



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SOLUCIONES PARA PROBLEMAS QUE SE
PRESENTAN EN EL BOMBEO MECÁNICO.**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO PETROLERO
PRESENTAN:

BARRÓN PARRA OSVALDO
SÁNCHEZ FONSECA GERARDO

ASESOR: ING MARÍA ISABEL VILLEGAS JAVIER



MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA,

2009.

Silvia Juan Rodrigo Albanydia Victor Hugo Dusty
 Abue chuy Tío Cuate Paco Pilín May Gaby Pedro Victor
 Manuel Ulises **Abue Carmelita Abuelito Jupe** Tio Manuel
Mary Pascual Jose Roberto Ulises Gabriela Monse **Vizidiana**
 Tío Julio Tío Juan Pitufo Chuyito Bis **Guayabos 1014**
 Valentín Gomez Farias Mtra. Elsy **David Miguel Erika** 1983
Escuela secundaria federal 243 SAMUEL BRYAN ALAIN
 FRANZ Rubén **Cristian Cesar FERMÍN** Ricardo Gerardo Popoca
veronica Miguel F. Schultz henry Fioreya Pedro Rosas Oscar *Damian Olmos*
Rocio Aton Quitlahuac Guillermo Felipe
Sindy.
Ingenieria Angel Garcia Eduardo Carmona GERARDO SÁNCHEZ
Francisco Suarez Antonio Murillo Juan Carlos Baez Marco A.
Tentle EDUARDO ANGELES Israel 9" Jesus "Shyru" Becerril
Josue Mares Miguel A. Chora Cesar Monroy Fernando Gonzalez
 Victor Hugo Martinez **Ulises Bruno Anastacio Montiel**
Gervacio Ma. Consuelo Aco Natalia Hinojosa Yolanda Ramirez
 Claudian **LIZBETH ING. MARÍA ISABEL VILLEGAS JAVIER**
 Roxana López Dinorín.

*Así seguire mi camino en la que algunas personas perduraran en el tiempo
 y en mi corazón, otras sólo compartirán algunos momentos de su vida a mi lado
 y algunos cuantos seguirán caminando a mi lado...*

Sin olvidar a las que se unirán en algún momento.

Familia
Barrón
Parra

Agradezco primeramente a Dios por permitirme cumplir con esta meta. Por todas las bendiciones que me ha dado y por acompañarme en todos los momentos de mi vida.

Este trabajo se lo dedico a mis padres María Elena Fonseca Hernández y Manuel Sánchez Arriaga quienes son dos seres tan maravillosos y especiales que me dieron todo su apoyo y que están siempre pendientes de mí; ellos que entregan incondicionalmente su vida, no importando pasar desvelos, angustias y sufrimientos con tal de que sus hijos se hagan mujeres y hombres de bien.

Quiero dar mis más grandes y sinceros agradecimientos a mi hermano Manuel que siempre luchó y persistió para que lograra superarme. Gracias a mis padres y a él, hoy puede verse que no fue en vano su lucha.

A mis hermanas Luz Elena, Cecilia y María del Carmen, con quienes he tenido la dicha de compartir mi vida, los momentos más agradables y los más difíciles, a ustedes que han soportado mi conducta a veces hostil, gracias por el apoyo que me han brindado, su confianza y comprensión.

A la Ing. María Isabel Villegas Javier por su dedicación y tiempo en la asesoría del presente trabajo, especialmente por brindarme su apoyo y consejos sinceros que tendré siempre presentes.

A mis amigos Osvaldo, Ángel, Juan Carlos, Fernando, Cesar, Antonio, Víctor Hugo, Ulises, y mis amigas Roxana, Consuelo, Adriana y Natalia, que siempre han creído en mí y me han apoyado; con todos disfrute momentos maravillosos e inolvidables durante mi estancia en la Facultad de Ingeniería.

A los integrantes del jurado por su tiempo y paciencia en la revisión de éste trabajo:

M.I. José Ángel Gómez Cabrera, M.I. Felipe de Jesús Lucero Aranda, M.I. Tomás Eduardo Pérez García, Ing. Octavio Steffani Vargas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Ingeniería, por haberme permitido estudiar en sus aulas y forjarme como profesionalista.

Gerardo Sánchez Fonseca.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-1410

SR. OSVALDO BARRÓN PARRA

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Ing. Ma. Isabel Villegas Javier y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

SOLUCIONES PARA PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN EL BOMBEO MECÁNICO

- RESUMEN
- INTRODUCCIÓN
- I SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN
- II DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO
- III INSTRUMENTOS QUE PERMITEN DIAGNOSTICAR ANOMALÍAS EN EL EQUIPO SUBSUPERFICIAL DEL POZO
- IV PROBLEMAS Y SOLUCIONES PARA EQUIPOS DE BOMBEO MECÁNICO
- V BASE DE DATOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN A UN PROBLEMA ESPECÍFICO EN UNA U.B.M.
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- APÉNDICES
- GLOSARIO
- REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta

Asimismo, le recuerdo que la ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

CD. Universitaria; D. F. a 4 de Noviembre de 2009
EL DIRECTOR

MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA

JGGZ*RJPYS*srs



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-1411

SR. GERARDO SÁNCHEZ FONSECA

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Ing. Ma. Isabel Villegas Javier y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

SOLUCIONES PARA PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN EL BOMBEO MECÁNICO

	RESUMEN
	INTRODUCCIÓN
I	SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN
II	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO
III	INSTRUMENTOS QUE PERMITEN DIAGNOSTICAR ANOMALÍAS EN EL EQUIPO SUBSUPERFICIAL DEL POZO
IV	PROBLEMAS Y SOLUCIONES PARA EQUIPOS DE BOMBEO MECÁNICO
V	BASE DE DATOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN A UN PROBLEMA ESPECÍFICO EN UNA U.B.M.
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
	APÉNDICES
	GLOSARIO
	REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta

Asimismo, le recuerdo que la ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

CD. Universitaria, D.F., a 4 de Noviembre de 2009

EL DIRECTOR

MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA

JGGZ*RJPYS*srs

Resumen.	XII
Introducción.	XIV
1. Sistemas Artificiales de Producción.	2
1.1 Sistemas artificiales.	2
1.1.1 Bombeo Neumático.	3
1.1.1.1 Bombeo Neumático Continuo.	4
1.1.1.2 Bombeo Neumático Intermitente.	4
1.1.2 Bombeo Mecánico.	5
1.1.3 Bombeo de Cavidades Progresivas.	8
1.1.3.1 Principio de bombeo.	10
1.1.4 Bombeo Electrocentrífugo.	10
1.1.5 Bombeo Hidráulico.	12
1.1.5.1 Bombeo Hidráulico Tipo Pistón.	13
1.1.5.1.1 Sistemas de inyección del fluido motor.	14
1.1.5.1.1.1 Sistema abierto.	14
1.1.5.1.1.2 Sistema cerrado.	14
1.1.5.2 Bombeo Hidráulico Tipo Jet (a chorro).	15
2. Descripción del equipo de Bombeo Mecánico.	18
2.1 Mecanismos superficiales.	18
2.1.1 Preventores.	18
2.1.2 Estopero.	19
2.1.2.1 Estopero preventor Hércules DPSB.	19
2.1.3 Grampas (mordaza) para varilla pulida.	20
2.1.4 Válvula de control.	21
2.1.4.1 Válvulas Cameron.	21
2.1.5 Válvulas de retención (check).	23
2.1.6 Varilla pulida.	23
2.2 Varilla de succión.	25
2.2.1 Clase de varillas.	27
2.3 Bomba subsuperficial.	27
2.3.1 Clasificación, nomenclatura y tipo de bombas.	28
2.3.2 Bomba de tubería o tubería de producción.	30
2.3.3 Bomba de inserción de barril fijo.	31
2.3.3.1 Bomba de barril fijo y anclaje inferior.	32
2.3.3.2 Bomba de barril fijo y anclaje superior.	32
2.3.3.3 Bomba de barril fijo y anclaje mixto.	32
2.3.3.4 Bomba de inserción de barril viajero y anclaje inferior.	33
2.3.4 Bomba de revestimiento.	34
2.3.5 Bombas especiales “bomba de doble etapa”.	35
2.3.6 Bombas especiales “bomba de succión múltiple o en paralelo”.	36
2.4 Descripción de los componentes de una bomba subsuperficial.	38

2.4.1 Barril de trabajo o cilindro.	38
2.4.1.1 Materiales utilizados para la construcción del barril de trabajo.	38
2.4.2 Émbolo o pistón.	38
2.4.3 Válvula viajera y válvula de pie.	39
2.4.4 Ancla de asiento.	40
2.4.5 Ancla de gas.	40
2.4.6 Fallas de la bomba subsuperficial.	41
2.5 Funcionamiento de una bomba subsuperficial (ciclo de bombeo).	41
2.6 Selección del tamaño de la bomba.	42
2.7 Sarta de tubería y varillas.	43
2.8 Acoplamientos.	44
2.9 Fatiga y el diagrama de Goodman.	44
2.9.1 Elaboración del diagrama de Goodman	48
2.10 Fallas de la sarta de varillas.	50
2.10.1 Fallas en las roscas de las varillas.	50
2.10.2 Fallas en los acoplamientos de las varillas.	52
2.10.2.1 Corrosión.	52
2.10.2.2 Abolladuras.	52
2.11 Desgaste en la varilla y tubería.	53
2.11.1 Fallas en el cuerpo de las varillas.	54
2.11.2 Barra de peso.	54
2.11.3 Centralizadores de varillas.	56
2.12 Descripción y tipo de unidades.	57
2.12.1 Geometría de la unidad de bombeo mecánico.	58
2.12.2 Efecto de la geometría en las unidades de bombeo mecánico.	59
2.12.3 Unidad de bombeo mecánico convencional.	60
2.12.4 Unidad de bombeo mecánico Mark II.	61
2.12.5 Unidad de bombeo mecánico aerobalanceada.	66
2.12.5.1 Parte exclusiva de la unidad de bombeo mecánico aerobalanceada.	67
2.12.6 Unidad de bombeo mecánico hidroneumático (Tieben).	68
2.12.6.1 Principio de operación del bombeo mecánico hidroneumático.	70
2.12.6.2 Sistema de seguridad de la unidad de bombeo mecánico hidroneumático.	71
2.12.7 Unidad de carrera extra-larga (Rotaflex).	72
2.13 Nomenclatura API sobre balancines.	74
2.13.1 Capacidad de carga de estructura.	74
2.13.2 Torque máximo en la caja reductora.	75

2.14 Efecto de contrabalance.	75
2.15 Motores.	76
2.16 Fallas en las unidades de bombeo mecánico.	78
2.17 Descripción de componentes (accesorios).	78
2.17.1 Empacadores.	79
2.17.2 Anclas de tubería.	80
2.17.3 Niples de drenaje.	81
2.17.4 Filtro de succión.	81
2.17.5 Conexión “Flash” para varillas.	82
2.17.6 Separador estático de gas.	82
2.17.7 Separador de arena.	82
3. Instrumentos que permiten diagnosticar anomalías en el equipo subsuperficial del pozo.	84
3.1 Sistemas analizadores del pozo.	84
3.2 Ecómetro.	84
3.2.1 Principio de operación.	84
3.2.2 Partes del Ecómetro.	85
3.2.3 Interpretación.	86
3.2.4 Fuentes de error.	87
3.2.5 Ecómetro digital analizador de pozos.	87
3.3 Dinamómetro.	88
3.3.1 Tipos de dinamómetro.	89
3.3.2 Principio de operación.	89
3.3.3 Partes del dinamómetro.	89
3.3.4 Limitación de la interpretación visual.	92
3.3.5 Patrón típico de cargas en la varilla pulida durante un ciclo de bombeo, dividido en cuatro zonas de movimiento.	92
3.3.6 Construcción de una carta dinamométrica típica.	94
3.3.6.1 Comportamiento ideal	95
3.3.7 Principios del movimiento.	97
3.3.8 Alargamiento de las varillas.	99
3.3.9 Movimiento armónico de las varillas.	99
3.3.10 Amortiguamiento.	100
3.3.11 Procedimiento para interpretar una carta dinamométrica.	102
4. Problemas y soluciones para equipos de Bombeo Mecánico.	105
4.1 Problemas en el equipo superficial.	105
4.2 Problemas comunes que afectan el comportamiento ideal.	106

4.3 Cambio de varilla pulida.	116
4.3.1 Corrosión	116
4.3.2 Deflexión	116
4.3.3 Varilla acinturada	117
4.4 Problemas por los que deja de fluir un pozo.	117
4.4.1. Bomba engasada (Candado de gas).	117
4.4.1.1 Válvulas anticandado de gas	119
4.4.1.1.1 Funcionamiento de la válvula eliminadora de candados de gas	120
4.4.2 Calzamiento en válvula viajera, de pie y azolvamiento de la bomba.	124
4.4.3 Falta de nivel dinámico.	127
4.4.4 Pozos desviados.	128
4.4.5 Bomba desanclada.	129
4.4.6 Sarta de varillas rotas.	129
4.4.7 Tubería de producción rota.	131
4.4.8 Flotamiento de sarta de varillas.	131
4.5 Análisis de las fallas de las varillas de bombeo.	132
4.6 Mecanismo de las fallas.	133
4.6.1 Fallas de diseño y operación.	135
4.6.2 Fallas mecánicas.	136
4.6.3 Fallas de la varilla por flexión.	136
4.6.4 Fallas por daños superficiales.	137
4.6.5 Fallas de conexión.	137
4.6.6 Fallas de fatiga por corrosión.	138
4.6.6.1 Corrosión por ácido.	139
4.6.6.2 Corrosión por cloruros.	139
4.6.6.3 Corrosión por CO ₂ .	140
4.6.6.4 Corrosión de metales distintos.	141
4.6.6.5 Corrosión por H ₂ S.	141
4.6.6.6 Corrosión influenciada microbiológicamente.	142
4.6.6.7 Bacterias productoras de ácido.	143
4.6.6.8 Bacterias reductoras de sulfato (SRB).	143
4.6.6.9 Corrosión intensificada por oxígeno (O ₂).	144
4.6.6.10 Corrosión por corrientes parásitas.	145
4.6.6.11 Corrosión por subdepósitos.	145
4.7 Problemas de mayor relevancia en el bombeo mecánico.	146
5. Base de datos para la identificación de la solución a un problema específico en una U.B.M.	150
Conclusiones y recomendaciones.	155
Apéndices.	
Apéndice A.	158
Apéndice B.	161

Índice	Páginas
Apéndice C.	162
Apéndice D.	166
Apéndice E.	167
Referencias.	170
Glosario.	I

INTRODUCCIÓN

Pemex Exploración y Producción (PEP) ha alcanzado resultados significativos en materia de restitución de reservas de hidrocarburos en los últimos años. La revisión y el desarrollo de campos ya descubiertos, junto con el descubrimiento de nuevas reservas producto de la actividad exploratoria, está demostrando que el objetivo de agregar anualmente reservas cuyo volumen sea igual, o mayor, a la producción del mismo año, es alcanzable a través de una estrategia sostenida de exploración y desarrollo (Fuente: Informe anual 2008 PEMEX).

Los nuevos descubrimientos e incorporaciones hicieron que la tasa de restitución de reservas probadas (1P) fuera de 71.8% en 2008, en comparación con 50.3% en 2007. En cuanto a las reservas posibles (3P), que se incorporaron por nuevos descubrimientos, en 2008 fueron 40.7% superiores a las del año previo (Fuente: Informe anual 2008 PEMEX).

En materia de petróleo crudo, se alcanzó una producción promedio de 2.8 millones de barriles, lo que representó una reducción de 9.2% respecto al año anterior. La acelerada declinación de Cantarell, que produjo 451 mil barriles diarios menos (30.1%) que en 2007, no se compensó con los aumentos en otros campos, como Ku-Maloob-Zaap que el 28 de diciembre de 2008 registró su nivel máximo histórico de producción, con 802 mil barriles diarios. A la disminución de la producción también contribuyeron retrasos en la puesta en marcha de la infraestructura en Chicontepec (Fuente: Informe anual 2008 PEMEX).

Los factores de recuperación varían considerablemente entre las diferentes regiones del mundo y entre los distintos yacimientos, oscilando entre el 5% a más del 80%. Una estimación razonable del factor de recuperación de petróleo promedio es aproximadamente un 37%. La geología y las propiedades de los fluidos inciden en la recuperación final en cada yacimiento y estas propiedades son difíciles de modificar.

El objetivo principal de aumentar o mantener la producción en los pozos, es alcanzar la máxima recuperación de hidrocarburos posible, con lo cual se extendería la vida productiva del campo y a la vez mejoraría la rentabilidad del mismo. Ya que en estos campos se tiene una infraestructura, por lo que ya no se sería necesario invertir en sistemas de tratamiento y transporte necesarios en los nuevos campos.

Los campos maduros se caracterizan principalmente por el tiempo que llevan en operación (20 años aproximadamente), en ellos se observa una declinación constante en la producción. Con la necesidad que se tiene por mantener la producción de años anteriores, y debido a los parámetros actuales de un alto precio, la creciente demanda por la falta de hidrocarburos; se hace más viable la inversión en los campos maduros ya que en estos se cuenta con una infraestructura predeterminada.

En general los campos maduros se caracterizan porque llevan operando más de 20 años, muestran una declinación constante en la producción. Con los parámetros actuales de un alto precio y una demanda creciente, se hace más viable invertir en estos campos para aumentar el recobro y así extender su vida útil. Dentro de las diferentes opciones que se pueden implementar para revitalizar la producción, se dispone de técnicas probadas como el análisis nodal y la simulación del sistema integral de producción (yacimientos, pozos, líneas y equipos de superficie), que son herramientas indispensables para evaluar y optimizar el funcionamiento de los pozos, ya sea en flujo natural o con levantamiento artificial. Además, el balance de materiales en estos campos es ideal para una mejor estimación de las reservas remanentes.

En la actualidad se cuenta con sistemas artificiales de producción que pueden ser aplicados en los campos maduros. Ya que los sistemas artificiales de producción suministran energía adicional a los fluidos en el pozo para hacerlos llegar hasta la superficie, implicará un aumento en la producción con un mínimo de inversión económica. De todos los sistemas artificiales existentes, el sistema de bombeo mecánico es uno de los más utilizados en los pozos someros y de profundidades medias.

El bombeo mecánico es un sistema artificial de producción, en el que el movimiento del equipo subsuperficial es originado desde la superficie, y es transmitido a la bomba por medio de una sarta de varillas de succión. Este sistema presenta principalmente tres clases de unidades, aunque existen otras dos que manejan el mismo principio en el equipo subsuperficial, pero la forma de transmitir el movimiento a la bomba es diferente.

La importancia de este trabajo radica principalmente en un análisis de los instrumentos que permiten diagnosticar las anomalías que se pueden presentar, haciendo énfasis principalmente en el equipo subsuperficial, así como conocer los datos que se obtienen de los instrumentos y poder realizar un diagnóstico adecuado de dichos problemas.

Como resultado, esta tesis proporcionará una base de datos con los principales problemas que se presentan en la bomba subsuperficial, y las anomalías que se obtienen en la superficie debido a la implementación de instrumentos de medición (dinamómetros), de tal forma que la base de datos contará con una sugerencia para corregir las distintas anomalías que se tienen documentadas en este trabajo.

RESUMEN

Alrededor de un 70% del petróleo producido en la actualidad proviene de campos con más de 30 años de explotación, lo que centra el interés de la industria precisamente en los campos petroleros maduros. El mejoramiento de la recuperación desde yacimientos conocidos en tan sólo el uno por ciento implicaría la incorporación de 10 mil millones de barriles (1,600 millones de m³) de petróleo equivalente al volumen de reservas mundiales. Los medios para lograrlo deben incluir el incremento de los factores de recuperación en dichos campos cuya producción se encuentra en declinación. A menudo, lo único que se necesita para explotar el potencial de recursos es la aplicación de tecnologías conocidas en forma oportuna y metódica.

La explotación de hidrocarburos en México experimenta una etapa en la que ya es una prioridad la implementación de sistemas artificiales de producción. La selección del sistema artificial está en función de diversos factores como son: la relación gas-aceite, el porcentaje de agua, la geología, las propiedades de los fluidos, la profundidad y temperatura, las condiciones de la tubería, la geometría del pozo, la infraestructura existente, entre otros.

El objetivo del presente trabajo, es presentar una explicación y análisis de los problemas que se tiene documentados como los de mayor frecuencia en la industria del petróleo; en los pozos que cuentan con un sistema artificial de producción, en este caso que cuentan con la instalación de un sistema de bombeo mecánico (rod sucker pumping), esta recopilación de información se presenta mediante una base de datos en la cual, se explicarán las causas que originan estas fallas, así como una breve reseña de la forma en la que se pueden detectar los problemas, además de las soluciones que se han aplicado hasta el momento para dichos problemas.

En el primer capítulo, se presenta una descripción de los sistemas artificiales de producción más utilizados a nivel mundial; además se hace mención de las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas, así como los resultados que se tendrían con la aplicación de un determinado sistema de acuerdo a las características geográficas y del pozo, tales como: las características físicas de la roca almacenadora, características de los fluidos, de la energía propia del yacimiento, del diseño de las tuberías de producción, etc., en las que se tenga que implementar este sistema.

Una vez que se ha hecho mención de los diferentes sistemas artificiales, en el segundo capítulo, nos referimos al bombeo mecánico, uno de los más aplicados en la industria petrolera, de bajo costo de inversión y que puede ser instalado en zonas urbanas. Realizamos una descripción de los componentes del sistema, tanto del equipo superficial como del subsuperficial, los diferentes tipos de unidades de bombeo mecánico que se conocen, así como el funcionamiento de cada unidad, las variantes en su operación con respecto a otro tipo de unidad de bombeo mecánico y las ventajas que se obtienen con la instalación de una determinada unidad, así como, las posibles limitantes que presentaría cada una de ellas.

En el tercer capítulo, realizamos una explicación de los instrumentos que se utilizan para la detección de problemas en el sistema de bombeo mecánico, tanto digitales como analógicos y las diferencias entre ambos; mencionamos los datos que se obtienen con estos equipos, los factores que pueden afectar las mediciones, que, si no son considerados, pueden causar un diagnóstico erróneo del funcionamiento del sistema.

