento.

La información mínima que debe conocerse es la siguiente:

- Nivel del fluido, D (pie).
- Profundidad de la bomba, L (pie).
- Velocidad de bombeo, N (rpm).
- Longitud de la carrera superficial, S (pg).
- Diámetro del émbolo de la bomba, Dp (pg).
- Gravedad específica del fluido, G.
- Diámetro de la TP (pg).
- Si la TP está anclada.

- Tamaño y diseño de varillas de succión.

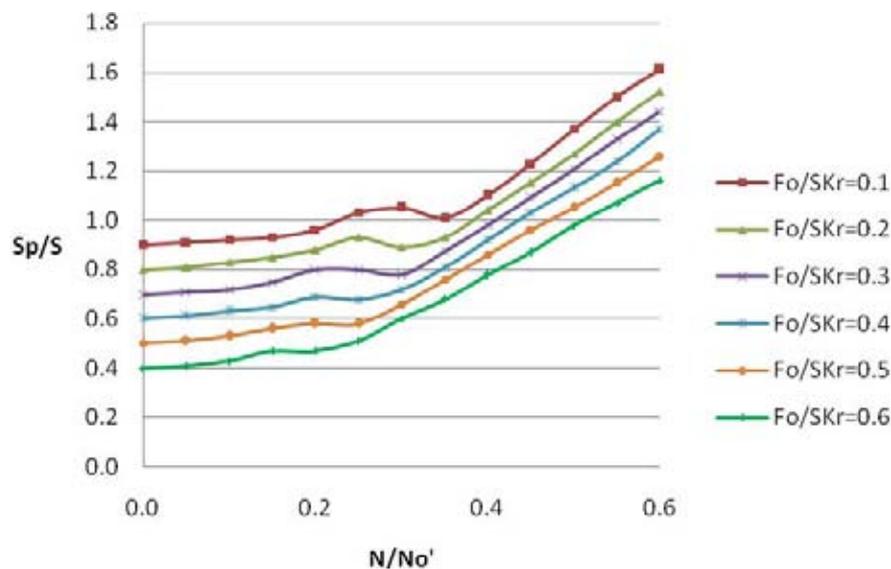
Una vez que se cuenta con los datos anteriores, se determinan los siguientes factores de diseño:

- Carrera del émbolo, S_p (pg).
- Desplazamiento de la bomba, PD (bpd).
- Carga pico en la varilla pulida, PPRL (lb).
- Carga mínima en la varilla pulida, MPRL (lb).
- Torque pico en la manivela, PT (pg-lb).
- Potencia requerida en la varilla pulida, PRHP (hp).
- Contrapeso requerido, CBE (lb).

Estos factores del diseño son determinados de la siguiente manera:

$$S_p = \left[\frac{S_p}{S} \times S \right] - \left[F_o \times \frac{1}{K_t} \right] \tag{4.1}$$

El valor de S_p/S se puede obtener de la Gráfica 4.1. Se debe calcular primeramente el valor de F_o/SK_r y de N/N_o' .



Gráfica 4.1. Correlación para determinar S_p/S .

El parámetro F_o/SK_r se refiere a la elongación que sufren la varillas de succión debido a la carga del fluido, y está dado en porcentaje de la longitud de la varilla pulida.

Mientras que el parámetro SKr, es la carga necesaria para alargar la sarta de varillas, esto es una longitud igual a la longitud de la varilla pulida y puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$SKr = \frac{S}{1/Kr} \quad (4.2)$$

Además:

$$\frac{1}{Kr} = Er \times L \quad (4.3)$$

Donde:

Er.- Constante de elongación de las varillas, puede obtenerse de la Tabla A1, ver Apéndice A.

Por otro lado, el término Fo, es la carga sobre el émbolo y puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$Fo = 0.340 G Dp^2 D \quad (4.4)$$

N/No es la relación de velocidad de bombeo a la frecuencia natural de una sarta de un sólo diámetro y se determina de la siguiente forma:

$$N/No = NL / 245,000 \quad (4.5)$$

Donde:

No.- Frecuencia natural de una sarta de varillas de un sólo diámetro.

N/No' es la relación de velocidad de bombeo a la frecuencia natural de una sarta telescopiada y se determina de la siguiente forma:

$$N/No' = (N/No)/Fc \quad (4.6)$$

Donde:

No'.- Frecuencia natural de una sarta de varillas telescopiada.

Donde Fc (factor de frecuencia) es una constante de proporcionalidad, la cual depende del diseño de las varillas, su valor puede obtenerse de la Tabla A1, ver Apéndice A.

Cuando la tubería de producción está anclada, $1/Kt$ es cero. De no contar con esta situación su valor debe calcularse con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{Kt} = Et \cdot L \quad (4.7)$$

Donde:

Et.- Constante de elasticidad de la tubería y puede determinarse de la Tabla 3.4.

El desplazamiento de la bomba, PD, está dado por:

$$PD = 0.1166 \times Sp \times N \times Dp^2 \quad (4.8)$$

Donde:

La carga máxima en la varilla pulida, PPRL, está dada por:

$$PPRL = W_{rf} + \left[\left(\frac{F_1}{SK_r} \right) \times SK_r \right] \quad (4.9)$$

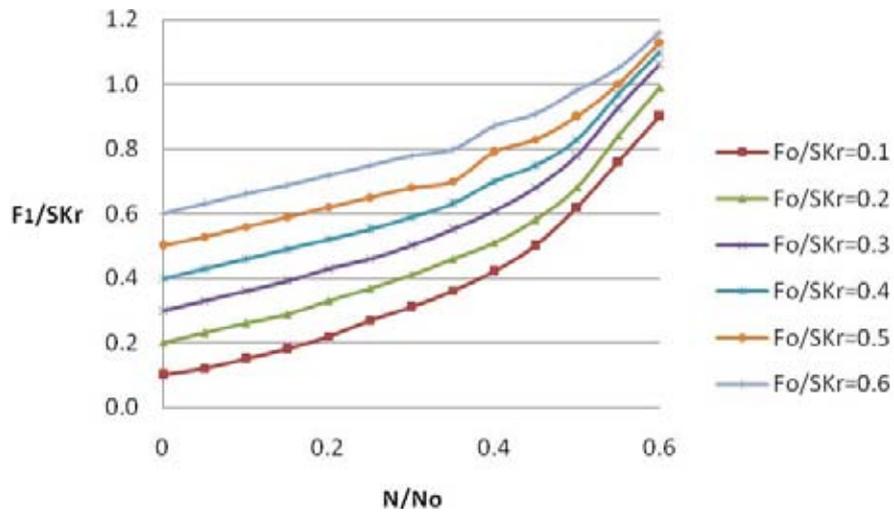
Donde:

W_{rf} .- Peso de las varillas en el fluido, lb

$$W_{rf} = W_r \times L(1 - 0.128G) \quad (4.10)$$

El peso de las varillas, W_r , en lb/ft, puede ser determinado de la Tabla A1, ver Apéndice A.

El parámetro F_1/SK_r es el factor adimensional de la carga máxima y puede determinarse de la Gráfica 4.2

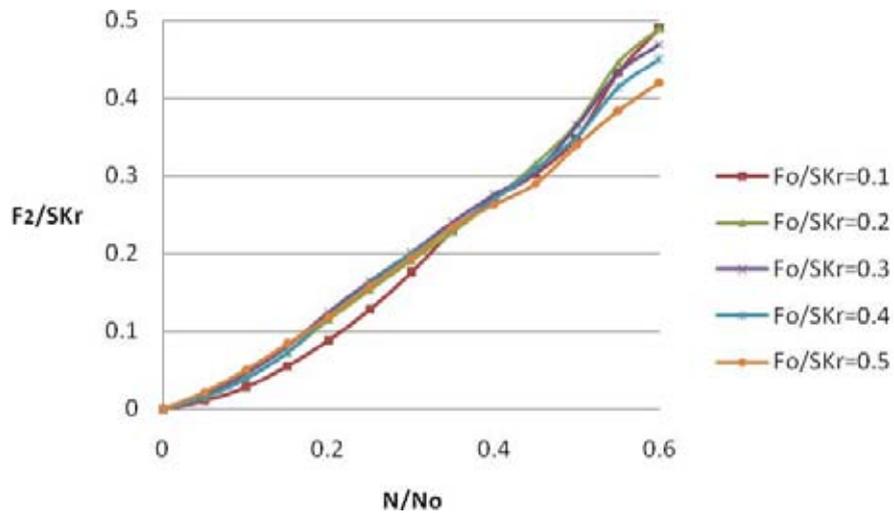


Gráfica 4.2. Correlación para determinar F_1/SK_r .

La carga mínima de la varilla pulida, MPRL, está dada por:

$$MPRL = W_{rf} \cdot \left[\left(\frac{F_2}{SK_r} \right) \times SK_r \right] \tag{4.11}$$

El parámetro F_2/SK_r es el factor adimensional de la carga mínima y puede determinarse de la Gráfica 4.3.



Gráfica 4.3. Correlación para determinar F_2/SK_r .

El torque pico, PT, está dado por:

$$PT = \left(\frac{2T}{S^2 K_r} \right) \times (SK_r) \times T_a \times \left(\frac{S}{2} \right) \tag{4.12}$$

Donde Ta es un ajuste del valor del torque máximo. Cuando Wrf/SKr es igual a 0.3 el valor de Ta es igual a 1, para el caso contrario se tiene que calcular Ta con la siguiente ecuación:

$$T_a = 1.0 + (\%) \left(\frac{\frac{W_{rf}}{SK_r} - 0.3}{10} \right) \tag{4.13}$$

El valor del porcentaje de ajuste se puede consultar de la Tabla 4.1 (puede ser positivo o negativo). Debe considerarse que al momento de sustituir en la Ecuación 4.13 se debe trabajar con porcentaje y no con fracción.

		Fo/SKr						
		0.000	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600
N/No'	0.000	0.200	0.160	0.080	0.055	0.029	0.005	-0.017
	0.050	0.180	0.120	0.065	0.040	0.015	-0.005	-0.017
	0.100	0.120	0.080	0.055	0.027	0.005	-0.017	-0.005
	0.150	0.100	0.065	0.040	0.015	-0.005	-0.017	0.003
	0.200	0.075	0.055	0.025	-0.005	-0.015	-0.005	0.011
	0.250	0.060	0.040	0.015	-0.005	-0.015	0.005	0.012
	0.300	0.050	0.025	0.005	-0.017	-0.005	0.011	0.013
	0.350	0.040	0.016	-0.005	-0.017	0.005	0.012	0.014
	0.400	0.030	0.012	-0.005	-0.005	0.011	0.013	0.015
	0.450	0.020	0.013	0.000	0.005	0.011	0.014	0.025
0.500	0.025	0.015	0.009	0.001	0.013	0.015	0.025	
0.550	0.030	0.028	0.015	0.015	0.015	0.020	0.030	
0.600	0.030	0.020	0.020	0.015	0.020	0.030	0.050	

Tabla 4.1. Fracción de ajuste¹².

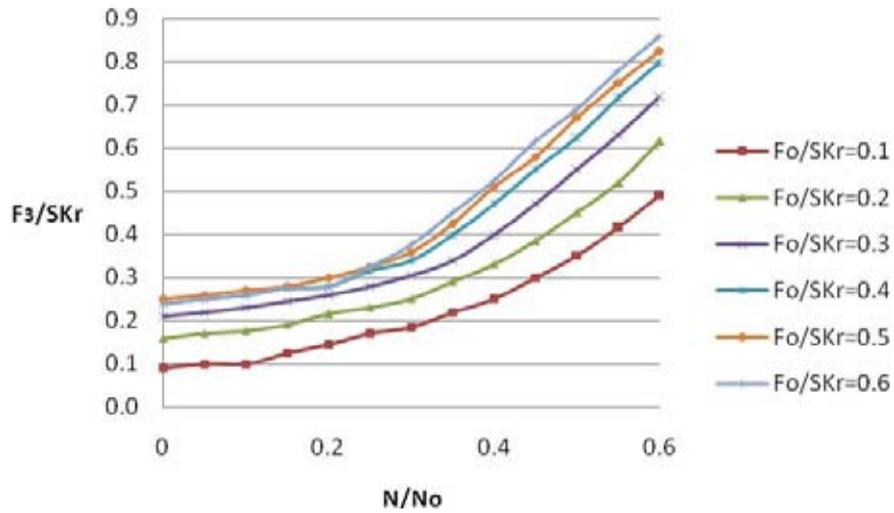
El valor de $2T/S^2 K_r$ es el factor de torque máximo y es obtenido a partir de la Gráfica 4.5.

La potencia en la varilla pulida (PRHP), está dada por:

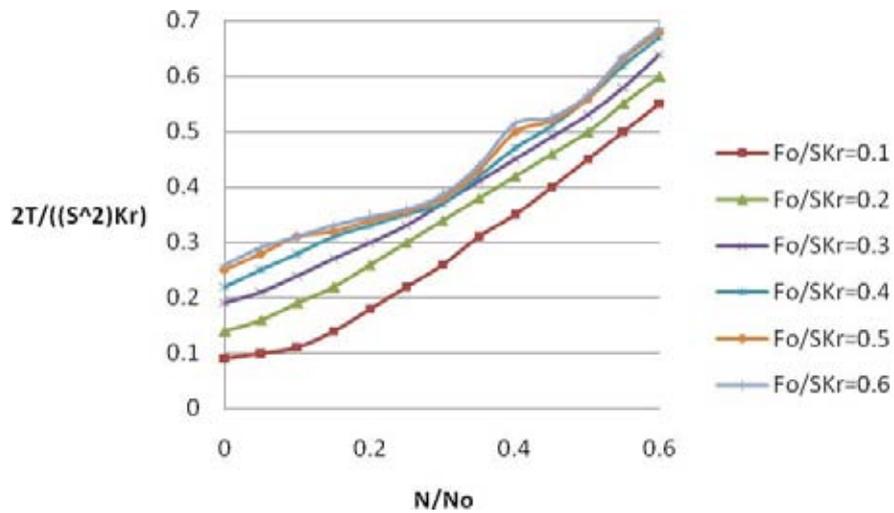
$$PRHP = (F_3/SK_r) \times SK_r \times S \times N(2.53 \times 10^{-6}) \tag{4.14}$$

¹² Tomada de: SAGAHON JUAREZ, Mario, *Modelo computarizado de diseño API en pozos de bombeo mecánico*. México, 1989, Tesis (Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México.

El parámetro (F_3/SK_r) es el factor de potencia en la varilla pulida y puede obtenerse a partir de la Gráfica 4.4.



Gráfica 4.4. Correlación para determinar F_3/SK_r .



Gráfica 4.5. Correlación para determinar $2T/(S^2Kr)$.

Finalmente, el contrabalanceo requerido es determinado por:

$$CBE = 1.06 \left(W_{rf} + \frac{1}{2} F_o \right) \tag{4.15}$$

El boletín API RP 11L proporciona un formato¹³ sobre el cual se realizan los cálculos para el diseño del sistema, la Figura 4.1 es una reproducción de dicho formato. En seguida de éste, en la Figura 4.2, se presenta una versión en español.

¹³ Tomado de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

<p>24. $MPRL = Wrf - [(F_2/SK_r) \times SK_r] = \text{_____} - [\text{_____} \times \text{_____}] = \text{_____} \text{ lb.}$</p> <p>25. $PT = (2T/S^2 K_r) \times SK_r \times (S/2) \times Ta = \text{_____} \times \text{_____} \times \text{_____} \times \text{_____} = \text{_____} \text{ pg-lb.}$</p> <p>26. $PRHP = (F_3/SK_r) \times SK_r \times S \times N \times 2.53 \times 10^{-6} = \text{_____} \times \text{_____} \times \text{_____} \times \text{_____} \times 2.53 \times 10^{-6} = \text{_____} \text{ hp.}$</p> <p>27. $CBE = 1.06 [Wrf + (Fo/2)] = 1.06 \times [\text{_____} + \text{_____}] = \text{_____} \text{ lb.}$</p>

Figura 4.2. Formato de cálculo para el diseño de UBM (API RP 11L).

4.3 EJEMPLO DE APLICACIÓN¹⁴

En un pozo petrolero se instalará una bomba de inserción con un émbolo de 1 3/4 pg a una profundidad de 6,232 pie en una tubería de producción de 2 7/8 pg. El fluido que se producirá tiene una densidad relativa de 0.87; se considera que el nivel dinámico en la tubería de revestimiento está a la misma profundidad de la colocación de la bomba. Realizar los cálculos correspondientes para seleccionar la UBM mínima requerida considerando que operará con una carrera de la varilla pulida de 100 pg, con una velocidad de bombeo de 13 rpm y moviendo una sarta de varillas número 86. Considere que la tubería está desanclada.

Datos:

- Diámetro del émbolo, $D_p = 1.75 \text{ pg}$
- Profundidad de la bomba, $L = 6,232 \text{ pie}$
- Diámetro de la tubería de producción = 2.875 pg
- Densidad relativa del fluido producido, $G = 0.87$
- Nivel del fluido, $D = 6,232 \text{ pie}$
- Carrera de la varilla pulida, $S = 100 \text{ pg}$
- Velocidad de bombeo, $N = 13 \text{ rpm}$
- Varillas de succión telescopiadas de 1, 7/8 y 3/4 pg
- Tubería desanclada

Solución:

Factores determinados de tablas

De la Tabla A1 (ver Apéndice A), para una varilla No. 86 y un diámetro del émbolo de la bomba de 1.75 pg:

$$Wr = 2.185 \text{ lb/pie}; Er = 0.699 \times 10^{-6}; Fc = 1.164$$

Cálculo de variables a partir de fórmulas

¹⁴ Tomado de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

$$F_o = 0.340 \times G \times Dp^2 \times D = 0.340 \times 0.870 \times (1.75)^2 \times (6,232) = 5,645.49 \text{ lb}$$

$$\frac{1}{K_r} = E_r \times L = \left(0.699 \times 10^{-6} \frac{\text{pg}}{\text{lb} \cdot \text{pie}} \right) (6,232 \text{ pie}) = 0.004356 \frac{\text{pg}}{\text{lb}}$$

$$SK_r = \frac{S}{1/K_r} = \frac{100 \text{ pg}}{0.004356 \text{ pg/lb}} = 22,955.955$$

$$\frac{F_o}{SK_r} = \frac{5,645.49 \text{ lb}}{22,955.955 \text{ lb}} = 0.25$$

$$\frac{N}{N_o} = \frac{NL}{245,000} = \frac{(13 \text{ rpm})(6,232 \text{ pie})}{245,000} = 0.33$$

$$\frac{N}{N_o'} = \frac{N/N_o}{F_c} = \frac{0.33}{1.164} = 0.28$$

$$\frac{1}{K_t} = E_t \times L = \left(0.221 \times 10^{-6} \frac{\text{pg}}{\text{lb} \cdot \text{pie}} \right) (6,232 \text{ pie}) = 0.0014 \frac{\text{pg}}{\text{lb}}$$

Cálculo de Sp, PD, W y Wrf

De la Gráfica 4.1

$$Sp/S = 0.83$$

Despejando Sp y haciendo las sustituciones correspondientes:

$$Sp = \left[\left(\frac{Sp}{S} \right) \times S \right] - \left[F_o \times \frac{1}{K_t} \right] = (0.83 \times 100) - (5,645.49 \times 0.0014) = 75.26 \text{ pg}$$

$$PD = 0.1166 Sp N Dp^2 = 0.1166 (75.26) (13) (1.75)^2 = 349.4 \text{ bpd}$$

$$W = W_r \times L = 2.185 \frac{\text{lb}}{\text{pie}} \times 6,232 \text{ pie} = 13,616.92 \text{ lb}$$

$$W_{rf} = W(1 - 0.128G) = 13,616.92 \text{ lb} \times [1 - 0.128(0.87)] = 12,100.54 \text{ lb}$$

Determinación de parámetros adimensionales

De la Gráfica 4.2, $F_1/SK_r = 0.46$

De la Gráfica 4.3, $F_2/SK_r = 0.22$

De la Gráfica 4.4, $F_3/SK_r = 0.31$

De la Gráfica 4.5, $2T/S^2K_r = 0.37$

De la Tabla 4.1, el porcentaje de ajuste es 0 por lo tanto de la Ecuación 3.10 se calcula que $T_a=1$

Resultados de las características de operación

$$PPRL = W_{rf} + [(F_1/SK_r) \times SK_r] = 12,100.54 \text{ lb} + (0.46 \times 22,955.96 \text{ lb}) = 22,660.28 \text{ lb}$$

$$MPRL = W_{rf} - [(F_2/SK_r) \times SK_r] = 12,100.56 \text{ lb} - (0.22 \times 22,955.96 \text{ lb}) = 7,050.25 \text{ lb}$$

$$PT = (2T/S^2K_r)(SK_r)(S/2)(T_a) = (0.37)(22,955.96 \text{ lb})(50 \text{ pg})(1) = 424,685.17 \text{ lb} \cdot \text{pg}$$

$$PRHP = (F_3/SK_r)(SK_r)(S)(N)(2.53 \times 10^{-6}) = (0.31)(22,955.96)(100)(13)(2.53 \times 10^{-6})$$

$$PRHP = 23.406 \text{ hp}$$

$$CBE = 1.06 \left(W_{rf} + \frac{F_o}{2} \right) = 1.06 \left(12,100.54 \text{ lb} + \frac{5,645.49 \text{ lb}}{2} \right) = 15,818.68 \text{ lb}$$

De acuerdo a la torsión máxima, la carga máxima y la carrera en la varilla pulida se procede a seleccionar la UBM mínima requerida en el catálogo Lufkin (Lufkin Industries, 2008), ver Apéndice D. Para este caso la unidad seleccionada es C - 640 D - 305 - 120, que corresponde a una unidad convencional con un torque máximo de 640,000 pg-lb, una carga máxima en la varilla pulida de 30,500 lb y una carrera máxima de la varilla pulida de 120 pg.

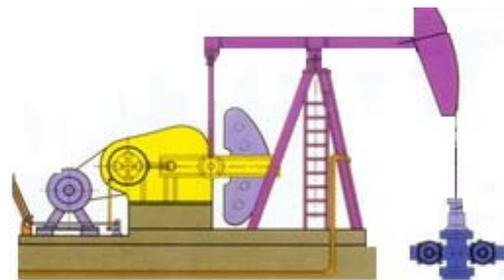


Figura 4.3. UBM Convencional.

4.4 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

Después de la puesta en operación de la UBM, es conveniente monitorear el funcionamiento de dicho sistema en su etapa productiva, esto con el objeto de detectar posibles alteraciones de la bomba, las varillas o cualquier otro elemento. Para este fin se hace uso de una herramienta llamada dinamómetro y por consiguiente de las cartas dinamométricas, que son parte fundamental en el análisis del comportamiento del sistema.

4.4.1 Dinamómetro superficial

Es una herramienta que registra el movimiento de la varilla pulida y la variación de la carga, durante el ciclo de bombeo; ambos registros se toman con respecto al tiempo y se dibujan en una gráfica. El tipo de dinamómetro más conocido es el Delta II, que consta principalmente de los siguientes componentes:

Transductor de carga. Es un registrador de esfuerzos de alta sensibilidad, el cual va montado entre la grampa de la varilla pulida y la barra porta varillas. Este transductor está calibrado con precisión para que pueda ser posible medir la carga que soprta la barra porta varillas, dicho peso es el de las varillas más el del fluido. Las cargas debidas a la compresión cambian la resistencia en el registrador de esfuerzos. Las diferencias resultantes del potencial a través de los registradores son grabadas en el lado derecho del registrador de dos canales en forma de carga contra tiempo.

Transductor de posición. Es un sistema conformado de partes mecánicas y electrónicas, el cual acciona a la bobina del potenciómetro. Los cambios de potencial a través de la bobina son grabados en el registrador de dos canales en forma de desplazamiento contra tiempo.

Registrador de dos canales. Es un sistema de grabación portátil diseñado para medir variables tales como esfuerzos, presiones, velocidades y aceleraciones.

Los datos superficiales registrados de carga contra tiempo y desplazamiento contra tiempo se alimentan a un programa de cómputo; como resultado se obtiene la carta dinamométrica a la profundidad de colocación de la bomba, con la cual es posible determinar las condiciones de operación. Generalmente en esta operación es necesario monitorear varios ciclos de bombeo con el objetivo de alimentar a la computadora con información veras.

4.4.2 Cartas dinamométricas

Es una gráfica continua resultante del registro de las fuerzas que actúan sobre la varilla pulida en cualquier instante durante el ciclo de bombeo y es registrado con respecto a la posición de la varilla pulida. Esta gráfica es la base para el análisis de esfuerzos sobre la UBM y la sarta de varillas de succión. El diagrama registrado está dado con la posición de la varilla pulida en el eje de las abscisas y las cargas en el eje de las ordenadas.

Una carta dinamométrica tiene tres usos principales: para obtener información que se utilizará como base para hacer cambios en el equipo de bombeo, en particular para determinar los rangos de carga, el par de torsión, los caballos de fuerza, el contrabalanceo y demás condiciones de operación; para optimizar el funcionamiento del sistema a través del ajuste de la velocidad de bombeo y de la longitud de la carrera; para verificar y probar las condiciones del pozo.

Cada vez que la bomba subsuperficial realiza un ciclo, una señal de fuerza es enviada a lo largo de la sarta de varillas de succión a una velocidad de alrededor de 15,800 pie/seg hasta la superficie donde es registrada por el dinamómetro. Para cada diferente condición de operación en el fondo, se envía una señal a la superficie, con lo que un analista puede determinar el comportamiento de la bomba de fondo y a través de la interpretación visual puede detectar lo siguiente:

- Condiciones de las válvulas viajera y estacionaria.
- Existencia de golpeteo de fluido.
- Presencia de candado de gas en la bomba.
- Exceso de fricción.
- Si el pozo está o no bombeando fluido a la superficie.

Existen gráficas típicas que permiten comprender de manera simple el comportamiento de una carta dinamométrica en el ciclo de bombeo. La Figura 4.4 presenta un sistema inelástico, en el que se hacen las siguientes suposiciones:

- i. Las varillas son completamente rígidas.
- ii. No hay tiempo de retraso en la transmisión de movimiento desde la superficie hasta el émbolo.
- iii. No presenta vibración.
- iv. Todos los componentes del sistema funcionan con el 100 % de eficiencia.

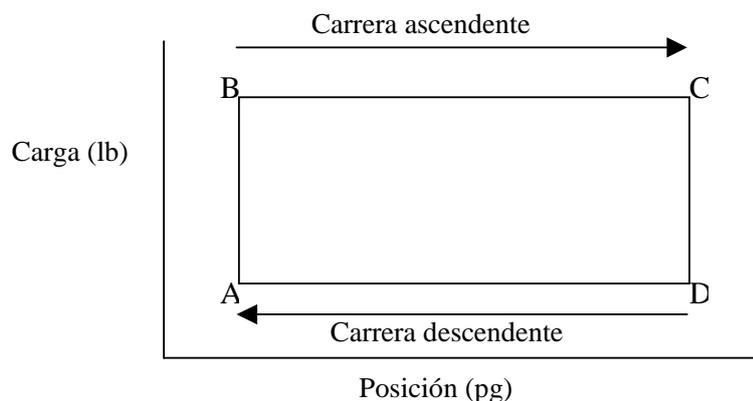


Figura 4.4. Carta dinamométrica de un sistema inelástico.

En el punto A, la válvula viajera cierra en el comienzo de la carrera ascendente y la carga del pozo es transferida instantáneamente a las varillas, esto representado como \overline{AB} . Para \overline{BC} la carga permanece constante hasta el tope de la carrera ascendente C. Entonces la válvula viajera abre, la válvula estacionaria se cierra y la carga es eliminada de las varillas en \overline{CD} instantáneamente. La carga otra vez permanece constante para \overline{DA} , así las varillas caen libremente. En el punto A el ciclo se repite.

Por diversos factores, como: la elongación y la contracción de las varillas, las aceleraciones en el movimiento reciprocante y la propia vibración de las varillas la carta dinamométrica teórica rara vez se logra en la práctica. A continuación se describen algunas características de estos factores.

Elongación y contracción de las varillas

La Figura 4.5 representa una carta dinamométrica teórica para un sistema de varillas elástico, en el que la sarta de varillas elástica y su carga de fluido son elevados por la varilla pulida, pero la carga total no se mueve hacia arriba simultáneamente sino que cada sección de la sarta de varillas, de abajo hacia arriba, tiende a alargarse ligeramente más que la sección inmediata anterior. En el principio de la carrera ascendente A, la carga comienza a incrementar gradualmente debido a la tensión de las varillas. La carga máxima en la varilla pulida se alcanza en B y permanece constante hasta el punto C, en tal punto las varillas comienzan a descender y a contraerse. En el punto D la carga del fluido ha sido transferida a la válvula estacionaria y la carga mínima en la varilla pulida otra vez permanece constante en \overline{DA} ; entonces el ciclo se repite.

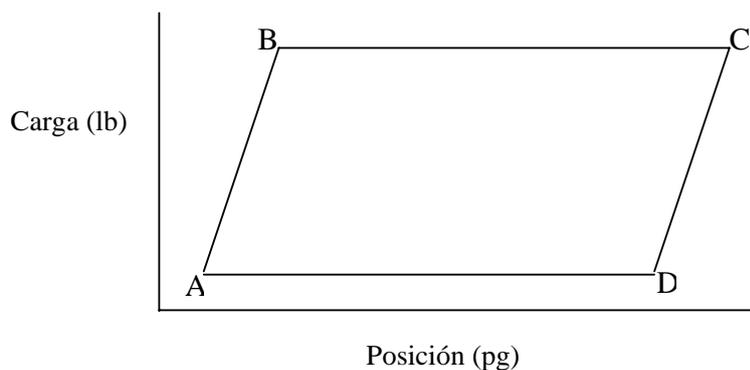


Figura 4.5. Carta dinamométrica de un sistema elástico.

Aceleración de la varilla pulida

El principal efecto de las fuerzas de aceleración en las varillas es hacer girar la gráfica en el sentido de las manecillas del reloj (ver Figura 4.6), es decir, elevar las cargas pico en el

fondo de la carrera y bajarlas en la parte superior de la carrera. Las varillas experimentan la máxima desaceleración en la parte superior de la carrera hacia arriba.

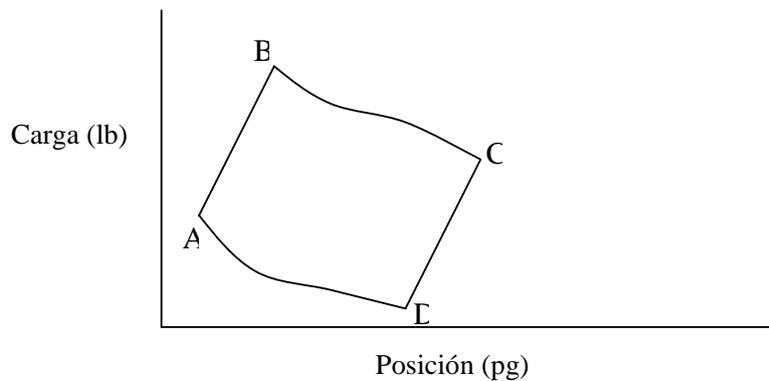
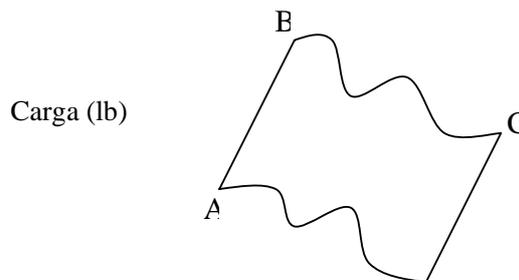


Figura 4.6. Modificación de la carta por efecto de la aceleración.

Vibración de las varillas

Después de que ocurre la elongación de las varillas y están presentes las fuerzas de aceleración, la sarta sufre un fenómeno de vibración natural. De manera similar ocurre cuando las varillas llegan a la parte superior de la carrera, comienzan a bajar y quedan liberadas del alargamiento, entonces, la sarta inicia nuevamente su periodo de frecuencia natural de vibraciones. Por lo tanto en un sistema con los efectos ya descritos e incluyendo este otro, se modifica la forma de la carta dinamométrica como se muestra en la Figura 4.7. Si la relación de velocidad de bombeo a la frecuencia natural de varillas es mayor existirán varios picos, es decir, que el número de picos será proporcional a la velocidad de bombeo.



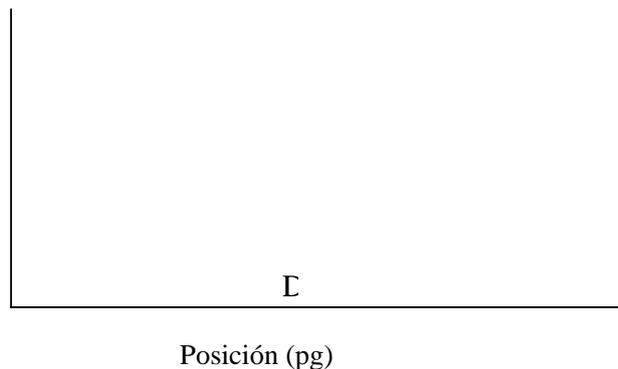


Figura 4.7. Modificación de la carta por efecto de vibración de las varillas.

Existen varias cartas dinamométricas típicas en las cuales es fácil diagnosticar el problema, dentro de los casos más comunes están el golpeteo por fluido, la interferencia de gas y el candado de gas. A continuación se describe el fenómeno físico que las define y el comportamiento de dichas gráficas.

Golpeteo por fluido. En este caso el pozo está casi o completamente agotado mediante el bombeo, y el desplazamiento del émbolo es más alto que el potencial de líquido de la formación. Como resultado se presenta un volumen de gas a baja presión en la cámara de la bomba, entre la válvula estacionaria y la viajera en cada carrera, conforme el émbolo se mueva hacia abajo, este gas se comprime, pero debajo de la válvula viajera se acumula presión insuficiente para superar la carga estática del fluido en la tubería de producción antes de que el émbolo toque el líquido relativamente libre de gas en la parte inferior de la cámara. El resultado es una brusca caída del esfuerzo de la sarta de varillas y el choque repentino puede ser dañino para la UBM (ver Figura 4.8. A).

Interferencia de gas. Este fenómeno tiene lugar cuando existe compresión de gas entre la válvula estacionaria y la viajera durante la carrera descendente. A diferencia del golpeteo por fluido, la válvula viajera abrirá antes de que la bomba golpee en el fluido, por lo que se tiene un decremento de la carga en la varilla pulida más suave (ver Figura 4.8. B).

Candado de gas. Si la bomba está operando a una eficiencia muy baja, es decir, si casi toda la carrera de la bomba se pierde en la compresión y expansión de gas, puede resultar una gráfica del tipo mostrado en la Figura 4.8. C. En el límite cuando no se bombea líquido alguno, no tiene lugar la acción de las válvulas y el área dentro de la carta puede desaparecer del todo; en este caso se dice que la bomba tiene candado de gas. Dicha condición es temporal, debido a que la fuga continua del petróleo al émbolo aumenta gradualmente el volumen de fluido en el cilindro de la bomba, hasta que es posible abrir la válvula viajera, momento en que se reinicia el bombeo.

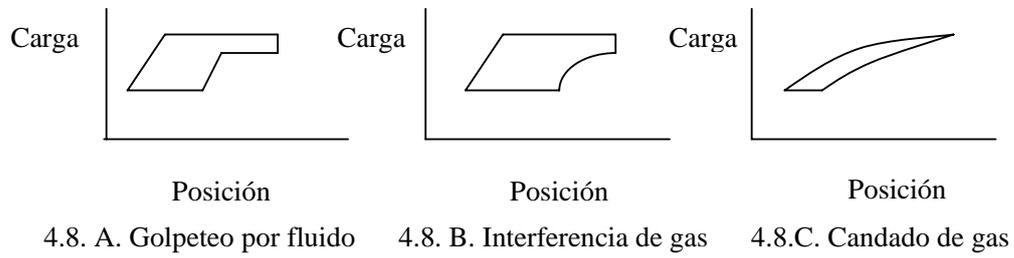


Figura 4.8. Cartas dinamométricas tipo.

5. PROGRAMA DE CÓMPUTO APLICADO AL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO API RP 11L

En cualquier rama de la ciencia, ya sea ingeniería, matemáticas aplicadas, entre otras, es necesario lograr soluciones prácticas y rápidas de fenómenos y procesos tanto físicos como químicos. En ocasiones, tales situaciones sólo se conocen de manera tabular o gráfica, es entonces, cuando la posibilidad de interpolar los datos o de generar una función de aproximación se torna primordial, pues con ello se obtiene una solución referida a los parámetros en estudio. Esta metodología evita el reproducir el proceso o fenómeno para cualquier condición requerida, con el consecuente ahorro de tiempo e inversión.

Por lo anterior, en el presente trabajo se hace uso de la técnica *Spline* cúbico, la cual es una herramienta matemática de interpolación exacta, que permite llevar a cabo el diseño del SBM por medio de un programa de cómputo. Como se ha descrito anteriormente, el procedimiento de diseño API de UBM señala el uso de diversas correlaciones que están contenidas ya sea en gráficas o tablas, las cuales han sido muy aceptadas a lo largo del mundo debido a su precisión y confiabilidad en los resultados obtenidos.

5.1 INTERPOLACIÓN

5.1.1 Interpolación funcional

Tiene por objetivo encontrar la ecuación de una curva que, aunque no pase por todos los puntos, tenga pocas variaciones y pase lo más cerca posible de todos ellos. La ecuación de dicha curva puede obtenerse por conocimiento previo del problema, es decir, por la interpretación física del fenómeno.

5.1.2 Interpolación exacta

Suponiendo que se cuenta con un conjunto de n pares de puntos, definidos en el conjunto \mathbf{R}^2 , tal que:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n), \quad \text{tal que,} \quad x_1 < x_2 < \dots < x_n$$

Los valores de las ordenadas y_i , son el resultado de alguna observación experimental o de alguna relación matemática y corresponden a las condiciones x_i . Si se desea conocer

(interpolarse) el valor de "y" que corresponde para $x \neq x_i$, deberá crearse una función f , de tal manera que:

$$f(x_i) = y_i \quad , \quad i=1,2,\dots,n \quad (5.1)$$

Además, la citada función debe proporcionar valores razonables para $f(x)$ cuando $x \neq x_i$. El criterio para definir un valor razonable varía de acuerdo al problema analizado y está sujeto a los requerimientos del analista. Si las ordenadas y_i conforman una función matemática "suave" y poseen un cierto número de cifras decimales exactas, se espera que la solución sea satisfactoria.

Si los puntos (x, y) , se derivan de observaciones experimentales muy precisas, de forma que pueden considerarse libres de error, por lo que es apropiado interpolarlos mediante una función suave, como la que ofrece la técnica de los *Spline* cúbicos. Si por el contrario, provienen de experimentos relativamente burdos o imprecisos, es absurdo obligar a que la función interpolante se ajuste exactamente a todos los puntos dato. En tal caso, será suficiente con ajustar una función global para lograr resultados aceptables.

El factor más importante a considerar en una interpolación, es definir como debe comportarse una función razonable a través de los puntos dato. Debido a que estos puntos pueden interpolarse con un número infinito de funciones distintas, por lo que se hace necesario emitir algún criterio para elegir alguna de ellas. El criterio típico se sustenta en la "suavidad" y simplicidad de la función a seleccionar.

La suavidad de una función está dada por el valor máximo de $|f''(x)|$. Entre menor sea dicho valor, la suavidad irá en aumento. La simplicidad se refiere al grado de la función y también debe ser el mínimo valor posible.

La técnica *spline* cúbico ajusta $n-1$ polinomios con el más alto grado de suavidad y simplicidad a los n puntos dato, lo que la diferencia de otras técnicas de interpolación exacta, en donde se ajusta un polinomio único que pase por todos los n puntos dato. Esta exclusividad de ajuste permite obtener la curva más suave y más simple de entre todas las curvas que pueden contener los n puntos dato.

Dado que la técnica de los *Spline* cúbicos es una herramienta matemática de interpolación exacta con alto grado de suavidad y simplicidad se ha elegido esta metodología para

realizar el modelo matemático que ha de satisfacer las correlaciones que proporciona el método API (procedimiento API RP 11L); las cuales se consideran exactas. A continuación se describe la técnica *Spline* cúbico que se utilizó como base para el desarrollo del programa de cómputo del presente trabajo.

5.2 TÉCNICA SPLINE CÚBICO (Berlanga, 1980)

Las funciones *Spline* cúbicas ajustan $n-1$ polinomios de tercer grado, esto es, un polinomio por cada uno de los $n-1$ intervalos definidos. Esta es la principal diferencia con las técnicas tradicionales, en las cuales, se ajusta un polinomio único a los n puntos base.

A continuación se expone la teoría de las funciones *Spline*:

Sean las abscisas $(a = x_0) < x_1 < \dots < (x_n = b)$ y las ordenadas $y_i, i=0,1,2,\dots,n$. Puede demostrarse (Berlanga, 1980) que de todas las funciones $f(x)$ con segunda derivada continua en el intervalo $[a,b]$, tales que $f(x_i) = y_i$, la función *Spline* cúbico, con segunda derivada igual a cero en los extremos del citado intervalo, $s''(a) = s''(b) = 0$, minimiza la integral:

$$\int_a^b (f''(x))^2 dx \quad (5.2)$$

esto es:

$$\int_a^b (s''(x))^2 dx \leq \int_a^b (f''(x))^2 dx \quad (5.3)$$

La función *Spline* cúbico con condición $s''(a) = s''(b) = 0$, es denominada *Spline* natural y posee la menor curvatura (mayor "suavidad") de entre todas las funciones que pueden interpolar los puntos dato.

En los $n-1$ intervalos, se tiene igual número de secciones separadas de curvas cúbicas, cada una con 4 parámetros a determinar, por lo que habrá $4n-4$ términos a determinar. El hecho de que $s(x)$ sea continua, y que su primera y segunda derivada también lo sean en los $n-2$ puntos interiores x_i adiciona $3(n-2)$ condiciones. Como $s(x_i) = y_i$ en cada uno de los nodos, se introducen n condiciones más, siendo $4n-6$ el número total de parámetros a determinar.

Para generar un sistema compatible, deben incluirse dos condiciones adicionales, que pueden estar dadas por las condiciones de frontera, $s''(a) = s''(b) = 0$.

Por lo que es posible construir una función *Spline* como un proceso simple y numéricamente estable. Suponer el subintervalo (x_i, x_{i+1}) , y que:

$$h_i = x_{i+1} - x_i, \quad (5.4)$$

$$w = \frac{x - x_i}{h_i}, \quad (5.5)$$

$$\bar{w} = 1 - w, \quad (5.6)$$

Debido a que x fluctúa en tal subintervalo, w variará de 0 a 1 y \bar{w} de 1 a 0. Ahora, representando la función *Spline* por medio de :

$$s_i(x) = wy_{i+1} + \bar{w}y_i + h_i^2 \left[(w^3 - w)\sigma_{i+1} + (\bar{w}^3 - \bar{w})\sigma_i \right] \quad (5.7)$$

Donde:

σ_i y σ_{i+1} son constantes por determinar.

Los dos primeros términos de la expresión anterior representan una interpolación lineal, mientras que los términos entre paréntesis rectangulares realizan una corrección cúbica, que genera la suavidad de la solución. El término corrector desaparece en el punto inicial y final del intervalo, de manera que:

$$s(x_i) = y_i, \quad (5.8)$$

$$s(x_{i+1}) = y_{i+1} \quad (5.9)$$

De lo anterior, es posible determinar que la función $s(x)$ interpola exactamente los datos, sin importar cuales sean los valores de σ_i .

Ahora diferenciando en tres ocasiones la función $s(x)$ y utilizando la regla de la cadena y considerando que:

$$w' = \frac{1}{h_i}, \quad (5.10)$$

$$\bar{w}' = \frac{-1}{h_i}, \quad (5.11)$$

se obtiene:

$$s'(x) = \frac{(y_{i+1})}{h_i} + h_i \left[(3w^2 - 1)\sigma_{i+1} + (3\bar{w}^2 - 1)\sigma_i \right], \quad (5.12)$$

$$s''(x) = 6w\sigma_{i+1} + 6\bar{w}\sigma_i, \quad (5.13)$$

$$s'''(x) = \frac{6(\sigma_{i+1} - \sigma_i)}{h_i}, \quad (5.14)$$

Debe señalarse que $s'''(x)$ es una función lineal, la cual interpola entre los valores $6\sigma_{i+1}$ y $6\sigma_i$. Consecuentemente:

$$\sigma_i = \frac{s''(x_i)}{6} \quad (5.15)$$

Lo que explica el significado de σ_i , pero no determina su valor. Además, $s'''(x)$ es constante en cada subintervalo y $s'''(x) = 0$ puesto que $s(x)$ es una función cúbica. Si se evalúa $s'(x)$ en los puntos extremos del subintervalo se tiene:

$$s'_+(x_i) = \Delta_i - h_i(\sigma_{i+1} + 2\sigma_i), \quad (5.16)$$

y

$$s'_-(x_{i+1}) = \Delta_i + h_i(2\sigma_{i+1} + \sigma_i), \quad (5.17)$$

Donde:

$$\Delta_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} \quad (5.18)$$

En las expresiones anteriores se emplea de manera temporal s'_+ y s'_- , debido a que la fórmula para $s(x)$ se cumple sólo en el intervalo $[x_i, x_{i+1}]$ y las derivadas en los puntos

extremo no están claramente definidas. Con la finalidad de lograr la continuidad deseada en $s'(x)$, se fijan las siguientes condiciones en los puntos interiores:

- La primera derivada en un punto dado, es la misma que para ambos lados de la función definida que pasa por el punto en común. Esto es:

$$s'_-(x_i) = s'_+(x_i) \quad , \quad i=2,3,\dots,n-1 \tag{5.19}$$

- La segunda derivada en un punto dado, es la misma para ambos lados de la función definida que pasa por el punto en común.

Aún cuando s' se calcule al considerar el subintervalo $[x_{i-1}, x_i]$, su fórmula puede obtenerse al reemplazar i por $i-1$, lo que origina:

$$\Delta_{i-1} + h_{i-1}(2\sigma_i + \sigma_{i-1}) = \Delta_i - h_i(\sigma_{i+1} + 2\sigma_i) \tag{5.20}$$

Por lo que agrupando términos:

$$h_{i-1}(\sigma_{i-1}) + 2(h_{i-1} + h_i)\sigma_i + h_i(\sigma_{i+1}) = \Delta_i - \Delta_{i-1} \quad ; \quad i=2,3,\dots,n-1 \tag{5.21}$$

La expresión anterior genera un sistema de $n-2$ ecuaciones lineales con n incógnitas, σ_i , $i=1,2,\dots,n$. Entonces, deben adicionarse dos condiciones para lograr una solución única, esto es, el problema se resuelve considerando un *Spline* natural, puesto que $s''(x_1)=s''(x_n)=0$, lo que implica que $\sigma_1 = \sigma_n = 0$.

Un *Spline* con estas condiciones de frontera define un sistema de $n-2$ ecuaciones lineales y $n-2$ incógnitas, de forma tal que, se establece el siguiente sistema:

$$\begin{bmatrix} 2(h_1+h_2) & h_2 & 0 & 0 & 0 \\ h_2 & 2(h_2+h_3) & h_3 & 0 & 0 \\ 0 & M & M & M & 0 \\ 0 & 0 & h_{n-3} & 2(h_{n-3}+h_{n-2}) & h_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & h_{n-2} & 2(h_{n-2}+h_{n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ M \\ \sigma_{n-2} \\ \sigma_{n-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_2 - \Delta_1 \\ \Delta_3 - \Delta_2 \\ M \\ \Delta_{n-2} - \Delta_{n-3} \\ \Delta_{n-1} - \Delta_{n-2} \end{bmatrix}$$

Como se puede ver, se trata de un sistema tridiagonal y simétrico, además de que para cualquier $x_1 < x_2 < \dots < x_n$, la matriz es no singular y generalmente está bien condicionada. Por lo tanto, se puede emplear el algoritmo de Thomas para resolver dicho sistema, lo cual reduce el tiempo de ejecución comparado con la solución con las subrutinas DECOM y SOLVE, Gauss-Jordan, Gauss-Seidel, entre otras (Berlanga, 1980).

Si el *Spline* se va a evaluar muchas veces, es conveniente calcular y almacenar los coeficientes del *Spline* cúbico, b_i, c_i y $d_i, i=1,2,\dots,n-1$, para cada intervalo $[x_i, x_{i+1}]$, siendo:

$$s(x) = y_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad ; \quad x_i \leq x \leq x_{i+1} \quad (5.22)$$

Dichos coeficientes pueden obtenerse con las ecuaciones siguientes:

$$b_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - h_i(\sigma_{i+1} + 2\sigma_i), \quad (5.23)$$

$$c_i = 3\sigma_i, \quad i=1,2,\dots,n-1 \quad (5.24)$$

$$d_i = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{h_i} \quad (5.25)$$

De esta manera se simplifican manipulaciones de $s(x)$, tales como derivaciones e integraciones.

5.2.1 Subrutina *Spline* y Función *Seval*

La subrutina *Spline* utilizada en el programa de cómputo tiene implementada la técnica descrita para calcular los coeficientes de la función cúbica. Una vez calculados los coeficientes por SPLINE, el subprograma SEVAL evalúa el valor a interpolar en el *Spline* correspondiente. El Apéndice C, presenta estas dos subrutinas con sus respectivos comentarios que explican su funcionamiento, están desarrolladas en lenguaje *Visual Basic 6.0TM*. Los comentarios que aparecen en cada subrutina, se emplean para describir claramente cada término de la técnica.

5.3 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE CÓMPUTO RODSYSTEM

RodSystem es un programa de cómputo desarrollado en lenguaje *Visual Basic 6.0TM*, que cuenta con una interfaz de entrada y salida de datos en ambiente *WindowsTM*, permite llevar a cabo el diseño del SBM en un tiempo mínimo. Dicho programa se basa en el método API para el diseño de UBM, el cual conlleva el manejo de diversas correlaciones que están contenidas en tablas (ver Apéndice B), estas se han cargado a RodSystem para determinar los diferentes parámetros adimensionales que señala el procedimiento API RP 11L. Las correlaciones para diseñar el SBM están dadas en función de tres parámetros, lo cual da origen a una interpolación doble, en tercera dimensión; para esto se hace uso de las subrutinas SPLINE y SEVAL, lo cuál hace posible trabajar con las correlaciones ofrecidas por el procedimiento y realizar sus consecuentes interpolaciones. Todos los datos, tanto de entrada como de salida son de tipo txt, lo que permite su fácil lectura y manipulación.

5.3.1 Objetivo

Diseñar el Sistema de Bombeo Mecánico a partir del procedimiento de diseño API RP 11L, construir diferentes escenarios y elegir el óptimo.

5.3.2 Datos requeridos

RodSystem requiere de datos obligatorios para realizar el diseño, los cuales deben ser ingresados sin excepción. Estos son:

- Nivel del fluido.
- Profundidad de colocación de la bomba.
- Densidad relativa del aceite.
- Velocidad de bombeo.
- Carrera de la varilla pulida.
- Diseño de varillas(número y grado de las varilla).
- Tipo de ambiente al cual será sometido el sistema.
- Diámetro del émbolo y eficiencia de la bomba.
- Diámetro de la tubería y si está anclada.
- Tipo de unidad, (Convencional, Mark II o Aerobalanceada).
- Eficiencia de la unidad de bombeo.
- Eficiencia y tipo de motor.

5.3.3 Ejecución de RodSystem

Al ser ejecutado RodSystem se presenta la pantalla de arranque (también conocida como *Splash*), la cual presenta las características del proyecto, el autor y la plataforma en la cual fue desarrollado (ver Figura 5.1).

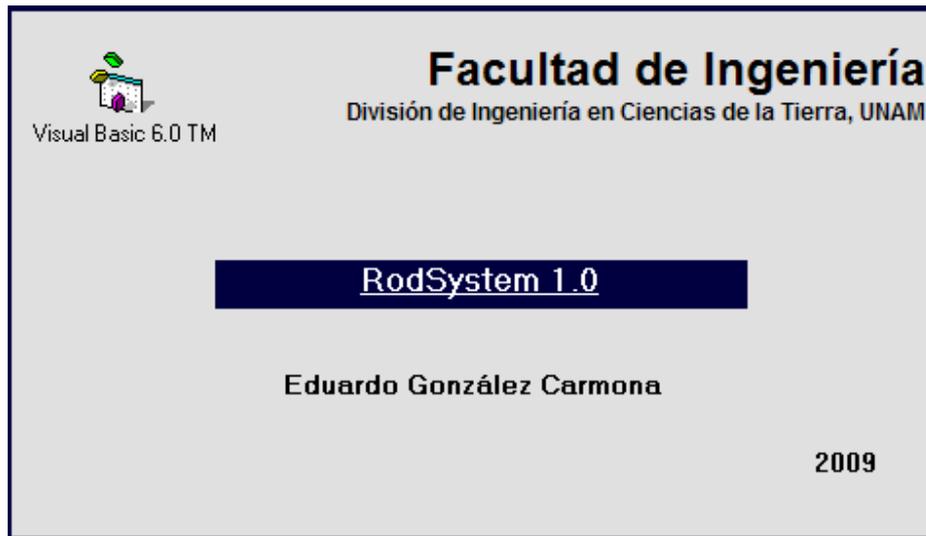


Figura 5.1. Ventana de arranque del programa RodSystem versión 1.0.

Después de ocultarse la ventana de *Splash* se muestra una segunda ventana, "Restricción del usuario" (Figura 5.2), en ella se deben llenar los campos con la información del nombre de usuario y contraseña, al haber ingresado la información correcta y tras oprimir el botón "Aceptar" se podrá tener acceso a la plataforma de diseño, de lo contrario se mostrará una advertencia.

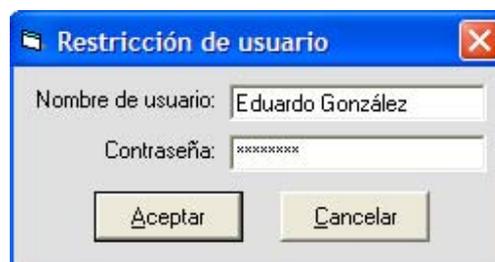


Figura 5.2. Ventana de restricción de usuario para acceder al programa RodSystem.

5.3.4 Ventana de diseño de RodSystem

Es la pantalla principal, en la cual se ingresan los datos y se proyectan los resultados preliminares del diseño. Deberán ingresarse los datos que se especificaron en el punto 5.3.2. RodSystem trabaja con el sistema inglés de unidades, por lo que los datos deben ser ingresarse en dichas unidades. La pantalla está conformada de la siguiente manera: en la parte superior se encuentra el menú y en la parte central el grupo de diseño, básicamente este grupo se dividen en dos partes, apartado de entrada de datos y apartado de resultados (ver Figura 5.3).

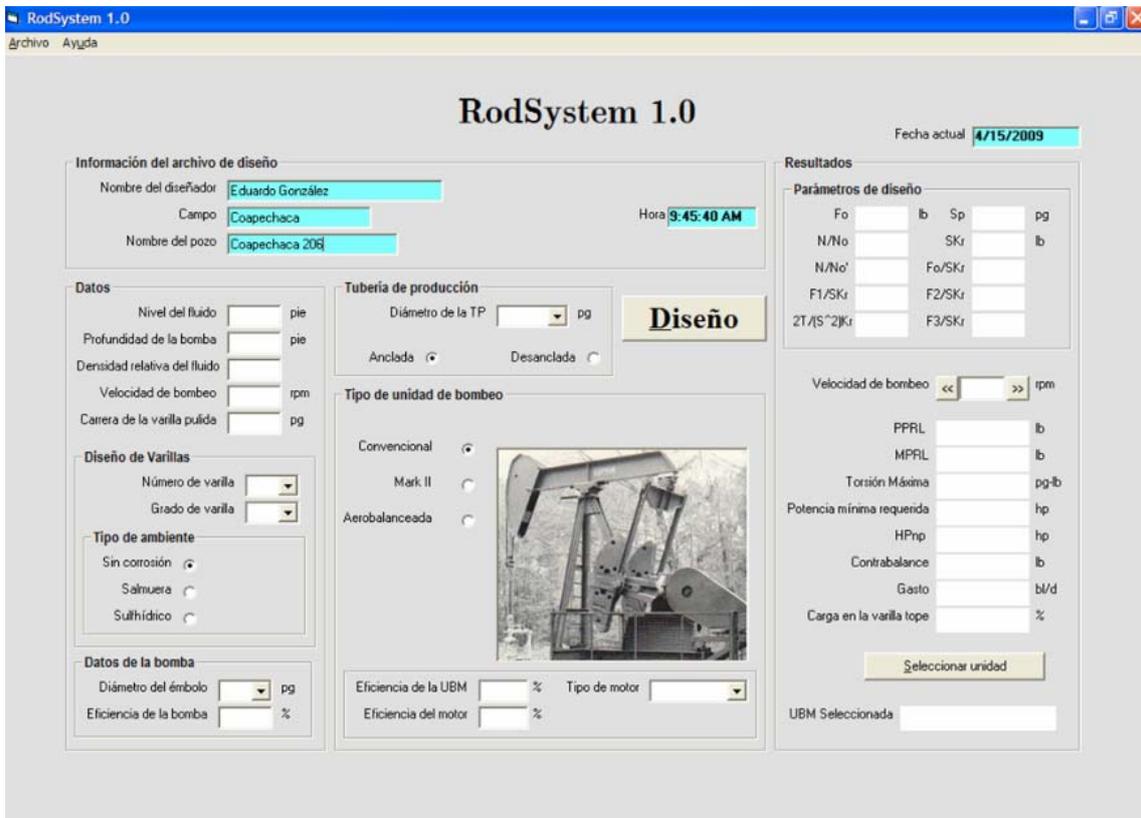


Figura 5.3. Pantalla de diseño de RodSystem.

5.3.5 Descripción de los campos del programa RodSystem

5.3.5.1 Información del archivo de diseño

Sección en la que se ingresan los nombres del campo y del pozo en el que se pretende implantar una UBM.

Figura 5.4. Información del archivo de diseño.

5.3.5.2 Datos generales

Incluyen las condiciones a las cuales operará el SBM, en esta sección se especifica el diseño de varillas, el tipo de ambiente y los datos de la bomba.

Figura 5.5. Datos de diseño.

Datos: La profundidad de la bomba debe ser mayor que el nivel del fluido con el fin de asegurar la sumersión de la misma.

Diseño de varillas: El número de varilla define los porcentajes preestablecidos de cada diámetro de varilla. El grado define la resistencia a la tensión de las varillas API, este campo puede tomar los valores K, C y D, siendo esta última la de mayor resistencia.

Tipo de ambiente: Ambiente al cual se somete el SBM, cada caso repercute significativamente en los resultados de diseño.

Datos de la bomba: El diámetro del émbolo debe ser menor que el diámetro de la TP; la eficiencia de la bomba se considera en la mayoría de los casos del 80 %.

5.3.5.3 Datos de la tubería de producción

En esta sección se elige el diámetro de la tubería de producción y se especifica si estará anclada o no, si lo está la carrera efectiva del émbolo será mayor, aumentando por tanto la eficiencia de la bomba.

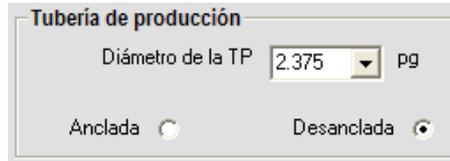


Figura 5.6. Datos de la tubería de producción.

5.3.6 Diseño del sistema de bombeo mecánico

Después de haber ingresado la información requerida para realizar el diseño, se debe oprimir el botón "Diseño", con esta acción el programa realiza los cálculos necesarios-incluyendo las interpolaciones-para calcular los diferentes parámetros del diseño, que posteriormente se emplean para la selección de la UBM. Finalmente, los resultados del cálculo se presentan en la pantalla.

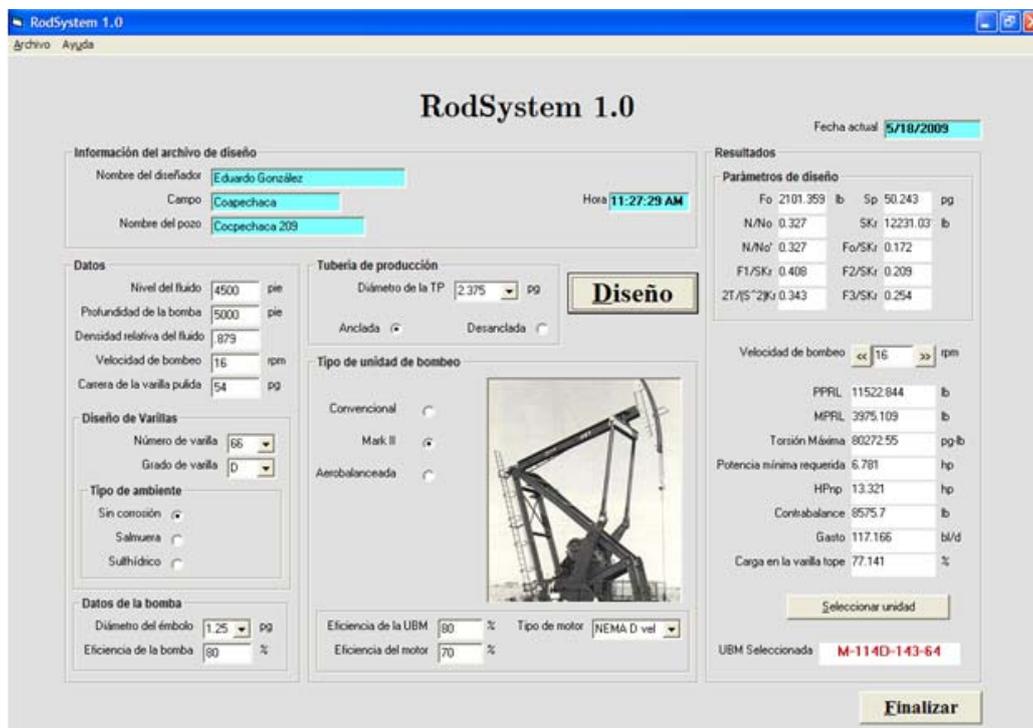


Figura 5.7. Diseño el SBM.

5.3.6.1 Mensajes de alerta

En caso de que ciertos valores estén fuera del rango de las correlaciones o si las varillas están sobrecargadas, RodSystem mostrará un mensaje alertando al diseñador de este hecho, ver Figuras 5.8, 5.9 y 5.10.

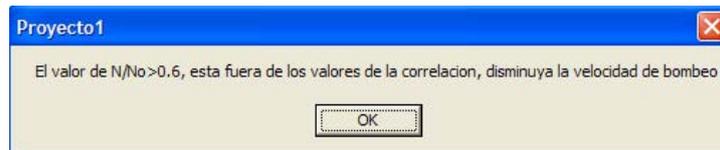


Figura 5.8. El valor de N/N_o está fuera del rango de la correlación.

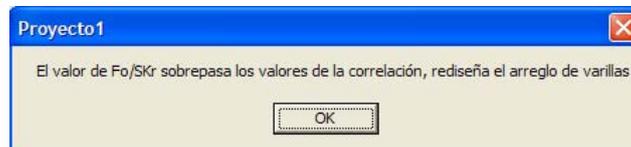


Figura 5.9. El valor de F_o/SK_r es mayor que 0.6.

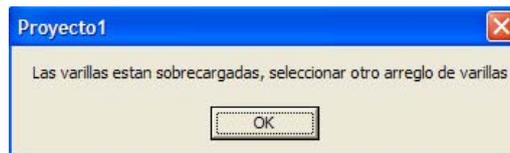


Figura 5.10. Las varillas están sobrecargadas.