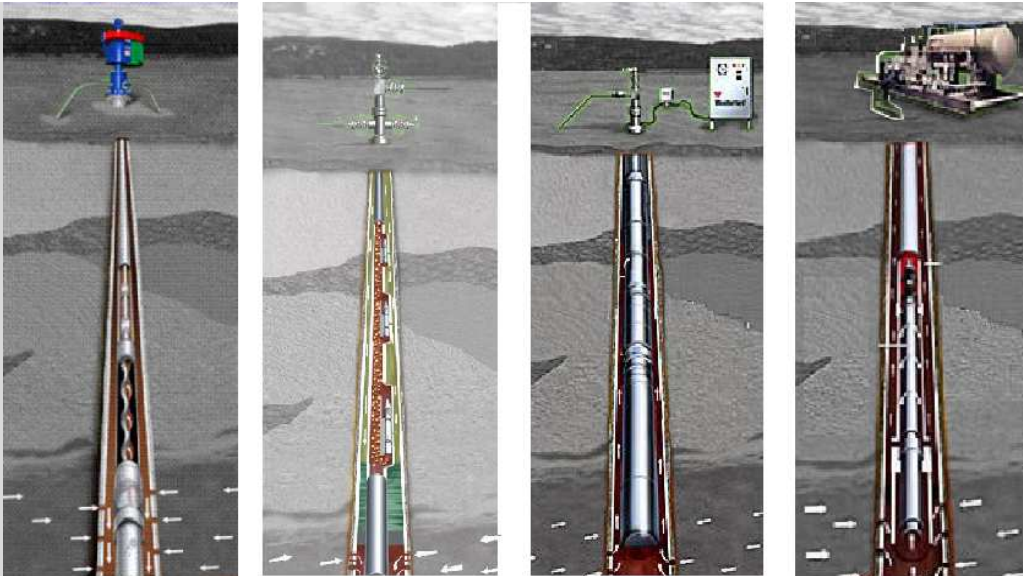
En el cuarto capítulo se mencionan los problemas que se presentan con mayor frecuencia en los equipos de bombeo mecánico, cómo pueden ser detectados y las posibles soluciones que se puedan dar, tanto para la prevención como la forma de corregirlos cuando ya se presentaron.

Por último, en el quinto capítulo, presentamos una base de datos en la que se incluye un compendio de los problemas más comunes en el bombeo mecánico principalmente en el equipo subsuperficial; cuya finalidad es ayudar en la determinación más rápida de los problemas comunes y sugerir una solución que permita resolverlo.

CAPÍTULO 1

SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN.

Sistema artificial de producción son equipos adicionales a la infraestructura del pozo, que suministran energía adicional a los fluidos producidos por el yacimiento.



1.1 Sistemas artificiales.

La explotación de un yacimiento de hidrocarburos a través de un pozo depende de varios factores, tales como: las características físicas de la roca almacenadora, características de los fluidos, de la energía propia del yacimiento, del diseño de las tuberías de producción, etc.

En el inicio de la explotación de los campos, los pozos productores son fluyentes; es decir, el yacimiento tiene suficiente energía para transportar al aceite hasta la superficie; pero conforme avanza la explotación del yacimiento, la presión estática comienza a declinar hasta que la energía aportada por el yacimiento es insuficiente para elevar los fluidos a la superficie. Debido a la necesidad de continuar con la explotación de los hidrocarburos, fueron creados los sistemas artificiales de producción (SAP). Cabe señalar que en algunos pozos es necesario introducir desde el inicio de la explotación un sistema artificial de producción.

En el diseño de un sistema artificial, el principal reto al que se enfrenta el ingeniero petrolero es el de lograr la compatibilidad de los sistemas a implementar con la productividad del pozo, esto con la finalidad de obtener la máxima eficiencia del sistema.

Los sistemas que existen y se conocen actualmente son:

1. Bombeo Neumático.
2. Bombeo Mecánico.
3. Bombeo de Cavidades Progresivas.
4. Bombeo Electrocentrífugo.
5. Bombeo Hidráulico.

1.1.1 Bombeo Neumático.

El bombeo neumático es un sistema artificial de producción utilizado en los pozos petroleros para poder transportar a los fluidos hasta la superficie mediante la inyección de gas en la tubería de producción a una presión relativamente alta (250 lb/pg^2 como mínima) para aligerar la columna de fluido y poder vencer la contrapresión de la línea. El gas inyectado origina que la presión que ejerce la carga del fluido sobre la formación disminuya debido a la reducción de la densidad de dicho fluido.

Existen dos tipos de bombeo neumático:

1. Bombeo Neumático Continuo.
2. Bombeo Neumático Intermitente.

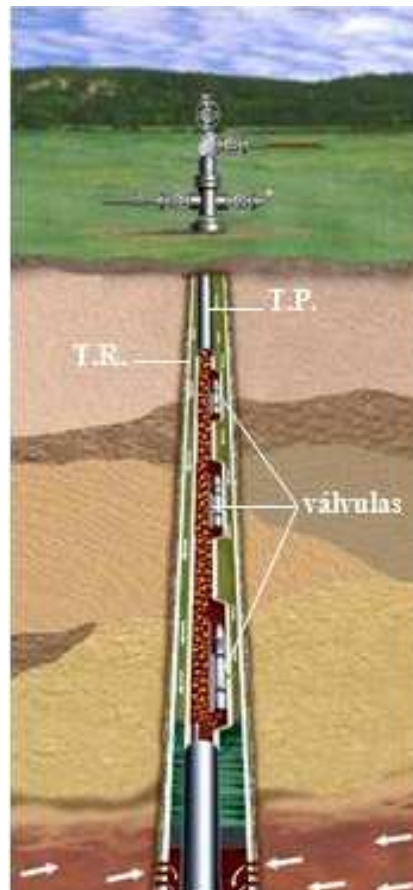


Fig. 1.1 Esquema representativo del sistema artificial de bombeo neumático ^[31].

1.1.1.1 Bombeo Neumático Continuo.

En este método el volumen continuo de gas a alta presión es inyectado dentro de la tubería de producción para aligerar la columna de los fluidos hasta obtener una diferencial de presión suficiente a través de la cara de la formación que logre hacer fluir al pozo a un gasto deseado. Lo anterior se logra mediante una válvula de flujo, la cual permite un posible punto de inyección profundo de presión disponible y una válvula para regular el gas inyectado desde la superficie. El sistema de bombeo neumático continuo es factible de aplicarse en pozos de alto índice de productividad (> 0.5 bl/día / lb/pg²) y presión de fondo relativamente alta (columna hidrostática 50% de la profundidad del pozo) así como utilizar diversos diámetros de tubería de producción, dependiendo del gasto de producción deseado. De este modo se pueden tener gastos entre 200 bl/día hasta 80,000 bl/día; aún más se pueden tener gastos tan bajos como 25 bl/día a través de tuberías de diámetros reducidos (tipo macarroni).

1.1.1.2 Bombeo Neumático Intermitente.

Este método consiste en inyectar un volumen de gas a alta presión por el espacio anular hacia la tubería de producción en forma cíclica, es decir, periódicamente inyectar un determinado volumen de gas por medio de un regulador, un interruptor o ambos.

Cuando la válvula superficial del bombeo neumático intermitente abre, el volumen de gas inyectado en ese momento expulsa hacia la superficie al fluido de la formación (en forma de bache) que se acumula dentro de la tubería de producción entre cada ciclo de inyección, es decir, después de que la válvula cierre; la formación continua aportando fluido al pozo, hasta alcanzar un determinado volumen de aceite con que el que se pueda iniciar otro ciclo; dicho ciclo es regulado para que coincida con el gasto de llenado del fluido de formación al pozo. En el bombeo neumático intermitente pueden utilizarse puntos múltiples de inyección del gas a través de más de una válvula subsuperficial.

Este sistema es recomendado para pozos con las características siguientes:

- a) Alto índice de productividad (> 0.5 bl/día / lb/pg²) y bajas presiones de fondo (columna hidrostática $\leq 30\%$ profundidad del pozo).
- b) Bajo índice de productividad (< 0.5 bl/día / lb/pg²) con bajas presiones de fondo

[1].

1.1.2 Bombeo Mecánico.

El sistema de bombeo mecánico se define como un sistema artificial de producción en el cual el movimiento del equipo de bombeo subsuperficial se origina en la superficie y se transmite a la bomba por medio de una sarta de varillas de succión. Debido a que usa una bomba de émbolo, el movimiento de las varillas produce un vacío en el interior del barril de trabajo, ocasionado por la salida parcial del émbolo, haciendo que el líquido penetre al barril de trabajo a través de la válvula de pie ocupando el espacio vacío. El desplazamiento de líquido y su descarga a través de la válvula viajera y de la tubería de producción, se lleva a cabo cuando el émbolo entra nuevamente al barril ^[2].



Fig. 1.2 Esquema representativo del sistema artificial de bombeo mecánico ^[31].

El bombeo mecánico puede operar eficientemente sobre un amplio rango de características de producción de pozos, se considera para levantar volúmenes moderados desde profundidades someras, y volúmenes pequeños en profundidades intermedias. Si los fluidos del pozo no contienen ácido sulfúrico (H_2S), o si usan varillas de succión especiales, es posible levantar 1,000 bpd desde aproximadamente 14,000 pies. Si los fluidos del pozo, en cambio, llegan a contener ácido sulfúrico, el

bombeo mecánico puede levantar 1,000 bpd desde 4,000 pies y 200 bpd desde 10,000 pies. La mayoría de las partes del sistema de bombeo mecánico están certificadas por estándares internacionales, los cuales fueron establecidos por American Petroleum Institute (API). Numerosas refacciones pueden sustituir cada parte y todos sus componentes interconectados son estándar.

El sistema de bombeo mecánico presenta las siguientes ventajas:

- Su diseño es simple, lo cual permite una fácil operación.
- Su inversión es baja, cuando se manejan producciones de volúmenes bajos de hidrocarburos.
- Se utiliza principalmente en profundidades someras a intermedias (7,800 pies).
- Adaptable a pozos que presentan una desviación moderada.
- Permite producir con niveles de fluidos bajos.
- Se adapta a pozos que presentan problemas de corrosión e incrustaciones.

Algunas limitantes que presenta este sistema son:

- Presenta una limitada capacidad para trabajar con arenas.
- Las parafinas y las incrustaciones interfieren con la operación de estos sistemas.
- Se corre el riesgo de que la prensaestopa de la varilla pulida se salga de su lugar [3].

Es un método muy antiguo, y no se tiene claro ni quién ni cuándo fue creado este sistema, pero se creó que lo desarrollaron los chinos alrededor de los 400 años A.C. En ese tiempo, emplearon este sistema de bombeo para extraer agua dulce desde pozos profundos. Este sistema consistía en una sarta de bambú unida a un pistón, en cuyo interior, dos esferas que descansaban en asientos de madera, permitían el ingreso del agua a una recámara interior y el agua era comprimida cuando el pistón descendía dentro del barril. De esta forma, el agua encapsulada dentro de la recámara interna incrementaba su presión y ascendía hasta la superficie. Cuando el pistón ascendía, se permitía la entrada del fluido y así se mantenía el ciclo de bombeo.

Su uso como sistema artificial de producción se remonta a 1859, cuando Colonel Edwin Drake en Pensilvania (EEUU) utilizó una bomba reciprocante para producir una mezcla de petróleo y agua desde una distancia de 10 pies desde la superficie, esta fue la primera vez en el mundo que un pozo de petróleo utilizó un sistema artificial de producción. No fue sino hasta comienzos de 1920 cuando comenzaron los estudios de investigación para comprender su operación y mejorar su diseño, en 1954, la “Asociación de Ingenieros Petroleros” (SPE) a solicitud de varias empresas operadoras y fabricantes promueven la creación de una norma que estandarice el procedimiento del diseño del sistema y sus componentes con lo cual se persigue evitar los problemas de subdimensionamiento en los cuales se solía incurrir. Desde entonces diversos investigadores han realizado importantes aportaciones al área que han permitido mejorar la comprensión de la fenomenología del sistema.

El bombeo mecánico convencional es el sistema artificial de producción más utilizado a nivel mundial, se estima que tan solo en EE.UU el 80% de los pozos producen utilizando este sistema artificial. Aún cuando no se tiene una referencia porcentual precisa sobre la cantidad de pozos activos que utilizan este sistema, se estima que cerca del 50% de los pozos a nivel mundial producen a través del sistema de bombeo mecánico convencional ^[4].

La información con la que se cuenta hasta la fecha, sobre el número de pozos que operan mediante el sistema de bombeo mecánico en el Activo Integral Poza Rica-Altamira, así como su porcentaje de aplicación es el siguiente:

- En todo el AIPRA operan 317 pozos con sistema artificial de producción (bombeo mecánico), su porcentaje de aplicación es del 23%.
- En el Activo Integral Aceite del Terciario del Golfo (AIATG) se cuenta con 368 que producen mediante el sistema de bombeo mecánico, lo que representa el 37% del total de pozos operando al (8/Oct/2009).
- En la región Sur de Pemex Exploración y Producción, se tienen produciendo un total de 129 pozos mediante este sistema de producción (bombeo mecánico) y su porcentaje de implementación en esta zona es del 100%.

1.1.3 Bombeo de Cavidades Progresivas.

A finales de los años 20's, René Moineau desarrolló el concepto para una serie de bombas de engranajes helicoidales. Una de estas bombas tomó la forma de lo que ahora se conoce como bombeo de cavidades progresivas (PCP) "bomba de tornillo". El (PCP) ha sido utilizado en casi todas las industrias (química, metalurgia, minera, textiles, tratamiento de residuos, agua y el petróleo) por una amplia variedad de aplicaciones.

Los primeros esfuerzos serios para su implementación como sistema artificial de producción fue en la década de los 80's, el (PCP) ha experimentado un surgimiento gradual en la industria petrolera. A partir de 2002 se estima que existen aproximadamente 50,000 pozos que operan con este sistema en el mundo (pozos terrestres y costa afuera).

El sistema artificial de producción por bombeo de cavidades progresivas (PCP), es una bomba de desplazamiento rotativo positivo. Esa bomba es accionada desde la superficie por medio de varillas que transmiten la energía a través de un motor eléctrico ubicado en la superficie. Este sistema se adapta en particular a los fluidos viscosos, aun si éstos transportan partículas sólidas, y/o flujos bifásicos de gas y petróleo.

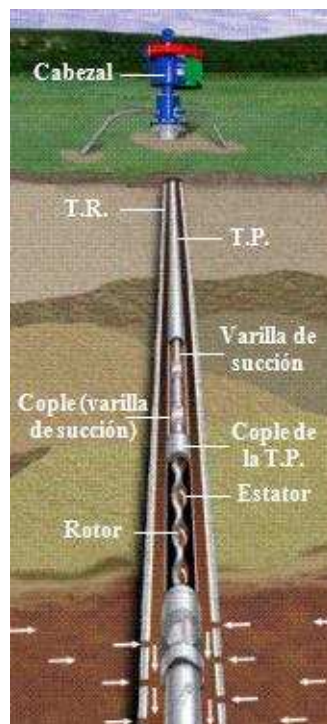


Fig. 1.3 Esquema representativo del sistema artificial de bombeo de cavidades progresivas ^[31].

El sistema de (PCP) posee características únicas, con lo cual se puede hacer mejor frente a otros sistemas artificiales de producción. La mayor característica que presenta este sistema es su eficiencia que va de un 50% hasta 70%, rango superior comparado con las eficiencias que se obtienen con los demás sistemas artificiales de producción.

Aplicaciones:

- Aceite pesado y bitumen hasta con 50% de arena.
- Aceite medio limitado en el contenido de H₂S.
- Aceite dulce ligero limitado en el contenido de aromáticos.
- Extracción de agua de pozos productores de gas.
- Yacimientos maduros con flujo de agua.
- Áreas visualmente sensibles.

Algunas ventajas adicionales del sistema de (PCP) incluyen:

- La capacidad de producir fluidos con alta viscosidad, grandes concentraciones de sólidos, y moderado porcentaje de gas libre.
- Bajo flujo interno de corte, lo cual limita al fluido emulsificante por la agitación.
- No hay válvulas o partes reciprocantes que obstruyan, bloqueo de gas o desgaste.
- Fácil instalación y operación, así como bajo mantenimiento.

El sistema (PCP) también presenta algunas desventajas. La más prominente de éstas son las limitaciones con respecto a la capacidad de bombeo, levantamiento y la compatibilidad de elastómero. A continuación se resume en forma de lista la aplicación actual, las principales limitaciones y dificultades operativas asociadas con el sistema de (PCP):

- Producción: máximo = $800\text{m}^3/\text{d}$ (5000 bl/d).
- Profundidad: máximo = 3000m (9500pies).
- Capacidad de temperatura: máximo = 170°C (330°F).
- Sensibilidad al medio líquido: el elastómero puede hincharse o deteriorarse debido a la exposición con determinados fluidos.
- Tendencia del estator de la bomba para mantener un daño permanente, si bombea en seco incluso en períodos cortos.

Estas limitantes están siendo rápidamente superadas con el desarrollo de nuevos productos y mejoras en el material y el equipo de diseño.

1.1.3.1 Principios de bombeo.

Las bombas del sistema (PCP) son bombas de desplazamiento positivo, que consisten en dos partes principalmente, un rotor y un estator. La geometría del montaje es tal que consiste en dos o más series de cavidades, espirales y separadas. Cuando el rotor gira en el interior del estator, las cavidades comienzan su movimiento en espiral de un extremo del estator hasta el otro, desde la entrada hasta la salida, creando la acción de bombeo. Como cada cavidad progresa a partir de la entrada a la salida, la presión aumentará de la presión de entrada a la presión de salida, en forma lineal ^[5].

1.1.4 Bombeo Electrocentrífugo.

En general el sistema de (ESP) tiene un funcionamiento como cualquier bomba eléctrica que comúnmente se utiliza en otras aplicaciones industriales. En el caso de la industria petrolera en las operaciones del sistema (ESP), la energía eléctrica es transferida al pozo a través de cables eléctricos conectados a una fuente de energía. Estos cables eléctricos son colocados a un costado de la tubería de producción. El cable eléctrico proporciona la energía necesaria para accionar el motor eléctrico. El motor transmite energía al fluido, en forma de energía hidráulica (pistón), lo que transportará al fluido hasta la superficie ^[6].

El bombeo electrocentrífugo (ESP) es considerado generalmente para manejar altos volúmenes de hidrocarburos y para altas profundidades, entre los sistemas artificiales de producción. El sistema (ESP) requiere de muy poco espacio en superficie para su instalación y es adaptable en pozos muy desviados, por arriba de los 80°.



Fig. 1.3 Esquema representativo del sistema artificial de bombeo electrocentrífugo ^[31].

Adaptable a una variedad de configuraciones de pozos, los sistemas (ESP) pueden utilizarse en pozos con 4 1/2" tubería corta (casing), y son excelentes candidatos para pozos verticales con dog legs "pata de perro" (agujero torcido). Normalmente, estos sistemas son los mejores para manejar altos volúmenes de fluidos, a grandes profundidades y varias condiciones, es decir, los sistemas (ESP) pueden manejar hasta 60,000 bpd, aunque también pueden funcionar para producciones muy bajas de 200 bpd en profundidades mayores a 15,000 pies con altas viscosidades y el manejo simultáneo de aceite, gas y agua; este sistema es muy eficaz cuando se manejan sólo líquidos. Aunque no por esa razón no se aplica en pozos con producción de gas libre, ya que la bomba centrífuga tolera cantidades determinadas de gas libre.

La automatización del sistema requiere de análisis, monitoreo y control, requieren de muy poco mantenimiento y son muy resistentes a los ambientes corrosivos que se pueden presentar en el pozo ^[5].

Entre las limitaciones para la aplicación del sistema (ESP) se encuentran la disponibilidad de la electricidad, la profundidad de operación se ve limitada por el rango de potencia del motor eléctrico, no se aplica a múltiples terminaciones de pozos, no es adecuada para determinadas profundidades por las altas temperaturas en los yacimientos, no se recomienda su instalación en pozos que producen por debajo de 150 bpd, el costo del cable es elevado, éste puede fallar debido a las altas temperaturas, corrosión y a un mal manejo del mismo, se pueden presentar fallas en el motor por altas temperaturas, corrosión, abrasión, alta RGA y a la liberación de gas ^[6,7].

Las bombas electrocentrífugas no desplazan una cantidad fija de fluidos como lo hacen las bombas de desplazamiento positivo, en cambio, generan una cantidad relativamente constante de incremento de presión en la corriente de flujo. Una unidad típica de bombeo electrocentrífugo consiste de un motor eléctrico, una sección de sello, una sección de admisión, una bomba centrífuga multietapa, cable eléctrico, tablero superficial de control, transformadores, etc.

Puede incluir equipo de protección para el cableado, registradores (centinelas) de presión de fondo, temperatura, etc. El motor eléctrico trabaja relativamente a una velocidad constante. La bomba y el motor están directamente unidos con el protector o una sección de sello. La potencia es transmitida al equipo subsuperficial a través de un cable eléctrico trifásico que se introduce junto con la tubería de producción ^[8].

1.1.5 Bombeo Hidráulico.

El bombeo hidráulico es otro método artificial de producción, el cual puede clasificarse como:

1. Bombeo Hidráulico Tipo Pistón.
2. Bombeo Hidráulico Tipo Jet.



Fig. 1.3 Esquema representativo del sistema artificial de bombeo hidráulico ^[31].

1.1.5.1 Bombeo Hidráulico Tipo Pistón.

El proceso de generación y transmisión de energía varía según el sistema que se utilice. En el caso del sistema de bombeo hidráulico tipo pistón, este proceso se efectúa mediante un fluido conocido como “fluido motor”, el cual es inyectado a presión al pozo mediante una unidad de potencia. El fluido motor es introducido al pozo a través de una tubería que se introduce junto con la tubería de producción, y que accionará los pistones, tanto del motor como de la bomba, instalada abajo del nivel de trabajo del fluido producido por el pozo.

Este proceso está basado en el principio hidráulico el cual establece que: “Si se ejerce una presión sobre la superficie de un líquido contenido en un recipiente, dicha presión se transmite en todas direcciones con la misma intensidad”. Esto significa que la presión proporcionada en la superficie al fluido motor, es la misma que se aplica a los pistones de la unidad de bombeo, obligándolos a impulsar a los fluidos producidos por el yacimiento hacia la superficie.

1.1.5.1.1 Sistemas de inyección del fluido motor.

Al mencionar el sistema de inyección del fluido motor, se indican dos formas de inyección: una en un sistema abierto (circuito abierto) y otra en un sistema cerrado (circuito cerrado). Ambos sistemas presentan el mismo manejo del fluido motor desde los tanques de almacenamiento hasta la unidad de bombeo, pero difieren en la forma en que el fluido motor retorna a la superficie después de haber operado la unidad. A continuación se presentan las características fundamentales de estos sistemas:

1.1.5.1.1.1 Sistema abierto.

El sistema de inyección de circuito abierto fue el primero que se utilizó debido a que su aplicación es más sencilla y económica. En este sistema, el fluido motor retorna a la superficie mezclado con el aceite producido, ya sea a través de la tubería de descarga o por el espacio anular de la tubería de revestimiento, producción o inyección, dependiendo del equipo subsuperficial con que se cuente. La aplicación de este sistema presenta las siguientes ventajas:

- La adición del fluido motor limpio en los pozos que contienen altos porcentajes de agua salada, debido a esto se reducirá dicho porcentaje y por consiguiente disminuye el efecto de corrosión.
- La adición de un aceite ligero puede reducir la viscosidad en pozos que producen aceites pesados.

Este tipo de sistema también presenta algunas desventajas; entre ellas está el incremento del volumen bruto que deberá ser tratado en la superficie para poder obtener un aceite limpio y continuar con la operación.

1.1.5.1.1.2 Sistema cerrado.

El sistema de inyección en circuito cerrado es el método más completo con el que se cuenta actualmente. En este sistema el fluido motor retorna a la superficie, independientemente del aceite que se esté produciendo, el cual fluye hasta el tanque almacenador y forma un circuito cerrado. Esto se logra por medio de una tubería adicional, que está alojada en un dispositivo mecánico llamado “cámara de fondo”, instalada en el fondo del pozo. En este sistema se utiliza un elemento de empaque en la

unidad de bombeo, que permite aislar al fluido motor del producido. Las principales ventajas que se tienen al implementar este sistema son:

- La medición exacta del fluido producido por el pozo.
- La determinación del desgaste sufrido por la unidad de bombeo al incrementar el volumen del fluido motor utilizado en la lubricación de los pistones, lo cual facilita la operación de mantenimiento de la unidad ^[1].

Las principales causas que provocan mal funcionamiento en el sistema son:

- Falta de fluido motor.
- Obstrucciones del flujo.
- Fugas.
- Cambios de condiciones del pozo.
- Desgaste del motor.
- Contaminación del fluido motor.
- Alta producción de gas.
- Corrosión.
- Abrasividad.
- Taponamientos, etc.

1.1.5.2 Bombeo Hidráulico Tipo Jet (a chorro).

El bombeo hidráulico tipo jet es un sistema artificial de producción especial, a diferencia del tipo pistón, no ocupa partes móviles y su acción de bombeo se realiza por medio de transferencia de energía entre el fluido motor y los fluidos producidos.

Las bombas jet operan bajo el principio de Venturi. El fluido motor a alta presión entra en la tobera de la bomba, la presión se reduce debido a la alta velocidad del fluido motor. Esta reducción de la presión hace que el fluido producido se introduzca en la cámara y se mezcle con el fluido motor.

En el difusor, la energía en forma de alta velocidad es convertida en una alta presión, suficiente para bombear el fluido motor y fluido producido a la superficie. Por lo anterior, en el sistema de bombeo hidráulico tipo jet únicamente se tendrá el sistema abierto de fluido motor.

En este sistema artificial de producción se requiere de una presión de succión relativamente alta para evitar la cavitación, además de que la eficiencia mecánica es baja; sin embargo, presenta ventajas sobre el bombeo hidráulico tipo pistón como son:

- Permite manejar cualquier tipo de fluidos (aún contaminados).
- La bomba subsuperficial es de fácil instalación.
- Se adapta a cualquier profundidad en el pozo.
- Permite obtener gastos mayores.

Al igual que el bombeo hidráulico tipo pistón, el tipo jet utiliza agua o aceite como fluido motor. Las bombas jet generalmente requieren más potencia superficial que las bombas tipo pistón ya que son menos eficientes ^[1].

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL BOMBEO MECÁNICO.

El Bombeo Mecánico es un sistema artificial de producción (SAP) en el cual el movimiento del equipo de bombeo subsuperficial se origina en la superficie y se transmite a la bomba por medio de una sarta de varillas de succión.



2.1 Mecanismos superficiales.

Las conexiones superficiales, tienen como función principal el conducir los hidrocarburos producidos por el pozo, a la línea de descarga del mismo, hasta la batería de separación; todas ellas deben ser para presiones no menores de 1000 lb/pg².

El sistema de bombeo mecánico está provisto de diversos elementos o accesorios superficiales que son elegidos de acuerdo al diseño del propio sistema. A continuación se enunciarán los accesorios más importantes:

- Preventores.
- Estopero.
- Grampas (mordaza).
- Válvula de control.
- Válvula de retención.
- Varilla pulida.

Los accesorios de seguridad y control son mecanismos que van instalados en el árbol de válvulas de los pozos con bombeo mecánico y que van a auxiliar en el caso que sea necesario impedir que el aceite producido por el pozo, quede expuesto a la atmósfera. De esta manera se evitara la contaminación del ambiente, además de que proporciona seguridad al personal de operación o de mantenimiento.

Los mecanismos de seguridad más utilizados para arreglos superficiales en pozos con bombeo mecánico son los siguientes:

- a) Preventores.
- b) Estopero.

2.1.1 Preventores.

Estos mecanismos de seguridad se diseñan principalmente, para impedir en caso de que sea necesario, el paso de fluidos al exterior. Sólo se pueden accionar cuando la unidad de bombeo mecánico no está operando, ya que en su interior tiene unos sellos de hule llamados “Rams”, que aprietan la varilla pulida para sellar y evitar el paso de hidrocarburos.

En el caso del preventor doble “E” LP-15, los “Rams” pueden sellar aun sin la presencia de la varilla pulida, ya que son para un rango de diámetro de 0 a 1 ½”. Los Preventores son vitales para llevar acabo el cambio de hule (sellos) del estopero colocado en la parte más alta del

árbol, también son vitales para evitar la salida de hidrocarburos a la atmósfera, cuando por rotura de la sarta, la varilla pulida se vaya al fondo del pozo. Los “Rams” son accionados mediante dos vástagos, tornillos laterales impulsados por medio de movimientos alternados para abrir o cerrar, normalmente cuando la unidad de bombeo mecánico está operando deben permanecer abiertos (Figura 2.1) ^[9].

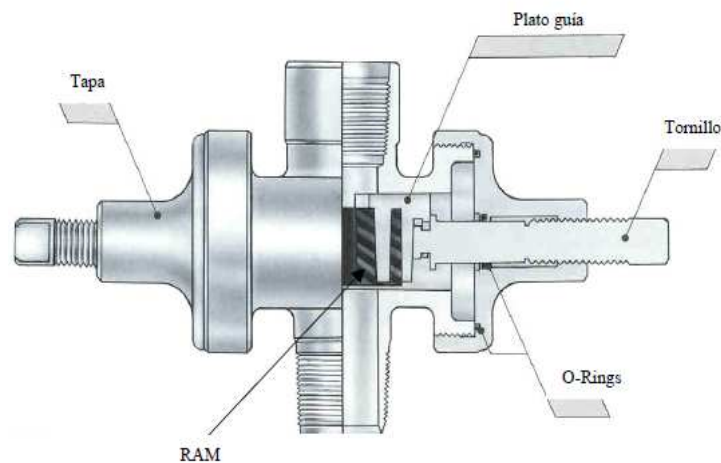


Figura 2.1 Preventor doble “E” LP-15^[9].

2.1.2 Estopero.

Mecanismo de seguridad que se localiza en la parte superior del árbol de válvulas para el sistema de bombeo mecánico, sobre la tee y cuya función principal es la de contener los fluidos para que no se manifiesten en el exterior. En la actualidad se han diseñado estoperos provistos además del mecanismo preventor, para mejorar su funcionamiento dentro de los mecanismos de seguridad en el árbol de bombeo mecánico. La función principal del estopero, es sellar sobre la superficie de la varilla pulida por medio de los hules sello construidos con elastómero, resistentes al rozamiento, a diferencia del preventor, en el estopero se cambian dichos hules sello cada vez que sea necesario, esto con la finalidad de evitar que se presente una fuga de aceite en la parte superior de éste, cuando la unidad de bombeo mecánico está operando. En la operación de cambiar los sellos, se suspenderá la operación de la unidad y se cierran los “Rams” del preventor, para poder trabajar con facilidad en el estopero ^[9].

2.1.2.1 Estopero preventor Hércules DPSB.

Es un mecanismo de seguridad que consta básicamente de tres secciones, en las cuales van distribuidos una serie de sellos cónicos, los cuales se van ajustar por medio de un conjunto de

tornillos alternadamente, con la finalidad de impedir el paso de fluidos al exterior, permitiendo libremente el desplazamiento de la varilla pulida (Figura 2.2) [7].

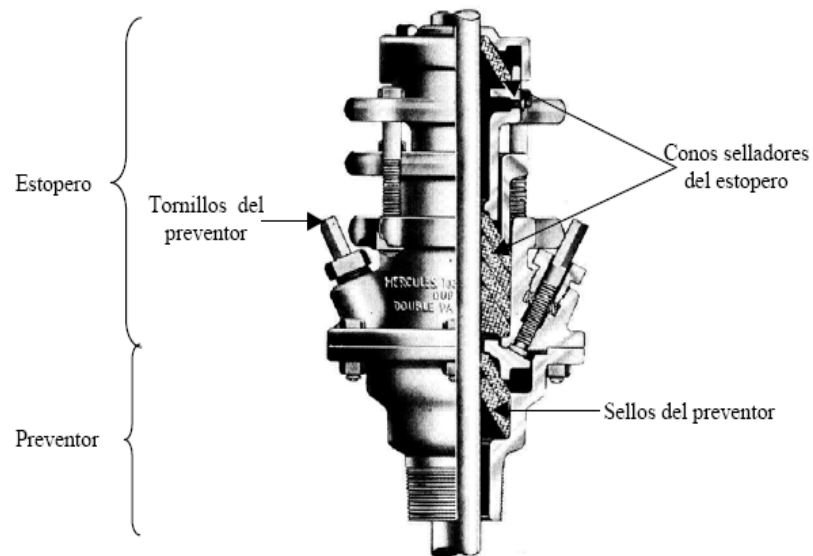


Figura 2.2. Estopero preventor “Hércules DPSB” [7].

2.1.3 Grampas (mordaza) para varilla pulida.

Estos dispositivos sirven para conectar el block colgador a la varilla pulida, estas grampas pueden ser de uno, de dos o tres tornillos (Figura 2.3), incrementándose, por supuesto la seguridad, con el aumento del número de los mismos. Por razones económicas, sin embargo, es recomendable el uso de un solo tornillo para pozos someros y conforme aumenta la profundidad es preferible las grampas con mayor número [7].



Figura 2.3 Grampas [7].

2.1.4 Válvulas de control.

Son mecanismos que se utilizan para el control de fluidos (líquido o gas). En el caso de las conexiones superficiales todas son de 2"Ø, sin embargo, las válvulas laterales del árbol son para 3000 lb/pg² bridadas, mientras que la de flote y la de las conexiones superficiales son de 1000 ó 2000 lb/pg², normalmente roscadas.

Las que más se emplean comprenden dos grandes grupos con sus diferentes modelos:

- a) Válvulas de compuerta con sello de metal en hule.

Dentro de este tipo de válvulas las de mayor uso son las Cameron Flex-seal, estas válvulas están conformadas por dos secciones metálicas que al unir las forman el cuerpo de la válvula, en su interior cuentan con una serie de partes que son las que se encargan de efectuar el sello. Estas válvulas sin embargo, no se utilizan en los pozos de bombeo mecánico.

- b) Válvulas de compuertas con sello de metal con metal.

Las válvulas de compuerta de sello metal con metal más utilizadas para el control de flujo de gas, aceite y otros fluidos son las válvulas Cameron.

2.1.4.1 Válvulas Cameron.

Las válvulas Cameron que más se utilizan en el Activo de Producción son las del tipo "F" (Figura 2.4). Esta válvula está construida con doble asiento, de vástago no desplazable, lubricada y de conducto sin restricciones. Sus características y funciones principales son:

1. Asientos de rotación positiva: Esta característica le permite a la válvula ser más confiable cuando se utiliza para operación de control de flujos, ya que al cerrar, los fuertes gatillos con los que cuenta en su parte interna, engranan con los dientes situados en el diámetro exterior de los anillos de asientos, haciendo girar éstos una fracción de vuelta, por lo que en cada operación de la válvula, se remueve el aceite sobre dichos anillos, distribuyendo el soporte uniformemente en el mismo, mejorando su confiabilidad y aumentando su vida útil.
2. Ensamble de compuerta y asiento: Están diseñadas de tal manera que pueden ser remplazadas con relativa facilidad y rapidez.

3. Compuerta sólida: Esta característica ayuda a evitar que entren sedimentos de la línea, a la cavidad interna del cuerpo, así como también disminuye la posibilidad de que ésta se atore por presión atrapada, cuando la presión arriba de ésta se purga.
4. Rodamiento de empuje: En la parte superior cuenta con dos rodamientos de empuje de agujas de alta capacidad de carga, que absorbe las cargas cuando la compuerta se abre o cierra reduciendo el esfuerzo torsional a un minuto.
5. Prensaestopa: El empaque del vástago es confinado a la caja de empaquetadura por una prensaestopa, esto implicara que los rodamientos puedan ser removidos con seguridad aunque exista presión en la válvula.
6. Contra asiento: El vástago de la válvula cuenta con un hombro que asienta contra la parte superior interna de la brida del bonete, el cual sella la caja de la empaquetadura.
7. Perno cortable del vástago: Esta parte se construye con determinadas dimensiones, que al cerrar o abrir la válvula, inadvertidamente se llegara aplicar una alta torsión al volante, el perno se romperá antes de que se rompa el vástago u otra parte interna de la válvula.
8. Orificio para inyección de grasa: Este orificio se encuentra colocado en la brida del bonete y está equipado por una válvula de inyección de alta presión.
9. Cuerpo: el cuerpo del bonete y la válvula están construidas de acero de aleación ^[9].

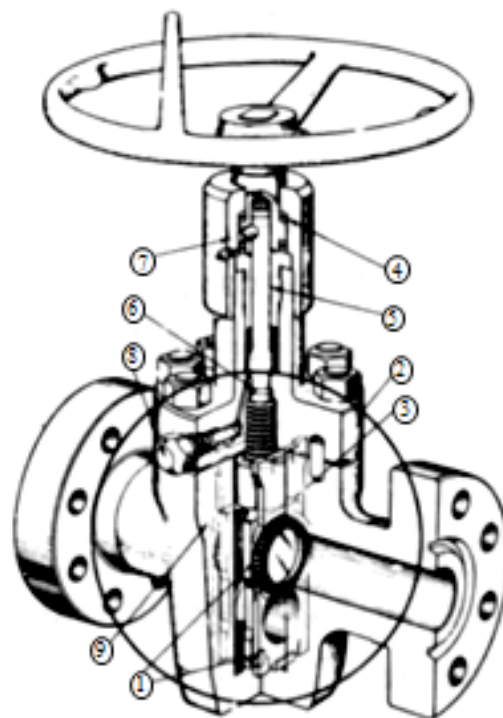


Figura 2.4. Válvula Cameron tipo "F" ^[9].

2.1.5 Válvulas de retención (check).

El objetivo principal de este modelo de válvulas, comúnmente conocido como “check”, es permitir el paso del flujo en una sola dirección, impidiendo así el regreso del fluido cuando se presenten contra presiones (Figura 2.5) ^[3].



Figura 2.5 a. Válvula tipo Pistón.

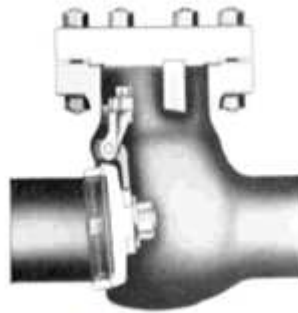


Figura 2.5 b. Válvula tipo charnela.

Figura 2.5 Válvulas de retención ^[3].

2.1.6 Varilla pulida.

Es la unión directa entre la sarta de varillas de succión y el equipo superficial, en otras palabras es el eje final de la sarta de varillas, su función es: soportar el peso total de la sarta de varillas; brindar una superficie lisa y libre de imperfecciones a la prensaestopa para evitar la fuga de fluidos al exterior; además de acoplar la sarta de varillas a la unidad de bombeo.

Diámetro externo (pg)	Longitud (pie)	API Pin (pg)	Peso (lb/pie)	Tamaño del elevador (pg)
1 1/4	25	5/8, 3/4, 7/8	4.2	7/8
1 1/2	25	3/4, 7/8	6.0	1
1 5/8	25	7/8	7.2	1
1 3/4	25	7/8	8.2	1

Tabla 2.1 Dimensiones de las varillas pulidas ^[4,18,13].

Las varillas pulidas y sus acoplamientos son fabricados de acuerdo a la norma API 11B (Tabla 2.1), por lo cual las roscas son fabricadas bajo el proceso de forjado en caliente. Así se asegura la calidad de la rosca para mejorar su resistencia a la abrasión y la corrosión; superficialmente las varillas son terminadas en acabado espejo, con el propósito que no dañe los sellos del estopero (Figura 2.6), estas varillas son manufacturadas a partir de diferentes materiales, algunos de los cuales son citados a continuación:

- a) Acero para pistón: Las varillas bajo ésta denominación son fabricadas a partir de un acero al carbón 1045, especialmente para cargas ligeras y pesadas, donde los fluidos de producción no son corrosivos o donde los inhibidores de corrosión son efectivos. Debido a que se emplea un material convencional económico y posee una resistencia a la tensión de $105,000 \text{ lb/pg}^2$, por lo que se recomienda un acoplamiento con varillas de grado “C”.
- b) Acero aleado: Estas varillas son fabricadas a partir de acero aleado molibdeno-cromo 4140, es ideal para cargas ligeras y pesadas. Debido a sus características ésta puede ser utilizada en pozos con ambientes de moderada corrosión, ya que su dureza y resistencia a la corrosión y abrasión han sido mejoradas con tratamientos superficiales. Se estima que esta varilla posee una resistencia a la tensión de $125,000 \text{ lb/pg}^2$ y puede utilizarse con cualquier varilla.
- c) Acero “Norloy”: Éste es un acero aleado con níquel-cromo-molibdeno 8620, el cual es ideal para cualquier tipo de carga y ambiente corrosivo. Posee una resistencia a la tensión de $100,000 \text{ lb/pg}^2$ y puede ser utilizado con varillas de grado “K”.
- d) Acero inoxidable: Las varillas pulidas de acero inoxidable son manufacturadas a partir de acero inoxidable 431, poseen una resistencia a la tensión de $115,000 \text{ lb/pg}^2$ y es la mejor opción para ambientes de severa corrosión incluyendo ambiente de agua salada. Puede ser utilizada para la producción de pozos inyectados con vapor y para cualquier tipo de carga.
- e) Cromada: Las varillas cromadas son manufacturadas a partir de aceros AISI 4140, y recubiertas con cromo para obtener una dureza de 65 Rockwell “C”(ver Apéndice), poseen una resistencia a la tensión de $125,000 \text{ lb/pg}^2$ y son ideales para carga media a pesada en ambiente de moderada corrosión y excesiva abrasión ^[4].



Figura 2.6 Varilla pulida ^[26].

2.2 Varilla de succión.

La varilla de succión es el elemento que constituye el enlace entre la unidad de bombeo mecánico superficial y la bomba subsuperficial, la cual se coloca en o cerca del intervalo de producción. El movimiento vertical de la unidad de bombeo mecánico es transmitido a la bomba subsuperficial por medio de la varilla de succión, es considerada una de las partes principales del equipo, ya que éstas tienen que soportar cambios de esfuerzos, temperatura y corrosión. Las varillas de succión de acero son hechas en un crisol abierto y proceso de horno eléctrico, se funden en lingotes, los cuales se vacían dentro de una moldura, estos a su vez, después de las condiciones superficiales son recalentados y laminados en barras.

El constituyente básico de las varillas de succión de acero es el fierro (Fe). La mayoría contiene cerca de 90%, sin embargo, el Fe puro haría a la varilla demasiado suave y frágil por lo cual se le añaden diferentes metales para aumentar su resistencia.

Las aleaciones para las varillas de succión se limitan a los siguientes elementos son: carbón (C), manganeso (Mn), silicón, níquel (Ni), cromo (Cr), vanadio (V), boro (B), molibdeno (Mo), cobre (Cu):

El carbón (C), es el elemento esencial en el acero, por su aumento o disminución en las varillas es posible alcanzar mayor o menor resistencia. Una de las principales ventajas de los elementos aleados, es que aumentan la resistencia del acero, disminuyendo el contenido de carbón (C).

El manganeso (Mn), actúa como desoxidante, en combinación con el azufre (S), hace al acero menos quebradizo, así como más duro y más resistente a la corrosión. Varios tipos de varillas de succión que contienen cerca del 1% de Mn, el cual aumenta la resistencia considerablemente, más que la que se puede obtener por un tipo de varilla carbón-acero. Se ha encontrado también que en pozos corrosivos no es adecuada la varilla de succión de Mn.

El silicón, es muy útil como desoxidante en aceros del alto grado de refinación, la mayoría de las varillas de succión contiene cerca del 0.15 al 0.35% de este elemento.

El níquel (Ni), tiene un efecto de endurecimiento en el acero para evitar la disolución del fierro; en muchos pozos existe la presencia de agua salada la cual está saturada con H_2S , el cual tiene un efecto de desgastar (picar) y hacer quebradizas a las varillas, esto puede ser contrarrestado con la adición de níquel.

El cromo (Cr), forma un carburo estable y contribuye considerablemente a la dureza del acero, mejora la resistencia a la corrosión del acero en el aire y en otro ambiente distinto, se encuentra en alto porcentaje en todos los aceros tipo inoxidable.

El vanadio (V), incrementa el endurecimiento del acero aún cuando se presenta en pequeñas cantidades. Fomenta una estructura granular buena y retarda el ablandamiento del acero cuando es sometido a altas temperaturas.

El boro (B), se utiliza para incrementar el endurecimiento del acero. Es muy poderoso y únicamente se agrega en porcentajes del 1%.

El molibdeno (Mo), es uno de los elementos de aleación más potentes y resistentes, pero a pesar de eso no se puede considerar tan efectivo como el carbón.

El cobre (Cu), es agregado para resistir los ambientes corrosivos. Los aceros que contienen más del 0.6% de cobre, tienden a endurecerse precipitadamente.

La selección de las varillas.- La adecuada selección se basa principalmente en un análisis anticipado de las condiciones de bombeo y un conocimiento de la actuación de varias clases de varillas operando bajo condiciones similares. Por lo tanto, uno de los factores importantes es la carga y las condiciones del fluido. La carga máxima es determinada por la profundidad de bombeo y el volumen de fluido elevado, suponiendo que la instalación ha sido propiamente diseñada, para fines prácticos se calculan las varillas en un medio no corrosivo, en el caso de que el fluido contenga fluidos corrosivos como H_2S y CO_2 respectivamente, los cuales reaccionarán químicamente con las varillas de succión y la tubería causando desgastes (picaduras) en diferentes grados.

- El ácido sulfhídrico (H_2S) ataca al acero formando una capa de sulfuro de hierro (FeS) liberando al hidrógeno, el cual hace quebradizo al acero y aumenta el efecto de corrosión.
- Para combatir el efecto del ácido sulfhídrico (H_2S) se usan inhibidores tales como el bicarbonato de sodio (HCO_3Na) y otros formadores de películas, tales como cromato de sodio ($NaCr_2$) y dicromato ^[2,3,7].