5.3.7 Selección de la unidad de bombeo mecánico

Cuando el diseño es correcto y no se presenta ningún mensaje de alerta, es momento de seleccionar la unidad. Para lo cual se procede a dar un *click* al botón "Seleccionar unidad"; con lo que inmediatamente se mostrará la ventana "Selección de la unidad" en la que además de especificarse la unidad mínima requerida ideal para el pozo en estudio se muestra un catálogo con todas las unidades que son candidatas para el mismo, así como sus respectivas características físicas y capacidades mecánicas (ver Figura 5.11). Es conveniente mencionar que aunque para estas alturas del diseño se conoce la unidad mínima requerida se deberá seleccionar una unidad del catálogo puesto que son construidas en tamaños preestablecidos por los fabricantes; RodSystem cuenta con el catálogo de unidades Lufkin precargado (Lufkin Industries, 2008). La clave de la unidad seleccionada se imprime en su campo correspondiente, en la pantalla principal. En este momento si se desea se puede guardar el archivo de diseño.

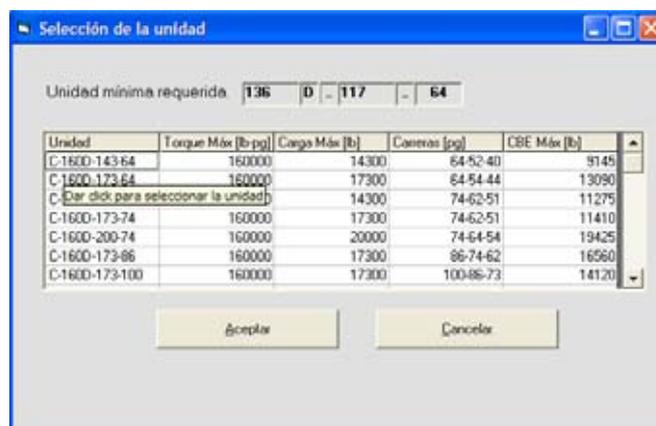


Figura 5.11. Selección de la unidad.

5.3.8 Descripción del menú Archivo

El menú Archivo cuenta con los siguientes comandos: Nuevo, Abrir, Guardar, Guardar como y Salir. A continuación se describen cada uno de ellos.

5.3.8.1 Nuevo

Esta opción se utiliza cuando se quiere iniciar un nuevo diseño, al seleccionarlo se limpian todos los campos de la pantalla de diseño, exceptuando el correspondiente al nombre del diseñador.

5.3.8.2 Abrir

Al seleccionarlo se muestra la pantalla "Abrir" (ver Figura 5.12). En ella se puede especificar la ruta específica en la cual se encuentra guardado el archivo de diseño que se quiere modificar o consultar. La extensión ".rds" denota un archivo propio de RodSystem.

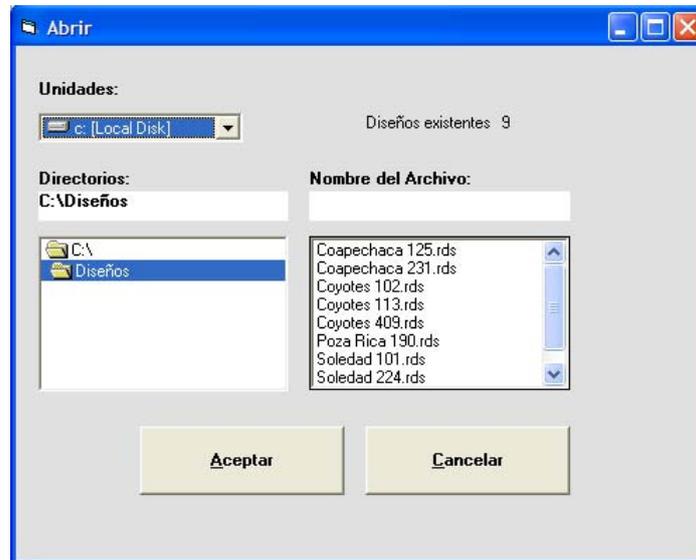


Figura 5.12. Ventana Abrir.

5.3.8.3 Guardar

Esta opción permite guardar automáticamente las modificaciones realizadas a la información o a los cálculos realizados en un archivo previamente abierto; si el archivo no se ha guardado con anterioridad se mostrará la ventana "Guardar como".

5.3.8.4 Guardar como

Esta opción se selecciona para guardar un diseño con un nombre distinto o para asignarle un nombre a un archivo nuevo. Al seleccionar este comando se muestra la ventana "Guardar como" (ver Figura 5.13).



Figura 5.13. Ventana Guardar como.

5.3.8.5 Salir

Al seleccionarlo se muestra la ventana "Finalizar sesión".



Figura 5.14. Ventana Finalizar Sesión.

5.3.9 Descripción del menú Ayuda

Esta opción permite ver el contenido de la ventana "Ayuda", en ella se presenta información relevante en torno al funcionamiento del programa, así como de la descripción de los diferentes parámetros que se utilizan en el programa RodSystem (ver Figura 5.15).

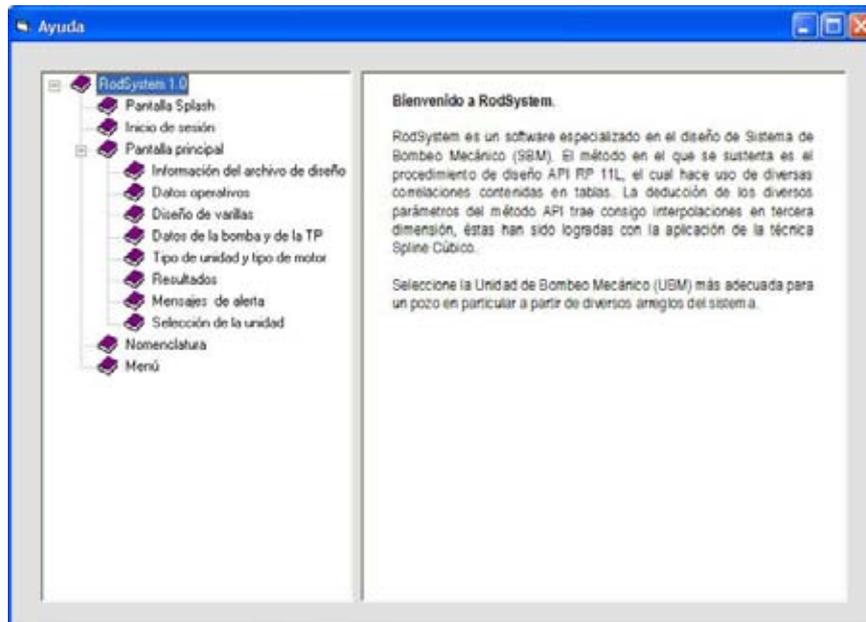


Figura 5.15. Ayuda de RodSystem.

5.3.10 Limitaciones del programa de cómputo RodSystem

- RodSystem supone que no existe contenido de agua en los fluidos producidos.
- Se desprecian los efectos por fricción.
- Se pueden diseñar sólo unidades de balancín de tipo Convencional, Mark II y Aerobalanceadas.
- No se contempla la posibilidad de utilizar varillas de fibra de vidrio.
- Es exclusivamente para diseñar pozos verticales.

6. VALIDACIÓN DEL PROGRAMA DE CÓMPUTO RODSYSTEM

Al desarrollar una herramienta de cómputo se hace necesario validarla para certificar la confiabilidad de sus resultados, por lo que en el presente trabajo se demuestra que los resultados obtenidos con RodSystem son bastante cercanos y aceptables. Para este propósito se incluye una serie de comparaciones entre los resultados obtenidos con RodSystem y los determinados a través de diferentes fuentes como: literatura especializada, datos reales de campo y un *software* especializado en el diseño del SBM.

6.1 VALIDACIÓN CON BASE EN LITERATURA ESPECIALIZADA

En esta sección se presentan dos casos extraídos de la literatura referente al diseño del SBM, al final de cada caso se presenta una comparación con los resultados obtenidos con RodSystem.

Caso 1¹⁵. Los datos de entradas son los siguientes:

- Nombre del pozo: Caso 1.
- Nivel del fluido: 4,500 pie.
- Profundidad de la bomba: 5,000 pie.
- Diámetro de la tubería de producción: 2 pg.
- Velocidad de bombeo: 16 rpm.
- Longitud de la carrera: 54 pg.
- Tipo de varillas de succión: Varillas número 76, grado D.
- Diámetro del émbolo: 1.50 pg.
- Gravedad específica del fluido: 0.9.
- Eficiencia de la bomba: 100%.
- Tipo de unidad: Convencional.

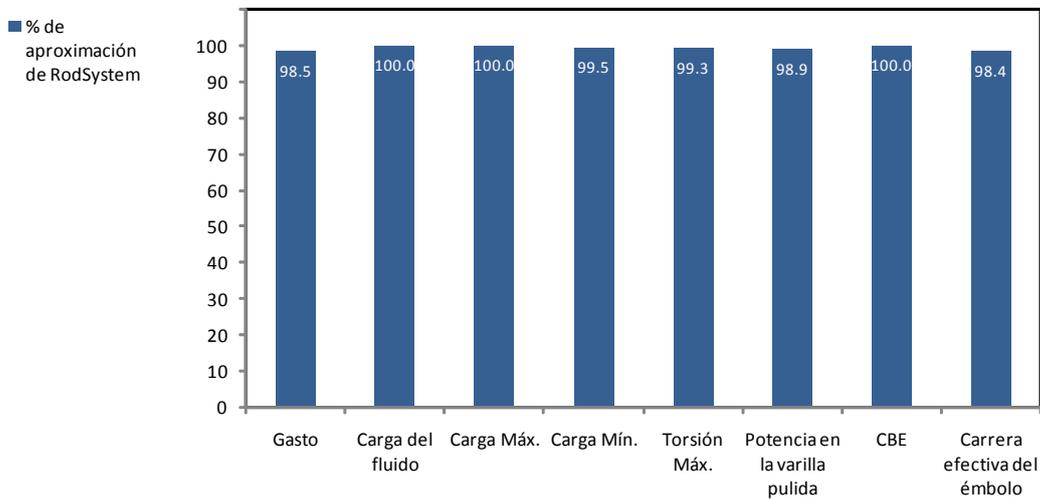
En la Tabla 6.1 se presentan los resultados del diseño provenientes de la literatura citada y de RodSystem.

¹⁵ Tomado de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

Fuente	Literatura	RodSystem	% de aproximación de RodSystem
Unidad de bombeo seleccionada	C-160D-173-64	C-160D-173-64	-----
Gasto	175 bpd	172.3 bpd	98.5
Carga del fluido en la bomba	3,098 lb	3,098 lb	100.0
Máxima carga en la varilla pulida	14,356 lb	14,350.9 lb	99.9
Mínima carga en la varilla pulida	5,249 lb	5,225.1 lb	99.5
Máxima torsión en el reductor	133,793 pg-lb	134,745.6 pg-lb	99.3
Potencia en la varilla pulida	8.5 hp	8.41hp	98.8
Contrabalanceo requerido	10,239 lb	10,237.8 lb	99.9
Carrera efectiva del émbolo	41.7 pg	41.038 pg	98.4

Tabla 6.1. Validación de RodSystem con base en literatura (Caso 1).

En este caso los valores de los diferentes parámetros de diseño son muy parecidos con los obtenidos con RodSystem. Debe notarse que si el diseño especificara una tubería anclada el desplazamiento y la carrera efectiva del émbolo hubieran sido mayores. En la gráfica siguiente se muestra el porcentaje de aproximación de RodSystem para el Caso 1.



Gráfica 6.1. Porcentaje de aproximación de RodSystem (Caso 1).

Caso 2¹⁶. Los datos de entrada son los siguientes:

- Nombre del pozo: Caso 2
- Nivel del fluido: 8,650 pie
- Profundidad de la bomba: 8,650 pie
- Diámetro de la tubería de producción: 2 pg
- Velocidad de bombeo: 7.6 rpm
- Longitud de la carrera: 168 pg
- Tipo de varillas de succión: Varillas número 86 grado D
- Diámetro del émbolo: 1.75 pg
- Gravedad específica del fluido: 1.0
- Eficiencia de la bomba: 100%
- Tipo de unidad: Mark II

En la Tabla 6.2 se presentan los resultados del diseño provenientes de la literatura citada y de RodSystem.

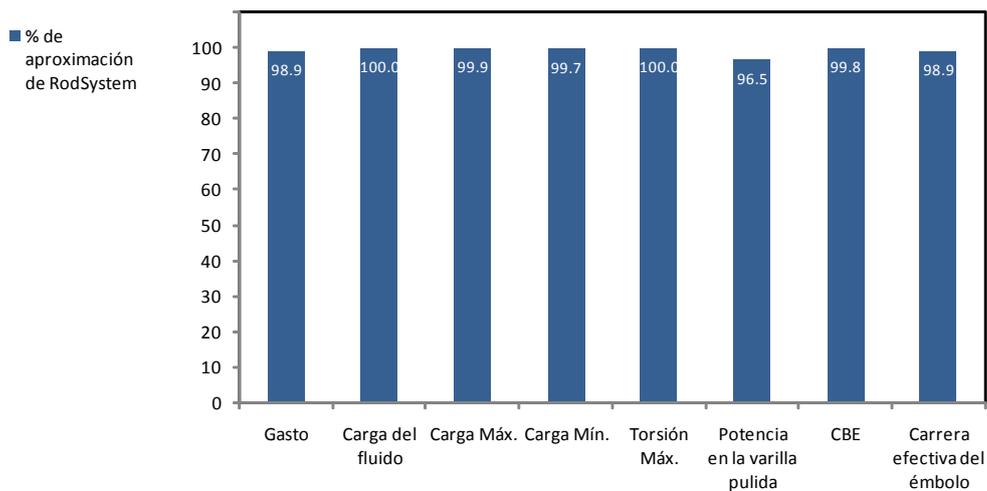
Fuente	Literatura	RodSystem	% de aproximación de RodSystem
Unidad de bombeo seleccionada	M-640D-305-168	M-640D-305-168	-----
Gasto	351 bpd	354.73 bpd	98.9
Carga del fluido en la bomba	9,005 lb	9,007 lb	99.9
Máxima carga en la varilla pulida	29,075 lb	29,037.52 lb	99.9
Mínima carga en la varilla pulida	10,374 lb	10,345.5 lb	99.7
Máxima torsión en el reductor	612,800 pg-lb	612,792.6 pg-lb	100.0
Potencia en la varilla pulida	26 hp	26.9 hp	96.5
Contrabalanceo requerido	21,862 lb	21,824.1 lb	99.8
Carrera efectiva del émbolo	129.33 pg	130.71 pg	98.9

Tabla 6.2. Validación de RodSystem con base en Literatura (Caso 2).

En este caso en particular, es importante señalar que aunque en la literatura citada no se especifica un diagnóstico del diseño, con RodSystem se deduce que las varillas están

¹⁶ Tomado de: B. BRADLEY, Howard, *Petroleum Engineering Handbook*. Segunda edición, Texas, EE. UU., Society of Petroleum Engineers, 1989.

sobrecargadas, en realidad se debe rediseñar el sistema. Una solución es aumentar la capacidad de carga de las varillas eligiendo otra sarta de varillas de succión. Sin embargo, como un caso teórico los resultados obtenidos son muy similares. En la siguiente gráfica se muestra el porcentaje de aproximación de RodSystem para el Caso 2.



Gráfica 6.2. Porcentaje de aproximación de RodSystem (Caso 2).

6.2 VALIDACIÓN CON BASE EN SOFTWARE ESPECIALIZADO

Actualmente existen diversos programas especializados en el diseño del SBM, entre los más usados está QRod, una herramienta creada por *Echometer Company*; en esta sección se validan los resultados obtenidos con RodSystem a partir de los obtenidos con QRod (Echometer, 2003).

Caso 3. Los datos de entrada son los siguientes:

- Nombre del pozo: Caso 3
- Nivel del fluido: 5,000 pie
- Profundidad de la bomba: 5,000 pie
- Diámetro de la tubería de producción: 1.9 pg
- Velocidad de bombeo: 16 rpm
- Longitud de la carrera: 64 pg
- Tipo de varillas de succión: Varillas número 75, grado D

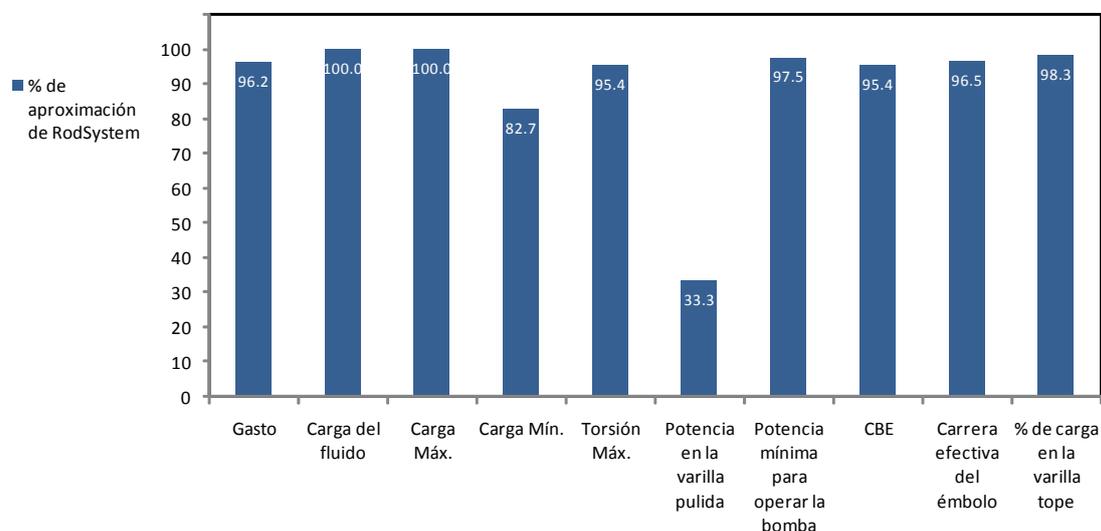
- Diámetro del émbolo: 1.06 pg
- Gravedad específica del fluido: 0.88
- Eficiencia de la bomba: 100%
- Tipo de unidad: Convencional

En la Tabla 6.3 se presentan los resultados del diseño obtenidos con QRod y RodSystem.

Fuente	QRod	RodSystem	% de aproximación de RodSystem
Unidad de bombeo seleccionada	160-119-64	C-160D-143-64	-----
Gasto	131 bpd	136 bpd	96.2
Carga del fluido en la bomba	1,681 lb	1,681 lb	100.0
Máxima carga en la varilla pulida	11,700 lb	11,700 lb	100.0
Mínima carga en la varilla pulida	5,200 lb	4,300 lb	82.7
Máxima torsión en el reductor	130,000 pg-lb	136,000 pg-lb	95.4
Potencia en la varilla pulida	4.5 hp	7.5 hp	33.3
Potencia mínima para operar la bomba	16 hp	16.4 hp	97.5
Contrabalanceo requerido	8,700 lb	8,300 lb	95.4
Carrera efectiva del émbolo	62.6 pg	64.8 pg	96.5
Porcentaje de carga en la varilla tope	58.1 %	59.1 %	98.3

Tabla 6.3. Validación de Rodsystem con base en programa especializado (Caso 3).

El programa QRod no ofrece un apartado en donde se pueda seleccionar la unidad, sólo propone una ideal para el sistema diseñado. Así podemos observar que la UBM que propone es una 160-119-64, sin embargo, es conveniente mencionar que esta unidad no existe en el mercado, es decir que los fabricantes construyen las unidades con capacidades preestablecidas, por lo que es necesario consultar los catálogos de los mismos antes de adquirir dicha unidad. RodSystem mientras tanto, está provisto de una base de datos de todas las unidades existentes, por lo que se puede hacer la selección de la unidad en tiempo de diseño (la información con la cual está provista dicha base de datos es el catálogo Lufkin). En la siguiente gráfica se muestra el % de aproximación de RodSystem para el Caso 3.



Gráfica 6.3. Porcentaje de aproximación de RodSystem (Caso 3).

De la Tabla 6.3 se concluye que la unidad requerida para el caso 3 es una unidad Convencional, con una capacidad de torque de 160,000 **pg · lb** , con capacidad de carga de hasta 14,300 lb y una carrera máxima de la varilla pulida de 64 pg.

6.3 VALIDACIÓN CON BASE EN DATOS REALES DE CAMPO

Con finalidad de respaldar la funcionalidad de RodSystem, se hace una comparación entre los resultados obtenidos a partir de datos de campo. Para este caso se contó con información proporcionada por especialistas en diseño de Sistemas Artificiales de Producción (SAP) del Activo Integral Aceite Terciario del Golfo (AIATG) de Pemex Exploración y Producción.

Caso 4. El objetivo del presente diseño es obtener un gasto en superficie de 35 bpd. Los datos del diseño son los siguientes:

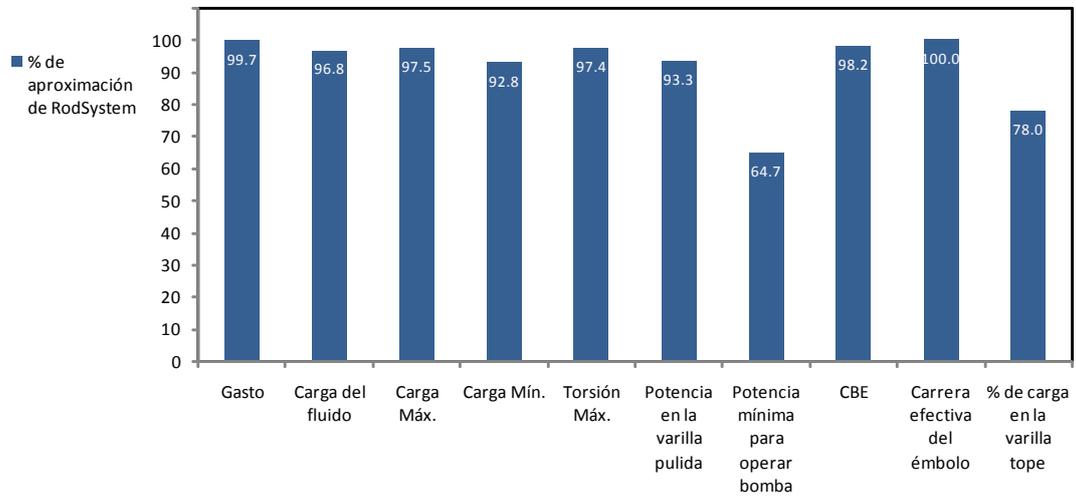
- Nombre del pozo: Caso 4
- Nivel del fluido: 4,556 pie
- Profundidad de la bomba: 4,557 pie
- Diámetro de la tubería de producción: 2.875 pg
- Tubería anclada a 3,821 pie
- Velocidad de bombeo: 1.7 rpm

- Longitud de la carrera: 104.3 pg
- Tipo de varillas de succión: Varillas número 66, grado D
- Diámetro del émbolo: 1.5 pg
- Gravedad específica del fluido: 0.9161
- RGA: $120 \frac{\text{pie}^3}{\text{pie}^3}$
- Eficiencia de la bomba: 85%
- Tipo de unidad: Convencional

En la Tabla 6.4 se presentan los resultados del diseño proporcionados por el AIATG y los obtenidos con RodSystem, enseguida se muestra la gráfica de % de aproximación de RodSystem para el Caso 4.

Fuente	AIATG	RodSystem	% de aproximación de RodSystem
Unidad de bombeo seleccionada	C-320D-256-144	C-228D-213-120	----
Gasto	35 bpd	34.9 bpd	99.7
Carga del fluido en la bomba	3,300 lb	3,193 lb	96.8
Máxima carga en la varilla pulida	10,352 lb	10,096 lb	97.5
Mínima carga en la varilla pulida	5,985 lb	6,414 lb	92.8
Máxima torsión en el reductor	152,000 pg-lb	148,023 pg-lb	97.4
Potencia en la varilla pulida	1.5 hp	1.4 hp	93.3
Potencia mínima para operar la bomba	6.8 hp	4.4 hp	64.7
Contrabalanceo requerido	8,823 lb	8,660 lb	98.2
Carrera efectiva del émbolo	92 pg	92 pg	100.0
Porcentaje de carga en la varilla tope	50 %	61 %	78.0

Tabla 6.4. Validación de Rodsystem con base en datos de campo (caso 4).



Gráfica 6.4. Porcentaje de aproximación de RodSystem (Caso 4).

El siguiente es el estado mecánico propuesto por el AIATG para este caso en particular.

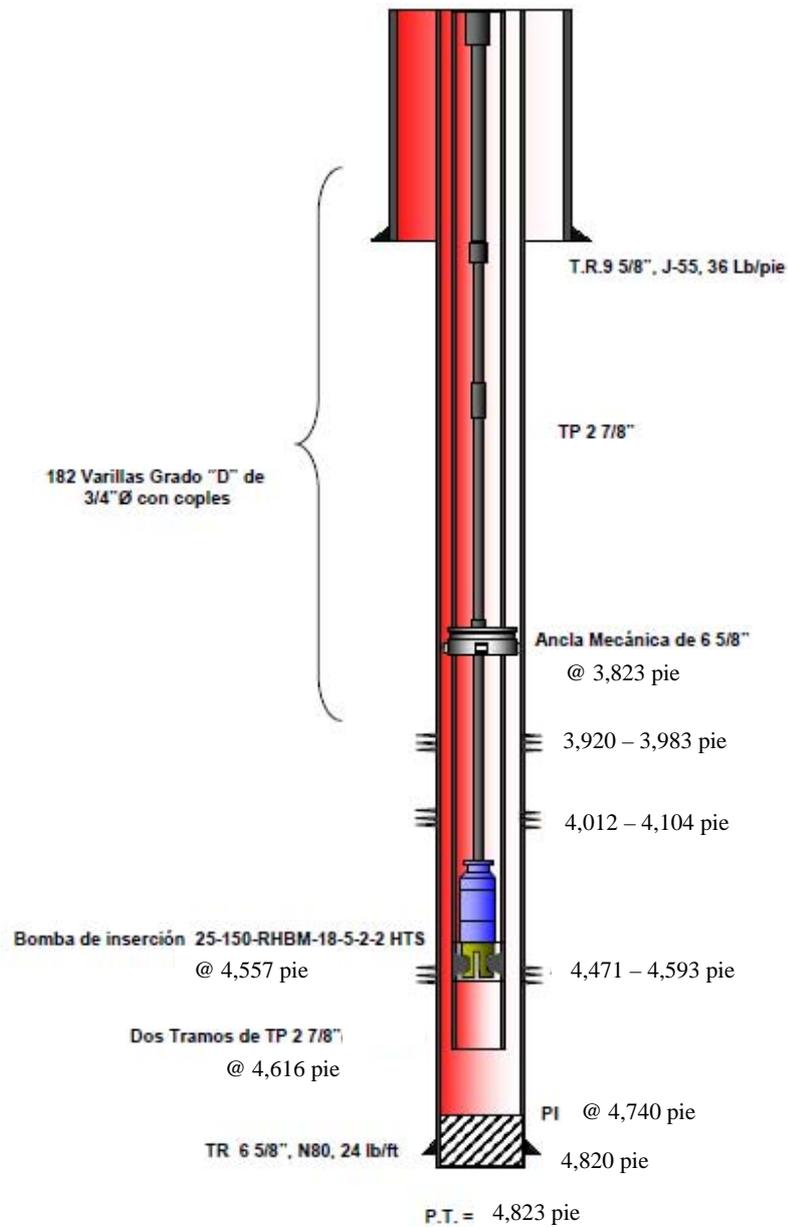


Figura 6.1. Estado mecánico propuesto por AIATG.

En la práctica, durante el diseño del SBM, se realiza la elección de la UBM tomando en cuenta aquellos equipos disponibles en el momento de dicho análisis y de cual se puede hacer uso de manera inmediata para la puesta en producción del pozo. En este caso, podemos ver que la unidad propuesta por el programa RodSystem es la más ideal para el diseño en cuestión, sin embargo, la unidad C-320D-256-144 también puede ser utilizada aunque resulte un poco sobrada su capacidad. A pesar de que los diseñadores del SBM

utilizan más elementos de análisis que los contemplados con RodSystem, con éste último se ofrece una gran aproximación en cuanto a los cálculos del diseño se refiere.

Finalmente, puede concluirse que con base en todos los casos expuestos en este capítulo, RodSystem es una herramienta práctica y funcional en el del diseño del SBM.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

RodSystem es una herramienta de cómputo que permite llevar a cabo el diseño del sistema de bombeo mecánico, a partir de datos básicos y en un tiempo mínimo, gracias al empleo de la técnica *Spline* cúbico, la cual genera polinomios que satisfacen -casi de manera exacta- las interpolaciones en tres dimensiones empleadas en el procedimiento de diseño API RP 11L, minimizando así el error humano.

El procedimiento de diseño API RP 11L es un método iterativo, al final de los cálculos se debe evaluar si el sistema de varillas elegido es capaz de operar eficientemente. Por lo que si el diseño de varillas no excede los valores de tensión permisibles, se procederá a elegir la unidad y demás componentes, de lo contrario se deberá rediseñar la sarta de varillas y comenzar de nuevo los cálculos. Para tal efecto, RodSystem determina el porcentaje de sobrecarga de las varillas para un escenario específico de diseño.

El diseño del sistema de bombeo mecánico conlleva la recopilación de información, la cual deberá ser lo más veraz posible, los datos imprescindibles y más significativos para el diseño son: profundidad del intervalo productor, el nivel del fluido (en el pozo), especificaciones de la bomba de fondo y el tipo de ambiente al cual estará sometido el sistema. La exactitud de los datos de entrada conllevará a obtener resultados más confiables respecto al diseño, ésta puede ser la diferencia entre adquirir una unidad de menor o mayor capacidad, lo que concluye en un menor o mayor gasto de recursos, respectivamente.

Gracias a la oportunidad de participar en una estancia profesional en instalaciones de Pemex Exploración y Producción, se pudo incluir muchas observaciones y recomendaciones, tanto al trabajo de tesis como al programa de cómputo RodSystem, así como también se verificó la información con datos de campo.

De acuerdo a las observaciones obtenidas a partir de problemas provenientes de literatura, programa comercial y datos de campo, se concluye que los resultados obtenidos con RodSystem son precisos y que sus variaciones son aceptables, por lo que los mismos son confiables en el diseño del sistema de bombeo mecánico.

7.2 RECOMENDACIONES

Antes de ejecutar RodSystem y comenzar el diseño es conveniente hacer una evaluación del potencial del pozo, con diversos escenarios posibles para asegurar un gasto óptimo y una buena eficiencia de bombeo.

Es conveniente precisar que si se requiere reducir la torsión máxima en el sistema de bombeo mecánico se recomienda decidirse por diseñar una unidad Mark II. La geometría poco usual de esta unidad genera una carrera ascendente más lenta y una carrera descendente más rápida con una reducción en la aceleración cuando la carga es mayor, esto resulta en menos cargas máximas, una vida más larga de las varillas y menor esfuerzo de torsión máximo y menos caballos de fuerza.

La profundidad de colocación de la bomba está supeditada al nivel del fluido, al contenido de gas, al ángulo de inclinación y al grado de arenamiento que existe en el pozo. En el caso en que el intervalo productor aporte una cantidad considerable de arena, la bomba puede ser colocada 50 m (164 pie) por arriba de éste. Por otro lado, si la formación no aporta arena, pero su contenido de gas es alto, se propone que la bomba se coloque a 15 m (49 pie) por debajo del intervalo productor. En el peor de los casos, cuando se da una combinación de los dos fenómenos se sugiere hacer uso de un separador de gas de fondo. Estas recomendaciones aumentarán la eficiencia de desplazamiento de líquido y evitarán los tapones de arena.

Por último, es conveniente hacer notar que RodSystem se ha desarrollado con el fin de hacer posible el diseño del sistema de bombeo mecánico, contemplando unidades Convencionales, Mark II o Aerobalanceadas, pero que su misma plataforma puede servir de base para complementar el presente trabajo con los procedimientos de diseño de las unidades Hidroneumática y RotaFlex respectivamente; esto en respuesta a la gran aceptación que están teniendo dichas unidades en los mercados nacional e internacional.