2.2.1 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; se utilizan 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 de tipo C quedan en punto crítico, generalmente para pozos de alta producción y que no manejen ácido sulfhídrico [2,3,4].

2.3 Bomba subsuperficial.

Las bombas subsuperficiales son utilizadas en los sistemas de bombeo mecánico convencional pertenecen a la familia de bombas de desplazamiento positivo del tipo reciprocante. Estas bombas realizan su trabajo gracias a la acción de un juego de válvulas que le permiten encapsular el fluido durante su ciclo de succión, para posteriormente incrementar su presión a través de la aplicación directa de fuerza durante su ciclo de descarga. Debido a que durante su operación, las bombas subsuperficiales transfieren energía al fluido durante dos fases en el ciclo de operación, estas bombas son conceptuadas como bombas reciprocantes de doble acción. El hecho de que la bomba subsuperficial sea una bomba de desplazamiento positivo le permite trabajar con fluidos de alta viscosidad sin reducir su eficiencia, además de que pueden soportar altas presiones de descarga sin variar el flujo del bombeo. De ahí, que este sistema sea muy utilizado para la producción de pozos con crudos pesados y extrapesados, además de pozos someros.

Otra ventaja de ser una bomba de desplazamiento positivo es que no es necesario una elevada presión de succión lo que es ideal para la producción de yacimientos maduros o en declinación cuya relación gas-aceite (RGA) es menor a 200 m³/m³.

El arreglo tubular de la bomba subsuperficial es ideal para su uso en el levantamiento artificial, lo cual, adicionado a su bajo consumo de energía, baja tasa de falla y la capacidad para acoplarse a motores eléctricos, hidráulico o de combustión interna, le hacen una alternativa que debe estar presente en cualquier estudio para la selección de un sistema artificial.

Tal vez su principal desventaja es el manejo de gas, es decir, la limitante en volumen de gas que puede manejar la bomba cambia según su tipo y dimensiones, pero se emplea un valor de 50% en fracción como límite operacional. Fracciones superiores de gas a este valor pueden generar fallas en la apertura de las válvulas, golpe de fluido, a demás de una pérdida de eficiencia que se manifiesta en una reducción en la producción y en la posibilidad de que se presenten fallas en sus componentes.

Otra limitante a considerar es el manejo de arena, aunque se tiene poca evidencia acerca de los límites de tolerancia a la arena, la experiencia de campo señala que el valor límite de concentración de arena se encuentra alrededor del 5%(V/V), pero en realidad esto dependerá del tamaño y dureza del grano adicionalmente al valor de la concentración. Aun que no son limitantes, también es importante considerar en el diseño del sistema la presencia de parafinas, incrustaciones, asfaltenos y fluidos corrosivos, ya que de ello dependerá una buena selección de los materiales que lo componen ^[4,12].

2.3.1 Clasificación, nomenclatura y tipo de bombas.

La norma API-11AR define la nomenclatura a emplear para clasificar las bombas subsuperficiales de acuerdo a sus características, dicha clasificación se basa en su forma de instalación (anclaje), es así que las bombas se clasifiquen en: bombas de inserción y de tubería (Tabla 2.2).

Bombas insertables	Émbolos metálicos		Émbolos de empaque	
	Pared gruesa	Pared delgada	Pared gruesa	Pared delgada
De barril estacionario y anclaje superior.	RHA	RWA	-----	RSA
De barril estacionario y anclaje inferior	RHB	RWB	-----	RSB
De barril viajero y anclaje inferior.	RHT	RWT	-----	RST
Bombas de tubería	TH	-----	-----	-----

Tabla 2.2 Designación del tipo de bomba según la norma API-11AR ^[4,13].

Dentro de las bombas de tubería existen dos subdivisiones:

- a) Bombas de pared gruesa.
- b) Bombas de pared delgada.

Mientras que para el grupo de las bombas de inserción se dividen en:

- a) Bombas de barril fijo y anclaje inferior.
- b) Bombas de barril fijo y anclaje superior.
- c) Bombas de barril fijo y doble anclaje o mixto (superior e inferior).
- d) Bombas de barril viajero y anclaje inferior.

Adicionalmente existen dos variantes las cuales incluyen bombas de gran volumen las cuales reciben el nombre de bombas de revestimiento y bombas de inserción de barril viajero. El resto de las configuraciones que puedan existir se clasifican como “bombas especiales”.

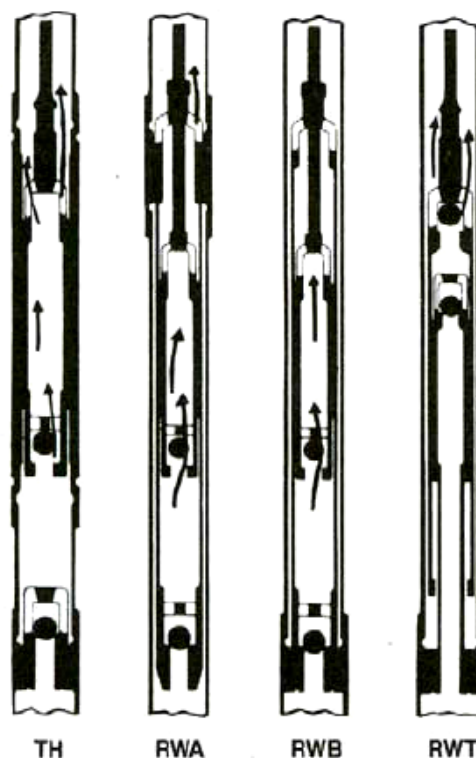


Figura 2.7 Esquemas de la clasificación de las bombas API, de izquierda a derecha: bombas de tubería (TH), bombas de inserción de anclaje superior (RWA), bombas de inserción de anclaje inferior (RWB) y bombas de inserción de barril viajero (RWT) ^[12,16].

La nomenclatura completa de las bombas incluye los siguientes datos: diámetro nominal de la tubería, diámetro de la bomba, tipo de bomba incluyendo el tipo de barril y ubicación del anclaje, longitud del barril, longitud del émbolo y longitud total de las extensiones (Figura 2.8).

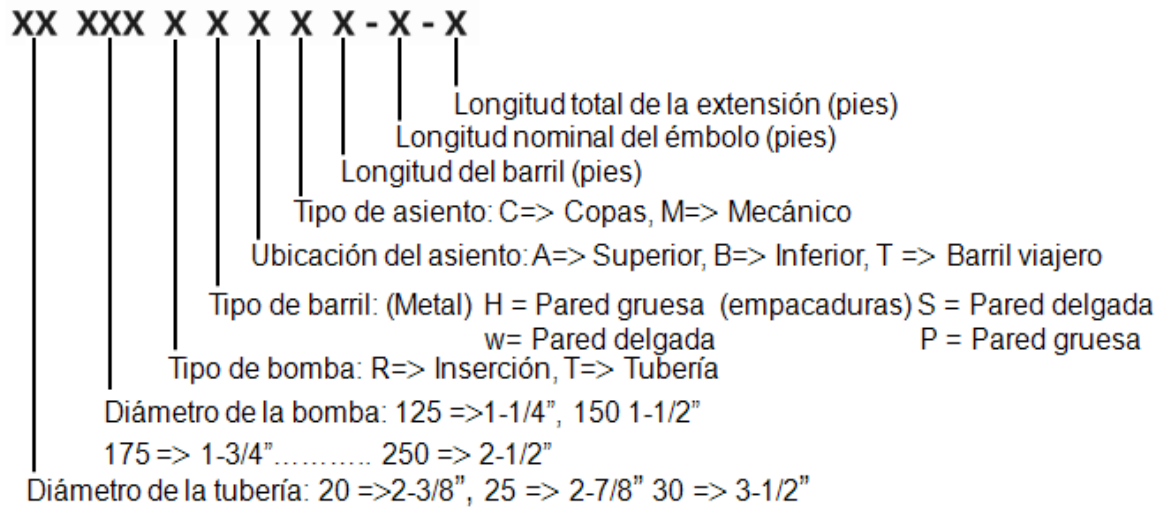


Figura 2.8 Nomenclatura API para bombas subsuperficiales [12].

Adicionalmente y según el tipo de servicio que la bomba va a prestar, se requiere la siguiente información adicional: material del barril, material del émbolo, material de la válvula, ajuste y longitud de cada extensión.

A fin de conocer las ventajas y desventajas de los tipos de bombas, a continuación se realizará una breve descripción de cada una de ellas.

2.3.2 Bomba de tubería o tubería de producción.

Las bombas de tubería son aquellas bombas cuyo barril es instalado junto con la tubería de producción, por lo que éste se encuentra fijo con respecto a la tubería mientras que el émbolo es el elemento móvil, el cual es accionado por la sarta de varillas.

En estas bombas la válvula de pie se encuentra fija al barril, mientras que la válvula viajera se encuentra instalada dentro del émbolo, durante su operación el émbolo se mueve dentro del barril y el fluido que se produce, fluye a través del espacio anular entre la sarta de varillas y la tubería de producción. Las bombas de tubería son fáciles de instalar y sólo deberá cuidar el espacio entre la válvula de pie y el émbolo, es recomendable incluir un niple de drenaje en la terminación a fin de desalojar el fluido que se encuentre dentro de la tubería antes de realizar el cambio o instalación del equipo (Figura 2.9).

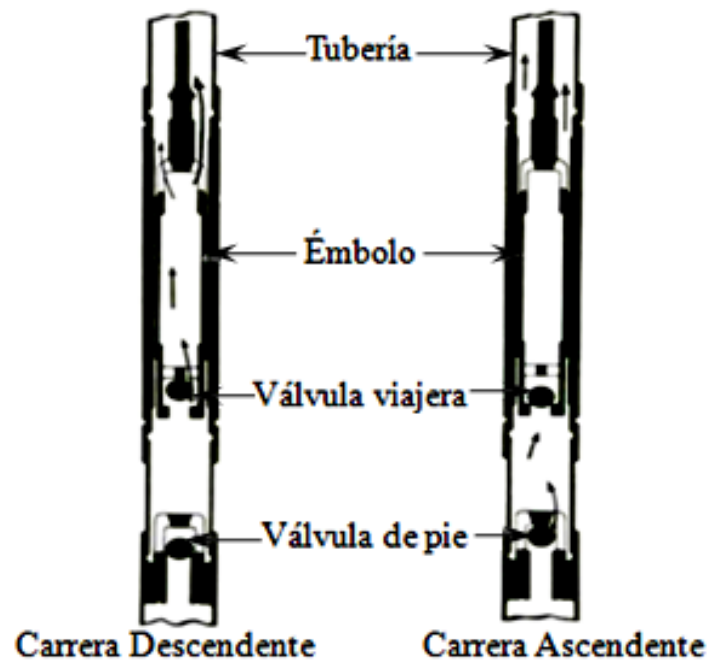


Figura 2.9 Bomba de tubería o tubería de producción ^[12].

Este tipo de bomba se ve afectada por los efectos de elongación de la tubería y las varillas por lo cual son utilizadas en pozos someros (en la práctica se recomienda utilizarlas a profundidades inferiores a los 5,000 pies), tomando la precaución de anclar la tubería a profundidades mayores de 2,500 pies. Además estas bombas son recomendables para el manejo de pozos de alta viscosidad, pozos de grandes cargas (como los pozos que presentan un corte de agua alto).

Por el contrario, no se recomienda su uso en pozos con alta RGA ($2,000 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Ya que son bombas que poseen una baja capacidad de compresión al igual que debe tenerse precaución de utilizarlas en la producción de yacimientos de arenas no consolidadas, ya que por ser bombas de alta producción propiciarán el arrastre de arena.

2.3.3 Bombas de inserción de barril fijo.

Las bombas de inserción son aquellas donde el émbolo y el barril son ensamblados dentro de un paquete de forma tal que al ver su exterior sólo se observa un tubo con un puerto de entrada y otro de salida. Dicho paquete cuenta con un dispositivo de anclaje, el cual permite fijar la bomba a la tubería de producción, pero en el caso de las bombas de inserción de barril fijo, el barril se encuentra fijo a la tubería de producción mientras que el émbolo es libre y se mueve por la acción de la sarta de varillas. Para este tipo de bombas las válvulas de pie se

encuentran instaladas en la parte inferior del barril mientras que la válvula viajera se encuentra en el extremo inferior del émbolo, es por esto que la válvula de pie suele ser de mayor tamaño que la válvula viajera.

Su operación es similar a las bombas de tubería, por lo que el fluido producido fluye a través del espacio anular entre la tubería de producción y la sarta de varillas, para ello el fluido debe pasar a través de unos agujeros colocados en la parte superior del barril que comunican a la zona superior del émbolo con la tubería de producción. Además tiene la misión de ser el soporte del paquete de bomba-émbolo mientras la bomba desciende dentro de la tubería y esta sirve como herramienta de rotación o impacto durante el proceso de anclaje a la tubería.

Estas válvulas son de bajo volumen (generalmente hasta 600 bpd), y de menor longitud que las bombas de tubería, dependiendo del anclaje se clasifican en bombas de anclaje superior, inferior o mixto (Figura 2.10).

2.3.3.1 Bombas de barril fijo y anclaje inferior.

Estas bombas se recomiendan para pozos profundos que no tengan problemas de corrosión o manejo de arena y por lo que se recomienda producir con emboladas largas, operan con mayor eficiencia cuando trabaja con un separador subsuperficial de gas (Figura 2.10a).

2.3.3.2 Bombas de barril fijo y anclaje superior.

Las bombas de anclaje superior poseen características similares a las bombas de anclaje inferior, con la única ventaja de que pueden ser utilizadas en pozos con alta concentración de arena, es decir, en estas bombas el fluido se descarga inmediatamente arriba del ancla, lo que evita que la arena u otros materiales caigan en el interior de la bomba. Son adecuadas para pozos que producen gas, ya que, el barril en este tipo de bombas actúa como un separador interno de gas por lo que se recomienda su uso en pozos con alta RGA ($2,000 \text{ m}^3/\text{m}^3$). No se recomienda su utilización en pozos muy profundos, debido a que pueden presentar fallas por la tensión y la presión diferencial entre el interior y exterior del barril de trabajo (Figura 2.10b).

2.3.3.3 Bombas de barril fijo y anclaje mixto.

No se trata de una bomba estándar por el contrario se trata de un diseño especial utilizado en pozos con una concentración de arena muy elevada y en pozos que manejan fluidos muy corrosivos tales como CO_2 o H_2S . La ventaja de tener anclajes tanto en la zona superior como

en la zona inferior asegura la estabilidad de la bomba por lo que se recomienda se utilicen en pozos que producen con largas emboladas o pozos profundos (Figura 2.10c).

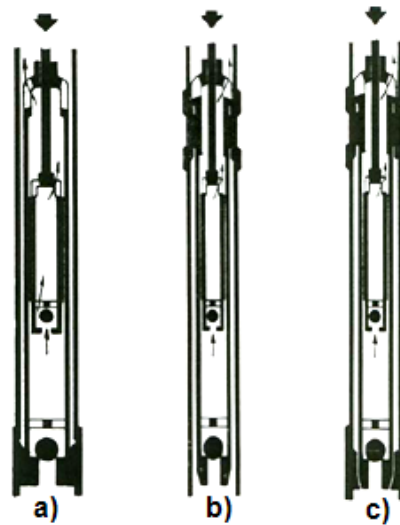


Figura 2.10 Bombas de inserción de barril fijo, de izquierda a derecha: bomba de anclaje inferior, bomba de anclaje superior y bomba de anclaje mixto^[4].

2.3.3.4 Bomba de inserción de barril viajero y anclaje inferior.

Las bombas de inserción de barril viajero son un caso particular de las bombas de inserción cuya finalidad es evitar la decantación de la arena durante el ciclo de no succión de la bomba. Para ello el émbolo se invierte y ancla a la tubería de producción mientras que en su interior es colocada la válvula de pie; el barril en este caso se encuentra conectado a la sarta de varillas y se mueve según la acción de este elemento. En el extremo superior del barril se encuentra la válvula viajera, que esta bomba suele ser de mayor dimensión que la válvula de pie, la cual se encuentra en el extremo superior del émbolo (Figura 2.11).

La posición en la que trabaja el émbolo, hace que éste sea un tubo hueco, a través del cual fluyen los fluidos durante el ciclo de succión, el émbolo posee cambios de diámetros externos y previenen la decantación de arena hacia su parte inferior. La posición en la que trabaja el émbolo asegura también que exista cierta agitación de la arena producto del funcionamiento de las válvulas, lo que evita que la arena se deposite y detenga el movimiento del barril.

Por su configuración geométrica son bombas con muy poca capacidad de compresión, por lo que no es recomendable su uso en pozos con alta RGA ($2,000 \text{ m}^3/\text{m}^3$) o alta producción, de igual forma no se recomienda su uso para pozos profundos por la posibilidad de que colapse el émbolo durante la carrera descendente. Tampoco deben ser utilizadas en pozos de alta

viscosidad, por lo que su rango de aplicación se restringe sólo a pozos con alta concentración de arena.

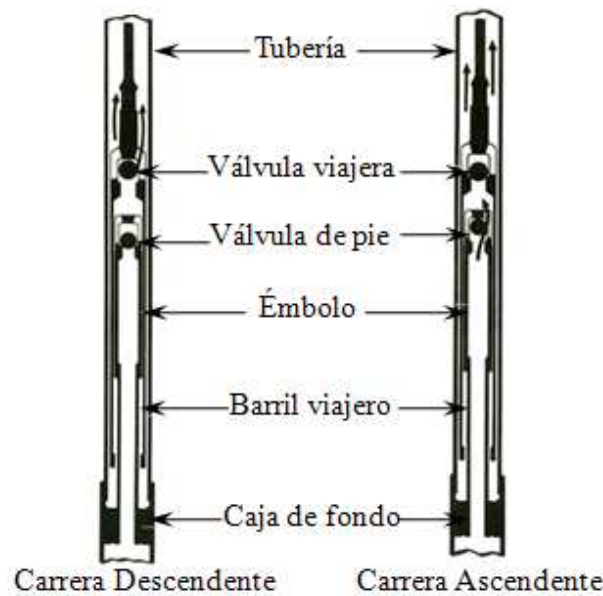


Figura 2.11 Bomba de inserción de barril viajero [4].

2.3.4 Bombas de revestimiento.

Las bombas de revestimiento son otro tipo de bombas de inserción de gran volumen que pueden llegar a diámetros de barril de 7 ¼” por lo que no se encuentran especificadas por la norma, se distinguen de las bombas de inserción tradicionales en su forma de instalación y en la manera en como operan (Figura 2.12).



Figura 2.12 Bomba de revestimiento [4].

Las bombas de revestimiento están compuestas por un sistema de anclaje y sello (similar al de los empacadores) y otro sistema que es la bomba o paquete émbolo-barril.

El sistema de anclaje y sello es instalado inicialmente a la profundidad deseada, este componente tiene como misión aislar el revestimiento corriente arriba de la succión a fin de garantizar que todos los fluidos a producir pasen a través de la bomba. Este dispositivo posee un tubo inferior que comunica al yacimiento con la succión de la bomba, en el interior de dicho tubo existe una sección de anclaje dentro de la cual se instalará la bomba. La bomba en todos los aspectos es similar a las bombas de anclaje inferior, ya que cuenta con un dispositivo de anclaje mecánico que le permite posicionarse y fijarse dentro del tubo inferior.

La sección de anclaje y sello se instala en la tubería de producción, esta sección posee una herramienta de “on-off” que permite la liberación de la tubería una vez instalada de manera que se pueda extraer la tubería dejando anclada la sección de sello. La bomba es igualmente instalada con la tubería pero en este caso, la tubería hace la misma función de la varilla en las bombas de inserción.

Al operar la bomba de revestimiento, ésta produce los fluidos por el espacio anular entre la tubería de producción y la tubería de revestimiento, que además de generar ahorros, reduce las cargas por fricción. Otra ventaja de estas bombas son los volúmenes de producción que se pueden alcanzar, los cuales son cercanos a los 1,500 bpd.

Este sistema no puede ser utilizado en pozos con alta RGA ($2,000 \text{ m}^3/\text{m}^3$) debido a los problemas de pérdida de eficiencia que ocurren a consecuencia del manejo de gas (se debe recordar que la bomba maneja todo el gas mas todo el fluido de producción). Este sistema tampoco puede ser utilizado en pozos con alta profundidad o con problemas de arena o corrosión, ya que existen limitaciones operativas, debido a que se puede producir cargas muy elevadas, que en consecuencia, ocasionen problemas de rotura de varillas o de la tubería de revestimiento.

2.3.5 Bombas especiales “bomba de doble etapa”.

La bomba de doble etapa es semejante en operación y construcción a las bombas de tubería y de inserción; la diferencia estriba en que en el extremo superior del barril se instala una válvula anular o “válvula de anillo” por lo que es conceptuada una bomba especial dentro de la norma API. La válvula anular crea una cámara superior dentro del barril y ubicada encima del émbolo, dicha cámara sirve como una región de presión regular ya que la válvula anular

abrirá sólo cuando la presión de dicha cámara sea mayor que la presión en la tubería, de manera que la válvula viajera opera sin las cargas establecidas por la presión dentro de la tubería de producción. Esta bomba usualmente es ensamblada utilizando válvulas círculo “A” que minimizan las restricciones de flujo; sin embargo, puede adaptarse a cualquier bomba estándar.

El arreglo aprovecha la doble acción del pistón para mejorar la capacidad de levantamiento de la bomba, incluso si se manejan elevadas fracciones de gas; ya que en estos casos la cámara superior funge de cámara de compresión evitando los problemas de “bloqueo de gas”.

Tal arreglo fue propuesto por Shell en 1964 como una solución al problema de producir crudos espumantes en el campo Tía Juana de la costa oriental del Lago Maracaibo, en Venezuela. Posteriormente, este diseño ha sido utilizado en pozos con alta RGA ($2,000 \text{ m}^3/\text{m}^3$) y en la producción de pozos inyectados con vapor (Figura 2.13).

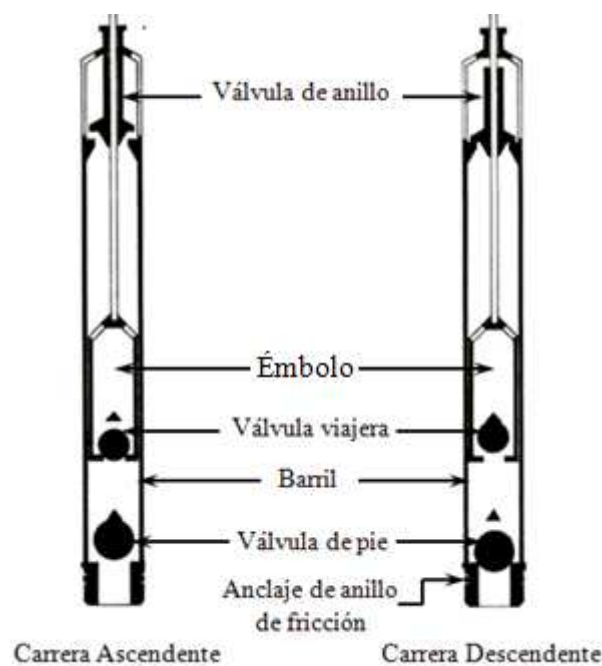


Figura 2.13 Bomba de doble acción con válvula círculo “A” [4].

2.3.6 Bombas especiales “bomba de succión múltiple o en paralelo.

Las limitaciones de volumen que tienen las bombas de inserción pueden solventarse mediante el uso de arreglos de succión múltiples o en paralelo, debido a que se puede incrementar la producción hasta en un 66% más, según el diseño utilizado.

Existen varios arreglos disponibles para esto. En la (Figura 2.14), se presenta uno de los más utilizados en el cual se une una bomba de barril estacionario con otra de barril viajero para conseguir el efecto de doble succión, la bomba de barril estacionario se coloca en la parte inferior del arreglo mientras que la bomba de barril viajero se ubica en la parte superior. Analizando su funcionamiento se observa que durante la carrera ascendente la válvula fija se abre permitiendo el ingreso del fluido hacia dos puntos de la bomba, uno ubicado en la cámara de compresión tradicional y otro en un barril flotante que crea una cámara superior, ambas cámaras se comunican entre si por medio de un tubo que tiene la función en ocasiones de émbolo fijo para la bomba superior.

Luego mientras el arreglo se encuentra en su ciclo de descenso, el barril viajero de la bomba superior y el émbolo de la bomba inferior propiciarán la compresión del fluido dentro de la bomba a tal punto que causará la apertura de la válvula viajera.

Este arreglo en ocasiones presenta problemas de operación de la válvula al manejar fluidos de alta viscosidad o altas fracciones de gas, por ello es recomendable utilizar este arreglo sólo en pozos de baja viscosidad (alta gravedad API), o corte de agua elevados (mayores al 70%) y de baja RGA ($200 \text{ m}^3/\text{m}^3$).

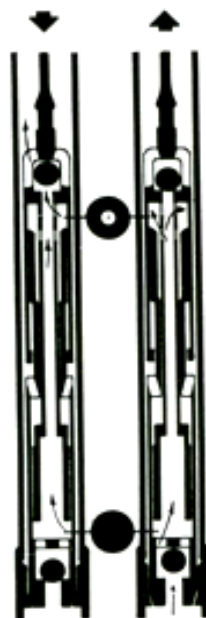


Figura 2.14 Bomba de doble succión o arreglo en paralelo ^[4].

2.4 Descripción de los componentes de una bomba subsuperficial.

Las principales componentes de una bomba subsuperficial son: a) cilindro o barril de trabajo, b) émbolo o pistón, c) válvula viajera y d) válvula de pie.

2.4.1 Barril de trabajo o cilindro.

Es el elemento dentro del cual se mueve el émbolo en su recorrido ascendente y descendente, éste debe ser lo suficientemente largo para adaptarse a la carrera máxima del émbolo.

2.4.1.1 Materiales utilizados para la construcción del barril de trabajo.

- HI-BRIN. Diseño para pozos con alto contenido de arena y gas sulfhídrico. Se fabrica utilizando un proceso de endurecimiento denominado “nitrocicle”.
- NITRELINE. Barril construido para alta resistencia mecánica y alta resistencia a la corrosión. Lleva el mismo proceso de endurecimiento que el anterior (proceso nitrocicle). Uso general.
- HI-HARD. El barril lleva una capa de endurecimiento de cromo del 5% y con el proceso de endurecimiento “nitrocicle”. Proporciona alta resistencia a la abrasión y a la corrosión por CO₂.
- KROM-J-DEE. El barril lleva una capa de endurecimiento de cromo, este material le proporcionará una alta resistencia a la abrasión y a la corrosión. Se recomienda usarlo en pozos que producen arena y CO₂.
- SIRVERLINE. Este barril se recomienda utilizarlo en pozos con fluidos no corrosivos y en donde la arena no sea un problema serio ^[2].

2.4.2 Émbolo o pistón.

Es el elemento móvil de la bomba. El émbolo es construido a partir de una amplia variedad de materiales siendo los más utilizados los aceros aleados, aleaciones de bronce y acero inoxidable. Éste con una dureza menor que la del barril, debido a que es conceptualizado el elemento de sacrificio del sistema. Habitualmente posee acabados superficiales pulidos o son cromados para disminuir el desgaste en su superficie, reducir la abrasión, así como disminuir la fricción en caso de entrar en contacto con el cilindro (Figura 2.15).



Figura 2.15 Émbolos ^[29].

Existen dos principales tipos de émbolos: a) émbolos totalmente metálicos de superficie completa o anclada, b) émbolos con empaque suave. Los émbolos metálicos presentan dos variantes adicionales: aquellos que son manufacturados de una sola pieza, o de la unión de dos piezas los cuales son llamados émbolos compuestos.

Los émbolos de empaque suave son aquéllos en cuya superficie se instalan anillos poliméricos con la finalidad de ayudar a controlar el escurrimiento, permitir el manejo de arena y reducir el desgaste.

2.4.3 Válvula viajera y válvula de pie.

Éste se encuentra formado por un sistema de bola y asiento (Figura 2.16), la válvula que permite la descarga del fluido de yacimiento al interior de la bomba recibe el nombre de válvula de escape o mejor conocida como válvula viajera; por otra parte, la válvula de pie es aquella que consta generalmente de una válvula “check” con sello de bola. El montaje de esta válvula permanece estacionaria durante el ciclo de bombeo. Son construidas a partir de materiales cerámicos y metálicos he incluso existen algunas construidas a partir de materiales compuestos como carburo de tungsteno.

La bola posee una superficie pulida por lo que, en ocasiones la válvula es sometida a un tratamiento de cromado. El asiento puede ser de dos tipos: acuñado o plano, el uso de un tipo u otro se basa en el material de la bola, éste suele ser construido de aceros aleados pero en ocasiones puede ser manufacturado a partir de aleaciones de bronce, aleaciones de níquel, bronce y aluminio o de carburo de tungsteno, posee una dureza similar a la bola pero, presenta la diferencia de que son agregados ciertos compuestos que reducen la fricción y evita que la bola se incruste en el asiento; tales como molibdeno y manganeso. En el caso de ambientes corrosivos suelen emplearse aleaciones de níquel, cobre y aluminio.



Figura 2.16 Bola y asiento (válvula viajera y válvula de pie) ^[15].

2.4.4 Ancla de asiento.

Es un dispositivo para retener una bomba de varillas en su posición de trabajo. Puede ser colocada en la parte superior o en el fondo de una bomba de barril fijo.

2.4.5 Ancla de gas.

Cuando se tienen determinadas condiciones tales que exista una cantidad considerable de gas libre en los fluidos del pozo, es recomendable instalar un ancla de gas, la cual tiene como función separar al 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 alojará en la entrada de la bomba. Esto le da al gas liberado la oportunidad para separarse y elevarse a las partes más altas del niple perforado donde puede retornar al espacio anular, de esta manera todo o casi todo el gas escapará antes 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 Fallas de la bomba subsuperficial.

La bomba subsuperficial presenta fallas por distintas situaciones, estas pueden deberse a presencia de gas, lo que impide su correcto funcionamiento, pues las válvulas al estar en movimiento no permitirán un llenado óptimo del barril, los problemas también se pueden presentar en las válvulas, debido al contenido de sólidos en los fluidos, y como consecuencia se presenta abrasión en las válvulas (de pie y viajera), lo que impedirá que se tenga un sello adecuado para impedir que exista fuga del líquido.

2.5 Funcionamiento de una bomba subsuperficial (ciclo de bombeo).

Cuando la unidad de superficie se encuentra en el punto muerto inferior, la válvula de pie y la válvula viajera están cerradas (Figura 2.17a). Al comenzar la carrera ascendente, la presión de fondo y el efecto de succión producido por el movimiento del émbolo, permiten la apertura de la válvula de pie, y de este modo el volumen desplazado por el émbolo es ocupado con fluido succionado del pozo.

Al mismo tiempo la columna de fluido ejerce una presión sobre la válvula viajera, lo que ocasiona que esta permanezca cerrada durante la carrera ascendente (Figura 2.17b). El fluido continua llenando la bomba hasta llegar al punto muerto superior (Figura 2.17c). En este momento, la válvula de pie se cierra, ya que la presión sobre ésta, debido a la columna de líquido es mayor a la presión que ejerce el pozo. Esto provoca que la bola sea impulsada hacia el asiento y retenga el líquido que trata de regresar. A partir de aquí comienza la carrera descendente del émbolo, produciendo un efecto de compresión sobre el fluido que se encuentra alojado en el barril de la bomba (Figura 2.17d). Por ser el petróleo un fluido poco compresible, al ponerse en contacto la válvula viajera con éste, la presión se incrementa y es obligada a abrir.

El émbolo continua su viaje descendente, mientras el fluido es transferido a la tubería de producción (Figura 2.17e), hasta llegar al punto muerto inferior (Figura 2.17f), (en la carrera descendente la bomba sigue movilizand o fluido, puesto que la varilla pulida ocupa un volumen que desaloja líquido del barril). Una vez que el émbolo llega al punto muerto inferior, se cierra la válvula viajera y se repite el ciclo de bombeo.

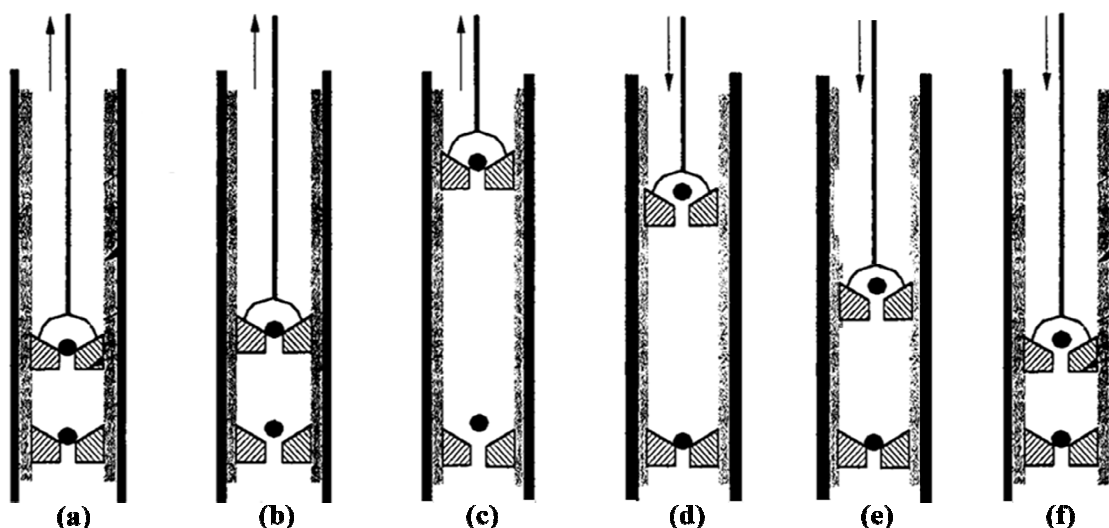


Figura 2.17 Funcionamiento de una bomba subsuperficial (ciclo de bombeo) ^[7,12]

2.6 Selección del tamaño de la bomba.

Para una profundidad y un flujo de producción dado, existe un tamaño óptimo de las bombas subsuperficiales que asegura la producción del pozo. Si se incurre en errores de dimensionamiento pueden ocurrir dos cosas: (a) si se selecciona un émbolo muy largo entonces se pueden provocar cargas muy elevadas e innecesarias a los equipos de superficie que puede resultar en una menor carrera efectiva del émbolo y (b) si la bomba seleccionada es muy pequeña entonces se necesita una velocidad de operación muy elevada, lo cual puede resultar en cargas inerciales que generarían elevados picos de torque en los equipos de superficie produciendo su falla.

Para evitar estos errores se recurre a la siguiente fórmula, con la que se podrá determinar el desplazamiento teórico de la bomba en el fondo (PD), donde A_p es el área de la sección transversal del émbolo [pg^2], S_p será la carrera efectiva del émbolo [$pg/embolada$] y N es la velocidad de bombeo [spm].

El factor básico para la selección adecuada del tamaño de la bomba es el flujo teórico de la bomba, que es función del diámetro del émbolo, la carrera efectiva y la velocidad de operación (Ec. 1). En la práctica suele agruparse el área del émbolo y los factores de conversión en un solo factor denominado “constante de la bomba” (K), cuyo valor puede ser obtenido de tablas (Tabla 2.3).

Diámetro del émbolo (pg)	Área del émbolo (pg ²)	Constante K	Diámetro del émbolo (pg)	Área del émbolo (pg ²)	Constante K
5/8	0,307	0,046	1 3/4	2,405	0,357
3/4	0,442	0,066	1 25/32	2,488	0,370
15/16	0,690	0,102	2	3,142	0,466
1	0,785	0,117	2 1/4	3,976	0,590
1 1/16	0,886	0,132	2 1/2	4,909	0,728
1 3/8	0,994	0,148	2 3/4	5,940	0,881
1 1/4	1,227	0,182	3 3/4	11,045	1,640
1 1/2	1,767	0,262	4 3/4	17,721	2,630

Tabla 2.3 Constantes de las bombas ^[4].

Otra manera para calcular el desplazamiento teórico de la bomba es mediante la constante de bombeo “K”, la cual como se puede observar en la (Tabla 2.3) se obtiene de acuerdo con el tamaño del émbolo y es determinada por la siguiente ecuación:

$$K = 0.148A_p \dots \dots \dots (2)$$

Así finalmente sustituyendo la ecuación (2) en la ecuación (1) se obtiene la siguiente expresión:

$$PD = KS_pN \dots \dots \dots (3)$$

La forma de relacionar el desplazamiento de la bomba con el gasto de producción en la superficie es a través de la “eficiencia volumétrica” de la bomba (E_v), la cual se define como la razón entre el gasto de producción en superficie y el desplazamiento teórico de la bomba

$$E_v = \frac{q_o}{PD} = \frac{q_o}{KS_pN} \dots \dots \dots (4)$$

La eficiencia volumétrica expresa la diferencia que existe entre el gasto producido en superficie y el desplazamiento de la bomba. En general el gasto de producción suele ser menor que el gasto teórico calculado, ello se debe a tres factores: la carrera efectiva, la fricción por gas y los factores volumétricos de los hidrocarburos.

2.7 Sarta de tubería y varillas.

La energía generada en la superficie es transmitida hacia el fondo del pozo por medio de la sarta de varillas. Este elemento opera de manera cíclica, sumergido dentro de una mezcla de líquido y gas, la cual en ocasiones puede ser erosiva y corrosiva. La correcta selección y dimensionamiento de las varillas es considerada la parte más crítica de un sistema de bombeo

mecánico, ya que de ello depende el consumo de energía y la frecuencia de fallas del sistema. Los diámetros de las varillas se incrementan en un octavo de pulgada (1/8”), comenzando por la de media pulgada (1/2”) y terminando en una y media pulgada (1 1/2”) (Tabla 2.4).

Diámetro de varillas	Área metálica en pg^2	Peso de las varillas en aire lb / pie	Constante de elasticidad en lb / pie
1 / 2	0.196	0.72	1.990×10^{-6}
5 / 8	0.307	1.13	1.990×10^{-6}
3 / 4	0.442	1.63	1.990×10^{-6}
7 / 8	0.601	2.22	1.990×10^{-6}
1	0.785	2.9	1.990×10^{-6}
1 – 1 / 8	0.994	3.67	1.990×10^{-6}

Tabla 2.4 Datos de las varillas según la norma API 11 RP11L ^[13].

2.8 Acoplamientos.

Con lo que respecta a los acoplamientos; existen tres tipos de acoplamientos: (a) los de diámetro completo o normal, (b) los de diámetro reducido y (c) los de diámetro sobre-medida. Sólo se utilizan de clase T, los cuales tienen una dureza Rockwell “C” (ver Apéndice) mínima de 16 y máxima de 23.

Los acoplamientos de diámetro reducido pueden ser usados en tuberías de menor diámetro que las especificadas para los acoplamientos de diámetro completo, no obstante, al reducir el área del acoplamiento también se reducirá la capacidad para soportar cargas durante el ciclo de bombeo, por lo que se deberá tener mayor atención.

Diámetro nominal del acoplamiento	Diámetro externo W	Longitud mínima NL	Diámetro mínimo de la tubería mínima.
1/2	1	2-3/4	1,660 OD
5/8	1-1/4	4	1,990 OD
3/4	1-1/2	4	2-1/6 OD
7/8	1-5/8	4	2-3/8 OD
1	2	4	2-7/8 OD

Tabla 2.5 Dimensiones de los acoplamientos ^[4].

2.9 Fatiga y el Diagrama de Goodman.

Las varillas en operación son sometidas a esfuerzos cíclicos que pueden proporcionar su falla antes de lo previsto, aun si las varillas pudieran resistir los esfuerzos en condiciones estáticas. Para evitar esta falla prematura a consecuencia de los esfuerzos cíclicos, las varillas deben ser

diseñadas a fatiga, lo que implicaría que el esfuerzo de cedencia deberá corregirse, mientras que el criterio de diseño a utilizarse deberá basarse en alguna de las teorías de fatiga de los materiales.

En el diseño a fatiga de las varillas se emplea la teoría de Goodman, la cual estudia el efecto del incremento de los esfuerzos medios y de la magnitud del esfuerzo, a fin de predecir la vida útil del elemento. Sin embargo, dentro de la ingeniería petrolera se emplea una variante de esta teoría en la cual los esfuerzos medios son englobados dentro de un parámetro de “tensión” y es llamada “Goodman Modificado”.

La varilla por definición tiene un límite de resistencia a la fatiga de 35,000 lb/pg², con 100% de variación del rango desde la compresión a la tensión. Este límite de resistencia a la fatiga se define como el esfuerzo al que la varilla se romperá, después de soportar 10 millones de ciclos desde la compresión hasta la tensión; sin embargo, este límite puede variar en función del ambiente en que se trabaje (Figura 2.18).

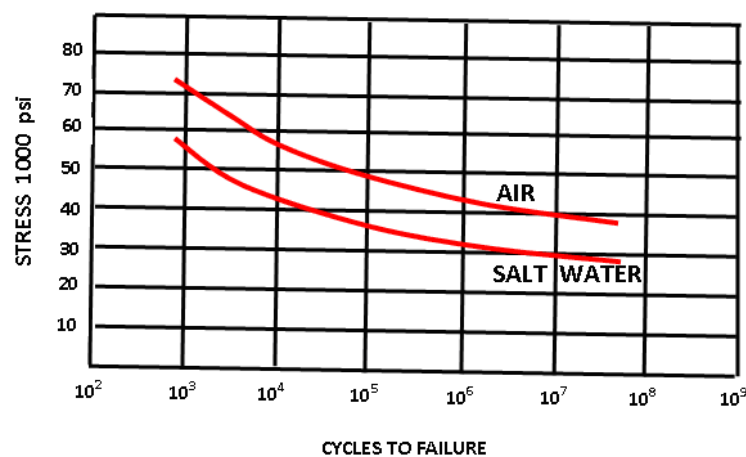


Figura 2.18 Efecto del ambiente en la resistencia a la fatiga ^[4].

Los valores que se establecen en el diagrama de Goodman, son típicos para superficies perfectamente lisas. No obstante, las varillas poseen imperfecciones que actúan como puntos de concentración de esfuerzos, por ello para aplicaciones petroleras, se utiliza un diagrama de Goodman modificado que toma en cuenta las imperfecciones y la exposición a un ambiente diferente al aire (Figura 2.19).

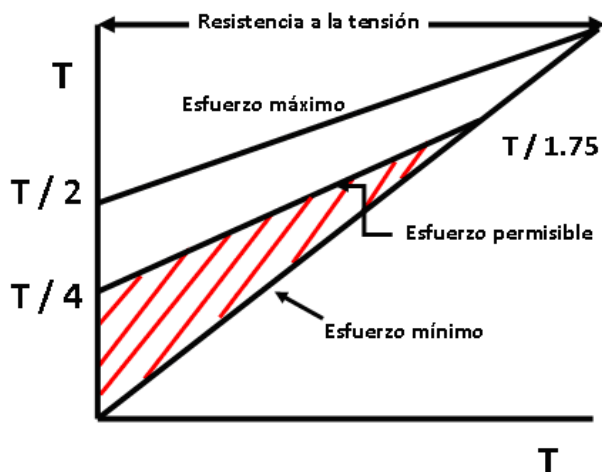


Figura 2.19 Diagrama de Goodman modificado [4,12].

El esfuerzo permisible se puede determinar gráficamente o mediante la ecuación (5).

$$S_A = \left(\frac{T}{4} + 0.5625 \cdot S_{\min} \right) \cdot F_S \dots \dots \dots (5)$$

Donde “S_A” representa el máximo esfuerzo admisible, “S_{min}” es el esfuerzo mínimo, “SF” es el factor de servicio y T es la resistencia a la tensión. Los factores de servicio comúnmente utilizados se presentan en la (Tabla 2.6).

Servicios	API C	API D
No corrosivo	1,00	1,00
Agua salada	0,65	0,90
Sulfuro de hidrógeno	0,50	0,70

Tabla 2.6 Factores de servicio típico para las varillas [4,7].

Para condiciones de operación no corrosivas y sin manejo de arena se pueden emplear como referencia los esfuerzos máximos admisibles presentados en la (Tabla 2.7). Las cargas aplicadas sobre las varillas se evalúan a través de tres parámetros, a saber: (1) porcentaje de rango del diagrama de Goodman, (2) factor de servicio equivalente y (3) nivel de esfuerzos.

El límite de la resistencia a la fatiga, es el rango de esfuerzos bajo el que operan la sarta de varillas dentro del límite de esfuerzos permisibles. De acuerdo a lo antes mencionado es necesario determinar el valor de la tensión máxima que puede resistir la sarta de varillas, este cálculo se determina utilizando la siguiente expresión matemática:

$$S_{MAX} = \frac{W_{MAX}}{A_{top}} \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

W_{max} = Carga máxima en la varilla pulida.

A_{top} = Área de la varilla superior.

Este valor nunca debe exceder el rango de tensión permisible. Para la tensión mínima se utiliza la misma fórmula, pero se considera W_{min} .

Aunque hay situaciones en que se necesitan usar otros grados de varilla, generalmente se usan varillas API grado “C”. Las varillas API grado “D”, se usan cuando la capacidad de la varilla API grado “C” se excede, y cuando no hay ácido sulfhídrico presente.