APÉNDICE A
TABLA DE VALORES PARA VARILLAS Y BOMBA

No. Varilla	Diámetro del émbolo, Dp pg	Peso de la varilla, Wr lb/ pie	Constante elástica, Er pg por lb*pie	Factor de frecuencia, Fc	Sarta de varillas, % de cada diámetro					
					1 1/8	1	7/8	3/4	5/8	1/2
44	Todos	0.726	1.99 x 10 ⁻⁶	1.000	-	-	-	-	-	100.0
54	1.06	0.908	1.668 x 10 ⁻⁶	1.138	-	-	-	-	44.6	55.4
54	1.25	0.929	1.633 x 10 ⁻⁶	1.140	-	-	-	-	49.5	50.5
54	1.50	0.957	1.584 x 10 ⁻⁶	1.137	-	-	-	-	56.4	43.6
54	1.75	0.990	1.525 x 10 ⁻⁶	1.122	-	-	-	-	64.6	35.4
54	2.00	1.027	1.460 x 10 ⁻⁶	1.095	-	-	-	-	73.7	26.3
54	2.25	1.067	1.391 x 10 ⁻⁶	1.061	-	-	-	-	83.4	16.6
54	2.5	1.108	1.318 x 10 ⁻⁶	1.023	-	-	-	-	93.5	6.5
55	Todos	1.135	1.270 x 10 ⁻⁶	1.000	-	-	-	-	100.0	-
64	1.06	1.164	1.382 x 10 ⁻⁶	1.229	-	-	-	33.3	33.1	33.5
64	1.25	1.211	1.319 x 10 ⁻⁶	1.215	-	-	-	37.2	35.9	26.9
64	1.50	1.275	1.232 x 10 ⁻⁶	1.184	-	-	-	42.3	40.4	17.3
64	1.75	1.341	1.141 x 10 ⁻⁶	1.145	-	-	-	47.4	45.2	7.4
65	1.06	1.307	1.138 x 10 ⁻⁶	1.098	-	-	-	34.4	65.6	-
65	1.25	1.321	1.127 x 10 ⁻⁶	1.104	-	-	-	37.3	62.7	-
65	1.50	1.343	1.110 x 10 ⁻⁶	1.110	-	-	-	41.8	58.2	-
65	1.75	1.369	1.090 x 10 ⁻⁶	1.114	-	-	-	46.9	53.1	-
65	2.00	1.394	1.070 x 10 ⁻⁶	1.114	-	-	-	52.0	48.0	-
65	2.25	1.426	1.045 x 10 ⁻⁶	1.110	-	-	-	58.4	41.6	-
65	2.50	1.460	1.018 x 10 ⁻⁶	1.099	-	-	-	65.2	34.8	-
65	2.75	1.497	0.990 x 10 ⁻⁶	1.082	-	-	-	72.5	27.5	-
65	3.25	1.574	0.930 x 10 ⁻⁶	1.037	-	-	-	88.1	11.9	-
66	Todos	1.634	0.883 x 10 ⁻⁶	1.000	-	-	-	100.0	-	-
75	1.06	1.566	0.997 x 10 ⁻⁶	1.191	-	-	27.0	27.4	45.6	-
75	1.25	1.604	0.973 x 10 ⁻⁶	1.193	-	-	29.4	29.8	40.8	-
75	1.50	1.664	0.935 x 10 ⁻⁶	1.189	-	-	33.3	33.3	33.3	-
75	1.75	1.732	0.892 x 10 ⁻⁶	1.174	-	-	37.8	37.0	25.1	-
75	2.00	1.803	0.847 x 10 ⁻⁶	1.151	-	-	42.4	41.3	16.3	-
75	2.25	1.875	0.801 x 10 ⁻⁶	1.121	-	-	46.9	45.8	7.2	-
76	1.06	1.802	0.816 x 10 ⁻⁶	1.072	-	-	28.5	71.5	-	-
76	1.25	1.814	0.812 x 10 ⁻⁶	1.077	-	-	30.6	69.4	-	-

No. Varilla	Diámetro del émbolo, Dp pg	Peso de la varilla, Wr lb/ pie	Constante elástica, Er pg por lb*pie	Factor de frecuencia, Fc	Sarta de varillas, % de cada diámetro					
					1 1/8	1	7/8	3/4	5/8	1/2
76	1.50	1.833	0.804 x 10 ⁻⁶	1.082	-	-	33.8	66.2	-	-
76	1.75	1.855	0.795 x 10 ⁻⁶	1.088	-	-	37.5	62.5	-	-
76	2.00	1.880	0.785 x 10 ⁻⁶	1.093	-	-	41.7	58.3	-	-
76	2.25	1.908	0.774 x 10 ⁻⁶	1.096	-	-	46.5	53.5	-	-
76	2.50	1.934	0.764 x 10 ⁻⁶	1.097	-	-	50.8	49.2	-	-
76	2.75	1.967	0.751 x 10 ⁻⁶	1.094	-	-	56.5	43.5	-	-
76	3.25	2.039	0.722 x 10 ⁻⁶	1.078	-	-	68.7	31.3	-	-
76	3.75	2.119	0.690 x 10 ⁻⁶	1.047	-	-	82.3	17.7	-	-
77	Todos	2.224	0.649 x 10 ⁻⁶	1.000	-	-	100.0	-	-	-
85	1.06	1.883	0.873 x 10 ⁻⁶	1.261	-	22.2	22.4	22.4	33.0	-
85	1.25	1.943	0.841 x 10 ⁻⁶	1.253	-	23.9	24.2	24.3	27.6	-
85	1.50	2.039	0.791 x 10 ⁻⁶	1.232	-	26.7	27.4	26.8	19.2	-
85	1.75	2.138	0.738 x 10 ⁻⁶	1.201	-	29.6	30.4	29.5	10.5	-
86	1.06	2.058	0.742 x 10 ⁻⁶	1.151	-	22.6	23.0	54.3	-	-
86	1.25	2.087	0.732 x 10 ⁻⁶	1.156	-	24.3	24.5	51.2	-	-
86	1.50	2.133	0.717 x 10 ⁻⁶	1.162	-	26.8	27.0	46.3	-	-
86	1.75	2.185	0.699 x 10 ⁻⁶	1.164	-	29.4	30.0	40.6	-	-
86	2.00	2.247	0.679 x 10 ⁻⁶	1.161	-	32.8	33.2	33.9	-	-
86	2.25	2.315	0.656 x 10 ⁻⁶	1.153	-	36.9	36.0	27.1	-	-
86	2.50	2.385	0.633 x 10 ⁻⁶	1.138	-	40.6	39.7	19.7	-	-
86	2.75	2.455	0.610 x 10 ⁻⁶	1.119	-	44.5	43.3	12.2	-	-
87	1.06	2.390	0.612 x 10 ⁻⁶	1.055	-	24.3	75.3	-	-	-
87	1.25	2.399	0.610 x 10 ⁻⁶	1.058	-	25.7	74.3	-	-	-
87	1.50	2.413	0.607 x 10 ⁻⁶	1.062	-	27.7	72.3	-	-	-
87	1.75	2.430	0.603 x 10 ⁻⁶	1.066	-	30.3	69.7	-	-	-
87	2.00	2.450	0.598 x 10 ⁻⁶	1.071	-	33.2	66.8	-	-	-
87	2.25	2.472	0.594 x 10 ⁻⁶	1.075	-	36.4	63.6	-	-	-
87	2.50	2.496	0.588 x 10 ⁻⁶	1.079	-	39.9	60.1	-	-	-
87	2.75	2.523	0.582 x 10 ⁻⁶	1.082	-	43.9	56.1	-	-	-
87	3.25	2.575	0.570 x 10 ⁻⁶	1.084	-	51.6	48.4	-	-	-
87	3.75	2.641	0.556 x 10 ⁻⁶	1.078	-	61.2	38.8	-	-	-
87	4.75	2.793	0.522 x 10 ⁻⁶	1.038	-	83.6	16.4	-	-	-
88	Todos	2.904	0.497 x 10 ⁻⁶	1.000	-	100.0	-	-	-	-
96	1.06	2.382	0.670 x 10 ⁻⁶	1.222	19.1	19.2	19.5	42.3	-	-

No. Varilla	Diámetro del émbolo, Dp pg	Peso de la varilla, Wr lb/ pie	Constante elástica, Er pg por lb*pie	Factor de frecuencia, Fc	Sarta de varillas, % de cada diámetro					
					1 1/8	1	7/8	3/4	5/8	1/2
96	1.25	2.435	0.655 x 10 ⁻⁶	1.224	20.5	20.5	20.7	38.3	-	-
96	1.50	2.511	0.633 x 10 ⁻⁶	1.223	22.4	22.5	22.8	32.3	-	-
96	1.75	2.607	0.606 x 10 ⁻⁶	1.213	24.8	25.1	25.1	25.1	-	-
96	2.00	2.703	0.578 x 10 ⁻⁶	1.196	27.1	27.9	27.4	17.6	-	-
96	2.25	2.806	0.549 x 10 ⁻⁶	1.172	29.6	30.7	29.8	9.8	-	-
97	1.06	2.645	0.568 x 10 ⁻⁶	1.120	19.6	20.0	60.3	-	-	-
97	1.25	2.670	0.563 x 10 ⁻⁶	1.124	20.8	21.2	58.0	-	-	-
97	1.50	2.707	0.556 x 10 ⁻⁶	1.131	22.5	23.0	54.5	-	-	-
97	1.75	2.751	0.548 x 10 ⁻⁶	1.137	24.5	25.0	50.4	-	-	-
97	2.00	2.801	0.538 x 10 ⁻⁶	1.141	26.8	27.4	45.7	-	-	-
97	2.25	2.856	0.528 x 10 ⁻⁶	1.143	29.4	30.2	40.4	-	-	-
97	2.50	2.921	0.515 x 10 ⁻⁶	1.141	32.5	33.1	34.4	-	-	-
97	2.75	2.989	0.503 x 10 ⁻⁶	1.135	36.1	35.3	28.6	-	-	-
97	3.25	3.132	0.475 x 10 ⁻⁶	1.111	42.9	41.9	15.2	-	-	-
98	1.06	3.068	0.475 x 10 ⁻⁶	1.043	21.2	78.8	-	-	-	-
98	1.25	3.076	0.474 x 10 ⁻⁶	1.045	22.2	77.8	-	-	-	-
98	1.50	3.089	0.472 x 10 ⁻⁶	1.048	23.8	76.2	-	-	-	-
98	1.75	3.103	0.470 x 10 ⁻⁶	1.051	25.7	74.3	-	-	-	-
98	2.00	3.118	0.468 x 10 ⁻⁶	1.055	27.7	72.3	-	-	-	-
98	2.25	3.137	0.465 x 10 ⁻⁶	1.058	30.1	69.9	-	-	-	-
98	2.50	3.157	0.463 x 10 ⁻⁶	1.062	32.7	67.3	-	-	-	-
98	2.75	3.180	0.460 x 10 ⁻⁶	1.066	35.6	64.4	-	-	-	-
98	3.25	3.231	0.453 x 10 ⁻⁶	1.071	42.2	57.8	-	-	-	-
98	3.75	3.289	0.445 x 10 ⁻⁶	1.074	49.7	50.3	-	-	-	-
98	4.75	3.412	0.428 x 10 ⁻⁶	1.064	65.7	34.3	-	-	-	-
99	Todos	3.676	0.393 x 10 ⁻⁶	1.000	100.0	-	-	-	-	-
107	1.06	2.977	0.524 x 10 ⁻⁶	1.184	16.9	16.8	17.1	49.1	-	-
107	1.25	3.019	0.517 x 10 ⁻⁶	1.189	17.9	17.8	18.0	46.3	-	-
107	1.50	3.085	0.506 x 10 ⁻⁶	1.195	19.4	19.2	19.5	41.9	-	-
107	1.75	3.158	0.494 x 10 ⁻⁶	1.197	21.0	21.0	21.2	36.9	-	-
107	2.00	3.238	0.480 x 10 ⁻⁶	1.195	22.7	22.8	23.1	31.4	-	-
107	2.25	3.336	0.464 x 10 ⁻⁶	1.187	25.0	25.0	25.0	25.0	-	-
107	2.50	3.435	0.447 x 10 ⁻⁶	1.174	26.9	27.7	27.1	18.2	-	-
107	2.75	3.537	0.430 x 10 ⁻⁶	1.156	29.1	30.2	29.3	11.3	-	-

No. Varilla	Diámetro del émbolo Dp pg	Peso de la varilla, Wr lb/ pie	Constante elástica, Er pg por lb*pie	Factor de frecuencia, Fc	Sarta de varillas, % de cada diámetro					
					1 1/8	1	7/8	3/4	5/8	1/2
108	1.06	3.325	0.447 x 10 ⁻⁶	1.097	17.3	17.8	64.9	-	-	-
108	1.25	3.345	0.445 x 10 ⁻⁶	1.101	18.1	18.6	63.2	-	-	-
108	1.50	3.376	0.441 x 10 ⁻⁶	1.106	19.4	19.9	60.7	-	-	-
108	1.75	3.411	0.437 x 10 ⁻⁶	1.111	20.9	21.4	57.7	-	-	-
108	2.00	3.452	0.432 x 10 ⁻⁶	1.117	22.6	23.0	54.3	-	-	-
108	2.25	3.498	0.427 x 10 ⁻⁶	1.121	24.5	25.0	50.5	-	-	-
108	2.50	3.548	0.421 x 10 ⁻⁶	1.124	26.5	27.2	46.3	-	-	-
108	2.75	3.603	0.415 x 10 ⁻⁶	1.126	28.7	29.6	41.6	-	-	-
108	3.25	3.731	0.400 x 10 ⁻⁶	1.123	34.6	33.9	31.6	-	-	-
108	3.75	3.873	0.383 x 10 ⁻⁶	1.108	40.6	39.5	19.9	-	-	-
109	1.06	3.839	0.378 x 10 ⁻⁶	1.035	18.9	81.1	-	-	-	-
109	1.25	3.845	0.378 x 10 ⁻⁶	1.036	19.6	80.4	-	-	-	-
109	1.50	3.855	0.377 x 10 ⁻⁶	1.038	20.7	79.3	-	-	-	-
109	1.75	3.867	0.376 x 10 ⁻⁶	1.040	22.1	77.9	-	-	-	-
109	2.00	3.880	0.375 x 10 ⁻⁶	1.043	23.7	76.3	-	-	-	-
109	2.25	3.896	0.374 x 10 ⁻⁶	1.046	25.4	74.6	-	-	-	-
109	2.50	3.911	0.372 x 10 ⁻⁶	1.048	27.2	72.8	-	-	-	-
109	2.75	3.930	0.371 x 10 ⁻⁶	1.051	29.4	70.6	-	-	-	-
109	3.25	3.971	0.367 x 10 ⁻⁶	1.057	34.2	65.8	-	-	-	-
109	3.75	4.020	0.363 x 10 ⁻⁶	1.063	39.9	60.1	-	-	-	-
109	4.75	4.120	0.354 x 10 ⁻⁶	1.066	51.5	48.5	-	-	-	-

Tabla A1. Datos de valores para varillas y bomba¹⁷.

¹⁷ Tomada de: E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Desing and analysis. Gas lift.* Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

APÉNDICE B

TABLAS PARA EL CÁLCULO DE FACTORES ADIMENSIONALES

A continuación se presentan las tablas que fueron provistas al programa de cómputo.

		Sp/S						
		Fo/SKr						
		0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
N/No'	0.00	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40
	0.05	1.00	0.91	0.81	0.71	0.61	0.51	0.41
	0.10	1.01	0.92	0.83	0.72	0.63	0.53	0.43
	0.15	1.02	0.93	0.85	0.75	0.65	0.56	0.47
	0.20	1.06	0.96	0.88	0.80	0.69	0.58	0.47
	0.25	1.10	1.03	0.93	0.80	0.68	0.58	0.51
	0.30	1.09	1.05	0.89	0.78	0.72	0.66	0.60
	0.35	1.10	1.01	0.93	0.88	0.81	0.76	0.68
	0.40	1.18	1.10	1.04	0.98	0.92	0.86	0.78
	0.45	1.33	1.23	1.15	1.09	1.03	0.96	0.87
	0.50	1.48	1.37	1.27	1.21	1.13	1.05	0.98
	0.55	1.60	1.50	1.40	1.33	1.24	1.15	1.07
0.60	1.70	1.61	1.52	1.44	1.37	1.26	1.16	

Tabla B1. Correlación para Sp/S.

		F1/SKr						
		Fo/SKr						
		0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
N/No	0.00	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
	0.05	0.02	0.12	0.23	0.33	0.43	0.53	0.63
	0.10	0.05	0.15	0.26	0.36	0.46	0.56	0.66
	0.15	0.08	0.18	0.29	0.39	0.49	0.59	0.69
	0.20	0.12	0.22	0.33	0.43	0.52	0.62	0.72
	0.25	0.17	0.27	0.37	0.46	0.55	0.65	0.75
	0.30	0.21	0.31	0.41	0.50	0.59	0.68	0.78
	0.35	0.27	0.36	0.46	0.55	0.63	0.70	0.80
	0.40	0.34	0.42	0.51	0.61	0.70	0.79	0.87
	0.45	0.43	0.50	0.58	0.68	0.75	0.83	0.91
	0.50	0.55	0.62	0.68	0.78	0.83	0.90	0.98
	0.55	0.70	0.76	0.84	0.93	0.97	1.00	1.05
	0.60	0.83	0.90	0.99	1.06	1.10	1.13	1.16

Tabla B2. Correlación para F1/SKr.

		F2/SKr						
		Fo/SKr						
		0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
N/No	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.05	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
	0.10	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.06
	0.15	0.04	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	0.09
	0.20	0.07	0.09	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12
	0.25	0.10	0.13	0.15	0.17	0.16	0.16	0.16
	0.30	0.16	0.18	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20
	0.35	0.22	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24
	0.40	0.26	0.27	0.27	0.28	0.27	0.26	0.27
	0.45	0.29	0.30	0.32	0.31	0.31	0.29	0.30
	0.50	0.34	0.35	0.37	0.36	0.35	0.34	0.34
	0.55	0.42	0.43	0.45	0.43	0.41	0.38	0.38
	0.60	0.49	0.49	0.49	0.47	0.45	0.42	0.42

Tabla B3. Correlación para F2/SKr.

		F3/SKr							
		Fo/SKr							
		0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	
N/No	0.00	0.03	0.09	0.16	0.21	0.24	0.25	0.24	
	0.05	0.03	0.10	0.17	0.22	0.25	0.26	0.25	
	0.10	0.04	0.10	0.18	0.23	0.26	0.27	0.26	
	0.15	0.05	0.13	0.19	0.25	0.28	0.28	0.28	
	0.20	0.06	0.15	0.22	0.26	0.28	0.30	0.28	
	0.25	0.07	0.17	0.23	0.28	0.32	0.33	0.33	
	0.30	0.09	0.19	0.25	0.31	0.34	0.36	0.38	
	0.35	0.12	0.22	0.29	0.34	0.40	0.43	0.45	
	0.40	0.15	0.25	0.33	0.40	0.47	0.51	0.53	
	0.45	0.18	0.30	0.39	0.47	0.55	0.58	0.62	
	0.50	0.23	0.35	0.45	0.55	0.63	0.67	0.69	
	0.55	0.29	0.42	0.52	0.63	0.72	0.75	0.78	
	0.60	0.37	0.49	0.62	0.72	0.80	0.83	0.86	

Tabla B4. Correlación para F3/SKr.

		$2T/S^2Kr$							
		Fo/SKr							
		0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	
N/No	0.00	0.05	0.09	0.14	0.19	0.22	0.25	0.26	
	0.05	0.06	0.10	0.16	0.21	0.25	0.28	0.29	
	0.10	0.08	0.11	0.19	0.24	0.28	0.31	0.31	
	0.15	0.10	0.14	0.22	0.27	0.31	0.32	0.33	
	0.20	0.13	0.18	0.26	0.30	0.33	0.34	0.35	
	0.25	0.16	0.22	0.30	0.33	0.35	0.36	0.36	
	0.30	0.20	0.26	0.34	0.37	0.37	0.38	0.39	
	0.35	0.25	0.31	0.38	0.41	0.42	0.43	0.44	
	0.40	0.29	0.35	0.42	0.45	0.47	0.50	0.52	
	0.45	0.34	0.40	0.46	0.49	0.51	0.52	0.53	
	0.50	0.38	0.45	0.50	0.53	0.56	0.56	0.57	
	0.55	0.44	0.50	0.55	0.58	0.62	0.63	0.64	
	0.60	0.49	0.55	0.60	0.64	0.67	0.68	0.69	

Tabla B5. Correlación para $2T/S^2Kr$.

% de ajuste de torsión

		Fo/SKr						
		0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
N/No'	0.00	0.20	0.16	0.08	0.06	0.03	0.01	-0.02
	0.05	0.18	0.12	0.07	0.04	0.02	-0.01	-0.02
	0.10	0.12	0.08	0.06	0.03	0.01	-0.02	-0.01
	0.15	0.10	0.07	0.04	0.02	-0.01	-0.02	0.00
	0.20	0.08	0.06	0.03	-0.01	-0.02	-0.01	0.01
	0.25	0.06	0.04	0.02	-0.01	-0.02	0.01	0.01
	0.30	0.05	0.03	0.01	-0.02	-0.01	0.01	0.01
	0.35	0.04	0.02	-0.01	-0.02	0.01	0.01	0.01
	0.40	0.03	0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.01	0.02
	0.45	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03
	0.50	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.03
	0.55	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
	0.60	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05

Tabla B6. Correlación de ajuste a la torsión.

APÉNDICE C

SUBROUTINA SPLINE Y FUNCION SEVAL

Subrutina Spline

Sub spline(n, X#(), Y#(), b#(), c#(), d#())

'Los coeficientes B(I), C(I) y D(I), I=1,2,...,N-1, son calculados para formar el polinomio de 'Splines cúbicos

$$'S(X) = Y(I) + B(I)*(X-X(I)) + C(I)*(X-X(I))^2 + D(I)*(X-X(I))^3$$

'para: X(I) =< X =< X(I+1).

'Datos de entrada:

'N = Número de datos, puntos o coordenadas (N >= 2).

'X = Abscisa de las coordenadas dato en estricto orden ascendente.

'Y = Ordenada de las coordenadas dato.

'Datos de salida:

'B, C, D = vectores con coeficientes de SPLINE, indicados anteriormente.

'Usando la letra "P" para denotar diferenciales:

'Y(I) = S(X(I))

'B(I) = SP(X(I))

'C(I) = SPP(X(I))/2

'D(I) = SPPP(X(I))/6

'Nota: La función SEVAL evalúa el Spline.

NM1 = n - 1

If n < 2 Then

MsgBox "El no. de datos debe ser mayor de 2"

End

End If

If n < 3 Then

```

b(1) = (Y(2) - Y(1)) / (X(2) - X(1))
c(1) = 0!
d(1) = 0!
b(2) = b(1)
c(2) = 0!
d(2) = 0!
Exit Sub
End If

```

'Se crea un sistema tri-diagonal

'B= diagonal principal, D= diagonal inmediata-superior, C= vector de términos independientes.

```

d(1) = X(2) - X(1)
c(2) = (Y(2) - Y(1)) / d(1)
For I = 2 To NM1
  d(I) = X(I + 1) - X(I)
  b(I) = 2! * (d(I - 1) + d(I))
  c(I + 1) = (Y(I + 1) - Y(I)) / d(I)
  c(I) = c(I + 1) - c(I)
Next I

```

'Condiciones finales. La tercera derivada de X(1) y X(N) resultan del cociente de las diferencias.

```

b(1) = -d(1)
b(n) = -d(n - 1)
c(1) = 0!
c(n) = 0!
If n = 3 Then GoTo sp10
c(1) = c(3) / (X(4) - X(2)) - c(2) / (X(3) - X(1))
c(n) = c(n - 1) / (X(n) - X(n - 2)) - c(n - 2) / (X(n - 1) - X(n - 3))
c(1) = c(1) * d(1) ^ 2 / (X(4) - X(1))
c(n) = -c(n) * d(n - 1) ^ 2 / (X(n) - X(n - 3))

```

'Sustitución hacia adelantes

```

p10: For I = 2 To n

```

```

t = d(I - 1) / b(I - 1)
b(I) = b(I) - t * d(I - 1)
c(I) = c(I) - t * c(I - 1)
Next I

```

'Sustitución hacia atrás

```

c(n) = c(n) / b(n)
For IB = 1 To NM1
  I = n - IB
  c(I) = (c(I) - d(I) * c(I + 1)) / b(I)
Next IB

```

'Cálculo de los coeficientes del polinomio

```

b(n) = (Y(n) - Y(NM1)) / d(NM1) + d(NM1) * (c(NM1) + 2! * c(n))
For I = 1 To NM1
  b(I) = (Y(I + 1) - Y(I)) / d(I) - d(I) * (c(I + 1) + 2! * c(I))
  d(I) = (c(I + 1) - c(I)) / d(I)
  c(I) = 3! * c(I)
Next I
c(n) = 3! * c(n)
d(n) = d(n - 1)

```

End Sub

Función Seval

Function Seval(n, U#, X#(), Y#(), b#(), c#(), d#(), OP)

'Esta subrutina evalúa la función cúbica spline:

$$'seval = Y(I) + B(I)*(U-X(I)) + C(I)*(U-X(I))^2 + D(I)*(U-X(I))^3$$

'donde: $X(I) < U < X(I+1)$, usando la regla de Horner.

'Si $U < X(1)$ entonces se supone que $I=1$.

'Si $U > X(N)$ entonces se supone que $I=N$.

'Datos de entrada:

'N = Número de datos.

'U = Abscisa en la que se valúa el spline.

'X, Y = Vectores de abscisas y ordenadas dato.

'B, C, D = Vectores de coeficientes calculados por SPLINE.

'OP = Variable que rige el tipo de búsqueda, secuencial si OP=1

y binaria en cualquier otro caso.

'Si U no se ubica en el intervalo de la llamada previa, entonces una búsqueda binaria o secuencial será ejecutada, para determinar el intervalo apropiado.

I = 1

If I >= n Then I = 1

Select Case OP 'Se designa el método de búsqueda

Case 1

If U <= X(I + 1) Then GoTo se10 'Búsqueda secuencial para U < X(I)

K = 0

Do

K = K + 1

'If U < X(k) Then J = k

If U >= X(K) Then I = K: GoTo se10

Loop While K < n

Case Else

If U <= X(I + 1) Then GoTo se10 'Búsqueda binaria para U < X(I)

I = 1

J = n + 1

Do

K = Int((I + J) / 2)

If U < X(K) Then J = K

If U >= X(K) Then I = K

Loop While J > I + 1

End Select

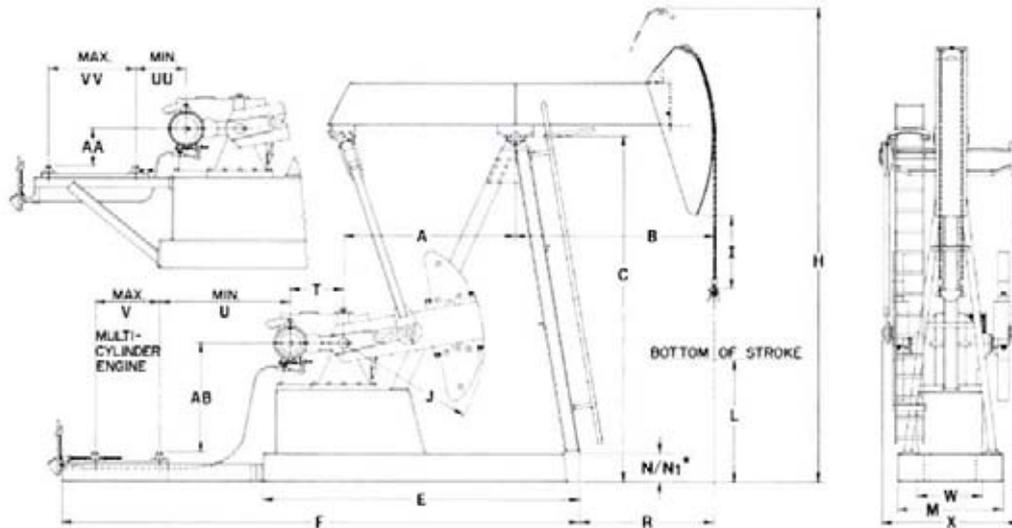
se10: DX = U - X(I) 'Se evalúa el spline

seval = Y(I) + DX * (b(I) + DX * (c(I) + DX * d(I)))

End Function

APÉNDICE D CATÁLOGO LUFKIN

 WILFELD PRODUCTS GROUP	<h3 style="margin: 0;">CONVENTIONAL CRANK BALANCED PUMPING UNITS</h3>	450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com
----------------------------	---	---



Dimensional Data (inches)

Unit Size*	A	B	C	E	F	H	I	J	L	M	N	N1	R	T	U	V	W	X	AA	AB	UU	VV
C-18240-305-240	120.00	228.00	340.00	263.50	396.50	545.00	25.50	110.00	64.00	80.25	-	24.50	161.00	58.88	92.38	52.00	50.00	112.50	51.69	90.88	24.13	57.00
C-18240-365-216	120.00	235.00	306.00	263.50	396.50	493.00	19.56	110.00	40.50	80.25	-	24.50	168.00	58.88	92.38	52.00	50.00	112.50	51.69	90.88	24.13	57.00
C-18240-365-192	120.00	210.00	296.00	263.50	396.50	464.00	18.81	110.00	63.88	80.25	-	24.50	143.00	58.88	92.38	52.00	50.00	112.50	51.69	90.88	24.13	57.00
C-12800-305-240	120.00	228.00	340.00	263.50	396.50	545.00	26.31	110.00	63.21	80.25	-	24.50	161.00	62.50	98.75	52.00	50.00	106.00	51.69	90.88	30.50	57.00
C-12800-427-192	120.00	210.00	296.50	263.50	396.50	464.50	18.19	110.00	65.38	80.25	-	24.50	143.00	62.50	98.75	52.00	50.00	106.00	51.69	90.88	30.50	57.00
C-12800-365-192	120.00	210.00	296.00	263.50	396.50	464.00	18.81	110.00	63.88	80.25	-	24.50	143.00	62.50	98.75	52.00	50.00	106.00	51.69	90.88	30.50	57.00
C-9120-305-240	120.00	228.00	340.00	247.50	396.50	545.00	25.50	110.00	64.00	80.25	-	24.50	161.56	48.50	91	52.00	50.00	96.50	51.69	90.88	19.25	57.00
C-9120-365-192	120.00	210.00	296.00	247.50	396.50	464.00	18.81	110.00	63.83	80.25	24.50	21.00	143.56	48.50	87.50	52.00	46.75	96.50	51.69	90.88	19.25	57.00
C-9120-305-192	120.00	210.00	296.00	247.50	396.50	464.00	18.81	110.00	63.83	80.25	24.50	21.00	143.56	48.50	87.50	52.00	46.75	96.50	51.69	90.88	19.25	57.00
C-9120-365-168	120.00	210.00	262.00	224.50	357.50	421.50	20.50	110.00	62.25	76.00	24.13	16.13	166.50	48.50	87.50	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	19.25	57.00
C-9120-305-168	120.00	210.00	262.00	224.50	357.50	421.50	20.50	110.00	62.00	76.00	24.13	16.13	166.50	48.50	87.50	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	19.25	57.00
C-9120-427-144	120.00	180.00	262.00	224.50	357.50	400.00	32.75	110.00	74.25	76.00	24.13	16.13	136.50	48.50	87.50	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	19.25	57.00
C-9120-365-144	120.00	180.00	262.00	224.50	357.50	400.00	32.75	110.00	74.25	76.00	24.13	16.13	136.50	48.50	87.50	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	19.25	57.00
C-6400-365-168	120.00	210.00	262.00	221.00	354.00	421.50	20.50	110.00	62.25	76.00	24.13	16.13	166.50	41.50	91.00	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	23.00	57.00
C-6400-305-168	120.00	210.00	262.00	221.00	354.00	421.50	20.50	110.00	62.25	76.00	24.13	16.13	166.50	41.50	91.00	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	23.00	57.00
C-6400-365-144	120.00	180.00	262.00	221.00	354.00	400.00	32.75	110.00	74.25	76.00	24.13	16.13	136.50	41.50	91.00	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	23.00	57.00
C-6400-305-144	120.00	180.00	260.00	220.75	353.75	398.00	32.75	110.00	72.50	76.00	21.13	16.13	136.88	41.50	91.13	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	23.00	57.00
C-6400-256-144	120.00	180.00	260.00	220.75	353.75	398.00	32.75	110.00	72.50	76.00	21.13	16.13	136.88	41.50	91.13	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	23.00	57.00
C-6400-365-120	120.00	152.00	260.00	220.75	353.75	379.00	54.50	110.00	75.50	76.00	21.13	16.13	108.88	41.50	91.13	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	23.00	57.00
C-6400-305-120	111.00	155.00	234.00	208.63	326.63	351.00	25.00	95.00	78.25	70.00	21.00	16.13	114.88	41.50	76.00	52.00	46.75	97.00	51.13	75.88	26.75	37.75
C-4560-305-168	120.00	210.00	262.00	221.00	354.00	421.50	20.50	110.00	62.25	76.00	24.13	16.13	166.50	38.38	94.13	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	26.13	57.00
C-4560-305-144	120.00	180.00	260.00	220.75	353.75	398.00	32.75	110.00	72.50	76.00	21.13	16.13	136.88	38.38	94.25	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	26.13	57.00
C-4560-256-144	120.00	180.00	260.00	220.75	353.75	398.00	32.75	110.00	72.50	76.00	21.13	16.13	136.88	38.38	94.25	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	26.13	57.00
C-4560-365-120	120.00	182.00	260.00	220.75	353.75	379.00	54.50	110.00	75.50	76.00	21.13	16.13	108.88	38.38	94.28	52.00	46.75	96.50	51.75	90.88	26.13	57.00
C-4560-305-120	111.00	155.00	234.00	208.63	326.63	351.00	25.00	95.00	78.25	70.00	21.00	16.13	114.88	38.38	79.13	52.00	46.75	97.00	51.13	75.88	29.88	37.75
C-4560-256-120	111.00	155.00	232.00	208.63	326.63	349.00	25.00	95.00	76.00	70.00	21.00	16.13	114.88	38.38	79.13	52.00	46.75	97.00	51.13	75.88	29.88	37.75
C-4560-213-120	111.00	155.00	232.00	208.63	326.63	349.00	25.00	95.00	76.00	70.00	21.00	16.13	114.88	38.38	79.13	52.00	46.75	97.00	51.13	75.88	29.88	37.75
C-4560-256-100	111.00	129.00	232.00	208.63	326.63	330.50	45.75	95.00	75.75	70.00	21.00	16.13	88.88	38.38	79.13	52.00	46.75	97.00	51.13	75.88	29.88	37.75