Máximo esfuerzo permisible	Grado API de la varilla
28,000	Grado C, aleada con manganeso
30,000	Aleaciones intermedias
40,300	Grado D, aleada de alta tensión
50,000	Electra.

Tabla 2.7 Esfuerzos admisibles para ambientes no corrosivos y no abrasivos^[4,7].

El porcentaje de rango del diagrama de Goodman se define a través de la (Ec. 7).

$$\% \text{Goodman} = \left(\frac{S_{MAX} - S_{MIN}}{S_A - S_{MIN}} \right) \dots \dots \dots (7)$$

Estas técnicas permiten comparar los esfuerzos entre diferentes tramos de la sarta de varillas y entre diferentes pozos (Figura 2.20).

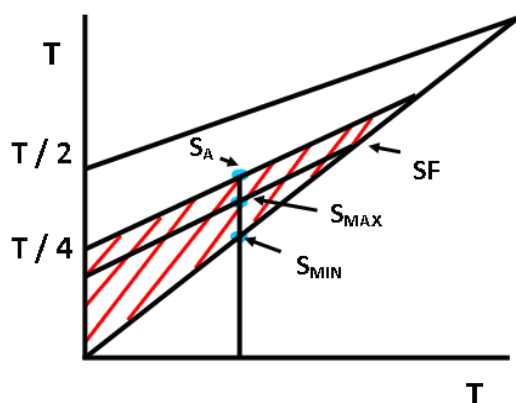


Figura 2.20 Representación gráfica del análisis de Goodman^[4].

El factor de servicio equivalente, se calcula despejando el factor de servicio de la ecuación (4) por lo que tiene forma presentada en la ecuación (8).

$$E. S. F. = \left(\frac{S_A}{\frac{T}{4} + 0.5625 \cdot S_{MIN}} \right) \dots \dots \dots (8)$$

Finalmente, el nivel de esfuerzos se calcula mediante la (Ec. 9).

$$SL = S_{MAX} + (S_{MAX} - S_{MIN}) \dots \dots \dots (9)$$

2.9.1 Elaboración del diagrama 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 lbs.

Grados API	Fuerza mínima de tensión (lbs/pg ²)
C	90,000
D	115,000
K	85,000

Tabla 2.8 Grados API para varillas ^[12, 24].

Paso 2. Coloque líneas horizontales y verticales sobre papel gráfico, después coloque una línea de 45 grados entre éstas. Esta línea de 45 grados establece el **estrés mínimo**. Construya una escala de estrés en la línea central.

Paso 3. Utilizando la escala de estrés coloque el punto T/1.75 en la línea de 45 grados donde T= 115,000, por lo tanto:

$$\frac{115,000}{1.75} = 65,714.28(\text{lb/pg}^2)$$

Paso 4. Sobre la línea central vertical, localice el punto T/4. Trace una línea entre este punto y el punto establecido en el paso 3. Esta línea define el **estrés máximo** permisible.

$$T = \frac{115,000}{4} = 28,750(\text{lb/pg}^2)$$

Paso 5. Coloque el estrés mínimo sobre la línea de 45°. Utilice la escala de estrés mostrada en la línea central vertical.

Paso 6. El estrés máximo permisible es leído directamente arriba en la línea.

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

El punto $S_m / 4$ representa el máximo esfuerzo al cual la varilla puede estar constantemente sometida (S_m es la resistencia mínima a la tensión), la línea de esfuerzo mínimo comienza en la línea de esfuerzo cero y forma 45° con la línea horizontal, la línea de esfuerzo máximo se traza a partir de $S_m / 4$ hasta cruzar la línea de esfuerzo mínimo en el punto $S_m / 1.75$, que es el punto común entre las líneas de esfuerzo máximo y mínimo.

Para determinar el valor de la tensión máxima permisible se utilizará la siguiente expresión matemática:

$$\Delta S_a = S_a - S_{\min} \dots \dots \dots (10)$$

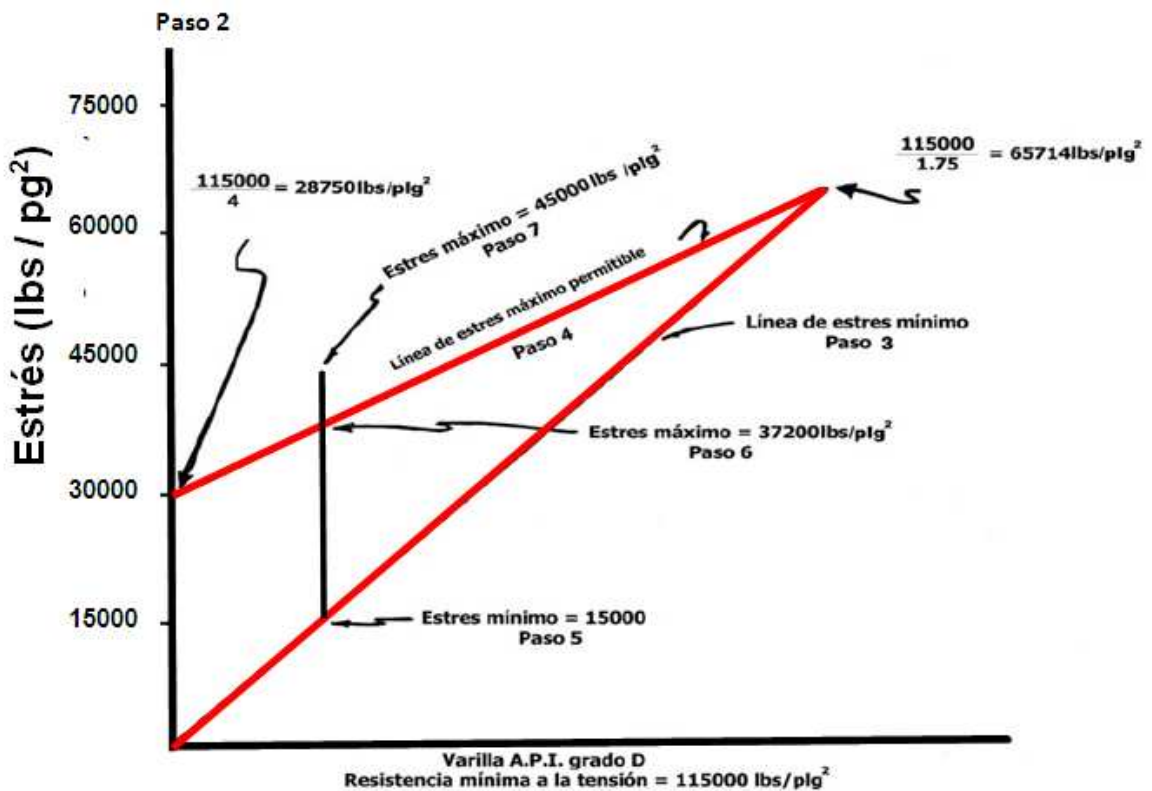


Figura 2.21 Diagrama de Goodman [7, 12, 24].

2.10 Fallas de la sarta de varillas.

Existen tres modos de falla básicos en las sarts de varillas: fallas de rosca, fallas de acoplamiento y fallas del cuerpo de la varilla, las cuales se analizarán a continuación.

2.10.1 Fallas en las roscas de la varilla.

Para entender las fallas que se presentan en las varillas es necesario tener el conocimiento sobre su fabricación y funcionamiento. En la (Figura 2.22), se presenta a detalle la rosca de las varillas, en las que se observa un área con rosca y otra libre conocida como “sobrecorte”, que es utilizada para el mejoramiento en la resistencia del conjunto. La transición entre ambas regiones es suave para evitar puntos de concentración de esfuerzos, razón por la cual las roscas son fabricadas a partir de forjado en caliente en vez del tradicional sistema de corte.

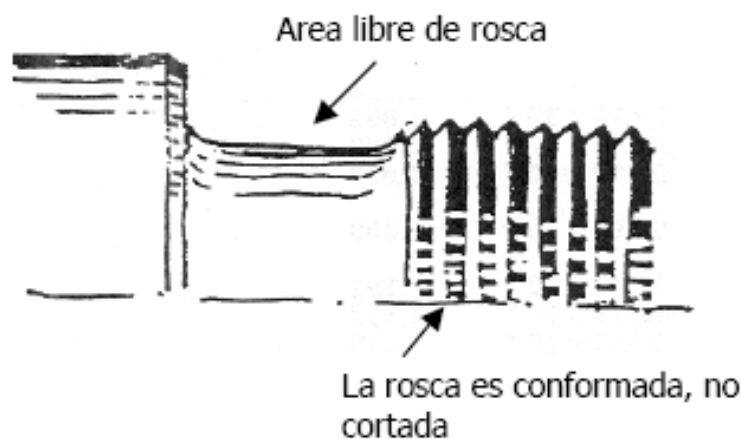


Figura 2.22 Falla por un esfuerzo excesivo cortante sobre la rosca ^[4].

La mayor parte de las fallas se atribuyen a las puntas roscadas y a los acoplamiento, por ello la instalación apropiada es de vital importancia para reducir estas fallas. Las fuerzas que actúan en el área de acoplamiento (Figura 2.23). En esta figura se observa que las caras del acoplamiento y el hombro de la varilla están en compresión, mientras que la rosca y el sobrecorte están en tensión siendo esta tensión máxima en el área de sobrecorte. Si la conexión se realiza de forma apropiada, la tensión en el sobrecorte será mayor que en la rosca, así los esfuerzos fluctuantes se concentrarán en esta región y podrá soportar la tensión.

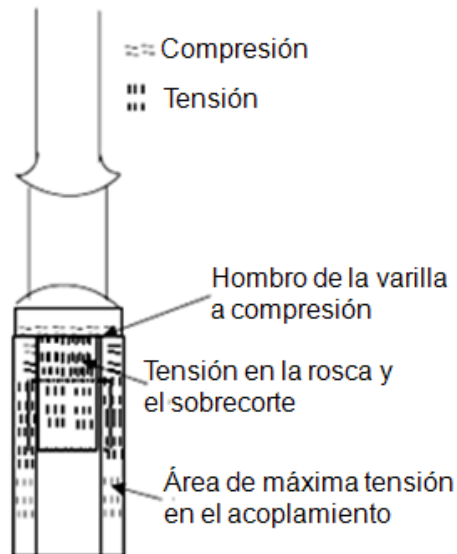


Figura 2.23 Distribución de fuerzas en una junta de varillas ^[4].

Si se separa el hombro de la varilla del conector a consecuencia de una instalación inadecuada, lo siguiente puede ocurrir:

- La punta roscada de la varilla fallará por fatiga. Aún cuando el área transversal de la punta roscada es ligeramente superior a la del cuerpo de la varilla, las roscas son entalladuras concentradoras de esfuerzos y por ende buenas propiciadoras del crecimiento de grietas.
- Entrada de fluido, corrosión y fatiga. Si el medio de trabajo es corrosivo, la entrada de estos fluidos creará un desgaste que actuará como concentrador de esfuerzos. Adicionalmente al no existir esfuerzos en la conexión, la varilla se desenroscará con relativa facilidad.

La norma API recomienda el uso de lubricantes al momento de realizar la conexión y especialmente recomienda que dichos lubricantes contengan inhibidores de corrosión.

A fin de evitar que las varillas sean apretadas excesivamente o que se incurra en un apriete bajo, se emplean galgas calibradas para tal fin. En la (Tabla 2.9), se presentan los desplazamientos recomendados por norma para asegurar un apriete adecuado de las varillas.

1	2		3	
Diámetro de la varilla	1 ^{er} corrida Grado D Desplazamiento		2 ^a corrida Grados C, D, & K Desplazamiento	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1 / 2	6 / 32	8 / 32	4 / 32	6 / 32
5 / 8	8 / 32	9 / 32	6 / 32	8 / 32
3 / 4	9 / 32	11 / 32	7 / 32	17 / 64
7 / 8	11 / 32	12 / 32	9 / 32	23 / 64
1	14 / 32	16 / 32	12 / 32	14 / 32
1 1 / 8	18 / 32	21 / 32	16 / 32	19 / 32

Tabla 2.9 Tabla de los desplazamientos circunferenciales recomendados por la norma API 11 BR para las conexiones de varillas ^[4].

2.10.2 Fallas en los acoplamientos de las varillas.

Debido a que el acoplador tiene mayor área que el cuerpo de las varillas y las roscas, los esfuerzos en estos elementos se mantienen dentro de los límites para la vida infinita, si la sarta se diseña adecuadamente. Sin embargo, algunas fallas ocurren debido a diversos factores, los cuales son detallados a continuación:

2.10.2.1 Corrosión.

Una conexión no apropiada de las varillas permite la entrada de fluidos en la unión que puede causar un desgaste, donde se encuentran los esfuerzos, estas zonas corroídas pueden crecer rápidamente y causar la falla de la instalación. Las zonas más afectadas por lo general son el último hilo de la rosca entre la varilla y el acoplador (Figura 2.24).

2.10.2.2 Abolladuras.

Golpear al acoplador no debe ser una práctica, debido a que cualquier abolladura representa un punto de concentración de esfuerzos y una zona más expuesta a la corrosión (Figura 2.25).



Figura 2.24 Falla por efecto de corrosión ^[25].



Figura 2.25 Falla del acoplador por abolladura ^[25].

2.11 Desgaste entre la varilla y la tubería.

En pozos desviados, horizontales, muy profundos o con tubería sin anclaje, la deformación de la varilla y la tubería puede proporcionar el contacto entre ambos componentes. Si la fricción, producto del contacto es muy severa, se produce el desgaste de ambos elementos propiciando la falla de uno o ambos elementos (Figura 2.26). Debido al tipo de material de la tubería y su poco acabado superficial interno, es común que la tubería falle, lo cual propicia la fuga de fluido hacia el espacio anular entre el revestimiento y la tubería de producción, con la consecuente pérdida de producción. Las recomendaciones más comunes para resolver este problema cambian según sea el caso pero el uso de guías o centralizadores es una excelente opción, también el uso de varillas continuas o anclar la tubería de producción.



Figura 2.26 Falla típica por desgaste de la tubería causado por el contacto entre la tubería y la varilla ^[25].

2.11.1 Fallas en el cuerpo de las varillas.

Las fallas en el cuerpo de las varillas representan entre el 15 al 30 % de los problemas de la sarta de varillas (Figura 2.27). Las causas mas frecuentes de estas fallas son:

- Se supera el esfuerzo máximo admisible.
- Se supera el rango de esfuerzo Goodman.
- Se supera la vida infinita de las varillas.

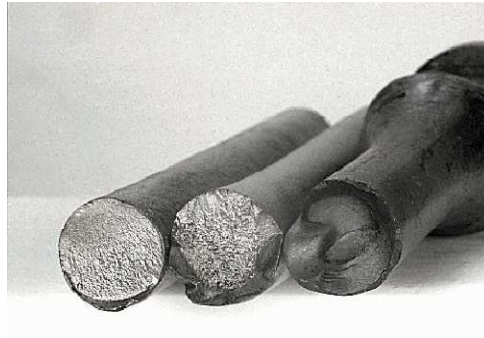


Figura 2.27 Falla típica de fatiga ^[25].

2.11.2 Barra de peso.

La barra de peso (barra de lastre) proporciona peso concentrado por encima de la bomba para ayudar a mantener la sarta de varillas en posición recta y en tensión, lo cual reducirá el pandeo de las varillas de bombeo o del émbolo de la bomba. Las barras de lastre están fabricadas con material en barra de acero-manganeso al carbono laminado en caliente.

Las barras de lastre están torneadas en su superficie y tienen uniones machos dobles para acoplarse a las varillas de bombeo, además de rebordes y caras para llaves API en ambos extremos, y al menos uno de los extremos tiene una sección reducida para asentamiento de elevadores (Figura 2.28).



Figura 2.28 Barra de peso lastre ^[4].

Tamaño (pg)	Peso (lb/pie)	Unión de varilla API (pg)	Longitud (pie)	Tamaño mínimo de Tubería (pg)
1-1/4	4.172	5/8	25	2
1-1/4	4.172	3/4	25	2
1-3/8	5.049	5/8	25	2
1-3/8	5.049	3/4	25	2
1-1/2	6.008	3/4	25	2
1-1/2	6.008	7/8	25	2
1-5/8	7.501	7/8	25	2-1/2
1-3/4	8.178	7/8	25	2-1/2
2	10.68	1	25	2-1/2

Tabla 2.10 Especificaciones de las barras de lastre ^[4,13].

Para entender el uso primordial de las barras de peso, es necesario comenzar por calcular la fuerza necesaria para abrir la válvula viajera. En el momento en que la válvula viajera se abre (Figura 2.29).

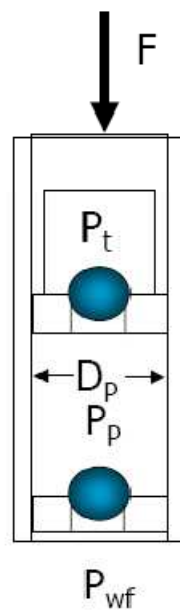


Figura 2.29 Presiones durante la carrera ascendente ^[4].

Realizando el balance de fuerzas se cumple:

$$-F - P_t \cdot D_p^2 \cdot \frac{\pi}{4} + P_p \cdot D_p^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0 \dots \dots \dots (11)$$

Por otra parte, la válvula viajera se comienza a desasentar cuando:

$$\frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot P_p = \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot P_t + W \dots \dots \dots (12)$$

Si se desprecia el peso de la bola, entonces se obtiene:

$$P_p = P_t \cdot \frac{D_2^2}{D_1^2} \dots \dots \dots (13)$$

Sustituyendo la (Ec. 11) en la (Ec.13) se tiene:

$$F = P_t \cdot D_p^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_2^2}{D_1^2} - 1 \right) \dots \dots \dots (14)$$

La fuerza F es suministrada por las varillas, por lo tanto la sarta de varillas estará en compresión y se pandeará, a menos que se utilicen barras de peso y centralizadores. El pandeo de la sarta de varillas puede causar:

- Desgaste de la varilla y la tubería por encima de la bomba.
- Fallas en la válvula y la varilla.
- Incremento del consumo de potencia.

Según algunos operadores, un diseño apropiado del bombeo mecánico, debe contar con barras de peso y centralizadores.

2.11.3 Centralizadores de varillas.

En pozos con grandes desviaciones o pozos inclinados u horizontales existe la posibilidad de contacto entre la tubería y la varilla, lo cual puede generar la falla prematura del sistema. Los dispositivos que evitan el contacto entre estos dos elementos son llamados “centralizadores de varillas”, ellos tienen la misión de soportar las cargas por deflexión de la varilla y evitar las fallas por desgaste de la tubería y la varilla. Existe un sinnúmero de modelos y fabricantes sin embargo, muchos de ellos presentan el gran inconveniente de que obstruyen el flujo por lo cual causan una gran caída de presión (Figura 2.30).



Figura 2.30 Centralizadores de varillas ^[4].

Tal vez el tipo más utilizado y recomendado es el que se conoce con el nombre de “centralizador de ruedas” cuya invención es otorgada a Rivas. Este centralizador consiste en un grupo de ruedas distribuidas a lo largo de una longitud de 2 pies, distribuidas radialmente hasta cubrir los 360° (Figura 2.31).



Figura 2.31 Centralizador con ruedas centralizadoras ^[4].

Presentan la gran ventaja de que posee las ruedas que ofrecen múltiples puntos de contacto con la tubería, por lo cual no existe posibilidad de obstrucción. Además las ruedas son instaladas en el mismo sentido del flujo por lo que no generan una caída de presión considerable. Las ruedas son construidas de aleaciones de bronce para reducir la fricción y ser el elemento de sacrificio en caso de que ocurra algún desgaste.

2.12 Descripción y tipos de unidades.

Las unidades de bombeo son en realidad un mecanismo que nos permite transformar el movimiento giratorio simple del motor en un movimiento armónico simple (ver Apéndice) a nivel de la varilla pulida.

Las mayorías de las unidades de bombeo son del tipo balancín, con sistemas biela-manivela, la manivela rotatoria o la viga viajera proveen el contra-balance para reducir la carga de torque y la demanda de energía. El uso de la caja de engranes es común para reducir la velocidad de la fuente primaria hasta la velocidad de bombeo e incrementar el torque disponible.

Generalmente las unidades de bombeo se clasifican según la capacidad de torque de la caja reductora y de acuerdo a la forma como realizan el balance de las fuerzas y sus sistemas de

accionamiento. Sobre el criterio de las fuerzas y sistemas de accionamiento las unidades son clasificadas por los tipos de balancín y los de no balancín, dentro del tipo de unidades con balancín se distinguen tres tipos: convencionales, Mark II y las aerobalanceadas ^[4].

2.12.1 Geometría de la unidad de bombeo mecánico.

La geometría de todas las unidades de bombeo mecánico cae dentro de dos clases:

1. La clase I, que tiene el reductor de engranes colocado en la parte trasera con apoyo a la mitad del balancín y está representado por la unidad convencional (Figura 2.32a); se aprecia el apoyo (F) cerca del centro, el esfuerzo del motor principal (E) aplicado en un extremo del balancín y la resistencia de la carga del pozo (R), está aplicación opuesta en el extremo del balancín.

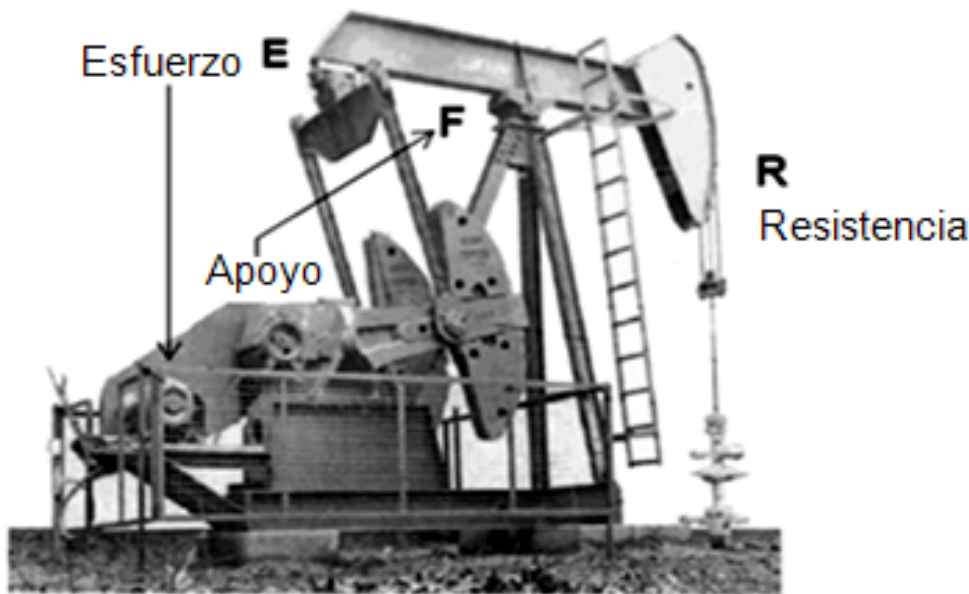


Figura 2.32a Unidad de bombeo mecánico convencional ^[7,12].