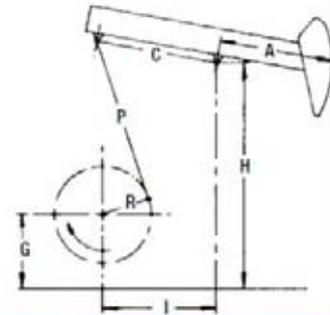
Dimensional Data (inches)

Unit Size	A	B	C	E	F	H	I	J	L	M	N	N ₁	R	T	U	V	W	X	AA	AB	UU	VV
C-320D-256-144	120.00	180.00	260.00	215.25	353.75	398.00	32.75	110.00	72.50	76.00	21.13	16.13	136.88	34.00	98.63	52.00	43.00	87.50	53.625	93.00	31.00	48.25
C-320D-256-120	111.00	155.00	232.00	203.13	327.13	349.00	25.00	95.00	76.00	70.00	21.00	15.88	114.88	34.00	83.50	53.00	43.00	85.50	54.00	79.00	31.00	33.25
C-320D-213-120	111.00	155.00	232.00	203.13	327.13	349.00	25.00	95.00	76.00	70.00	21.00	15.88	114.88	34.00	83.50	53.00	43.00	85.50	54.00	79.00	31.00	33.25
C-320D-305-100	111.00	129.00	232.00	203.13	327.13	330.50	45.75	95.00	76.00	70.00	21.00	15.88	88.88	34.00	83.50	53.00	43.00	85.50	54.00	79.00	31.00	33.25
C-320D-256-100	111.00	129.00	232.00	203.13	327.13	330.50	45.75	95.00	76.00	70.00	21.00	15.88	88.88	34.00	83.50	53.00	43.00	85.50	54.00	79.00	31.00	33.25
C-320D-246-86	111.00	111.00	232.00	203.13	327.13	317.50	59.75	95.00	75.75	70.00	21.00	15.88	70.88	34.00	83.50	53.00	43.00	85.50	54.00	79.00	31.00	33.25
C-320D-213-86	96.00	111.00	196.13	176.50	290.00	282.00	23.75	78.00	75.00	57.75	16.13	15.88	75.50	34.00	66.50	53.00	43.00	85.50	37.13	62.13	30.88	33.25
C-320D-246-74	96.00	96.00	196.13	183.50	290.50	271.00	35.50	78.00	77.75	57.75	16.13	15.88	60.50	34.00	66.50	53.00	43.00	85.50	37.13	62.13	30.88	33.25
C-228D-213-120	111.00	155.00	232.00	196.13	326.63	349.00	25.13	95.00	76.00	70.00	21.00	15.88	114.88	30.00	87.00	53.00	37.00	78.50	54.00	79.00	28.00	33.25
C-228D-213-100	96.00	129.00	196.13	176.50	290.00	295.00	21.75	78.00	63.00	59.75	16.13	15.88	93.50	30.00	70.00	53.00	37.00	78.50	37.13	62.13	27.88	33.25
C-228D-173-100	96.00	129.00	196.13	176.50	290.00	295.00	21.75	78.00	63.00	59.75	16.13	15.88	93.50	30.00	70.00	53.00	37.00	78.50	37.13	62.13	27.88	33.25
C-228D-246-86	111.00	111.00	232.00	196.13	326.63	317.50	59.75	95.00	75.75	70.00	21.00	15.88	70.88	30.00	87.00	53.00	37.00	78.50	54.00	79.00	28.00	33.25
C-228D-213-86	96.00	111.00	196.13	176.50	290.00	282.00	23.75	78.00	75.00	59.75	16.13	15.88	75.50	30.00	70.00	53.00	37.00	78.50	37.13	62.13	27.88	33.25
C-228D-200-74	96.00	96.00	196.13	176.50	290.00	271.00	35.63	78.00	77.25	59.75	16.13	15.88	60.50	30.00	70.00	53.00	37.00	78.50	37.13	62.13	27.88	33.25
C-228D-173-74	84.00	96.00	168.25	160.00	273.50	243.00	16.75	68.00	68.75	51.75	15.88	12.25	65.00	20.00	70.00	53.00	37.00	78.50	27.25	52.25	27.88	33.25
C-160D-173-100	96.00	129.00	195.13	172.00	288.00	295.00	21.50	78.00	62.75	57.75	15.88	15.88	93.50	26.00	74.50	50.00	32.00	70.50	37.13	62.88	26.63	34.75
C-160D-173-86	96.00	111.00	195.13	172.00	288.00	282.00	23.75	78.00	74.88	57.75	15.88	15.88	75.50	26.00	74.50	50.00	32.00	70.50	37.13	62.88	26.63	34.75
C-160D-200-74	96.00	96.00	195.13	172.00	288.00	271.00	35.25	78.00	77.25	57.75	15.88	15.88	60.50	26.00	74.50	50.00	32.00	70.50	37.13	62.88	26.63	34.75
C-160D-173-74	84.00	96.00	168.25	155.50	260.50	243.00	16.75	68.00	68.75	51.75	15.88	15.88	65.00	26.00	63.50	50.00	32.00	70.50	23.63	53.25	26.63	34.75
C-160D-143-74	84.00	96.00	166.00	155.50	260.50	241.00	16.75	68.00	66.00	51.75	15.88	15.88	65.00	26.00	63.50	50.00	32.00	70.50	23.63	53.25	26.63	34.75
C-160D-173-64	84.00	84.00	166.00	155.50	260.50	232.50	26.00	68.00	67.00	51.75	15.88	15.88	53.00	26.00	63.50	50.00	32.00	69.75	23.63	53.25	26.63	34.75
C-160D-143-64	72.00	84.00	148.50	133.75	227.75	210.00	18.00	58.00	53.75	50.75	12.25	12.25	62.75	26.00	62.50	50.00	32.00	69.75	28.75	41.25	17.13	30.25
C-114D-119-86	84.00	111.00	166.00	150.00	266.00	252.00	14.75	68.00	54.50	51.75	15.88	12.25	80.00	24.00	71.00	50.00	25.00	66.75	27.50	53.25	23.13	34.75
C-114D-143-74	84.00	96.00	166.00	150.00	266.00	241.00	16.75	68.00	66.50	51.75	15.88	12.25	65.00	24.00	71.00	50.00	25.00	66.75	27.50	53.25	23.13	34.75
C-114D-173-64	84.00	84.00	166.00	150.00	266.00	232.50	26.13	68.00	67.00	51.75	15.88	12.25	53.00	24.00	71.00	50.00	25.00	66.75	27.50	53.25	23.13	34.75
C-114D-143-64	72.00	84.00	148.50	128.25	226.25	210.00	18.13	58.00	53.75	50.75	12.25	12.25	62.75	24.00	63.00	50.00	25.00	66.75	28.75	41.25	13.63	30.25
C-114D-173-54	72.00	72.00	148.50	128.25	226.25	201.00	19.38	56.00	62.25	50.75	12.25	12.25	50.75	24.00	63.00	50.00	25.00	66.75	28.75	41.25	13.63	30.25
C-114D-133-54	64.00	72.00	116.00	119.88	213.88	183.00	13.50	50.00	49.88	47.00	-	10.13	51.13	24.00	49.00	50.00	25.00	67.25	22.63	35.13	13.50	30.25
C-80D-119-64	64.00	84.00	116.00	119.88	213.88	191.50	13.25	50.00	40.38	47.00	-	10.13	63.13	24.00	49.00	50.00	25.00	67.25	22.63	35.13	13.50	30.25
C-80D-133-54	64.00	72.00	116.00	119.88	213.88	183.00	13.50	50.00	49.88	47.00	-	10.13	51.13	24.00	49.00	50.00	25.00	67.25	22.63	35.13	13.50	30.25
C-80D-119-54	64.00	72.00	116.00	119.88	213.88	183.00	13.50	50.00	49.88	47.00	-	10.13	51.13	24.00	49.00	50.00	25.00	67.25	22.63	35.13	13.50	30.25
C-80D-133-48	64.00	64.00	116.00	119.88	213.88	177.00	14.63	50.00	54.88	47.00	-	10.13	43.13	24.00	49.00	50.00	25.00	67.25	22.63	35.13	13.50	30.25
C-80D-109-48	56.00	64.00	105.00	111.88	200.38	166.25	14.63	46.00	44.00	40.75	-	10.13	43.13	24.00	45.50	50.00	25.00	65.25	18.63	31.13	13.50	30.25
C-57D-76-54	56.00	72.00	105.00	111.88	200.38	172.00	13.63	46.00	50.88	40.75	-	10.13	51.13	20.00	47.50	50.00	25.00	58.25	18.63	31.13	17.50	30.25
C-57D-109-48	56.00	64.00	105.00	111.88	200.38	166.25	16.00	46.00	42.75	40.75	-	10.13	43.13	20.00	47.50	50.00	25.00	58.25	18.63	31.13	17.50	30.25
C-57D-95-48	56.00	64.00	105.00	111.88	200.38	166.25	16.00	46.00	42.75	40.75	-	10.13	43.13	20.00	47.50	50.00	25.00	58.25	18.63	31.13	17.50	30.25
C-57D-69-42	48.00	56.00	98.50	98.00	186.50	152.00	16.38	44.00	42.00	38.50	-	8.13	41.00	20.00	47.50	50.00	25.00	58.00	16.63	29.13	17.50	30.25
C-57D-76-42	48.00	56.00	98.50	98.00	186.50	152.00	16.38	44.00	42.00	38.50	-	8.13	41.00	20.00	47.50	50.00	25.00	58.00	16.63	29.13	17.50	30.25

* Conventional Crank Balanced Units are available in either two-point foundation or standard base foundation designs. Two-point units are suitable for front and rear concrete block foundations, standard units must have a one-piece block foundation supporting the entire steel base. Dimension "N" is for two-point units and dimension "N1" is for standard units.

	<h2 style="margin: 0;">CONVENTIONAL CRANK BALANCED PUMPING UNITS</h2>	450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com
---	---	---

The first "enclosed, geared" pumping unit was built by Lufkin for Humble Oil in 1923. Since then, over 250,000 Lufkin units have been manufactured.

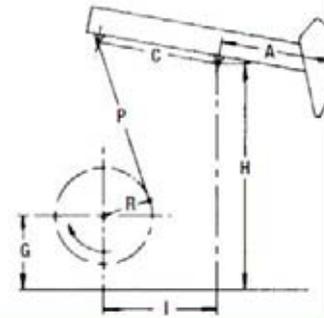


API Geometry Dimensions (inches)

Unit Size	A	C	I	P	H	G	R1, R2, R3, R4	S.U.*	T.F. @ 90°/Stroke Length
C-1824D-305-240	228	120.03	120	226.75	340.00	111.00	60, 53, 46, 39	-2740	111.78/240
C-1280D-305-240	228	120.03	120	226.80	340.00	111.00	60, 53, 46, 39	-2855	111.78/240
C-912D-305-240	228	120.03	120	226.75	340.00	111.00	60, 53, 46, 39	-2740	111.78/240
C-1824D-365-216	235	120.03	120	172.50	286.00	111.00	53, 46, 39, 32	-2030	101.31/216
C-1280D-427-192	210	120.03	120	172.50	286.50	111.00	53, 46, 39, 32	-995	90.43/192
C-1824D-365-192	210	120.03	120	172.50	286.00	111.00	53, 46, 39, 32	-1985	90.51/192
C-1280D-365-192	210	120.03	120	172.50	286.00	111.00	53, 46, 39, 32	-1800	90.51/192
C-912D-365-192	210	120.03	120	172.50	286.00	111.00	53, 46, 39, 32	-1800	90.51/192
C-912D-305-192	210	120.03	120	172.50	286.00	111.00	53, 46, 39, 32	-1800	90.51/192
C-912D-365-168	210	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-1500	80.29/168
C-912D-305-168	210	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-1500	80.29/168
C-640D-365-168	210	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-1500	80.29/168
C-640D-305-168	210	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-1500	80.29/168
C-456D-305-168	210	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-1500	80.29/168
C-912D-427-144	180	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-650	68.82/144
C-912D-365-144	180	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-650	68.82/144
C-640D-365-144	180	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-650	68.82/144
C-640D-305-144	180	120.08	120	144.50	260.00	111.00	47, 41, 35	-520	68.45/144
C-456D-305-144	180	120.08	120	144.50	260.00	111.00	47, 41, 35	-520	68.45/144
C-640D-256-144	180	120.08	120	144.50	260.00	111.00	47, 41, 35	-400	68.45/144
C-456D-256-144	180	120.08	120	144.50	260.00	111.00	47, 41, 35	-400	68.45/144
C-320D-256-144	180	120.08	120	144.50	260.00	111.00	47, 41, 35	-400	68.45/144
C-640D-365-120	152	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	570	58.12/120
C-456D-365-120	152	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	570	58.12/120
C-640D-305-120	155	111.09	111	133.50	234.00	96.00	42, 36, 30	-120	57.02/120
C-456D-305-120	155	111.09	111	133.50	234.00	96.00	42, 36, 30	-120	57.02/120
C-456D-256-120	155	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	55	57.05/120
C-320D-256-120	155	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	55	57.05/120
C-456D-213-120	155	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	0	57.05/120
C-320D-213-120	155	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	0	57.05/120
C-228D-213-120	155	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	0	57.05/120
C-456D-256-100	129	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	550	47.48/100
C-320D-256-100	129	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	550	47.48/100
C-320D-305-100	129	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	550	47.48/100
C-228D-213-100	129	96.08	96	113.00	196.13	79.13	37, 32, 27	0	48.21/100
C-228D-173-100	129	96.05	96	114.00	196.13	79.13	37, 32, 27	0	48.36/100
C-160D-173-100	129	96.05	96	114.00	195.88	78.88	37, 32, 27	0	48.36/100
C-320D-246-86	111	111.04	111	133.00	232.00	96.00	42, 36, 30	800	40.96/86
C-228D-246-86	111	111.04	111	133.00	232.00	96.00	42, 36, 30	800	40.96/86
C-320D-213-86	111	96.05	96	114.00	196.13	79.13	37, 32, 27	450	41.61/86
C-228D-213-86	111	96.05	96	114.00	196.13	79.13	37, 32, 27	450	41.61/86
C-160D-173-86	111	96.05	96	114.00	195.88	78.88	37, 32, 27	450	41.61/86
C-114D-119-86	111	84.05	84	93.75	166.00	69.25	32, 27, 22	115	40.96/86

*Structural Unbalance in pounds.

450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com	<h2 style="margin: 0;">CONVENTIONAL CRANK BALANCED PUMPING UNITS</h2>	
---	---	---



API Geometry Dimensions (inches)

Unit Size	A	C	I	P	H	G	R1, R2, R3, R4	S.U.*	T.F. @ 90°/Stroke Length
C-3200-246-74	96	96.05	96	114.00	196.13	79.13	37, 32, 27	800	35.99/74
C-2280-200-74	96	96.05	96	114.00	196.13	79.13	37, 32, 27	800	35.99/74
C-1600-200-74	96	96.05	96	114.00	195.88	78.88	37, 32, 27	800	35.99/74
C-2280-173-74	96	84.05	84	96.00	168.25	69.25	32, 27, 22	450	35.49/74
C-1600-173-74	96	84.05	84	96.00	168.25	69.25	32, 27, 22	450	35.49/74
C-1600-143-74	96	84.05	84	93.75	166.00	69.25	32, 27, 22	300	35.45/74
C-1140-143-74	96	84.05	84	93.75	166.00	69.25	32, 27, 22	300	35.45/74
C-1600-173-64	84	84.05	84	93.75	166.00	69.25	32, 27, 22	550	31.02/64
C-1140-173-64	84	84.05	84	93.75	166.00	69.25	32, 27, 22	550	31.02/64
C-1600-143-64	84	72.06	72	84.00	144.25	57.25	27, 22, 17	360	30.59/64
C-1140-143-64	84	72.06	72	84.00	144.25	57.25	27, 22, 17	360	30.59/64
C-800-119-64	84	64.00	64	74.50	126.13	51.13	24, 20, 16	0	30.85/64
C-1140-173-54	72	72.06	72	84.00	144.25	57.25	27, 22, 17	500	26.22/54
C-1140-133-54	72	64.00	64	74.50	126.13	51.13	24, 20, 16	330	26.45/54
C-800-133-54	72	64.00	64	74.50	126.13	51.13	24, 20, 16	330	26.45/54
C-800-119-54	72	64.00	64	74.50	126.13	51.13	24, 20, 16	300	26.45/54
C-570-76-54	72	56.05	56	65.63	115.13	47.13	21, 16, 11	0	26.22/54
C-800-133-48	64	64.00	64	74.50	126.13	51.13	24, 20, 16	440	23.51/48
C-800-109-48	64	56.05	56	65.63	115.13	47.13	21, 16, 11	320	23.30/48
C-570-109-48	64	56.05	56	65.63	115.13	47.13	21, 16, 11	320	23.30/48
C-570-95-48	64	56.05	56	65.63	115.13	47.13	21, 16, 11	320	23.30/48
C-570-89-42	56	48.17	48	57.50	106.63	45.13	18, 14, 10	150	20.21/42
C-570-76-42	56	48.17	48	57.50	106.63	45.13	18, 14, 10	150	20.21/42

*Structural Unbalance in pounds.

	<h2 style="margin: 0;">CONVENTIONAL CRANK BALANCED PUMPING UNITS</h2>	450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com
---	---	---

Structural Data

Unit Size	Polished Rod Capacity (lbs.)	Stroke Lengths (inches)	Walking Beam	Wireline Hanger (inches)	Cranks	Crank Pin Bearing	Equalizer Bearing	Center Bearing
C-1824D-305-240	30,500	240, 209, 179, 151	W33 x 241	1-3/8 x 16 CTRS.	120110CA	15E	ORA	0TGB
C-1280D-305-240	30,500	240, 209, 179, 151	W33 x 241	1-3/8 x 16 CTRS.	120110CA	15E	ORA	0TGB
C-912D-305-240	30,500	240, 209, 179, 151	W33 X 241	1-3/8 x 16 CTRS.	120110CA	15E	ORA	0TGB
C-1824D-365-216	36,500	216, 185, 155, 126	W33 x 241	1-3/8 x 16 CTRS.	106110CA	0S	0DR	00TG
C-1280D-427-192	42,700	192, 166, 139, 113	W36 x 247	1-3/8 x 16 CTRS.	106110CA	0S	0DR	00TG
C-1824D-365-192	36,500	192, 165, 139, 113	W33 x 221	1-3/8 x 16 CTRS.	106110CA	15E	ORA	0TGB
C-1280D-365-192	36,500	192, 165, 139, 113	W33 x 221	1-3/8 x 16 CTRS.	106110CA	15E	ORA	0TGB
C-912D-365-192	36,500	192, 165, 139, 113	W33 x 221	1-3/8 x 16 CTRS.	106110CA	15E	ORA	0TGB
C-912D-305-192	30,500	192, 165, 139, 113	W33 x 201	1-1/4 x 16 CTRS.	106110CA	15E	ORA	0TGB
C-912D-365-168	36,500	168, 145, 124	W33 x 221	1-3/8 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	0TGB
C-640D-365-168	36,500	168, 145, 124	W33 x 221	1-3/8 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	0TGB
C-912D-305-168	30,500	168, 145, 124	W33 x 201	1-1/4 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	0TGB
C-640D-305-168	30,500	168, 145, 124	W33 x 201	1-1/4 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	0TGB
C-456D-305-168	30,500	168, 145, 124	W33 x 201	1-1/4 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	0TGB
C-912D-427-144	42,700	144, 124, 106	W33 x 221	1-3/8 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	0TGB
C-912D-365-144	36,500	144, 124, 106	W33 x 201	1-3/8 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	0TGB
C-640D-365-144	36,500	144, 124, 106	W33 x 201	1-3/8 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	0TGB
C-640D-305-144	30,500	144, 124, 106	W30 x 173	1-1/4 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	1TGC
C-456D-305-144	30,500	144, 124, 106	W30 x 173	1-1/4 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	1TGC
C-640D-256-144	25,600	144, 124, 106	W30 x 173	1-1/4 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	1TGC
C-456D-256-144	25,600	144, 124, 106	W30 x 173	1-1/4 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	1TGC
C-320D-256-144	25,600	144, 124, 106	W30 x 173	1-1/4 x 16 CTRS.	94110CA	15E	ORA	1TGC
C-640D-365-120	36,500	120, 105, 90	W30 x 173	1-3/8 x 12 CTRS.	94110CA	15E	ORA	0TGB
C-456D-365-120	36,500	120, 105, 90	W30 x 173	1-3/8 x 12 CTRS.	94110CA	15E	ORA	0TGB
C-640D-305-120	30,500	120, 102, 85	W27 x 161	1-1/4 x 12 CTRS.	8495CA	25E	ORA	1TGC
C-456D-305-120	30,500	120, 102, 85	W27 x 161	1-1/4 x 12 CTRS.	8495CA	25E	ORA	1TGC
C-456D-256-120	25,600	120, 102, 85	W27 x 146	1-1/8 x 12 CTRS.	8495CA	25E	1RA	2TGC
C-320D-256-120	25,600	120, 102, 85	W27 x 146	1-1/8 x 12 CTRS.	8495CA	25E	1RA	2TGC
C-456D-213-120	21,300	120, 102, 85	W27 x 146	1-1/8 x 12 CTRS.	8495CA	25E	1RA	2TGC
C-320D-213-120	21,300	120, 102, 85	W27 x 146	1-1/8 x 12 CTRS.	8495CA	25E	1RA	2TGC
C-228D-213-120	21,300	120, 102, 85	W27 x 146	1-1/8 x 12 CTRS.	8495CA	25E	1RA	2TGC
C-320D-305-100	30,500	100, 85, 70	W27 x 146	1-1/4 x 12 CTRS.	8495CA	25E	1RA	2TGC
C-456D-256-100	25,600	100, 85, 70	W27 x 146	1-1/8 x 12 CTRS.	8495CA	25E	1RA	2TGC
C-320D-256-100	25,600	100, 85, 70	W27 x 146	1-1/8 x 12 CTRS.	8495CA	25E	1RA	2TGC
C-228D-213-100	21,300	100, 86, 73	W24 x 117	1-1/8 x 12 CTRS.	7478CA	35F	2RB	2TGC
C-228D-173-100	17,300	100, 86, 73	W24 x 104	1-1/8 x 12 CTRS.	7478CA	35F	2RB	2TGC
C-160D-173-100	17,300	100, 86, 73	W24 x 104	1-1/8 x 12 CTRS.	7478CA	35F	2RB	2TGC
C-320D-246-86	24,600	86, 74, 61	W24 x 117	1-1/8 x 12 CTRS.	8495CA	35F	2RB	2TGC
C-228D-246-86	24,600	86, 74, 61	W24 x 117	1-1/8 x 12 CTRS.	8495CA	35F	2RB	2TGC
C-320D-213-86	21,300	86, 74, 62	W24 x 104	1-1/8 x 12 CTRS.	7478CA	35F	2RB	2TGC
C-228D-213-86	21,300	86, 74, 62	W24 x 104	1-1/8 x 12 CTRS.	7478CA	35F	2RB	2TGC
C-160D-173-86	17,300	86, 74, 62	W24 x 104	1-1/8 x 12 CTRS.	7478CA	35F	2RB	2TGC
C-114D-119-86	11,900	86, 72, 59	W24 x 84	1-1/8 x 12 CTRS.	6468CA	45F	3RA	4TG

450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com	<h2 style="margin: 0;">CONVENTIONAL CRANK BALANCED PUMPING UNITS</h2>	 <small>INTEGRATED PRODUCTS GROUP</small>
---	---	---

Structural Data

Unit Size	Polished Rod Capacity (lbs.)	Stroke Lengths (inches)	Walking Beam	Wireline Hanger (inches)	Crank	Crank Pin Bearing	Equalizer Bearing	Center Bearing
C-320D-246-74	24,600	74, 64, 54	W24 x 104	1-1/8 x 9 CTRS.	7478CA	3SF	2RB	2TGC
C-228D-200-74	20,000	74, 64, 54	W24 x 94	1 x 9 CTRS.	7478CA	3SF	2RB	2TGC
C-160D-200-74	20,000	74, 64, 54	W24 x 94	1 x 9 CTRS.	7478CA	3SF	2RB	2TGC
C-228D-173-74	17,300	74, 62, 51	W24 x 94	1 x 9 CTRS.	6468CA	3SF	2RB	2TGC
C-160D-173-74	17,300	74, 62, 51	W24 x 84	1 x 9 CTRS.	6468CA	3SF	2RB	2TGC
C-160D-143-74	14,300	74, 62, 51	W24 x 84	1 x 9 CTRS.	6468CA	4SF	3RA	4TG
C-114D-143-74	14,300	74, 62, 51	W24 x 84	1 x 9 CTRS.	6468CA	4SF	3RA	4TG
C-160D-173-64	17,300	64, 54, 44	W24 x 84	1 x 9 CTRS.	6468CA	4SF	3RA	4TG
C-114D-173-64	17,300	64, 54, 44	W24 x 84	1 x 9 CTRS.	6468CA	4SF	3RA	4TG
C-160D-143-64	14,300	64, 52, 40	W18 x 71	1 x 9 CTRS.	5456CA	4SF	3RA	4TG
C-114D-143-64	14,300	64, 52, 40	W18 x 71	1 x 9 CTRS.	5456CA	4SF	3RA	4TG
C-80D-119-64	11,900	64, 53, 42	W18 x 60	1 x 9 CTRS.	4850BA	5SA	4RA	4TG
C-114D-173-54	17,300	54, 44, 34	W18 x 71	1 x 9 CTRS.	5456CA	4SF	3RA	4TG
C-114D-133-54	13,300	54, 45, 36	W18 x 60	7/8 x 9 CTRS.	4850BA	5SA	4RA	4TG
C-80D-133-54	13,300	54, 45, 36	W18 x 60	7/8 x 9 CTRS.	4850BA	5SA	4RA	4TG
C-80D-119-54	11,900	54, 45, 36	W18 x 60	7/8 x 9 CTRS.	4850BA	5SA	4RA	4TG
C-57D-76-54	7,600	54, 41, 28	W16 x 36	3/4 x 9 CTRS.	4246BA	5SA	5R	5C
C-80D-133-48	13,300	48, 40, 32	W16 x 57	7/8 x 9 CTRS.	4850BA	5SA	4RA	4TG
C-80D-109-48	10,900	48, 37, 25	W16 x 45	7/8 x 9 CTRS.	4246BA	5SA	5R	5C
C-57D-109-48	10,900	48, 37, 25	W16 x 45	7/8 x 9 CTRS.	4246BA	5SA	5R	5C
C-57D-95-48	9,500	48, 37, 25	W16 x 45	7/8 x 9 CTRS.	4246BA	5SA	5R	5C
C-57D-89-42	8,900	42, 33, 23	W16 x 36	3/4 x 6-1/2 CTRS.	3644BA	6	7R	6CA
C-57D-76-42	7,600	42, 33, 23	W16 x 36	3/4 x 6-1/2 CTRS.	3644BA	6	7R	6CA

	<h2 style="margin: 0;">CONVENTIONAL CRANK BALANCED PUMPING UNITS</h2>	450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com
---	---	---

Counterbalance Data (shown in lbs., effective at polished rod with weights at maximum position, including structural unbalance.)