2. La clase III, con el reductor de engranes colocado al frente, representada por las unidades Mark II y aerobalanceadas (Figura 2.32b); se puede observar que para ambas unidades, el esfuerzo (E) y la resistencia (R) se aplican en un mismo extremo del balancín con relación al apoyo (F), que se encuentra en el otro extremo.

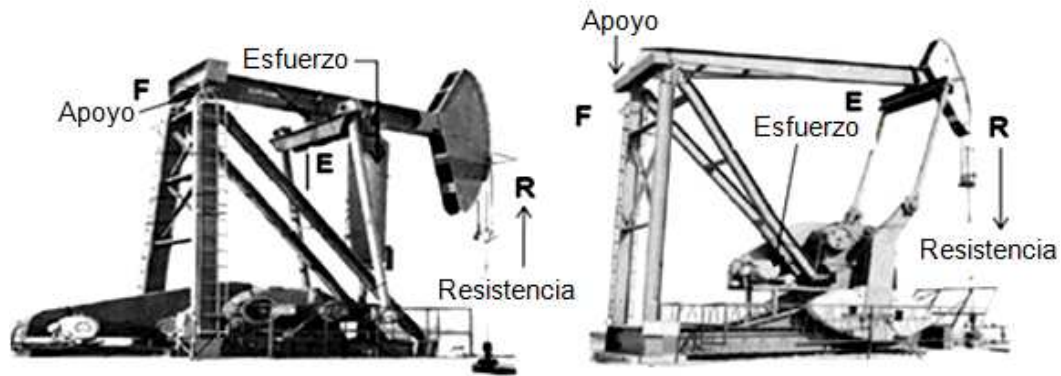


Figura 2.32b Unidad de bombeo mecánico aerobalanceada (izquierda) y unidad de bombeo mecánico Mark II (derecha) ^[7,12].

2.12.2 Efecto de la geometría en las unidades de bombeo mecánico.

Existen tres factores que controlan el movimiento de la carrera descendente y la velocidad de bombeo:

1. Longitud de la carrera.
2. Fuerza que retarda la carrera descendente.
3. Geometría de la unidad.

Cuando la unidad se encuentra elevando al fluido, hay varios factores importantes que deben reconocerse. Primeramente, el ciclo de bombeo se divide en dos partes: productivo y no productivo. La parte productiva ocurre durante la carrera ascendente cuando se eleva la columna de fluido y el no productivo, durante la carrera descendente que tiene como función principal, regresar a las varillas y al émbolo a su posición en el fondo. El regreso más rápido de las varillas en esta parte del ciclo no productivo hará que la carrera ascendente productiva se presente más pronto.

La carrera ascendente es productiva por dos razones:

1. Es el tiempo durante el que la columna de fluidos se eleva.
2. Es el tiempo durante el que el fluido del pozo entra al barril de la bomba.

La forma en la que realmente trabaja la unidad es:

Durante la carrera ascendente eleva las varillas y al fluido, durante la carrera descendente, la fuerza de gravedad jala a las varillas hacia abajo en contra de las fuerzas de fricción y

flotación (ver Apéndice). Esto es fácil de entender debido a que el cable colgador de acero trabaja únicamente a tensión y no son capaces de empujar las varillas hacia abajo.

En la unidad de bombeo mecánico hay cuatro características importantes de movimiento:

1. Aceleración máxima desde el fondo para elevar la carga total de varillas y fluido.
2. El tiempo que dura la carrera ascendente, es el mismo que tarda en llenarse el barril de la bomba.
3. Aceleración máxima al iniciar la carrera descendente.
4. Velocidad máxima en la carrera descendente. Debe tomarse como referencia que la velocidad angular de la manivela es constante.

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 la unidad Mark II y aerobalanceadas (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 unidad convencional.

2.12.3 Unidad de bombeo mecánico convencional.

En la unidad de bombeo mecánico convencional (Figura 2.33), su balanceo es a través de contrapesos y su rotación (vista del lado izquierdo de la unidad) es en contra de las manecillas del reloj, puede operar en sentido contrario pero no se debe, ya que la rotación de los dos lados da lubricación a los engranes del reductor.

El bombeo mecánico convencional es un sistema que posee un espectro muy amplio de aplicación; usualmente son instalados a profundidades que oscilan entre los 200 y 10,000 pies (60 y 3,000 metros); sin embargo, existen algunos diseños a mayor profundidad.

El hecho de que todos los materiales del sistema sean construidos a partir de materiales metálicos le confiere la particularidad de que es inmune a las características físico-químicas del petróleo, pero además define su límite de temperatura permisible en 700°F (371°C) aproximadamente. Es por ello que este sistema es ampliamente utilizado en pozos con crudos de alta gravedad API o con elevado corte de agua, al igual que en pozos de crudos pesados y extrapesados que se estimulan a través de la inyección cíclica o continua de vapor ^[4].

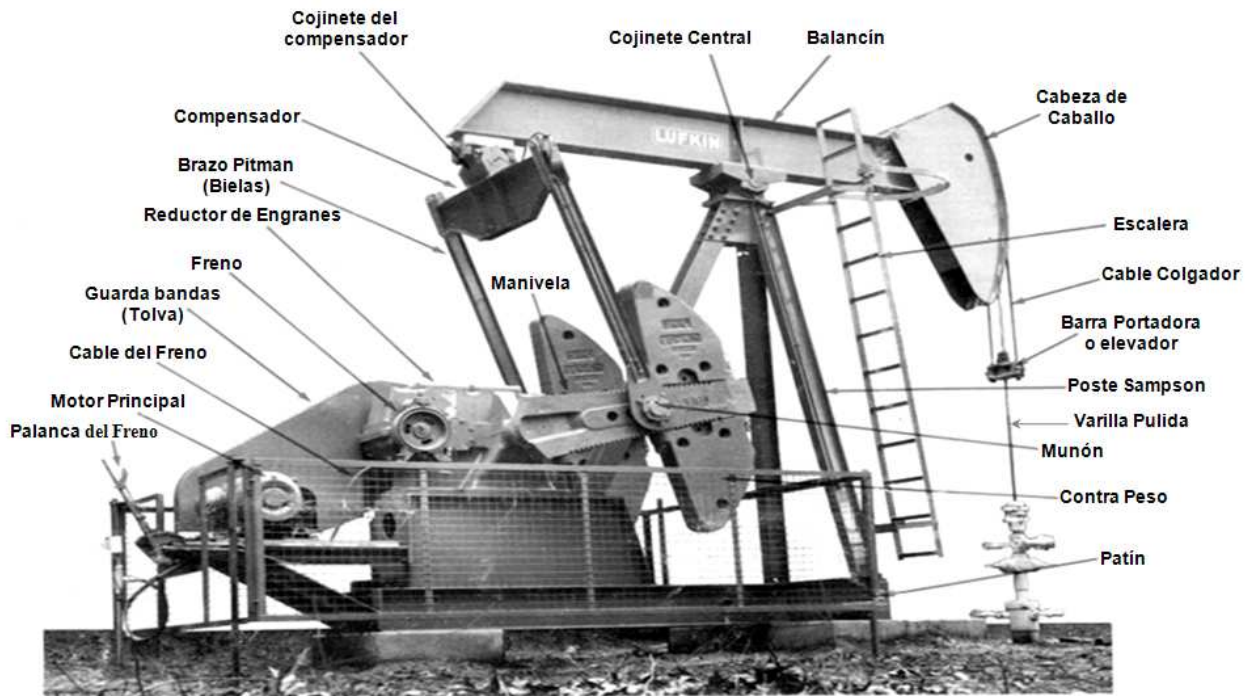


Figura 2.33 Unidad de bombeo mecánico convencional ^[12].

2.12.4 Unidad de bombeo mecánico Mark II.

En la unidad de bombeo mecánico Mark II (Figura 2.34), su balanceo es a través de contra pesos y su rotación (vista de lado izquierdo de la unidad) es conforme a las manecillas del reloj, ya que su sistema de lubricación en el reductor es exclusivamente para esta rotación, no puede operar en rotación contraria por que dañaría considerablemente el reductor.

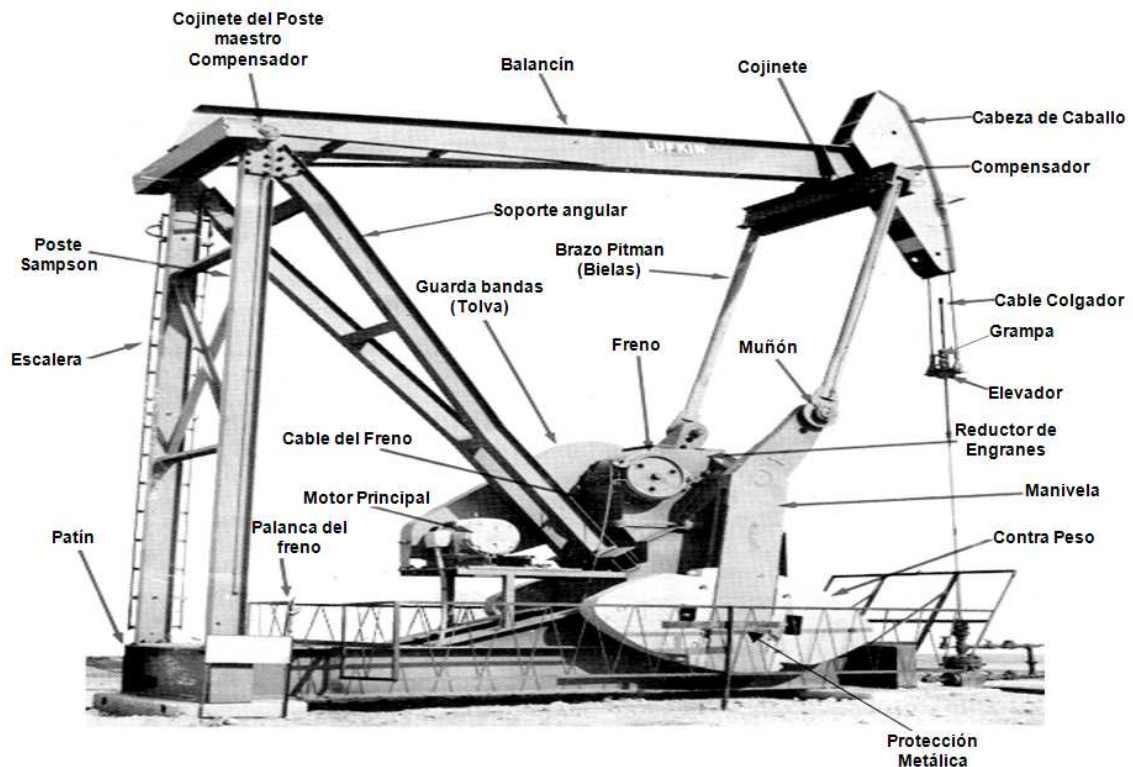


Figura 2.34 Unidad de bombeo mecánico Mark II ^[12].

Partes principales de las unidades de bombeo mecánico convencional y Mark II, comparación del movimiento de estas unidades (ver Apéndice).

Partes principales:

1. Motor.

La función del motor principal es el de proporcionar a la instalación energía mecánica, que es transmitida a la bomba y usada para levantar el fluido. El motor principal seleccionado para una determinada unidad debe, tener suficiente potencia para elevar el fluido al ritmo deseado, desde el nivel de trabajo del fluido en el pozo. El motor principal puede ser una máquina de combustión interna o puede ser un motor eléctrico.

La selección del motor principal dependerá: de los recursos locales del suministro y del costo de combustible (diesel, gas natural o energía eléctrica), de la capacidad para mantenimiento y de la existencia del personal experimentado.

En el Activo de Producción Poza Rica, inicialmente se utilizaron motores de combustión interna, usando el mismo gas que producía el pozo como combustible; sin embargo, a los constantes paros que se presentaban por las lluvias, a la

vulnerabilidad de su sistema de encendido, se empezaron a sustituir por motores eléctricos de corriente alterna para los trabajos en diferentes secciones y departamentos, debido a su versatilidad y economía.

2. Tablero de control.

Estos motores son trifásicos, alimentados a 440 volts y cuentan con un tablero de control que proporciona las siguientes funciones:

- a) Función on-off para poner en operación y sacar manualmente de operación el motor.
- b) Protección contra bajo y alto voltaje.
- c) Protección contra sobrecargas (alto amperaje).
- d) Protección contra sobrecalentamiento. Esta protección está señalizada por unos sensores térmicos (termotectores), colocados dentro del devanado del motor.
- e) Retardo a voluntad del operador para el arranque del motor, después de colocar el switch en la posición “on”, o de que se vuelva a energizar la línea.
- f) Timer para controlar los períodos de operación y de descanso de unidad, a fin de permitir a voluntad la recuperación del pozo.

3. Juego de polea del motor de pequeño diámetro, bandas y polea de la caja reductora de gran diámetro.

Este acoplamiento con bandas, transmite el par motriz a la caja de engranes, y al mismo tiempo reduce la velocidad angular (r.p.m), la cual después es reducida aún más por la caja de engranes.

4. Reductor de engranes.

Su función es la de reducir la velocidad del motor principal a una velocidad de bombeo adecuado. Es necesario determinar exactamente la probable torsión máxima a la que estará sujeta el reductor de engranes, ya que las normas API usan la torsión máxima como base para el rango de las unidades de bombeo. La designación del API para la unidad es simplemente la torsión máxima permisible en el reductor de engranes en miles de libras-pulgadas.

El API tiene estandarizados 16 rangos de torsión máxima que varían desde 3.4 hasta 1,824 miles de lb-pg.

La polea del reductor de engranes, es el miembro 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.

5. Manivela.

Acoplada en la salida de la caja de engranes (la entrada está en la polea), gira en un rango de 9 a 11 r.p.m.; y transmite este movimiento a través del muñón a el brazo “Pitman” o bielas, convirtiéndolo en un movimiento aleatorio.

6. Brazo “Pitman” o biela.

Convierte el movimiento de rotación de la manivela en movimiento alternativo, transmitiéndolo a la vigueta central a través del compensador y del cojinete, rodamiento o balero del compensador.

7. Compensador o vigueta compensadora.

Recibe el movimiento alternativo del brazo “Pitman”, a través de dos flejes complementarios de la biela, y lo transmite a la vigueta central a través del cojinete compensador.

8. Cojinete del compensador.

Conecta al brazo “Pitman” a la vigueta compensadora.

9. Vigueta central o balancín.

Recibe el movimiento alternativo del compensador, a través del cojinete compensador y balanceándose en el cojinete central, hace que la “cabeza de caballo” o “cabeza de mula” en su otro extremo suba o baje.

10. Cojinete central.

Sirve como punto pivote para la vigueta central.

11. Cabeza de caballo.
Sube y baja, fija al extremo delantero de la vigueta central, y transmite este movimiento al cable colgador, el cual a su vez a través de la barra portadora o elevador y la grampa de la varilla pulida, transmite este movimiento a la sarta de varillas y estas a la bomba subsuperficial.
12. Cable colgador.
Cable de acero trenzado de 1 1/4" Ø x 40', sirve de eslabón entre la cabeza de caballo y la varilla pulida, transmitiendo el movimiento alternativo a la sarta de varillas de succión.
13. Barra portadora o elevador.
Conecta al cable colgador a la varilla pulida a través de la grampa y transmite el movimiento alternativo a esa última. La barra portadora o elevador pende en sus extremos del cable colgador, en medio lleva una ranura en donde el personal operativo o de mantenimiento aloja a la varilla pulida. Para evitar que esta se salga, se cuenta con un candado. La barra portadora o elevador levanta la sarta en la carrera ascendente de la unidad de bombeo mecánico, apoyándose en la grampa o grapa para varilla pulida.
14. Freno.
Se use utiliza para inmovilizar la unidad, después de haber parado el motor, a fin de proporcionar mantenimiento a la misma.
15. Poste maestro "Sampson" o tripie.
Sirve de soporte al balancín por medio del cojinete central, soporta todo el peso de la sarta de varillas, en la parte inferior, se apoya por medio de tornillería en el patín de la unidad.
16. Patín.
Construido con viguetas "I" sirve de apoyo al poste maestro "Sampson", reductor, motor y guarda bandas (Tolva); va anclada por medio de tornillos y viguetas a la base de concreto de la unidad.

17. Tornillos de anclaje y viguetas de anclaje.

Los tornillos van enroscados a los anclajes cimentados en el concreto de la base de la unidad; estos tornillos usan viguetas sujetas por ellos para fijar o anclar el patín a la base de concreto.

18. Base de concreto.

El plano de esta base lo proporciona el fabricante y tiene cimentados los coples ancla en donde entran los tornillos de anclaje. Cada tamaño, marca y tipo de la unidad tiene su base de concreto específica, indicándose en un plano elaborado por el fabricante, las dimensiones de la misma y la distribución de los anclajes.

19. Guarda bandas (tolva).

El guarda bandas está construido de lámina con refuerzos, sirve para proteger la vida humana, ya que evita que alguien sea atrapado por las bandas, al mismo tiempo evita que el agua de lluvia moje a las poleas y bandas; lo que provocaría deslizamiento entre ellas y como consecuencia calentamiento y rotura de estas últimas.

2.12.5 Unidad de bombeo mecánico aerobalanceada.

En la unidad de bombeo mecánico aerobalanceada (Figura 2.35), el balanceo es a través de aire suministrado por un motocompresor hacia un cilindro amortiguador. El motocompresor se calibra a un paro y 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 es igual al de la unidad convencional.

Las partes principales de la unidad aerobalanceada son iguales a la de las unidades Mark II y convencional.

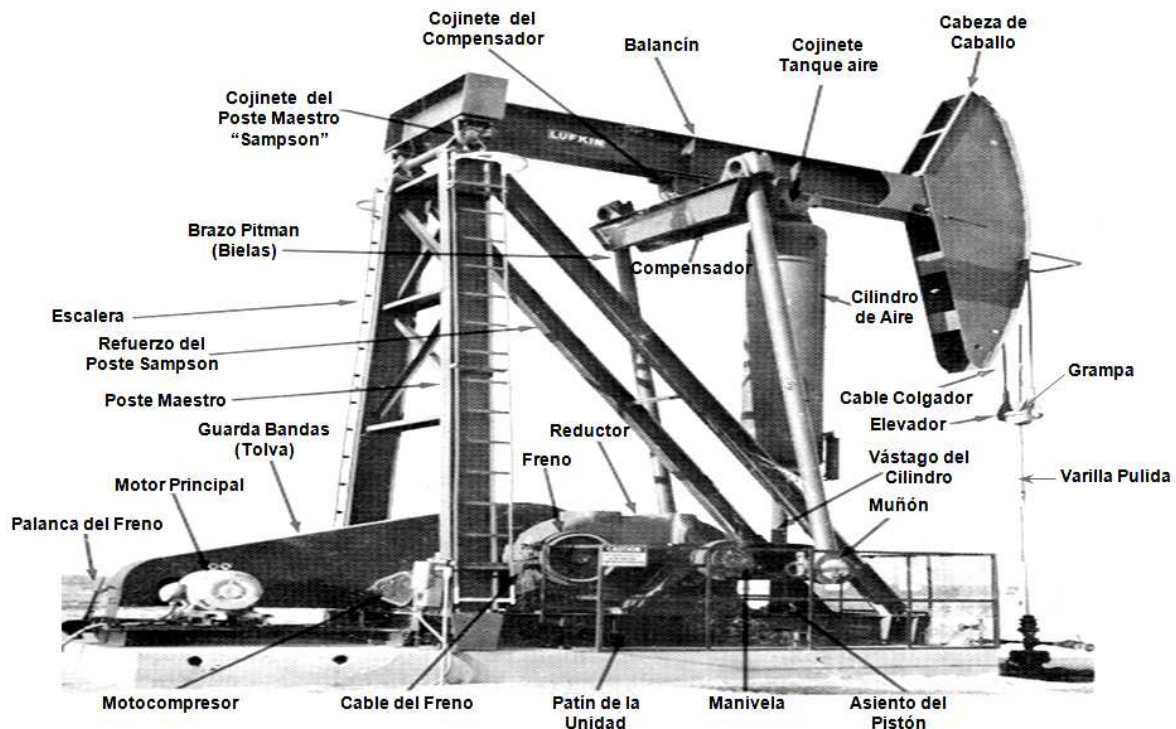


Figura 2.35 Unidad de bombeo mecánico aerobalanceada ^[12].

2.12.5.1 Partes exclusivas de las unidades de bombeo mecánico aerobalanceadas.

1. Motocompresor eléctrico.

El motocompresor consta de un motor eléctrico trifásico, el cual está acoplado por medio de poleas y bandas a un compresor alternativo de dos pasos, enfriado por aire, las bandas y poleas van cubiertas por un guarda bandas de lámina, el conjunto va montado sobre un patín que a su vez queda atornillado al patín de la unidad en forma transversal, a un lado del poste maestro "Sampson" y del lado del tambor del freno. En la parte inferior del patín del compresor se tiene un cilindro acumulador de aire, al que descarga el compresor, y a éste va acoplado en su parte inferior una válvula de compuerta, la que sirve para purgar los condensados del aire comprimido. En condiciones normales, el personal de operación o el de mantenimiento deben purgar los condensados diariamente. En la descarga del compresor, se tiene una válvula de seguridad. Del cilindro acumulador parte una manguera de alta presión, la cual descarga a una línea que conduce el aire a la parte delantera de la unidad, en donde está el cilindro de contra balanceo o amortiguador; al cual se conecta con una manguera de alta presión, un check del mismo diámetro y una válvula de compuerta del mismo diámetro y libraje.

El control de paro y arranque del motocompresor, se logra con un interruptor de presión de fuelle, que toma la señal del cilindro acumulador. Este interruptor puede calibrarse a fin de que el motor pare y arranque, para lo cual se cuenta con dos tornillos, uno para dar presión de paro de motor, cuando la presión va subiendo; el otro para ajustar la presión de paro cuando está va disminuyendo. La diferencia entre la presión de paro y la de arranque se le llama “amplitud”, es decir, que el segundo tornillo es el de amplitud ^[8].

2.12.6 Unidad de bombeo mecánico hidroneumático (Tieben).

Es una unidad de bombeo alternativo para el movimiento de varillas, cuyo principio de funcionamiento es sobre la base de presiones hidráulicas compensadas debido a la compresión y expansión del nitrógeno (N₂), este nitrógeno se encuentra dentro de un acumulador que soporta 2/3 de la carga total de la varilla pulida y reemplaza a los contrapesos de la unidad de bombeo mecánico convencional.