Unit Size	C-18240-305-240 C-9120-305-240	C18240-365-216	C-18240-365-192	C-12800-305-240	C-12800-427-192	C-12800-365-192 C-9120-365-192 C-9120-305-192	C-9120-365-168 C-9120-305-168 C-6400-365-168 C-6400-305-168 C-4560-305-168
Maximum Stroke	240"	216"	192"	240"	192"	192"	168"
Structural Unbalance	-2,740 lbs.	-2,030 lbs.	-1,985 lbs.	-2,855 lbs.	-1,149 lbs.	-1,800 lbs.	-1,500 lbs.
Cranks	120110CA	106110CA	106110CA	120110CA	106110CA	106110CA	94110CA
C'Bal., Cranks Only	1,470	2,615	3,215	1,356	4,060	3,400	4,360
4 No. OORCL Counterweights	15,035	17,585	19,970	14,920	20,829	20,155	-
4 No. OOSL Aux. Weights	19,040	22,000	24,915	18,925	25,716	25,100	-
8 No. OOSL Aux. Weights	23,040	26,415	29,860	22,925	30,724	30,045	-
4 No. OORO Counterweights	12,255	14,515	16,535	12,140	17,395	16,720	19,380
4 No. OOS Aux. Weights	15,510	18,105	20,555	15,395	21,420	20,740	23,910
8 No. OOS Aux. Weights	18,765	21,695	24,575	18,650	25,445	24,760	28,440
4 No. ORO Counterweights	10,880	12,985	14,835	10,765	15,690	15,020	17,455
4 No. OS Aux. Weights	14,005	16,440	18,695	13,885	19,550	18,880	21,805
8 No. OS Aux. Weights	17,130	19,885	22,555	17,010	23,410	22,740	26,150
4 No. OARO Counterweights	9,430	11,400	13,045	9,315	13,900	13,230	15,440
4 No. OAS Aux. Weights	11,895	14,120	16,090	11,780	16,945	16,275	18,870
8 No. OAS Aux. Weights	14,360	16,840	19,135	14,245	19,990	19,320	22,300
4 No. TRO Counterweights	7,660	9,450	10,865	7,545	11,715	11,050	12,980
4 No. TS Aux. Weights	9,565	11,550	13,215	9,450	14,070	13,400	15,630
8 No. TS Aux. Weights	11,470	13,650	15,565	11,355	16,425	15,750	18,280
4 No. 2RO Counterweights	6,625	8,305	9,580	6,510	10,435	9,765	11,535
4 No. 2S Aux. Weights	8,470	10,345	11,860	8,355	12,720	12,045	14,105
8 No. 2S Aux. Weights	10,315	12,385	14,140	10,200	15,005	14,325	16,675
4 No. 3CRO Counterweights	5,620	7,195	8,340	5,505	9,190	8,525	10,135
4 No. 3S Aux. Weights	7,410	9,170	10,550	7,295	11,400	10,735	12,625
8 No. 3S Aux. Weights	9,200	11,145	12,760	9,080	13,610	12,945	15,115*
4 No. SARO Counterweights	-	-	-	-	-	-	8,505
4 No. SA Aux. Weights	-	-	-	-	-	-	10,165
8 No. SA Aux. Weights	-	-	-	-	-	-	11,825*
4 No. SCRO Counterweights	-	-	-	-	-	-	7,430
4 No. SCS Aux. Weights	-	-	-	-	-	-	8,945
8 No. SCS Aux. Weights	-	-	-	-	-	-	10,465

Unit Size	C-4560-256-100 C-3200-256-100	C-2280-213-100 C-2280-173-100	C-3200-246-86 C-2280-246-86	C-3200-213-86 C-2280-213-86	C-1600-173-86	C-1140-119-86	C-3200-246-74 C-2280-200-74 C-1600-200-74
Maximum Stroke	100"	100"	86"	86"	86"	86"	74"
Structural Unbalance	+ 550 lbs.	+ 6 lbs.	+ 800 lbs.	+ 450 lbs.	+ 450 lbs.	+ 115 lbs.	+ 800 lbs.
Cranks	8495CA	7478CA	8495CA	7478CA	7478CA	6468CA	7478CA
C'Bal., Cranks Only	7,330	3,910	8,720	4,910	4,910	3,395	5,960
4 No. OARO Counterweights	22,510	-	-	-	-	-	-
4 No. OAS Aux. Weights	27,210	-	-	-	-	-	-
8 No. OAS Aux. Weights	-	-	-	-	-	-	-
4 No. TRO Counterweights	19,170	12,855	22,545	-	-	-	-
4 No. TS Aux. Weights	22,810	15,605	-	-	-	-	-
8 No. TS Aux. Weights	26,450	18,355	-	-	-	-	-
4 No. 2RO Counterweights	17,195	11,425	20,235	13,490	13,490	10,430	15,870
4 No. 2S Aux. Weights	20,725	14,120	-	16,560	16,560	-	19,425
8 No. 2S Aux. Weights	24,260	16,810	-	19,635	-	-	-
4 No. 3CRO Counterweights	15,330	10,090	18,065	11,985	11,985	9,255	14,110
4 No. 3S Aux. Weights	18,780	12,755	22,090	15,005	15,005	11,780	17,625
8 No. 3S Aux. Weights	22,230*	15,420*	-	18,045*	-	-	21,140*
4 No. SARO Counterweights	13,180	8,510	15,550	10,160	10,160	7,830	12,025
4 No. SA Aux. Weights	15,525	10,355	18,290	12,265	12,265	9,605	14,460
8 No. SA Aux. Weights	17,870*	12,195*	21,030*	14,370	14,370*	11,385	16,890***
4 No. SCRO Counterweights	11,640	7,310	13,750	8,795	8,795	6,685	10,445
4 No. SCS Aux. Weights	13,765	8,990	16,235	10,710	10,710	8,315	12,660
8 No. SCS Aux. Weights	15,895	10,670*	18,720	12,630	12,630*	9,940	14,880***
4 No. GRO Counterweights	10,675	6,565	12,625	7,940	7,940	5,975	9,460
4 No. 6 Aux. Weights	11,935	7,565	14,100	9,085	9,085	6,950	10,780
8 No. 6 Aux. Weights	13,195	8,565	15,570	10,225	10,225	7,925	12,100
4 No. 7RO Counterweights	9,465	5,815	11,210	6,855	6,855	5,060	8,205
4 No. 7 Aux. Weights	10,420	6,375	12,330	7,725	7,725	5,805	9,210
8 No. 7 Aux. Weights	11,375	7,135	13,445	8,595	8,595	6,550	10,215

* Use only one aux. weight per counterweight on belt cover side on 9120, 3200 & 1600 units.

** Use only one aux. weight per counterweight on belt cover side on 3200 & 2280 units.

*** Use only one aux. weight per counterweight on belt cover side on 1600 units.

450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com	<h2 style="margin: 0;">CONVENTIONAL CRANK BALANCED PUMPING UNITS</h2>	
---	---	--

C-912D-427-144 C-912D-365-144 C-640D-365-144	C-640D-305-144 C-456D-305-144	C-640D-256-144 C-456D-256-144 C-320D-256-144	C-640D-365-120 C-456D-365-120	C-640D-305-120 C-456D-305-120	C-456D-256-120 C-320D-256-120	C-456D-213-120 C-320D-213-120 C-228D-213-120
144"	144"	144"	120"	120"	120"	120"
- 650 lbs.	- 520 lbs.	- 400 lbs.	+ 570 lbs.	- 120 lbs.	+ 55 lbs.	0 lbs.
94110CA	94110CA	94110CA	94110CA	8495CA	8495CA	8495CA
6,190	6,360	6,480	8,670	5,570	5,740	5,685
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
23,710	23,970	-	29,415	-	-	-
28,995	29,285	-	35,670	-	-	-
34,285	-	-	-	-	-	-
21,475	21,725	21,845	26,765	20,430	20,595	-
26,550	26,825	-	32,775	25,365	-	-
31,625	-	-	-	-	-	-
19,125	19,360	19,480	23,980	18,305	18,470	18,415
23,130	23,385	23,505	28,725	22,250	22,415	-
27,130	27,410	-	33,465	26,190	-	-
16,250	16,470	16,590	20,580	15,505	15,670	15,615
19,345	19,580	19,700	24,240	18,555	18,725	18,670
22,435	22,690	22,810*	27,905	21,610	21,775	-
14,565	14,775	14,895	18,585	13,845	14,010	13,955
17,565	17,790	17,910	22,135	16,810	16,975	16,920
20,565	20,810	20,930*	25,690	19,770	19,935	19,880
12,935	13,135	13,255	16,650	12,285	12,450	12,395
15,840	16,055	16,175	20,095	15,175	15,345	15,290
18,745*	18,980	19,100*	23,535	18,070	18,235*	18,180**
11,025	11,200	11,340	14,395	10,475	10,645	10,590
12,965	13,165	13,285	16,690	12,445	12,615	12,560
14,905*	15,115	15,235*	18,985	14,410	14,580*	14,525*
9,775	9,960	10,080	12,910	9,185	9,355	9,300
11,545	11,740	11,860	15,005	10,970	11,140	11,085
13,315	13,520	*13,640	17,105	12,755	12,920	12,865

C-228D-173-74 C-160D-173-74	C-160D-143-74 C-114D-143-74	C-160D-173-64 C-114D-173-64	C-160D-143-64 C-114D-143-64	C-80D-119-64	C-114D-173-54	C-114D-133-54 C-80D-133-54
74"	74"	64"	64"	64"	54"	54"
+ 450 lbs.	+ 300 lbs.	+550 lbs.	+ 360 lbs.	0 lbs.	+ 500 lbs.	+ 330 lbs.
6468CA	6468CA	6468CA	5456CA	4850BA	5456CA	4850BA
4,235	4,090	4,880	2,665	2,155	3,190	2,845
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
11,005	10,870	12,630	8,605	-	10,115	-
13,925	13,790	15,965	11,165	-	13,105	-
16,840	-	-	13,725	-	16,090	-
9,360	9,220	10,745	7,290	6,120	8,585	7,470
11,410	11,275	13,090	9,145	7,740	10,745	9,360
13,465*	13,330*	15,440*	10,995*	-	12,910	11,250
8,040	7,900	9,235	6,120	5,135	7,220	6,320
9,915	9,780	11,380	7,830	6,610	9,210	8,040
11,795*	11,660*	13,530*	9,535*	-	11,205	9,760
7,220	7,075	8,295	5,400	4,515	6,380	5,595
8,345	8,205	9,580	6,430	5,405	7,580	6,635
9,470	9,330	10,870	7,460	6,295	8,785	7,675
6,160	6,015	7,085	4,440	3,700	5,260	4,645
7,020	6,880	8,070	5,235	4,395	6,190	5,460
7,880	7,740	9,050	6,030	5,090	7,115	6,270

EXAMPLE: A C-456D-256-120 Unit with 4 No. 2FO Counterweights and 4 No. 2S Auxiliary Weights would have a maximum counterbalance effect of 16,975 pounds in the 120" stroke. This effect includes a structural unbalance of +55 pounds. If the counterbalance effect is desired for the 85" stroke, subtract the structural unbalance from the effect in the 120" stroke and multiply this difference by the ratio of 120 ÷ 85, then add the structural unbalance to this product. Thus, counterbalance effect in the 85" stroke = [16,975 - (+55)] x 120/85 + (+55) = 16,920 x 120/85 + 55 = 23,942 pounds. Structural unbalance with a negative (-) sign indicates a walking beam assembly that is heavy on the well end. Structural unbalance without the negative sign indicates a walking beam assembly that is heavy on the gear reducer end.

	<h2 style="margin: 0;">CONVENTIONAL CRANK BALANCED PUMPING UNITS</h2>	450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4235 www.lufkin.com
---	---	---

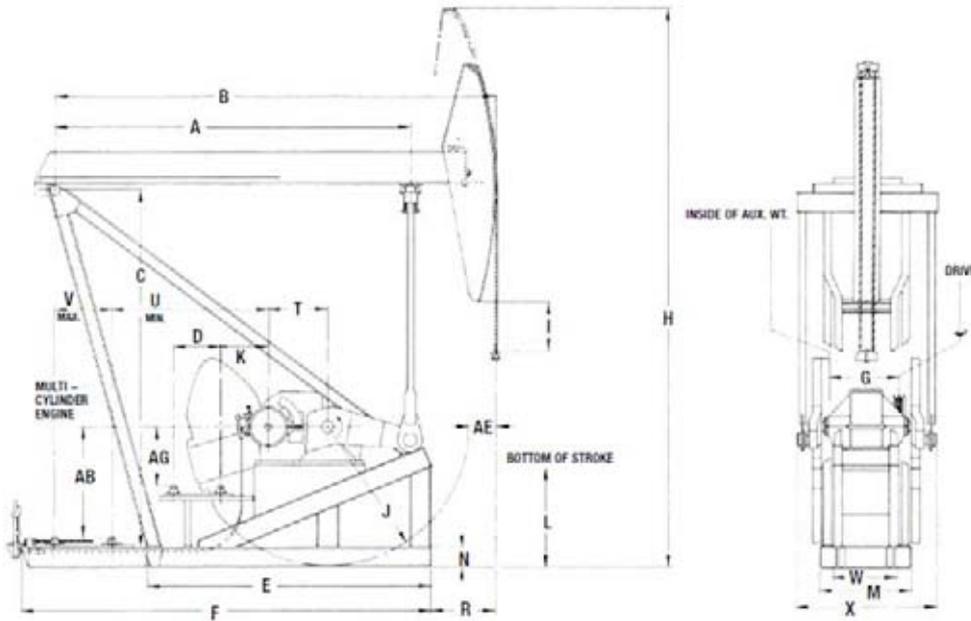
Counterbalance Data (shown in lbs., effective at polished rod with weights at maximum position, including structural unbalance.)

Unit Size	C-800-119-54	C-57D-76-54	C-800-133-48	C-800-109-48 C-57D-109-48 C-57D-95-48	C-57D-89-42 C-57D-76-42
Maximum Stroke	54"	54"	48"	48"	42"
Structural Unbalance	+ 300 lbs.	0 lbs.	+ 440 lbs.	+ 320 lbs.	+ 150 lbs.
Cranks	4850BA	4246BA	4850BA	4246BA	3644BA
C'Bal., Cranks Only	2,945	1,650	3,270	2,175	1,675
4 No. 5RD Counterweights	7,470	5,760	8,475	8,800	-
4 No. 5A Aux. Weights	9,580	7,440	10,585	8,690	-
4 No. 5CRD Counterweights	6,320	4,750	7,175	5,665	5,300
4 No. 5CS Aux. Weights	8,040	6,285	9,115	7,395	7,165
4 No. 6RD Counterweights	5,595	4,120	6,365	4,955	4,700
4 No. 6 Aux. Weights	6,635	5,050	7,535	6,005	5,840
8 No. 6 Aux. Weights	7,675	5,985	8,705	7,055	6,985*
4 No. 7RD Counterweights	4,645	3,275	5,295	4,005	3,670
4 No. 7 Aux. Weights	5,400	4,005	6,210	4,830	4,570
8 No. 7 Aux. Weights	6,270	4,740	7,125	5,655	5,475*

*Use only one aux. weight per counterweight on belt cover side on 4RD units.

NOTE: To convert effective counterbalance to maximum counterbalance torque for dynamometer card analysis, multiply the pounds counterbalance, minus the structural unbalance, by the torque factor at the 90° crank position.

450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com	<h2 style="margin: 0;">MARK II UNITORQUE PUMPING UNITS</h2>	 <p style="font-size: small; margin: 0;">INFIELD PRODUCTS GROUP</p>
---	---	--

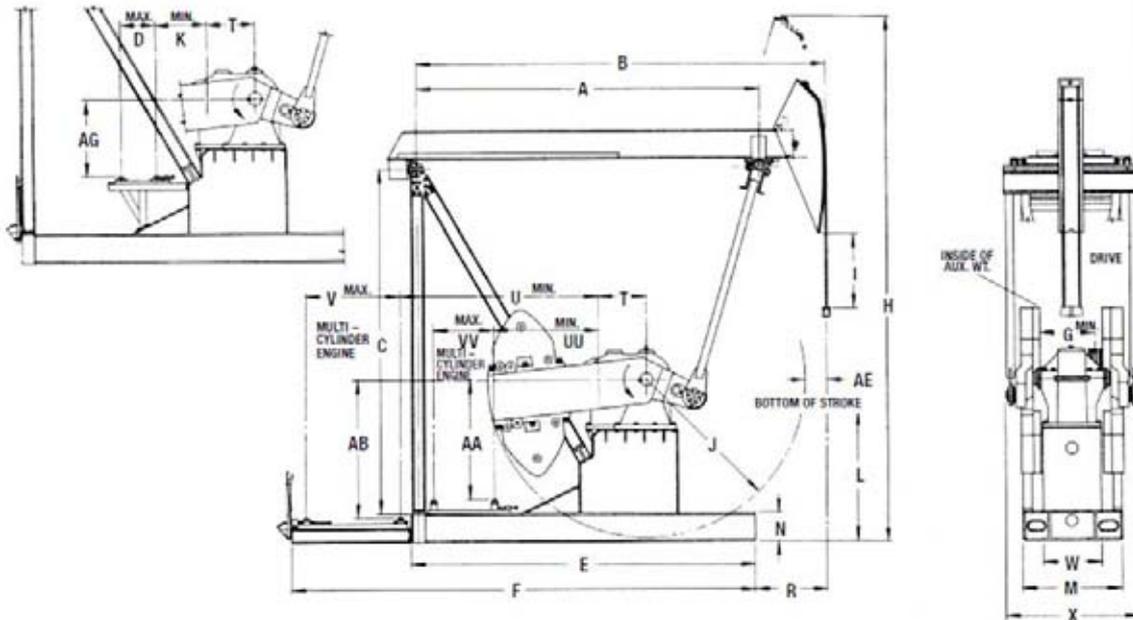


Dimensional Data (inches)

Unit Size	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	R	T	U	V	W	X	AB	AE	AG
M-18240-427-216	306	384	329.88	55	223.00	333.75	67.00	569	44.38	130	25.38	75.50	101.00	18	45.00	58.88	105.88	52	48.50	124.00	108.50	26.00	51
M-12800-427-216	306	384	329.88	55	223.00	341.50	57.25	589	44.38	130	31.75	75.50	96.00	18	45.00	52.50	120.00	52	48.50	114.00	108.50	26.00	51
M-12800-427-192	306	384	329.88	55	223.00	341.50	57.25	550	63.25	130	31.75	80.25	96.00	18	45.00	52.50	120.00	52	48.50	114.00	108.50	26.00	51
M-9120S-365-216	306	384	329.88	55	223.00	331.50	53.63	569	44.38	130	23.00	75.50	96.00	18	45.00	48.50	109.50	52	48.50	107.00	108.50	26.00	59
M-9120S-427-192	306	384	329.88	55	223.00	331.50	53.63	550	63.25	130	23.00	75.38	96.00	18	45.00	48.50	109.50	52	48.50	107.00	108.50	26.00	59
M-9120S-427-168	270	334	276.88	50	218.75	298.25	53.63	477	32.38	108	25.50	85.25	81.50	18	48.00	48.50	108.38	52	50.00	107.00	114.38	23.38	46
M-9120-305-216	306	384	329.88	55	223.00	326.50	53.63	569	44.38	130	23.00	75.50	96.00	18	45.00	48.50	109.50	47	48.50	108.00	108.50	26.00	59
M-9120-305-192	306	384	329.88	55	223.00	326.50	53.63	550	63.25	130	23.00	80.25	96.00	18	45.00	48.50	109.50	47	48.50	109.00	108.50	26.00	59
M-9120-365-168	270	334	276.88	50	218.75	298.25	53.63	471	40.25	108	25.50	77.13	81.50	18	48.00	48.50	108.38	52	50.00	105.00	90.38	23.38	46
M-9120-305-168	270	334	276.88	50	218.75	298.25	53.63	471	40.25	108	25.50	77.13	81.50	18	48.00	48.50	108.38	52	50.00	108.00	90.38	23.38	46
M-9120-365-144	258	312	252.88	50	218.75	298.25	53.63	426	33.63	108	25.50	83.75	81.50	18	42.50	48.50	108.38	52	50.00	105.00	90.38	18.00	46
M-9120-305-144	258	312	252.88	50	218.75	298.25	53.63	426	33.63	108	25.50	83.75	81.50	18	42.50	48.50	108.38	52	50.00	103.38	90.38	18.00	46
M-6400-305-192	306	384	329.88	55	223.00	326.50	49.88	550	63.25	130	24.63	80.25	96.00	18	45.00	41.50	116.50	47	48.50	108.00	108.50	26.00	60
M-6400-365-168	270	334	276.88	50	218.75	298.25	49.88	471	40.25	108	24.13	77.13	81.50	18	48.00	41.50	115.25	52	50.00	101.00	90.38	23.38	46
M-6400-305-168	270	334	276.88	50	218.75	298.25	49.88	471	40.25	108	24.13	77.13	81.50	18	48.00	41.50	115.25	52	50.00	101.00	90.38	23.38	46
M-6400-365-144	258	312	252.88	50	218.75	298.25	49.88	426	33.63	108	24.13	83.75	81.50	18	42.50	41.50	115.25	52	50.00	101.00	90.38	18.00	46
M-6400-305-144	258	312	252.88	50	218.75	298.25	49.88	426	33.63	108	24.13	83.75	81.50	18	42.50	41.50	115.25	52	50.00	99.38	90.38	18.00	46
M-6400-256-144	258	312	252.88	50	218.75	298.25	49.88	422	47.25	108	24.13	71.63	81.50	18	42.50	41.50	115.25	52	50.00	99.38	90.38	18.00	46
M-6400-305-120	258	312	252.88	50	218.75	298.25	49.88	399	59.75	108	24.13	80.75	81.50	18	42.50	41.50	115.25	52	50.00	99.38	90.38	18.00	46
M-4560-305-192	306	384	329.88	55	223.00	326.50	49.88	550	63.25	130	29.75	80.25	96.00	18	45.00	38.38	119.63	47	48.50	105.00	108.50	26.00	60
M-4560-305-168	270	334	276.88	50	218.75	298.25	49.88	471	40.25	108	31.00	77.13	81.50	18	48.00	38.38	115.25	52	50.00	101.00	90.38	23.38	46
M-4560-365-144	258	312	252.88	50	218.75	298.25	49.88	426	33.63	108	31.00	83.75	81.50	18	42.50	38.38	115.25	52	50.00	101.00	90.38	18.00	46
M-4560-305-144	258	312	252.88	50	218.75	298.25	49.88	426	33.63	108	31.00	83.75	81.50	18	42.50	38.38	115.25	52	50.00	99.38	90.38	18.00	46
M-4560-256-144	258	312	252.88	50	218.75	298.25	49.88	434	47.50	108	31.00	71.63	81.50	18	42.50	38.38	115.25	52	50.00	99.38	90.38	18.00	46
M-4560-365-120	258	312	252.88	50	218.75	298.25	49.88	399	59.75	108	31.00	80.75	81.50	18	42.50	38.38	115.25	52	50.00	101.00	90.38	18.00	46
M-4560-305-120	258	312	252.88	50	218.75	298.25	49.88	399	59.75	108	31.00	80.75	81.50	18	42.50	38.38	115.25	52	50.00	99.50	90.38	18.00	46
M-4560-256-120	258	312	252.88	50	218.75	298.25	49.88	400	73.88	108	31.00	70.00	81.50	18	42.50	38.38	115.25	52	50.00	99.50	90.38	18.00	46

NOTE: Do not use the above dimensions for foundation. Request a foundation plan.
 The above units are designed to be installed on "two point" foundations.
 Popular API models shown, other models available on request.

	<h2 style="margin: 0;">MARK II UNITORQUE PUMPING UNITS</h2>	450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com
---	---	---



Dimensional Data (inches)

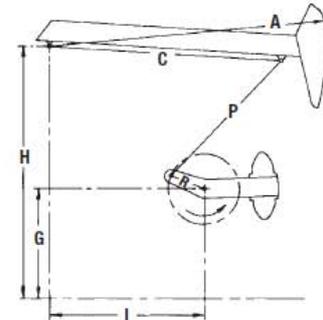
Unit Size*	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	R	T	U	V	W	X	AA	AB	AE	AG	UU	VV
M-3200-256-144	258	312	252.88	33.25	258.38	*	42.75	442	47.63	108.00	35.38	76.98	75.75	24	60	34	*	43	88.38	86	*	18.00	46.00	88	55	
M-3200-306-120	258	312	252.88	33.25	258.38	*	42.75	407	65.00	108.00	35.38	87.00	75.75	24	60	34	*	43	88.38	86	*	18.00	46.00	88	55	
M-3200-256-120	258	312	252.88	33.25	258.38	*	42.75	406	69.00	108.00	35.38	80.75	75.75	24	60	34	*	43	88.38	86	*	18.00	46.00	88	55	
M-3200-213-120	258	312	252.88	33.25	258.38	*	42.75	406	69.00	108.00	35.75	80.75	75.75	24	60	34	*	43	88.38	86	*	18.00	46.00	88	55	
M-3200-306-100	258	312	252.88	33.25	258.38	*	42.75	388	84.63	108.00	35.38	83.13	75.75	24	60	34	*	43	88.38	86	*	18.00	46.00	88	55	
M-3200-256-100	258	312	252.88	33.25	258.38	*	42.75	381	88.38	108.00	35.38	81.25	75.75	24	60	34	*	43	88.38	86	*	18.00	46.00	88	55	
M-2280-256-120	258	312	252.88	28.75	258.38	334.38	38.50	406	69.00	108.00	41.63	80.75	75.75	24	60	30	176.25	47.50	37	81.38	86	95.25	18.00	50.25	92	55
M-2280-213-120	258	312	252.88	28.75	258.38	334.38	38.50	406	69.00	108.00	41.63	80.75	75.75	24	60	30	176.25	47.50	37	81.38	86	95.25	18.00	50.25	92	55
M-2280-256-100	258	312	252.88	28.75	258.38	334.38	38.50	381	88.38	108.00	41.63	81.25	75.75	24	60	30	176.25	47.50	37	81.38	86	95.25	18.00	50.25	92	55
M-2280-173-100	258	312	252.88	28.75	258.38	*	38.50	381	88.38	108.00	41.63	81.25	75.75	24	60	30	176.25	47.50	37	81.38	86	95.25	18.00	50.25	92	55
M-2280-246-86	186	222	188.38	29.25	188.00	263.50	38.50	308	48.25	86.63	22.88	75.50	57.25	24	39	30	116.50	47.50	37	80.38	**	73.38	11.38	41.50	**	**
M-2280-213-86	186	222	188.38	29.25	187.63	263.13	38.50	308	45.25	86.63	22.88	72.50	57.25	21	39	30	116.13	47.50	37	103.38	**	70.38	11.38	41.50	**	**
M-2280-200-74	186	222	188.38	29.25	187.63	263.13	38.50	295	52.88	86.63	22.88	73.25	57.25	21	39	30	116.13	47.50	37	103.38	**	70.38	11.38	41.50	**	**
M-2280-173-74	186	222	188.38	29.25	187.63	263.13	38.50	294	52.88	86.63	22.88	72.88	57.25	21	39	30	116.13	47.50	37	103.38	**	70.38	11.38	41.50	**	**
M-1600-213-86	186	222	188.38	33.75	187.63	252.63	32.50	305	45.25	86.63	24.56	72.50	54.25	21	39	26	106.63	55.00	32	72.38	**	78.13	11.38	38.63	**	**
M-1600-173-86	186	222	188.38	33.75	187.63	252.63	32.50	305	41.13	86.63	24.56	72.13	54.25	21	39	26	106.63	55.00	32	72.38	**	78.13	11.38	38.63	**	**
M-1600-200-74	186	222	188.38	33.75	187.63	252.63	32.50	295	52.88	86.63	24.56	73.25	54.25	21	39	26	106.63	55.00	32	72.38	**	78.13	11.38	38.63	**	**
M-1600-173-74	186	222	188.38	30.00	187.63	252.63	32.50	294	52.88	86.63	24.56	72.88	54.25	21	39	26	106.63	55.00	32	72.38	**	78.13	11.38	38.63	**	**
M-1140-143-86	162	189	147.50	30.00	161.00	236.50	28.75	257	14.00	62.00	20.25	57.13	42.75	16	32	24	108.50	52.00	25	67.38	**	44.38	16.00	35.75	**	**
M-1140-173-74	186	222	188.38	30.75	188.38	263.13	28.75	254	52.88	86.63	26.00	72.88	54.25	21	39	24	122.13	52.00	25	69.00	**	70.38	11.38	41.63	**	**
M-1140-143-74	162	189	147.50	30.00	161.00	236.50	28.75	247	27.75	62.00	20.25	56.88	42.75	16	32	24	108.50	52.00	25	67.38	**	44.38	16.00	35.75	**	**
M-1140-173-64	162	189	147.50	30.00	161.00	236.50	28.75	239	21.00	62.00	20.25	71.63	42.75	16	32	24	108.50	52.00	25	67.38	**	44.38	16.00	35.75	**	**
M-1140-143-64	162	189	147.50	30.00	161.00	236.50	28.75	230	21.00	62.00	20.25	71.63	42.75	16	32	24	108.50	52.00	25	67.38	**	44.38	16.00	35.75	**	**

* On 100", 120" and 144" stroke units, on this page multi-cylinder engines are mounted on main base beams forward of Samson Post. See dimensions UU, VV, and AA.
 ** On 64", 74" and 86" stroke units, multi-cylinder engines are mounted behind the Samson Post. See dimensions U, V, and AB.

NOTE: Do not use the above dimensions for foundation. Request a foundation plan.
 The above units are designed to be installed on "two point" foundations.
 Popular API models shown, other models available on request.

450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com	<h2 style="margin: 0;">MARK II UNITORQUE PUMPING UNITS</h2>	
---	---	---

In 1976, when the United States celebrated its bicentennial, a Lufkin Mark II pumping unit was selected by the Smithsonian Museum of Natural History for display in its "Our Changing Land" exhibit.



API Geometry Dimensions (inches)

Unit Size	A	C	I	P	H	G	R1, R2, R3, R4	PHASE ANGLE	S.U.*	T.F. @ (90° - ∞) /Stroke Length
M-1824D-427-216	384.00	306.00	228.00	234.38	346.00	132.00	80.06, 71.06, 62.06	22.0	-7450	93.734/216
M-1280D-427-216	384.00	306.00	228.00	234.38	346.00	132.00	80.06, 71.06, 62.06	22.0	-7450	93.734/216
M-912D-305-216	384.00	306.00	228.00	234.38	346.00	132.00	80.06, 71.06, 62.06	22.0	-7450	93.734/216
M-912DS-365-216	384.00	306.00	228.00	234.38	346.00	132.00	80.06, 71.06, 62.06	22.0	-7450	93.734/216
M-1280D-427-192	384.00	306.00	228.00	228.06	346.00	132.00	71.69, 62.69, 53.69	19.5	-7160	86.074/192
M-912DS-427-192	384.00	306.00	228.00	228.06	346.00	132.00	71.69, 62.69, 53.69	19.5	-7160	86.074/192
M-912D-305-192	384.00	306.00	228.00	228.06	346.00	132.00	71.69, 62.69, 53.69	19.5	-7160	86.074/192
M-640D-305-192	384.00	306.00	228.00	228.06	346.00	132.00	71.69, 62.69, 53.69	19.5	-7160	86.074/192
M-456D-305-192	384.00	306.00	228.00	228.06	346.00	132.00	71.69, 62.69, 53.69	19.5	-7160	86.074/192
M-912DS-427-168	334.00	270.00	202.56	193.50	295.13	112.13	63.56, 56.56, 49.56	19.0	-5385	75.207/168
M-912D-365-168	334.00	270.00	202.56	193.50	295.13	112.13	63.56, 56.56, 49.56	19.0	-5385	75.207/168
M-912D-305-168	334.00	270.00	202.56	193.50	295.13	112.13	63.56, 56.56, 49.56	19.0	-4860	75.207/168
M-640D-365-168	334.00	270.00	202.56	193.50	295.13	112.13	63.56, 56.56, 49.56	19.0	-5385	75.207/168
M-640D-305-168	334.00	270.00	202.56	193.50	295.13	112.13	63.56, 56.56, 49.56	19.0	-4860	75.207/168
M-456D-305-168	334.00	270.00	202.56	193.50	295.13	112.13	63.56, 56.56, 49.56	19.0	-4860	75.207/168
M-912D-365-144	312.00	258.00	186.00	182.38	271.13	112.13	53.75, 47.75, 41.75	23.0	-4680	63.023/144
M-640D-365-144	312.00	258.00	186.00	182.38	271.13	112.13	53.75, 47.75, 41.75	23.0	-4680	63.023/144
M-456D-365-144	312.00	258.00	186.00	182.38	271.13	112.13	53.75, 47.75, 41.75	23.0	-4680	63.023/144
M-912D-305-144	312.00	258.00	186.00	182.38	271.13	112.13	53.75, 47.75, 41.75	23.0	-4300	63.023/144
M-640D-305-144	312.00	258.00	186.00	182.38	271.13	112.13	53.75, 47.75, 41.75	23.0	-4300	63.023/144
M-456D-305-144	312.00	258.00	186.00	182.38	271.13	112.13	53.75, 47.75, 41.75	23.0	-4300	63.023/144
M-640D-256-144	312.00	258.00	186.00	182.38	271.13	112.13	53.75, 47.75, 41.75	23.0	-4010	63.023/144
M-456D-256-144	312.00	258.00	186.00	182.38	271.13	112.13	53.75, 47.75, 41.75	23.0	-4010	63.023/144
M-320D-256-144	312.00	258.00	186.00	182.38	276.88	117.88	53.75, 47.75, 41.75	23.0	-4010	63.023/144
M-456D-365-120	312.00	258.00	186.00	173.75	271.13	112.13	45.13, 39.13, 33.13	24.0	-4510	53.595/120
M-640D-305-120	312.00	258.00	186.00	173.75	271.13	112.13	45.13, 39.13, 33.13	24.0	-4130	53.621/120
M-456D-305-120	312.00	258.00	186.00	173.75	271.13	112.13	45.13, 39.13, 33.13	24.0	-4130	53.621/120
M-320D-305-120	312.00	258.00	186.00	173.75	271.13	118.13	45.13, 39.13, 33.13	24.0	-4130	53.621/120
M-456D-256-120	312.00	258.00	186.00	173.75	271.13	112.13	45.13, 39.13, 33.13	24.0	-3840	53.621/120
M-320D-256-120	312.00	258.00	186.00	173.75	276.88	117.88	45.13, 39.13, 33.13	24.0	-3620	53.621/120
M-228D-256-120	312.00	258.00	186.00	173.75	276.88	117.88	45.13, 39.13, 33.13	24.0	-3435	53.621/120
M-320D-213-120	312.00	258.00	186.00	173.75	276.88	117.88	45.13, 39.13, 33.13	24.0	-3560	53.621/120
M-228D-213-120	312.00	258.00	186.00	173.75	276.88	117.88	45.13, 39.13, 33.13	24.0	-3235	53.621/120
M-320D-305-100	312.00	258.00	186.00	173.75	277.13	118.13	37.63, 31.63, 25.63	24.0	-3700	45.497/100
M-320D-256-100	312.00	258.00	186.00	173.75	276.88	117.88	37.63, 31.63, 25.63	24.0	-3470	45.497/100
M-228D-256-100	312.00	258.00	186.00	173.75	276.88	117.88	37.63, 31.63, 25.63	24.0	-3285	45.497/100
M-228D-173-100	312.00	258.00	186.00	173.75	276.88	117.88	37.63, 31.63, 25.63	24.0	-3175	45.497/100
M-228D-246-86	222.00	186.00	124.00	135.75	212.50	97.13	31.5, 26.5, 21.5	24.5	-2140	38.328/86
M-228D-213-86	222.00	186.00	124.00	135.75	209.50	94.13	31.5, 26.5, 21.5	24.5	-2040	38.328/86
M-160D-213-86	222.00	186.00	124.00	135.75	209.50	94.13	31.5, 26.5, 21.5	24.5	-2040	38.328/86
M-160D-173-86	222.00	186.00	124.00	135.75	209.50	94.13	31.5, 26.5, 21.5	24.5	-1930	38.328/86
M-114D-143-86	189.00	162.00	111.00	107.94	163.63	68.13	27.94, 23.44, 18.94	27.0	-1535	36.974/86
M-228D-200-74	222.00	186.00	124.00	130.50	209.50	94.13	27.25, 22.25, 17.25	24.5	-1960	33.523/74
M-160D-200-74	222.00	186.00	124.00	130.50	209.50	94.13	27.25, 22.25, 17.25	24.5	-1890	33.523/74
M-228D-173-74	222.00	186.00	124.00	130.50	209.50	94.13	27.25, 22.25, 17.25	24.5	-1860	33.523/74
M-160D-173-74	222.00	186.00	124.00	130.50	209.50	94.13	27.25, 22.25, 17.25	24.5	-1860	33.523/74
M-114D-173-74	222.00	186.00	124.00	130.50	209.50	94.13	27.25, 22.25, 17.25	24.5	-1820	33.523/74
M-114D-143-74	189.00	162.00	111.00	107.94	163.63	68.13	27.94, 23.44, 18.94	27.0	-1440	32.562/74
M-114D-173-64	189.00	162.00	111.00	107.94	163.63	68.13	24.19, 19.69, 15.19	28.0	-1420	28.549/64
M-114D-143-64	189.00	162.00	111.00	107.94	163.63	68.13	24.19, 19.69, 15.19	28.0	-1420	28.549/64

* Structural Unbalance in pounds.

	<h2 style="margin: 0;">MARK II UNITORQUE PUMPING UNITS</h2>	450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com
---	---	---

Counterbalance Data (shown in lbs., effective at polished rod with weights at maximum position, including structural unbalance.)

Unit Size	M-9129-205-216 M-1209-427-216	M-9129-205-216 M-18249-427-216	M-9129-427-192 M-1290-427-192	M-9129-305-192 M-4669-305-192	M-9129-427-168 M-4669-305-168	M-9129-305-168 M-5409-305-168	M-9129-305-168 M-4669-305-168	M-9129-305-144 M-4669-305-144	M-9129-305-144 M-4669-305-144	M-6409-265-144 M-4569-265-144
Maximum Stroke	216"	216"	192"	192"	168"	168"	168"	144"	144"	144"
Structural Unbalance	- 7,450 lbs.	- 7,450 lbs.	- 7,160 lbs.	- 7,160 lbs.	- 6,820 lbs.	- 5,305 lbs.	- 4,960 lbs.	- 4,500 lbs.	- 4,300 lbs.	- 4,010 lbs.
Cranks	216130 MROA	216130 MROA	192130 MROA	192130 MROA	168130 MROA	168130 MROA	168130 MROA	144130 MROA	144130 MROA	144130 MROA
C'Bal., Cranks Only	1,875	1,875	3,365	3,365	- 975	460	985	3,090	3,470	3,760
4 No. OORL Counterweights	22,150	22,150	25,445	25,445	18,620	20,065	-	-	-	-
4 No. OOSL Aux. Weights	28,130	28,130	31,955	-	24,415	25,850	-	-	-	-
8 No. OOSL Aux. Weights	34,110	-	38,470	-	30,180	31,635	-	-	-	-
4 No. 130RO Counterweights	21,605	21,605	24,850	24,850	-	-	-	-	-	-
4 No. 130D Aux. Weights	32,550	-	36,650	-	-	-	-	-	-	-
4 No. OORO Counterweights	17,990	17,990	20,920	20,920	14,605	16,040	16,565	21,690	22,065	22,355
4 No. OOS Aux. Weights	22,855	22,855	26,215	26,215	19,305	20,740	21,265	27,300	27,680	-
8 No. OOS Aux. Weights	27,720	27,720	31,510	-	24,005	25,440	25,965	32,910	-	-
4 No. ORO Counterweights	15,935	15,935	18,675	18,675	12,615	14,055	14,575	19,315	19,695	19,985
4 No. OS Aux. Weights	20,605	20,605	23,760	23,760	17,130	18,565	19,090	24,700	25,080	-
8 No. OS Aux. Weights	25,275	25,275	28,850	28,850	21,645	23,075	23,605	30,085	-	-
4 No. OARO Counterweights	13,595	13,595	16,130	16,130	10,510	11,945	12,470	16,795	17,180	17,470
4 No. OAS Aux. Weights	17,225	17,225	20,085	20,085	14,065	15,500	16,025	21,040	21,425	21,710
8 No. OAS Aux. Weights	20,855	20,855	24,040	24,040	17,620	19,055	19,580	25,285	25,670	-
4 No. 180 Counterweights	10,970	10,970	13,275	13,275	7,965	9,400	9,925	13,755	14,135	14,425
4 No. 15 Aux. Weights	13,770	13,770	16,340	16,340	10,710	12,145	12,670	17,035	17,415	17,705
8 No. 15 Aux. Weights	16,570	16,570	19,365	19,365	13,455	14,890	15,415	20,315	20,695	-
4 No. 290 Counterweights	9,430	9,430	11,590	11,590	6,460	7,895	8,420	11,960	12,345	12,635
4 No. 25 Aux. Weights	12,135	12,135	14,535	14,535	9,125	10,560	11,085	15,145	15,525	15,815
8 No. 25 Aux. Weights	14,840	14,840	17,480	17,480	11,790	13,225	13,750	18,325	18,705	18,995*
4 No. 390 Counterweights	7,910	7,910	9,940	9,940	5,015	6,450	6,975	10,240	10,620	10,910
4 No. 385 Aux. Weights	10,515	10,515	12,775	12,775	7,595	9,030	9,555	13,320	13,700	13,990
8 No. 385 Aux. Weights	13,120	13,120	15,605	15,605	10,175	11,610	12,135	16,400	16,780	17,070*
4 No. 5AR0 Counterweights	6,200	6,200	8,080	8,080	3,365	4,800	5,325	8,270	8,650	8,940
4 No. 5A Aux. Weights	7,950	7,950	9,970	9,970	5,110	6,555	7,080	10,365	10,745	11,035
8 No. 5A Aux. Weights	9,700	9,700	11,865	11,865	6,850	8,310	8,835	12,460	12,840	13,130*
4 No. 5OR0 Counterweights	5,050	5,050	6,820	6,820	2,220	3,655	4,180	6,895	7,275	7,565
4 No. 5OS Aux. Weights	6,620	6,620	8,530	8,530	3,796	5,230	5,755	8,780	9,160	9,450
8 No. 5OS Aux. Weights	8,190	8,190	10,240	10,240	5,370	6,805	7,330	10,665	11,045	11,335*
4 No. 6R0 Counterweights	4,285	4,285	5,985	5,985	1,445	2,880	3,405	5,970	6,350	6,640
4 No. 6 Aux. Weights	5,190	5,190	6,975	6,975	2,355	3,790	4,315	7,060	7,440	7,730
8 No. 6 Aux. Weights	6,095	6,095	7,965	7,965	3,265	4,700	5,225	8,150	8,530	8,820
4 No. 7R0 Counterweights	3,400	3,400	5,025	5,025	565	2,000	2,525	4,925	5,305	5,595
4 No. 7 Aux. Weights	4,085	4,085	5,770	5,770	1,255	2,690	3,215	5,745	6,125	6,415
8 No. 7 Aux. Weights	4,770	4,770	6,515	6,515	1,945	3,380	3,905	6,565	6,945	7,235

Unit Size	M-3200-305-190	M-3200-265-190	M-2200-265-190	M-2200-173-190	M-2200-246-86	M-2200-213-86 M-1600-213-86	M-1600-173-86	M-1140-143-86
Maximum Stroke	100"	100"	100"	100"	96"	96"	96"	96"
Structural Unbalance	- 3,700 lbs.	- 3,470 lbs.	- 3,285 lbs.	- 3,175 lbs.	- 2,140 lbs.	- 2,040 lbs.	- 1,920 lbs.	- 1,535 lbs.
Cranks	100130 MRA	100130 MRA	100130 MRA	100130 MRA	8606 MRA	8606 MRA	8606 MRA	8602 MRA
C'Bal., Cranks Only	4,660	4,890	5,075	5,185	2,715	2,815	2,925	1,525
4 No. 180 Counterweights	19,440	19,670	19,850	19,960	15,600	15,700	15,810	9,525
4 No. 15 Aux. Weights	23,980	24,210	24,395	-	19,565	19,665	19,775	11,980
4 No. 2R0 Counterweights	16,955	17,185	17,370	17,480	13,480	13,580	13,690	8,270
4 No. 2S Aux. Weights	21,360	21,590	21,775	-	17,335	17,435	17,545	10,690
4 No. 3OR0 Counterweights	14,560	14,790	14,975	15,085	11,495	11,595	11,705	7,200
4 No. 3BS Aux. Weights	18,830	19,060	19,245	19,355	15,280	15,380	15,490	9,640
4 No. 5AR0 Counterweights	11,840	12,070	12,255	12,365	9,190	9,290	9,400	5,880
4 No. 5A Aux. Weights	14,740	14,970	15,155	15,265	11,890	11,990	12,100	7,650
4 No. 5OR0 Counterweights	9,935	10,165	10,350	10,460	7,495	7,595	7,705	4,770
4 No. 5OS Aux. Weights	12,545	12,775	12,960	13,070	9,860	9,955	10,070	6,375
4 No. 6R0 Counterweights	8,655	8,885	9,070	9,180	6,435	6,535	6,645	4,080
4 No. 6 Aux. Weights	10,160	10,390	10,575	10,685	7,840	7,940	8,050	5,045
8 No. 6 Aux. Weights	11,665	11,895	12,080	12,190	9,245	-	-	6,010
4 No. 7R0 Counterweights	7,200	7,430	7,615	7,725	5,095	5,195	5,305	3,180
4 No. 7 Aux. Weights	8,340	8,570	8,755	8,865	6,160	6,260	6,370	3,925
8 No. 7 Aux. Weights	9,480	9,710	9,895	10,005	7,225	-	-	4,680

*Use only 1 auxiliary weight per master weight on the M3200.

450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com	<h2 style="margin: 0;">MARK II UNITORQUE PUMPING UNITS</h2>	
---	---	---

Counterbalance Data (shown in lbs., effective at polished rod with weights at maximum position, including structural unbalance.)

Well Size	M-456D-365-120	M-440D-306-120 M-456B-306-120	M-456D-256-120	M-320D-256-120	M-220D-256-120	M-320D-213-120	M-220D-213-120
Maximum Stroke	120"	120"	120"	120"	120"	120"	120"
Structural Unbalance	-4,510 lbs.	-4,130 lbs.	-3,840 lbs.	-3,620 lbs.	-3,425 lbs.	-3,560 lbs.	-3,235 lbs.
Cranks	120"Ø MRA	120"Ø MRA	120"Ø MRA	120"Ø MRA	120"Ø MRA	120"Ø MRA	120"Ø MRA
C'Bal., Cranks Only	1,990	2,370	2,660	2,890	3,070	2,940	3,270
4 No. ORO Counterweights	21,065	21,440	21,735	21,955	22,140	-	-
4 No. OS Aux. Weights	27,405	27,775	-	-	-	-	-
8 No. OS Aux. Weights	33,740	-	-	-	-	-	-
4 No. OARO Counterweights	18,105	18,485	18,775	18,995	19,180	19,055	19,380
4 No. OAS Aux. Weights	23,095	23,475	23,765	23,985	24,170	-	-
8 No. OAS Aux. Weights	28,085	28,465*	-	-	-	-	-
4 No. 1RO Counterweights	14,530	14,910	15,200	15,420	15,605	15,480	15,805
4 No. 1S Aux. Weights	18,385	18,765	19,055	19,275	19,460	19,335	19,660
8 No. 1S Aux. Weights	22,240	22,620*	22,910	-	-	-	-
4 No. 2RO Counterweights	12,425	12,805	13,095	13,315	13,500	13,375	13,700
4 No. 2S Aux. Weights	16,165	16,545	16,855	17,055	17,240	17,115	17,440
8 No. 2S Aux. Weights	19,905	20,285*	20,575	-	-	-	-
4 No. 3RO Counterweights	10,395	10,775	11,065	11,285	11,470	11,345	11,670
4 No. 3S Aux. Weights	14,015	14,395	14,685	14,905	15,090	14,965	15,290
8 No. 3S Aux. Weights	17,635	18,015*	18,305	-	-	-	-
4 No. 5ARO Counterweights	8,085	8,465	8,755	8,975	9,160	9,035	9,360
4 No. 5A Aux. Weights	10,545	10,925	11,215	11,435	11,620	11,495	11,820
8 No. 5A Aux. Weights	13,005	13,385*	13,675	-	-	-	-
4 No. 5ORO Counterweights	6,470	6,845	7,140	7,360	7,545	7,420	7,745
4 No. 5CS Aux. Weights	8,685	9,060	9,355	9,575	9,755	9,630	9,960
8 No. 5CS Aux. Weights	10,900	11,275*	11,570	-	-	-	-
4 No. 6RO Counterweights	5,395	5,765	6,055	6,275	6,460	6,335	6,660
4 No. 6 Aux. Weights	6,665	7,040	7,330	7,550	7,735	7,610	7,935
8 No. 6 Aux. Weights	7,945	8,315	8,605	8,825	9,010	8,885	9,210
4 No. 7RO Counterweights	4,150	4,530	4,820	5,040	5,225	5,100	5,425
4 No. 7 Aux. Weights	5,115	5,495	5,785	6,005	6,190	6,065	6,390
8 No. 7 Aux. Weights	6,080	6,460	6,750	6,970	7,155	7,030	7,355

* Use only 1 auxiliary weight per master weight on the M320D.

Well Size	M-220D-200-74	M-160D-200-74	M-220B-173-74 M-160B-173-74	M-114D-173-74	M-114D-143-74	M-114B-173-54 M-114B-143-54
Maximum Stroke	74"	74"	74"	74"	74"	54"
Structural Unbalance	-1,960 lbs.	-1,890 lbs.	-1,860 lbs.	-1,820 lbs.	-1,440 lbs.	-1,420 lbs.
Cranks	74Ø MRA	74Ø MRA	74Ø MRA	74Ø MRA	74Ø MRA	64Ø MRA
C'Bal., Cranks Only	3,685	3,755	3,785	3,825	2,230	2,845
4 No. 2RO Counterweights	15,990	16,060	16,090	16,130	9,890	11,580
4 No. 2S Aux. Weights	-	-	-	-	12,630	14,710
4 No. 3ORO Counterweights	13,720	13,790	13,820	13,860	8,670	10,190
4 No. 3BS Aux. Weights	18,045	18,115	18,145	18,185	11,445	13,355
4 No. 5ARO Counterweights	11,085	11,155	11,185	11,225	7,170	8,485
4 No. 5A Aux. Weights	14,080	14,150	14,180	14,220	9,180	10,775
4 No. 5ORO Counterweights	9,145	9,215	9,245	9,285	5,910	7,045
4 No. 5CS Aux. Weights	11,845	11,915	11,945	11,985	7,730	9,125
4 No. 6RO Counterweights	7,935	8,005	8,035	8,075	5,130	6,150
4 No. 6 Aux. Weights	9,540	9,610	9,640	9,680	6,225	7,400
8 No. 6 Aux. Weights	11,145	-	-	11,285	7,320	8,650
4 No. 7RO Counterweights	6,400	6,470	6,500	6,540	4,105	4,985
4 No. 7 Aux. Weights	7,625	7,695	7,725	7,765	4,950	5,950
8 No. 7 Aux. Weights	8,850	-	-	8,900	5,795	6,915

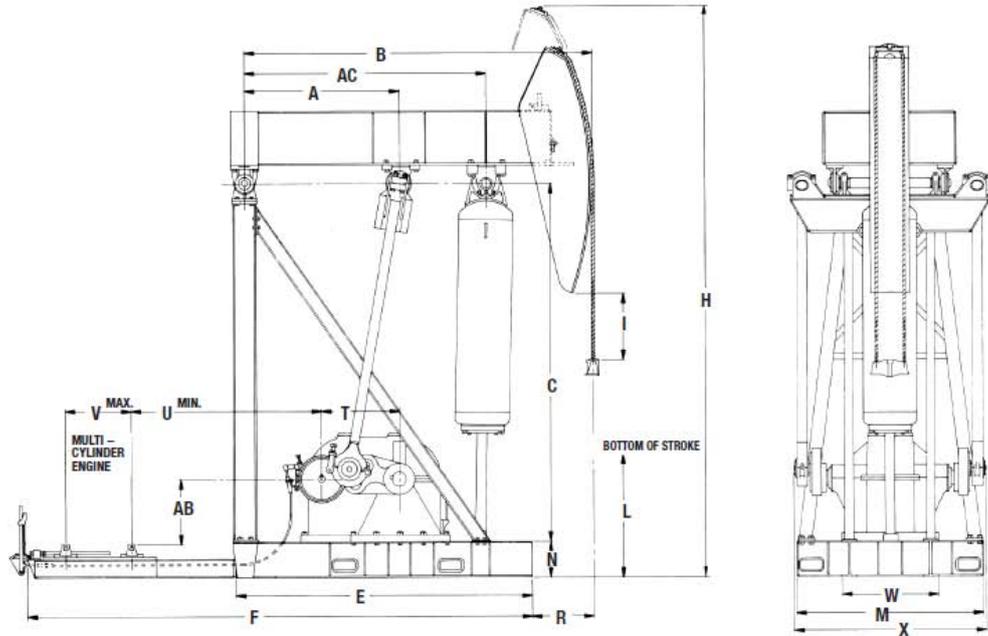
EXAMPLE: A M-456D-365-120 with 4 No. ORO Counterweights and 4 No. OS Auxiliary Weights would have a maximum counterbalance effect of 27,395 lbs. in the 120" stroke. Structural Unbalance with a negative (-) sign indicates a walking beam assembly that is heavy on the well end.

 <small>INFIELD PRODUCTS GROUP</small>	<h2 style="margin: 0;">MARK II UNITORQUE PUMPING UNITS</h2>	450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com
--	---	---

Structural Data

Unit Size	Polished Rod Capacity (lbs.)	Stroke Lengths (inches)	Walking Beam	Crank Pin Bearing	Samson Post Bearing	Cross Yoke Bearing	Wireline Hanger (inches)	Cranks
M-1824D-427-216	42,700	216, 192, 167	W24 x 131	1SE	P19	C232	1.38 x 16 CTRS.	216130 MROA
M-1280D-427-216	42,700	216, 192, 167	W24 x 131	1SE	P19	C232	1.38 x 16 CTRS.	216130 MROA
M-912D-365-216	36,500	216, 192, 167	W24 x 131	1SE	P19	C232	1.38 x 16 CTRS.	216130 MROA
M-912D-365-216	36,500	216, 192, 167	W24 x 131	1SE	P19	C232	1.38 x 16 CTRS.	216130 MROA
M-912D-305-216	30,500	216, 192, 167	W24 x 131	1SE	P19	C232	1.38 x 16 CTRS.	216130 MROA
M-1280D-427-192	42,700	192, 168, 144	W24 x 131	1SE	P19	C232	1.38 x 16 CTRS.	192130 MROA
M-912D-427-192	42,700	192, 168, 144	W24 x 131	1SE	P19	C232	1.38 x 16 CTRS.	192130 MROA
M-912D-305-192	30,500	192, 168, 144	W24 x 131	1SE	P19	C232	1.38 x 16 CTRS.	192130 MROA
M-640D-305-192	30,500	192, 168, 144	W24 x 131	1SE	P19	C232	1.38 x 16 CTRS.	192130 MROA
M-456D-305-192	30,500	192, 168, 144	W24 x 131	1SE	P19	C232	1.38 x 16 CTRS.	192130 MROA
M-912D-427-168	42,700	168, 150, 131	W24 x 131	1SE	P19	C232	1.38 x 16 CTRS.	168108 MROA
M-912D-365-168	36,500	168, 149, 130	W24 x 104	1SE	P18	C22 C	1.38 x 12 CTRS.	168108 MROA
M-640D-365-168	36,500	168, 149, 130	W24 x 104	1SE	P18	C22 C	1.38 x 12 CTRS.	168108 MROA
M-912D-305-168	30,500	168, 149, 130	W24 x 84	1SE	P18	C22 C	1.25 x 12 CTRS.	168108 MROA
M-640D-305-168	30,500	168, 149, 130	W24 x 84	1SE	P18	C22 C	1.25 x 12 CTRS.	168108 MROA
M-456D-305-168	30,500	168, 149, 130	W24 x 84	1SE	P18	C22 C	1.25 x 12 CTRS.	168108 MROA
M-912D-365-144	36,500	144, 128, 112	W24 x 84	1SE	P18	C232	1.38 x 12 CTRS.	144108 MROA
M-640D-365-144	36,500	144, 128, 112	W24 x 84	1SE	P18	C232	1.38 x 12 CTRS.	144108 MROA
M-456D-365-144	36,500	144, 128, 112	W24 x 84	1SE	P18	C232	1.38 x 12 CTRS.	144108 MROA
M-912D-305-144	30,500	144, 128, 112	W24 x 84	2SE	P18	C22 C	1.25 x 12 CTRS.	144108 MROA
M-640D-305-144	30,500	144, 128, 112	W24 x 84	2SE	P18	C22 C	1.25 x 12 CTRS.	144108 MROA
M-456D-305-144	30,500	144, 128, 112	W24 x 84	2SE	P18	C22 C	1.25 x 12 CTRS.	144108 MROA
M-640D-256-144	25,600	144, 128, 112	W21 x 68	2SE	P18	C22 C	1.13 x 9 CTRS.	144108 MROA
M-456D-256-144	25,600	144, 128, 112	W21 x 68	2SE	P18	C22 C	1.13 x 9 CTRS.	144108 MROA
M-320D-256-144	25,600	144, 128, 112	W21 x 68	2SE	P18	C22 C	1.13 x 9 CTRS.	144108 MROA
M-456D-365-120	36,500	120, 104, 88	W24 x 84	1SE	P18	C232	1.38 x 12 CTRS.	120108 MRA
M-640D-305-120	30,500	120, 104, 88	W24 x 84	2SE	P18	C22 C	1.25 x 12 CTRS.	120108 MRA
M-456D-305-120	30,500	120, 104, 88	W24 x 84	2SE	P18	C22 C	1.25 x 12 CTRS.	120108 MRA
M-320D-305-120	30,500	120, 104, 88	W24 x 84	2SE	P18	C22 C	1.25 x 12 CTRS.	120108 MRA
M-456D-256-120	25,600	120, 104, 88	W21 x 68	2SE	P18	C22 C	1.13 x 9 CTRS.	120108 MRA
M-320D-256-120	25,600	120, 104, 88	W21 x 68	2SE	P18	C22 C	1.13 x 9 CTRS.	120108 MRA
M-228D-256-120	25,600	120, 104, 88	W21 x 68	2SE	P18	C20	1.13 x 9 CTRS.	120108 MRA
M-320D-213-120	21,300	120, 104, 88	W21 x 62	2SE	P18	C22 C	1.13 x 9 CTRS.	120108 MRA
M-228D-213-120	21,300	120, 104, 88	W21 x 62	2SE	P16	C19	1.13 x 9 CTRS.	120108 MRA
M-320D-305-100	30,500	100, 84, 68	W24 x 84	2SE	P18	C22 C	1.25 x 12 CTRS.	100108 MRA
M-320D-256-100	25,600	100, 84, 68	W21 x 68	2SE	P18	C22 C	1.25 x 9 CTRS.	100108 MRA
M-228D-256-100	25,600	100, 84, 68	W21 x 68	2SE	P18	C20	1.25 x 9 CTRS.	100108 MRA
M-228D-173-100	17,300	100, 84, 68	W16 x 57	2SE	P16	C19	1.25 x 9 CTRS.	100108 MRA
M-228D-246-86	24,600	86, 72.4, 58.6	W16 x 57	2SE	P16	C20N	1.25 x 9 CTRS.	8686 MRA
M-228D-213-86	21,300	86, 72.4, 58.6	W16 x 45	2SE	P16	C20N	1.25 x 9 CTRS.	8686 MRA
M-160D-213-86	21,300	86, 72.4, 58.6	W16 x 45	2SE	P16	C20N	1.25 x 9 CTRS.	8686 MRA
M-160D-173-86	17,300	86, 72.4, 58.6	W16 x 45	2SE	P13	C18N	1.25 x 9 CTRS.	8686 MRA
M-114D-143-86	14,300	86, 74, 62	W14 x 34	4SF	P13	C18N	1.00 x 9 CTRS.	8686 MRA
M-228D-200-74	20,000	74, 60.4, 46.8	W16 x 45	2SE	P16	C20N	1.00 x 9 CTRS.	7486 MRA
M-160D-200-74	20,000	74, 60.4, 46.8	W16 x 45	2SE	P16	C20N	1.00 x 9 CTRS.	7486 MRA
M-228D-173-74	17,300	74, 60.4, 46.8	W16 x 45	2SE	P13	C18N	1.00 x 9 CTRS.	7486 MRA
M-160D-173-74	17,300	74, 60.4, 46.8	W16 x 45	2SE	P13	C18N	1.00 x 9 CTRS.	7486 MRA
M-114D-173-74	17,300	74, 60.4, 46.8	W16 x 45	3SF	P13	C18N	1.00 x 9 CTRS.	7486 MRA
M-114D-143-74	14,300	74, 60, 46	W14 x 34	4SF	P13	C18N	1.00 x 9 CTRS.	7462 MRA
M-114D-173-64	17,300	64, 52.40	W14 x 34	3SF	P13	C18N	1.00 x 9 CTRS.	6462 MRA
M-114D-143-64	14,300	64, 52, 40	W14 x 34	4SF	P13	C18N	1.00 x 9 CTRS.	6462 MRA

450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com	<h2 style="margin: 0;">AIR BALANCED PUMPING UNITS</h2>	
---	--	---



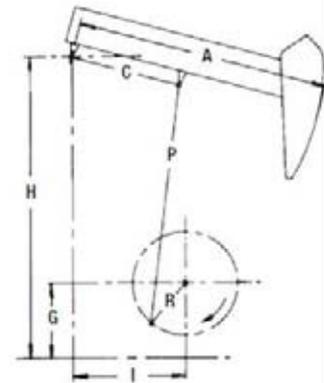
Dimensional Data (inches)

Unit Size	A	B	C	E	F	H	I	L	M	N	R	T	U	V	W	X	AB	AC
A-2560D-470-240	134.5	336	303.5	*	379.25	558.5	19.38	54.00	106.00	21.00	51.69	70.00	100.38	46.50	66.25	130.63	39.13	233.5
A-1824D-470-240	134.5	336	303.5	*	379.25	558.5	19.38	54.00	96.00	21.00	51.69	58.88	111.50	46.50	50.25	115.63	33.13	233.5
A-1824D-427-216	121.5	308	282.0	264.88	354.88	516.0	20.63	56.13	95.50	21.00	48.00	58.88	96.00	46.50	50.25	115.63	33.13	171.5
A-1824D-427-192	121.5	276	252.0	232.88	322.88	464.0	19.38	50.13	95.50	21.00	48.00	58.88	96.00	46.50	50.25	115.63	33.13	171.5
A-1280D-470-240	134.5	336	303.5	*	379.25	558.5	19.38	54.00	96.00	21.00	51.69	52.50	117.88	46.50	50.25	109.63	33.13	233.5
A-1280D-427-216	121.5	308	282.0	264.88	354.88	516.0	20.63	56.13	95.50	21.00	48.00	52.50	102.38	46.50	50.25	109.63	33.13	171.5
A-1280D-427-192	121.5	276	252.0	232.88	322.88	464.0	19.38	50.13	95.50	21.00	48.00	52.50	102.38	46.50	50.25	109.63	33.13	171.5
A-1280D-305-168	88.0	231	244.0	178.50	264.50	426.0	17.63	65.25	95.50	16.13	59.00	52.50	71.75	40.50	50.25	107.13	36.38	131.5
A-912D-470-240	134.5	336	303.5	*	379.25	558.5	19.38	54.00	96.00	21.00	51.69	48.50	121.88	46.50	50.00	102.63	33.13	233.5
A-912D-427-216	121.5	308	282.0	264.88	354.88	516.0	20.63	56.00	95.50	21.00	48.00	48.50	109.38	46.50	50.00	102.63	27.13	171.5
A-912D-427-192	121.5	276	252.0	232.88	322.88	464.0	19.38	50.00	95.50	21.00	48.00	48.50	109.38	46.50	50.00	102.63	27.13	171.5
A-912D-305-168	88.0	231	244.0	178.50	264.50	426.0	17.63	65.25	95.50	16.13	59.00	48.50	75.75	40.50	50.00	100.13	30.38	131.5
A-912D-427-144	88.0	200	214.0	147.50	233.50	375.5	19.38	56.00	95.50	16.13	59.00	48.50	75.75	40.50	50.00	100.13	30.38	131.5
A-640D-305-168	88.0	231	244.0	178.50	264.50	426.0	17.63	65.25	95.50	16.13	59.00	41.50	83.75	40.50	46.75	100.13	28.38	131.5
A-640D-427-144	88.0	200	214.0	147.50	233.50	375.5	19.38	56.00	95.50	16.13	59.00	41.50	83.75	40.50	46.75	100.13	28.38	131.5
A-640D-305-144	77.0	208	214.0	155.25	241.25	372.0	21.13	54.88	91.00	16.13	57.00	41.50	71.00	40.50	46.75	100.13	28.38	118.0
A-640D-365-120	77.0	175	187.0	131.75	217.75	324.0	22.50	50.00	91.00	16.13	47.50	41.50	71.00	40.50	46.75	100.13	28.38	118.0
A-456D-305-144	77.0	208	214.0	155.25	241.25	372.0	21.13	54.88	91.00	16.13	57.00	38.38	74.13	40.50	46.75	100.13	28.38	118.0
A-456D-365-120	77.0	175	187.0	131.75	217.75	324.0	22.50	50.00	91.00	16.13	47.50	38.38	74.13	40.50	46.75	100.13	28.38	118.0
A-456D-256-120	69.0	184	187.0	143.75	229.75	324.0	17.25	56.13	85.50	16.13	53.00	38.38	74.13	40.50	46.75	100.13	28.38	107.0
A-320D-256-120	70.0	184	187.0	135.25	227.25	324.0	17.25	56.00	85.50	16.13	53.00	34.00	71.25	40.50	43.25	87.38	30.13	107.0
A-320D-305-100	70.0	155	160.0	120.25	212.25	280.0	25.50	40.38	85.50	16.13	39.00	34.00	71.25	40.50	43.25	87.38	30.13	107.0
A-228D-173-100	56.0	151	149.0	99.25	177.00	267.0	15.00	40.50	73.50	16.13	56.00	30.00	47.00	40.50	37.25	80.38	29.13	87.5
A-228D-246-86	56.0	131	149.0	99.25	177.00	255.0	18.13	50.75	73.50	16.13	36.00	30.00	47.00	40.50	37.25	80.38	29.13	87.5
A-160D-200-74	50.0	120	141.0	95.00	174.75	231.0	18.88	49.50	73.50	9.75	35.50	26.00	53.75	48.00	32.00	69.88	15.88	77.5
A-114D-173-64	48.0	115	132.0	89.50	173.75	212.0	20.38	50.38	63.75	9.75	36.00	24.00	62.00	46.00	25.25	66.88	11.88	72.5

* Portable base is standard. One piece and portable bases available on all units.
 NOTE: Do not use above dimensions for foundation. Request foundation plan.

 <small>NO. FIELD PRODUCTS GROUP</small>	<h2 style="margin: 0;">AIR BALANCED PUMPING UNITS</h2>	450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com
--	--	---

In 1971, a Lufkin Air-Balanced pumping unit was chosen to dewater the test chamber for the Atomic Energy Commission's nuclear underground test on Anchitka Island, Alaska.



API Geometry Dimensions (inches)

Unit Size	A	C	I	P	H	G	R1, R2, R3	M	S
A-2560D-470-240	336	134.5	130.0	261.5	303.5	42	47, 39.44	114.80	150.00
A-1824D-470-240	336	134.5	130.0	267.5	303.5	36	47, 39.44	114.80	150.00
A-1280D-470-240	336	134.5	130.0	267.5	303.5	36	47, 39.44	114.80	150.00
A-912D-470-240	336	134.5	130.0	267.5	303.5	36	47, 39.44	114.80	150.00
A-1824D-427-216	308	121.5	114.5	246.0	282.0	36	41.75, 36.63, 32	92.00	140.00
A-1280D-427-216	308	121.5	114.5	246.0	282.0	36	41.75, 36.63, 32	92.00	140.00
A-912D-427-216	308	121.5	117.5	252.0	282.0	30	41.75, 36.63, 32	92.00	140.00
A-1824D-427-192	276	121.5	114.5	216.0	252.0	36	41.75, 36.63, 32	102.80	112.00
A-1280D-427-192	276	121.5	114.5	216.0	252.0	36	41.75, 36.63, 32	102.80	112.00
A-912D-427-192	276	121.5	117.5	222.0	252.0	30	41.75, 36.63, 32	102.80	112.00
A-1280D-305-168	231	88.0	84.0	208.0	244.0	36	31.25, 26.19, 22	75.54	112.81
A-912D-305-168	231	88.0	84.0	214.0	244.0	30	31.25, 26.19, 22	75.54	112.81
A-640D-305-168	231	88.0	85.0	216.0	244.0	28	31.25, 26.19, 22	75.54	112.81
A-912D-427-144	200	88.0	84.0	184.0	214.0	30	31.25, 26.19, 22	87.30	90.00
A-640D-427-144	200	88.0	85.0	186.0	214.0	28	31.25, 26.19, 22	87.30	90.00
A-640D-305-144	208	77.0	74.5	186.0	214.0	28	26.19, 22, 18.94	64.16	95.16
A-456D-305-144	208	77.0	74.5	186.0	214.0	28	26.19, 22, 18.94	64.16	95.16
A-640D-365-120	175	77.0	74.5	159.0	187.0	28	26.19, 22, 18.94	76.20	88.00
A-456D-365-120	175	77.0	74.5	159.0	187.0	28	26.19, 22, 18.94	76.20	88.00
A-456D-256-120	184	69.0	66.0	159.0	187.0	28	22, 18.94, 16.31	55.25	77.00
A-320D-256-120	184	70.0	68.0	159.0	187.0	28	22.38, 19.38, 16.75	55.25	77.00
A-320D-305-100	155	70.0	68.0	132.0	160.0	28	22.38, 19.38, 16.75	65.60	78.00
A-228D-173-100	151	56.0	54.0	122.0	149.0	27	18.25, 15.75, 13.75	45.49	85.75
A-228D-246-86	131	56.0	54.0	122.0	149.0	27	18.25, 15.75, 13.75	52.50	73.00
A-160D-200-74	120	50.0	48.0	114.0	141.0	27	15.25, 13.25, 11.25	50.70	63.00
A-114D-173-64	115	48.0	46.5	114.0	132.0	18	13.31, 11.25	31.70	63.00

450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com	<h2 style="margin: 0;">AIR BALANCED PUMPING UNITS</h2>	
---	--	---

Structural Data

Unit Size	Polish Rod Capacity (lbs.)	Stroke Lengths (Inches)	Piston Dia. (Inches)	Walking Beam	Wireline Hanger (Inches)	Floating Hub Sheave* Sizes, P.D. (Inches)	Crank Pin Bearing	Equalizer Bearing	Samson Post Bearing	Air Tank Bearing
A-2560D-470-240	47,000	240, 200	14.5	W36 x 247	1.38 x 16 CTRS.	68 (12D)	OT	E32	P19	334
A-1824D-470-240	47,000	240, 200	14.5	W36 x 247	1.38 x 16 CTRS.	40, 46, 51, 55, 68 (11D)	OT	E26	P19	334
A-1824D-427-216	42,700	216, 190, 162	14.5	W33 x 201	1.38 x 16 CTRS.	40, 46, 51, 55, 68 (11D)	OT	E26	P19	334
A-1824D-427-192	42,700	192, 168, 144	14.5	W33 x 201	1.38 x 16 CTRS.	40, 46, 51, 55, 68 (11D)	OT	E26	P19	334
A-1280D-470-240	47,000	240, 200	14.5	W36 x 247	1.38 x 16 CTRS.	40, 46, 51, 55, 68 (10D)	OT	E26	P19	334
A-1280D-427-216	42,700	216, 190, 162	14.5	W33 x 201	1.38 x 16 CTRS.	40, 46, 51, 55, 68 (10D)	OT	E26	P19	334
A-1280D-427-192	42,700	192, 168, 144	14.5	W33 x 201	1.38 x 16 CTRS.	40, 46, 51, 55, 68 (10D)	OT	E26	P19	334
A-1280D-305-168	30,500	168, 141, 118	13.0	W27 x 161	1.38 x 16 CTRS.	40, 46, 51, 55, 68 (10D)	OT	E26	P19	232
A-912D-470-240	47,000	240, 200	14.5	W36 x 247	1.38 x 16 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (8D)	OT	E26	P19	334
A-912D-427-216	42,700	216, 190, 162	14.5	W33 x 201	1.38 x 16 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (8D)	OT	E26	P19	334
A-912D-427-192	42,700	192, 168, 144	14.5	W33 x 201	1.38 x 16 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (8D)	OT	E26	P19	334
A-912D-305-168	30,500	168, 141, 118	13.0	W27 x 146	1.38 x 16 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (7D)	OT	E26	P19	232
A-912D-427-144	42,700	144, 120, 100	13.0	W27 x 161	1.38 x 16 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (7D)	OT	E26	P19	232
A-640D-305-168	30,500	168, 141, 118	13.0	W27 x 146	1.38 x 16 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (6D)	OT	E26	P19	232
A-640D-427-144	42,700	144, 120, 100	13.0	W27 x 161	1.38 x 16 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (6D)	OT	E26	P19	232
A-640D-305-144	30,500	144, 120, 100	12.0	W27 x 146	1.25 x 12 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (6D)	OT	E26	P18	326
A-640D-365-120	36,500	120, 100, 86	12.0	W27 x 146	1.25 x 12 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (6D)	OT	E26	P18	326
A-456D-305-144	30,500	144, 120, 100	12.0	W27 x 146	1.25 x 12 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (6D or 8C)	OT	E26	P18	326
A-456D-365-120	36,500	120, 100, 86	12.0	W27 x 146	1.25 x 12 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (6D or 8C)	OT	E26	P18	326
A-456D-256-120	25,600	120, 104, 90	11.0	W24 x 104	1.25 x 12 CTRS.	28, 34, 40, 46, 51 (6D or 8C)	OT	E26	P18	324
A-320D-256-120	25,600	120, 104, 90	11.0	W24 x 104	1.25 x 12 CTRS.	25, 30, 36, 42, 47, 25 (6Cor5D)	2T	E22	P18	324
A-320D-305-100	30,500	100, 86, 74	11.0	W24 x 104	1.25 x 12 CTRS.	25, 30, 36, 42, 47, 25 (6Cor5D)	2T	E22	P18	324
A-228D-173-100	17,300	100, 86, 74	10.0	W21 x 101	1.13 x 12 CTRS.	24, 25, 30, 36, 41, 25 (5C or 4D)	2T	E22	P17	322
A-228D-246-86	24,600	86, 74, 64	10.0	W21 x 101	1.13 x 12 CTRS.	24, 25, 30, 36, 41, 25 (5C or 4D)	2T	E22	P17	322
A-160D-200-74	20,000	74, 64, 54	10.0	W18 x 76	1.13 x 12 CTRS.	24, 25, 29, 25, 33, 25, 38 (4Cor3D)	3TA	E19	P16	322
A-114D-173-64	17,300	64, 54	8.0	W16 x 67	1 x 9 CTRS.	19, 25, 24, 33, 25 (3C)	3TA	E18	P16	318

*Standard sheave sizes shown are floating hub sheaves for clutch driven compressors; largest size shown is maximum available. For units using electric motor driven compressors, select reducer sheaves from chart in the reducer section.

 LUFKIN MULTIFIELD PRODUCTS GROUP	AIR BALANCED PUMPING UNITS										450 Gears Road, Suite 550 Houston, Texas 77067 Phone: 281/875-6500 Fax: 281/875-4236 www.lufkin.com	
Counterbalance Data (effective counterbalance in pounds based on average pressure.)												
	Average Pressure,* PPSI											
Unit Size	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	410
A-2560D-470-240												
A-1824D-470-240	-	2,870	5,740	8,610	11,480	14,350	17,220	20,090	22,960	25,830	28,700	29,850
A-1280D-470-240												
A-912D-470-240												
A-1824D-427-216												
A-1280D-427-216	920	3,220	5,520	7,820	10,120	12,420	14,720	17,020	19,320	21,620	23,920	24,830
A-912D-427-216												
A-1824D-427-192												
A-1280D-427-192	3,905	6,475	9,045	11,615	14,185	16,755	19,325	21,895	24,465	27,035	29,605	30,635
A-912D-427-192												
A-1280D-305-168												
A-912D-305-168	2,810	4,700	6,585	8,475	10,365	12,250	14,140	16,030	17,915	19,805	21,695	22,450
A-640D-305-168												
A-912D-427-144	5,240	7,420	9,605	11,785	13,970	16,150	18,335	20,515	22,700	24,880	27,065	27,935
A-640D-427-144												
A-640D-305-144	3,520	5,125	6,725	8,330	9,935	11,540	13,145	14,745	16,350	17,955	19,560	20,200
A-456D-305-144												
A-640D-365-120	4,725	6,630	8,535	10,440	12,345	14,250	16,155	18,060	19,965	21,870	23,775	24,535
A-456D-365-120												
A-456D-256-120	4,035	5,415	6,795	8,175	9,560	10,940	12,320	13,700	15,085	16,465	17,845	18,400
A-320D-256-120												
A-320D-305-100	4,855	6,495	8,135	9,775	11,415	13,055	14,695	16,335	17,975	19,615	21,255	21,910
A-228D-173-100	2,925	4,060	5,195	6,335	7,470	8,610	9,745	10,885	12,020	13,160	14,295	14,750
A-228D-246-86	4,045	5,355	6,670	7,980	9,295	10,605	11,920	13,230	14,545	15,855	17,170	17,695
A-160D-200-74	4,410	5,680	6,945	8,215	9,480	10,750	12,015	13,285	14,550	15,820	17,085	17,595
A-114D-173-64	2,760	3,550	4,345	5,135	5,930	6,720	7,515	8,305	9,100	9,890	10,685	11,000

*Pressure shown is average pressure between maximum and minimum and occurs at approximately beam horizontal position. For counterbalance at other pressures use direct interpolation.

Figura 1D. Catálogo Lufkin¹⁸.

¹⁸ Tomado de: LUFKIN INDUSTRIES, INC. *Pumping units*. Texas, 2008.

APÉNDICE E

CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA MODIFICADO DE GOODMAN

Paso 1. Determine la resistencia mínima a la tensión, T de las varillas, utilizando únicamente el grado API, los valores mínimos que a continuación se muestran han sido establecidos por API. El ejemplo, corresponde a un grado API D con una resistencia mínima a la tensión de 115,000 lb.

Grado API	Fuerza mínima de tensión (lb / pg ²)
K	82,000
C	90,000
D	115,000

Tabla E1. Esfuerzos mínimos de varillas API.

Paso 2. Coloque una línea horizontal y otra vertical sobre una hoja de papel para formar el primer cuadrante de un plano cartesiano, después coloque una línea de 45° entre éstas. Esta línea de 45° establece el esfuerzo mínimo. Posteriormente, construya una escala de esfuerzo en el eje de las ordenadas.

Paso 3. Utilizando la escala de esfuerzo coloque el punto $T/1.75$ en la línea de 45° donde $T=115,000$, ($T/1.75=65,714.28$).

Paso 4. Sobre el eje de las ordenadas localice el punto $T/4$, trace una línea entre este punto y el establecido en el paso 3. Esta línea define el esfuerzo máximo permisible para un factor de servicio de 1, ($T/4=28,750$).

Paso 5. Coloque el esfuerzo mínimo sobre la línea de 45°. Utilice la escala de esfuerzo del eje de las ordenadas.

Paso 6. El esfuerzo máximo permisible es leído directamente al proyectar una línea vertical del punto de mínimo esfuerzo hacia arriba, la cual cruzará con la línea de esfuerzo máximo. Este punto será nuestro valor de máximo esfuerzo permisible.

Paso 7. Localice el esfuerzo máximo (calculado o medido). Si este esfuerzo es mayor que el esfuerzo máximo permisible, las varillas estarán sobrecargadas. Si el esfuerzo máximo actual es menor que el esfuerzo máximo permisible, las varillas no estarán sobrecargadas.

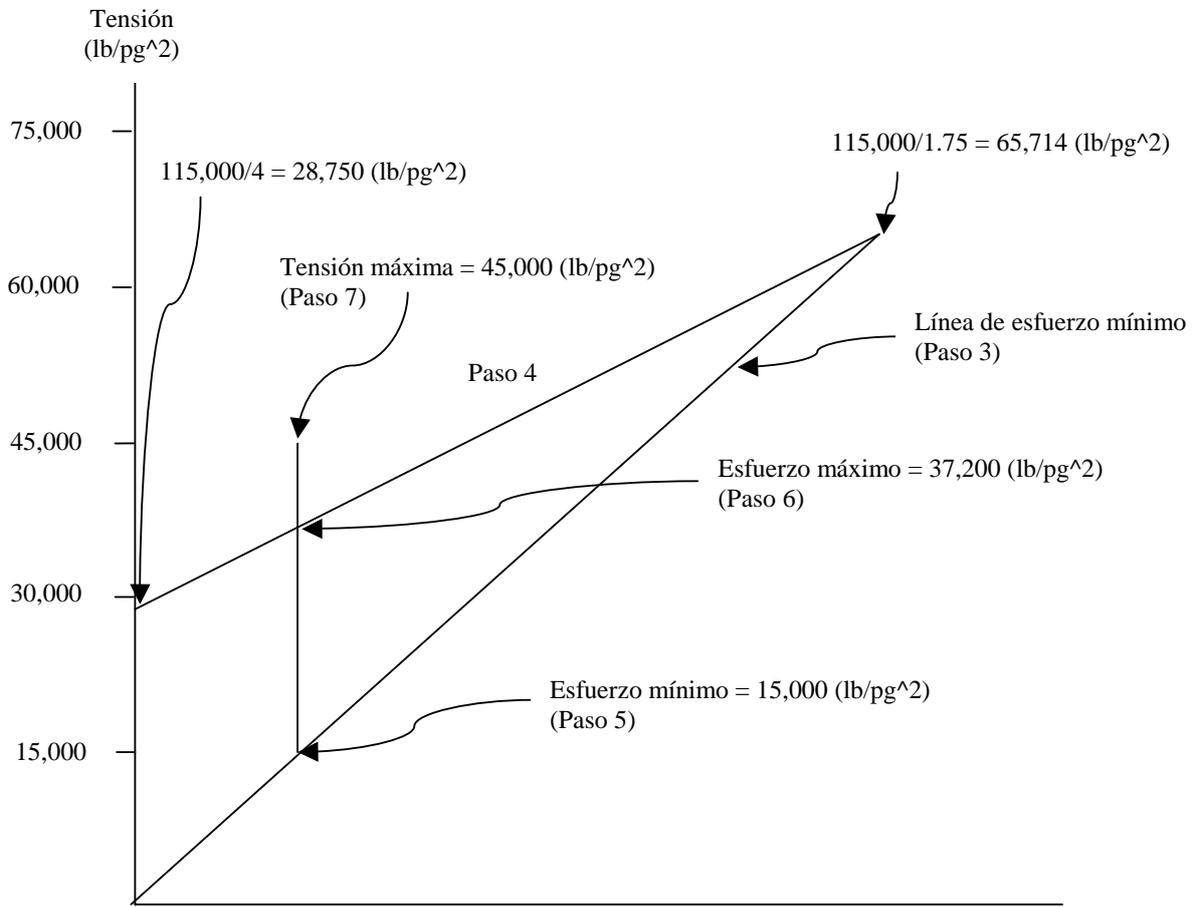


Figura E1. Construcción del Diagrama Modificado de Goodman para varilla API grado D.

APÉNDICE F GLOSARIO

Abrasión: Desgaste por fricción

Aceite ligero: La densidad de este es mayor a 27 °API, pero menor o igual a 38 °API.

Aceite pesado: Es aquél cuya densidad es menor o igual a 27 °API.

Aceite superligero: Su densidad es mayor a los 38 °API.

Acero: Aleación maleable de hierro y carbón, que también contiene cantidades apreciables de magnesio y otros elementos.

Acido: Cualquier compuesto químico, en el cual uno de los elementos es el hidrógeno, que se disocia en solución para producir iones de hidrógeno libres. Por ejemplo, el ácido clorhídrico (HCL), se disocia en agua para producir iones de hidrógeno H^+ y de cloro, C^- .

Agua dulce: Agua que contiene poca o nada de sal disuelta.

Aleación: Sustancia sólida con propiedades metálicas compuestas por dos o más elementos.

Ancla: Cualquier dispositivo que asegura o fija un equipo. Arreglo mecánico que previene el movimiento hacia arriba de ciertas piezas instaladas en un pozo. En las bombas de inserción de varillas se emplea el ancla para sujetarla.

Ancla de gas: Dispositivo tabular perforado, colocado en el fondo de una bomba de varillas de succión que ayuda a prevenir que la válvula de pie deje de funcionar.

Arenamiento: Columna formada por arena que ha entrado y se ha acumulado en el pozo.

Balancín: Manivela, campana que transmite el movimiento de la varilla de empuje a las válvulas en un motor.

Barril de aceite: Medida de volumen para productos petroleros. Un barril es equivalente a 42 gal ó 0.45899 m^3 o 159 lt. Un m^3 equivale a 6.2897 bl.

Barril de la bomba: Pieza tubular de acero instalada en la bomba de varillas de succión, dentro de la cual se coloca una camisa cuidadosamente ajustada y pulida. En este tipo de bomba el pistón se mueve hacia arriba y hacia abajo dentro de la camisa.

Biela: Brazo que conecta la manivela con el balancín, por medio del cual el movimiento rotatorio se convierte en movimiento recíprocante.

Bomba: Dispositivo que incrementa la presión de un fluido o lo eleva a un nivel más alto.

Bomba de desplazamiento positivo: Bomba que mueve una determinada cantidad de líquido en cada embolada de un pistón o en cada revolución de aspas o engranes, puede ser bomba reciprocante o bomba rotatoria.

Bomba de fondo: Cualquier bomba de varillas de succión, hidráulica o centrífuga, instalada cerca o en el fondo del pozo.

Bomba de inserción: Bomba de varillas de succión, que se mete a un pozo como una unidad completa.

Bomba de tubería: Bomba de varillas de succión en la que el barril está sujeto a la tubería de producción.

Bombeo mecánico: Método de bombeo en el que una bomba se instala cerca del fondo del pozo, y la cual se conecta a una sarta de varillas de succión. Se emplea para elevar los fluidos de este a la superficie. El peso de la sarta de varillas y el fluido se compensa por medio de contrapesos colocados en un balancín reciprocante o en la manivela de la unidad de bombeo mecánico o por presión de aire en un cilindro colocado en el balancín.

Cabeza de caballo: Sección curva del balancín de una unidad de bombeo mecánico.

Candado de gas: Condición que se encuentra algunas veces en un pozo de bombeo mecánico cuando el gas disuelto, liberado del aceite durante el ascenso del émbolo aparezca como gas libre entre las válvulas. Si la presión del gas es suficiente, la válvula de pie permanece cerrada y no permite el paso de líquido a la tubería de producción.

Claro: Espacio comprendido entre la válvula viajera y la válvula de pie en una bomba de bombeo mecánico, cuando el émbolo se encuentre en la parte inferior de la carrera.

Condiciones estándar: Son las cantidades a las que la presión y temperatura deberán ser referidas. Para el sistema inglés son 14.73 lb/pg² para la presión y 60 °F para la temperatura.

Contrapeso del balancín: Pesas en una unidad de bombeo mecánico, que se instalan al final del balancín.

Densidad API: Es la medida de la densidad de los productos líquidos del petróleo, derivado de la densidad relativa de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad API} = \frac{141.5}{\text{densidad relativa}} - 131.5$$

Densidad relativa: El cociente de la masa de un volumen dado de una sustancia y la masa de un volumen igual de una sustancia patrón, como el agua o el aire.

Dinamómetro: Dispositivo empleado para indicar la variación del peso sobre la varilla pulida conforme al movimiento de la sarta de varillas.

Empacador: Herramienta que va dentro del pozo, que consta de un dispositivo de sello, un dispositivo colgador, y un paso interior para los fluidos, que se emplea para bloquear el flujo de fluidos a través del espacio anular.

Espacio anular: Es el espacio entre la tubería de perforación o la de revestimiento y el agujero u otra tubería de revestimiento y entre la tubería de producción y la de revestimiento.

Factor de compresibilidad: Factor, generalmente denominado Z, que resulta de dividir el volumen de un gas a una presión y temperatura dadas, entre el volumen de gas calculado por la ley de los gases ideales.

Fatiga: Tendencia de un material-como el metal-a romperse bajo la repetición de una carga cíclica, que provoca un esfuerzo considerablemente menor al esfuerzo de tensión mostrada en una fuerza estática.

Flotación: Pérdida aparente de peso de un objeto inmerso en un fluido.

Fondo del pozo: Parte más baja o profunda de un pozo.

Fuera de bombeo: Bombear un pozo de tal forma que el nivel del fluido caiga debajo de la válvula de pie de la bomba y deje de operar.

Gas amargo: Gas que forma un ácido cuando se mezcla con agua. En producción y procesos petroleros, los gases más comunes son el sulfuro de hidrógeno y el bióxido de carbono (ambos son corrosivos, y además el sulfuro de hidrógeno es muy venenoso).

Gas asociado. Gas producido con el aceite.

Golpe del fluido: El impacto errático del pistón de la bomba contra el fluido cuando ésta opera con un vacío parcial en el cilindro, con gas atrapado o cuando el pozo no está produciendo.

Grampa: Dispositivo empleado para suspender una sarta de varillas después de que la bomba se ha espaciado, o cuando el peso de la sarta debe ser retirado del equipo de bombeo.

Instituto Americano del Petróleo: Organización norteamericana petrolera, fundada en 1920, que fija las normas que deben satisfacer los equipos de perforación y de producción; es reconocida como la más importante en esta materia.

Intervalo productor: La zona o formación de la cual se producen aceite y/o gas.

Línea de acero: Cable metálico de pequeño diámetro utilizado en operaciones de toma de información, disparos, entre otras.

Motor: Dispositivo hidráulico, de aire o eléctrico, empleado para realizar trabajo.

Niple de asiento: Tubo instalado en una sarta de tubería de producción, que tiene contornos maquinados para colocar un mandril con candado. Se emplea para colocar un regulador, un estrangulador o una válvula de seguridad, para anclar una bomba o para permitir la instalación de válvulas para bombeo neumático.

Nivel estático del líquido: El nivel del líquido en un pozo cuando está cerrado.

Operaciones con línea de acero: Operaciones en las que se baja al pozo herramientas mecánicas, como válvulas y herramientas de pesca, para fines diversos. Las operaciones eléctricas con línea de acero, como el registro eléctrico de un pozo o la perforación con pistolas, involucran el uso de una línea conductora.

Petróleo: Sustancia que se presenta en forma natural en la tierra que está principalmente formada por mezclas de compuestos químicos de carbón e hidrógeno, con o sin otros elementos no metálicos como azufre, oxígeno y nitrógeno.

Pozo fluyente: Pozo que produce aceite o gas por medio de la energía del yacimiento.

Prensaestopas: Collarín sellante enroscado en la parte superior de la cabeza del pozo, a través del cual opera la varilla pulida en un pozo en bombeo, evita el escape del aceite.

Presión de fondo: Presión hidrostática en el fondo de un pozo, que ejerce el fluido de perforación.

Preventor para varillas: Dispositivo de arietes empleado para cerrar el espacio anular alrededor de la varilla pulida o varillas de succión en un pozo de bombeo mecánico.

Rango de carga: En bombeo mecánico, la diferencia entre la carga ascendente y descendente en la varilla pulida.

Salmuera: Agua que tiene una gran cantidad de sales disueltas, especialmente de cloruro de sodio.

Sarta de varillas: Longitud total de las varillas de succión, construida por una serie de varillas conectadas entre sí.

Separador de fondo: Dispositivo usado para separar el aceite y el gas en el fondo de los pozos, cuyo objeto es el de incrementar la eficiencia volumétrica del equipo de bombeo.

Sistema Artificial de Producción: Cualquier método utilizado para levantar el aceite a la superficie a través de un pozo, después de que la presión de yacimiento ha declinado hasta el punto en el cual ya no producirá por medio de su energía natural.

Torsión: La fuerza de rotación que se aplica a un eje u otro mecanismo rotatorio para hacer que gire o que tienda a hacerlo (se mide en unidades de longitud por fuerza como $pg \cdot lb$).

Tubería de producción: Tubería de pequeño diámetro instalada dentro de un pozo, cuyo fin es el de servir como conducto para el paso del aceite y/o gas hacia la superficie.

Tubería de revestimiento: Tubería de acero que se coloca durante la perforación de un pozo para prevenir los derrumbes de las paredes del mismo, el filtrado de los fluidos en la formación y para proveer un medio de extraer hidrocarburos si el pozo es productor.

Unidad de bombeo mecánico: Máquina diseñada especialmente para bombeo de varillas de succión, la cual utiliza un miembro horizontal (balancín), el cual sube y baja por medio de una manivela rotatoria para producir un movimiento recíprocante.

Válvula de pie: Válvula fija de canica y asiento colocada en el extremo inferior del barril de trabajo de una bomba de varillas de succión.

Varilla pulida: La varilla colocada en el extremo superior de una sarta de varillas de succión, empleada para elevar fluidos por bombeo mecánico.

Válvula viajera: Una de las dos válvulas en un sistema de bombeo con varillas de succión. La válvula viajera sigue el movimiento de la sarta de varillas. Al subir las varillas ésta permanece cerrada soportando la carga del fluido. Al bajar las varillas, la canica se separa del asiento, permitiendo la entrada del fluido dentro de la columna de producción.

Yacimiento: Acumulación de petróleo y/o gas en roca porosa. Un yacimiento petrolero normalmente contiene tres fluidos (petróleo, gas y agua) que se separan en secciones distintas debido a sus gravedades variantes. El gas siendo el más ligero ocupa la parte superior del yacimiento, el aceite la parte intermedia y el agua la parte inferior.

REFERENCIAS

B. BRADLEY, Howard, *Petroleum engineering handbook*. Segunda edición, Texas, EE. UU., Society of Petroleum Engineers, 1989.

BERLANGA GUTIÉRREZ, J. M. *Apuntes de computación aplicada a la ingeniería petrolera*. México, Facultad de ingeniería, UNAM, 1980.

CAPPS, B. *Selection of Artificial Lift: Submersible Pumping*. Texas, Society of Petroleum Engineers, 1981.

CLEGG, J. *Selection of Artificial Lift: Gas Lift*. Texas, Society of Petroleum Engineers, 1981.

E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift*. Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

ECHOMETER COMPANY, *Echometer QRod 2.4*. Texas, Echometer, 2003.

GIPSON, F. *Selection of Artificial Lift: Sucker Rod Pumping*. Texas, Society of Petroleum Engineers, 1981.

GRIFFIN, F. D. *Pumping units and prime movers for pumping units: Part 1- Pumping units*. Texas, Society of Petroleum Engineers, 1989.

LUFKIN INDUSTRIES, INC. *Pumping units*. Texas, 2008.

SAGAHON JUAREZ, Mario, *Modelo computarizado de diseño API en pozos de bombeo mecánico*. México, 1989, Tesis (Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México.

BIBLIOGRAFÍA

B. BRADLEY, Howard, *Petroleum engineering handbook*. Segunda edición, Texas, EE. UU., Society of Petroleum Engineers, 1989.

BERLANGA GUTIÉRREZ, J. M. *Apuntes de computación aplicada a la ingeniería petrolera*. México, Facultad de ingeniería, UNAM, 1980.

CHAN VILCHES, Fernando, *Nuevo método para el diseño de equipo de bombeo mecánico*. México, 2004, Tesis (Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México.

CHARLES UREN, Lester, *Petroleum producción engineering*. New York, EE. UU., Mc Graw-Hill, 1965.

COLEGIO DE INGENIEROS PETROLEROS DE MÉXICO, *Glosario Inglés-Español de términos petroleros*. México, Instituto Mexicano del Petróleo, 1990.

D.R., Skinner, *Introduction to Petroleum Production: Fluid Flow, Artificial Lift, Gathering Systems and Processing*. Houston, Texas, EE.UU., Gulf Publishing Company, 1982.

E. BROWN, Kermit, *The technology of artificial lift methods: Vol. 2 Introduction of artificial lift systems. Beam pumping: Design and analysis. Gas lift*. Tulsa, Pennwell Publishing Company, 1980.

ECHOMETER COMPANY, *Echometer QRod 2.4*. Texas, Echometer, 2003.

HERNÁNDEZ CORTES, Mario Arturo, *Operación de bombeo mecánico*. México, Instituto Mexicano del Petróleo, 2000.

INTERNATIONAL HUMAN RESOURCES DEVELOPMENT CORPORATION, *Pumping Systems-Rod Pumping, IHRDC*. México, (DC/6)

LUFKIN INDUSTRIES, INC. *Pumping units*. Texas, 2008.

MCCOY J., N. "Rotaflex Efficiency and Balancing", *Society of Petroleum Engineers*. Oklahoma, núm. 67275, marzo 2001, 9 pp.

MODÓN, Alberto Marcelo, José PICH Y Osvaldo TRICLI. "VSH2 - Unidad de bombeo hidroneumática de velocidad variable", *Instituto argentino del petróleo y del gas*. Buenos Aires, Argentina, 2003, 16 pp.

NEELY A., Buford. "Selection of Artificial Lift Method", *Society of Petroleum Engineers*. San Antonio, Texas, núm. 10337, octubre 1981, 17 pp.

NIND T. E. W., *Fundamentos de producción y mantenimiento de pozos petroleros*. México, D.F., Limusa, 1987.

SAGAHON JUAREZ, Mario, *Modelo computarizado de diseño API en pozos de bombeo mecánico*. México, 1989, Tesis (Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México.