Con el principio hidroneumático se pueden levantar cargas de hasta 40,000 libras en la varilla pulida, con una carrera efectiva máxima de 120 pulgadas y con hasta ocho emboladas por minuto; éstas pueden ser modificadas según las necesidades de la operación (Figura 2.36).

Componentes principales de una unidad de bombeo mecánico hidroneumático.

1. Acumulador.

Es un cilindro con un pistón flotante en su interior en el cual actúan dos fluidos; aceite hidráulico y nitrógeno (N₂) comprimido. El acumulador genera el efecto de los contrapesos.

2. Cilindro actuador.

Es el cilindro que está compuesto por dos pistones adheridos a una varilla pulida, estos pistones generan tres cámaras en las cuales actúa el aceite hidráulico.

3. Motor.

Elemento que propicia la potencia necesaria a la bomba hidráulica.

4. Bomba hidráulica.

Unidad provista de 130 [cm³], con una bomba simple o de 75 [cm³] cuando se trata de una bomba doble.

5. Tanque de aceite hidráulico.

Almacenador del aceite hidráulico con una capacidad de hasta 360 litros.

6. Contenedor de nitrógeno (N_2).

7. Pedestal.

Torre de aproximadamente 7 metros en la cual se alojan los sensores para el cambio de dirección de la carrera y del elevador, los cuales están unidos por la varilla de succión en uno de los extremos del cilindro actuador y en el otro extremo por la varilla pulida.

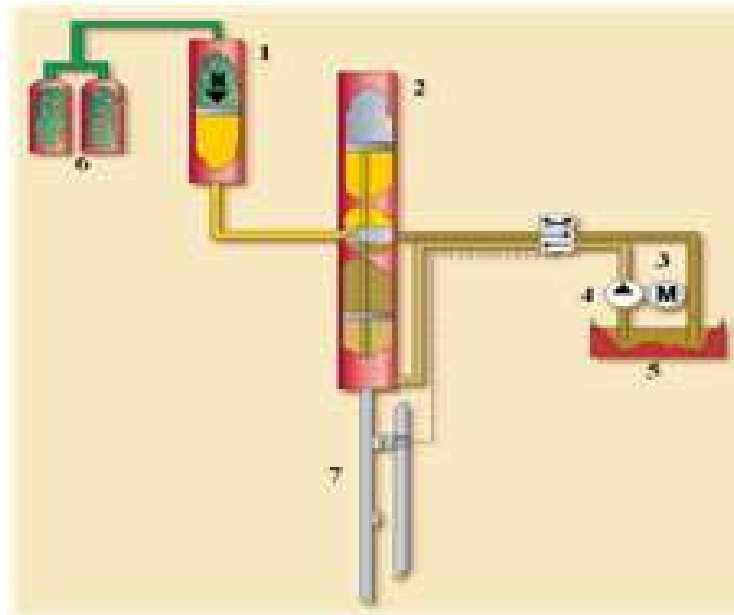


Figura 2.36 Partes principales del bombeo mecánico hidroneumático ^[10].

2.12.6.1 Principio de operación del bombeo mecánico hidroneumático.

El N_2 en compresión empuja hacia abajo al pistón flotante del acumulador, éste presiona al aceite hidráulico a circular hacia la cámara superior del cilindro actuador, al mismo tiempo la bomba hidráulica llena con aceite la cámara inferior del cilindro actuador y de esta forma es levantada la varilla pulida, esto hasta que el elevador emite una señal al sensor superior para finalizar la carrera ascendente.

El sensor superior emite una señal que genera un cambio de dirección del fluido hidráulico proveniente de la bomba hidráulica. Al invertir la circulación del fluido hidráulico comienza el llenado de la cámara intermedia del cilindro actuador, lo cual genera que la varilla pulida comience su carrera descendente. El fluido hidráulico de la cámara superior del cilindro actuador proveniente del acumulador, comienza a ingresar nuevamente a éste, comprimiendo al N_2 .

La carrera descendente llega a su fin cuando el elevador emite una señal al sensor inferior, el cual a su vez emite una señal para que comience su carrera ascendente (Figura 2.37).

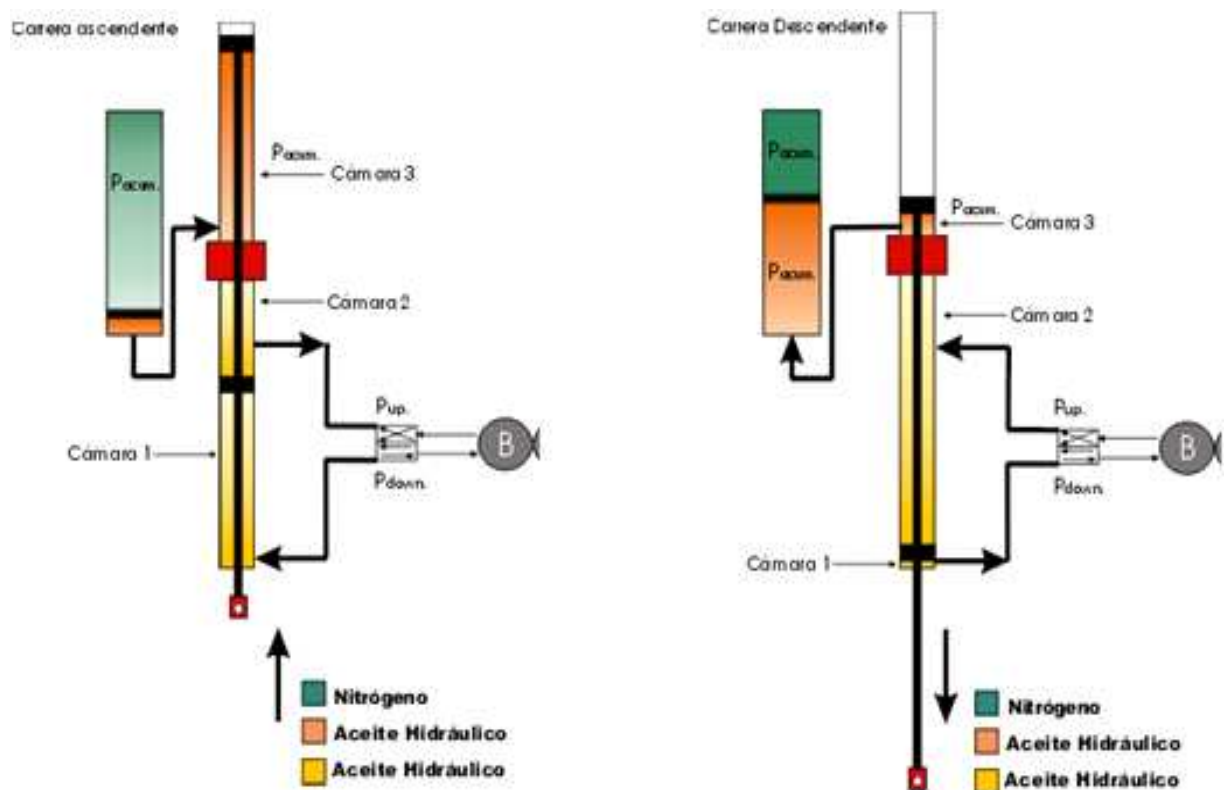


Figura 2.37 Operación de bombeo mecánico hidroneumático ^[10].

2.12.6.2 Sistema de seguridad de las unidades de bombeo mecánico hidroneumático.

a. Sensor de separación de la varilla pulida.

Este sensor se coloca al elevador, el cual se desliza por el pedestal. Estos sensores son magnéticos por lo que se coloca un disco de metal sobre la grampa superior para que el sensor esté actuando permanentemente, en el caso de que la varilla pulida se detenga, la separación del sensor y el plato metálico no será la misma que detendrá a la unidad hasta que la distancia del sensor-plato se restablezca (Figura 2.38).

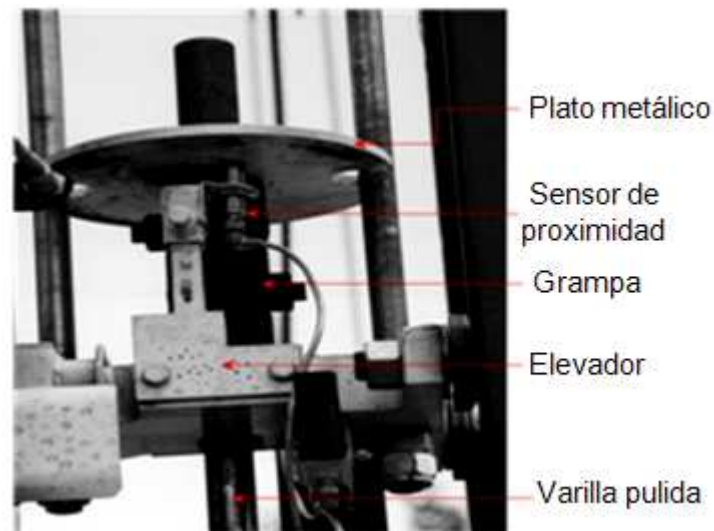


Figura 2.38 Sistema de seguridad (sensor de separación de la varilla pulida) ^[10].

b. Limitador de presión.

Esta limitante es regulada de acuerdo a la carga a levantar; al exceder esta limitante el equipo se detendrá quedando asentada esta falla.

c. Sensor de nivel de fluido hidráulico.

Cuando el nivel no es seguro para realizar una operación el equipo se detendrá.

d. Sensor de temperatura.

La temperatura no podrá exceder los 65°C ^[10].

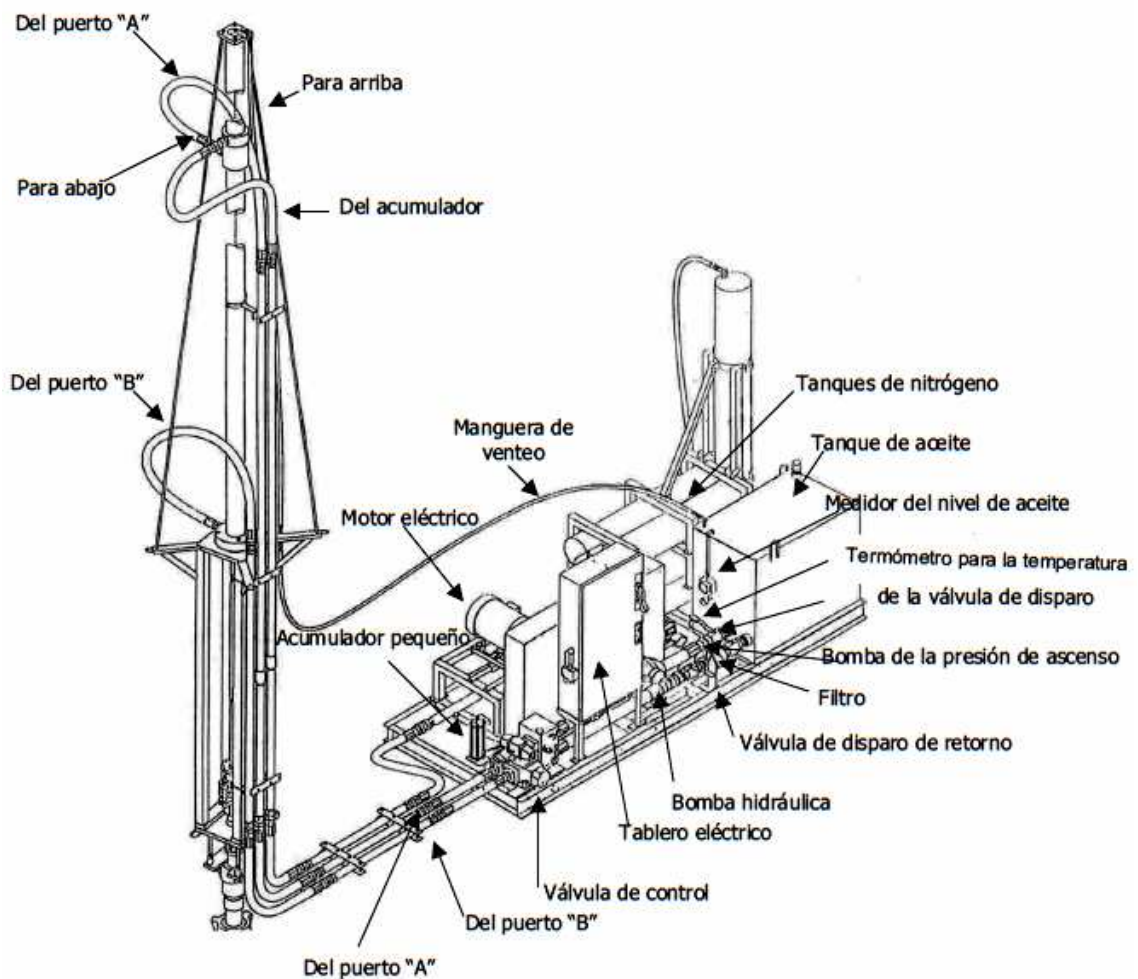


Figura 2.39 Unidad de bombeo hidroneumático (Tieben) [9].

2.12.7 Unidad de carrera extra-larga (Rotaflex).

En algunos casos donde el crudo a levantar es pesado y/o pozos profundos, se necesitan carreras de superficie que no se pueden alcanzar con las unidades de tipo balancín. Para estas situaciones se suelen utilizar unidades de carrera-larga, conocidas con el nombre comercial de Rotaflex. Estas unidades no poseen un sistema de biela-manivela y por lo tanto el movimiento lineal recíprocante se obtiene moviendo alternativamente una carrera que se desliza por un cilindro, que está acoplada por un extremo a la varilla pulida de la sarta de varillas y por el otro extremo aun contrapeso que permite balancear la unidad tal como se aprecia en la (Figura 2.40) [4].

Estas unidades tienen una carrera de hasta 306 pulgadas para bombas mecánicas, manejan altos niveles de producción, arrojan muy buenos resultados en pozos con problemas o pozos profundos, tienen muy buenas aplicaciones como reemplazo de las bombas electrosumergibles (ESP), como maneja bajas velocidades se tiene una mayor vida útil tanto del equipo de fondo, como de las varillas, se tiene un ahorro en el costo de energía, es muy práctico con los problemas de bloque por gas además de que su accionamiento es mecánico^[11].



Figura 2.40 Unidad de carrera extra-larga “Rotaflex” ^[4].

El mecanismo de inversión de la carrera trabaja a través de una cadena que se acciona mediante la caja reductora a través de una corona. El diámetro de esta corona es de 18 pulgadas, permitiendo así que se pueda trabajar con las cajas reductoras de menor capacidad que un aparato convencional de proporciones similares. Los componentes básicos y su mecanismo de inversión se pueden observar en la (Figura 2.41).

En uno de los eslabones de la cadena, se encuentra conectado el carro que transmite 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 la carrera ascendente y descendente experimentara un cambio en su velocidad.

Se monta un motor eléctrico en la base de la estructura, este con el fin de suministrar la potencia que requiere 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 la que el torque tiene la forma senoidal aproximadamente.

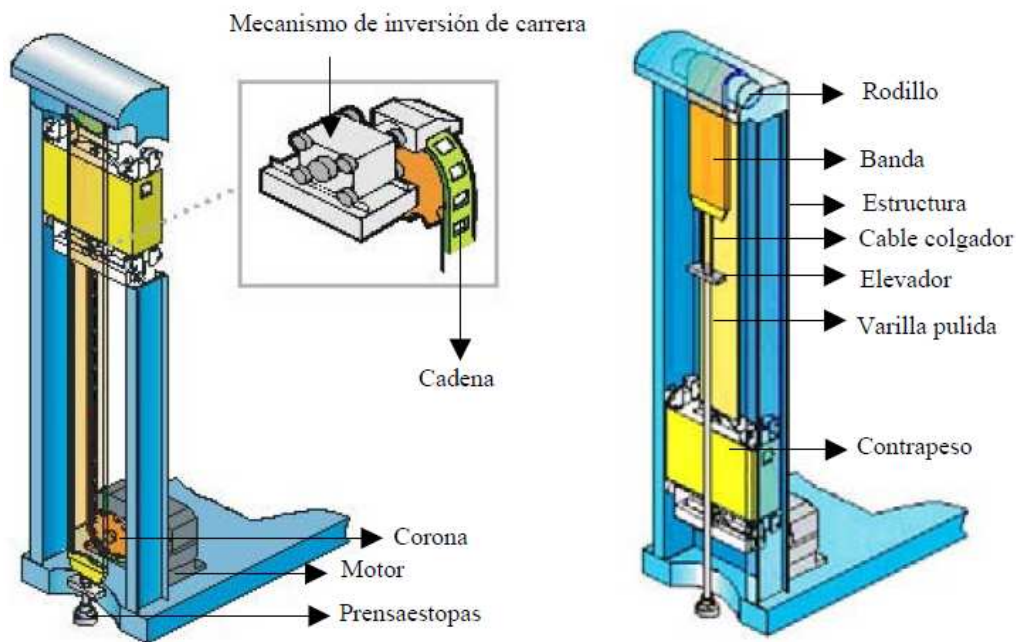


Figura 2.41 Mecanismos de inversión y básicos de la unidad Rotaflex ^[3].

2.13 Nomenclatura API sobre balancines.

Para introducir la nomenclatura del balancín es necesario precisar las características más relevantes de una unidad de bombeo de superficie. La nomenclatura estándar de los balancines se expresa mediante una secuencia de letras y números que se detallan en la (Figura 2.42).

2.13.1 Capacidad de carga de la estructura.

El máximo momento flector en la viga del balancín ocurre en la articulación que une el poste con la viga (en balancines convencionales), impuestos por la máxima carga en la varilla pulida (PPRL). El máximo momento flector permisible para una unidad de bombeo es suministrado como especificación por el fabricante, en forma de carga máxima admisible en la varilla pulida. La carga máxima en la varilla pulida puede ser medida si la unidad esta en operación.

2.13.2 Torque máximo en la caja reductora.

La carga en la varilla pulida y en el contrapeso, crean un momento de torsión en el eje de baja velocidad de la caja de engranajes. El pico de torque ocurre dos veces durante cada giro de la manivela (crank). Si la unidad se encuentra debidamente balanceada, el pico de torque durante la carrera de ascenso será similar al pico de torque durante la carrera de descenso. El balancín debe ser diseñado para resistir estos picos de torque.

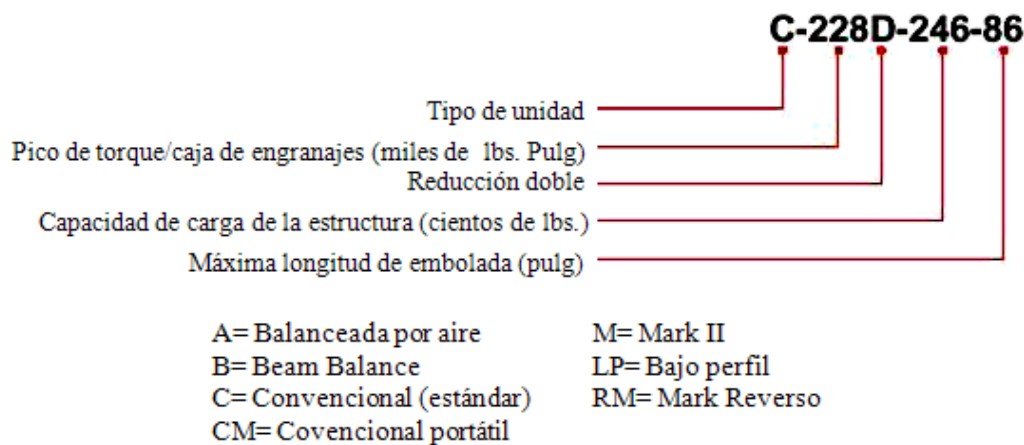


Figura 2.42 Nomenclatura de balancines^[12].

2.14 Efecto del contrabalance.

Un sistema de levantamiento por bombeo requiere un balance apropiado ya que, dependiendo de ello, puede que su operación propicie un incremento en el consumo de energía. Este balance consiste en igualar los picos de torque durante las carreras de ascenso y descenso, para lo cual es necesario estimar el contrabalanceo necesario.

Para ello se debe asumir que los picos de torque en la carrera de ascenso y descenso ocurren en ángulos tales que la distancia perpendicular entre el punto de aplicación de la fuerza generada por la varilla pulida, hasta el eje de baja velocidad (eje de salida) de la caja de engranajes son iguales. Este cálculo del contrabalance es estrictamente teórico y el contrabalance requerido en condiciones de operación debe ser calculado en campo durante la operación del equipo.

2.15 Motores.

Existen dos tipos básicos de motores para unidades de superficie: (a) motores de combustión interna, (b) motores eléctricos.

Los motores de combustión interna para unidades de superficie, son alimentados generalmente con gas natural como combustible. No obstante también existen motores alimentados con gasoil, o gasolina para este fin. Existen dos tipos de motores de combustión interna: de alta velocidad > 750 RPM y de baja velocidad < 750 RPM. Por lo general los motores de baja velocidad son de dos tiempos mientras los de alta velocidad son de cuatro tiempos.

Ventajas y desventajas de los motores de baja velocidad se presentan en la (Tabla 2.11):

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Larga vida útil debido a la baja frecuencia de funcionamiento. • Rotación uniforme de la manivela del balancín debido a las grandes ruedas de inercia de los motores. • Construcción sencilla. • Fácil de reparar (en muchos casos en sitio). 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja relación potencia/peso. • Mayor costo por HP generado. • No es recomendable para instalaciones portátiles.

Tabla 2.11 Ventajas y desventajas de los motores de combustión interna de baja velocidad ^[4].

Las ventajas y desventajas de los motores de alta velocidad se resumen en la (Tabla 2.12). En cuanto a los motores Diesel, se pueden mencionar que el costo por concepto de combustible es bastante bajo mientras que, como aspectos negativos destacan: el alto costo inicial, alto costo de mantenimiento y la necesidad de mantener combustible almacenado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Alta relación potencia/peso. • Bajo costo inicial. • Rango amplio de potencia y velocidad. • Bajos costos de instalación. • Poco espacio requerido para la instalación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta variación de velocidad. • Vida corta debido a la alta frecuencia de funcionamiento. • Cambios frecuentes de aceite. • Con frecuencia las reparaciones no se pueden hacer en sitio. • Mantenimiento frecuente.

Tabla 2.12 Ventajas y desventajas de los motores de alta velocidad ^[4].

Los motores eléctricos preferentemente utilizados para el accionamiento del sistema son motores trifásicos Jaula de ardilla de 440 V y 60 Hz de frecuencia de alimentación. De acuerdo a las características de la caja reductora y las necesidades de potencia se pueden utilizar motores de 4, 6 y hasta 8 polos, con la cual se puede asegurar una elevada entrega de potencia a velocidades de operación de 1800, 1200 y 900 rpm respectivamente.

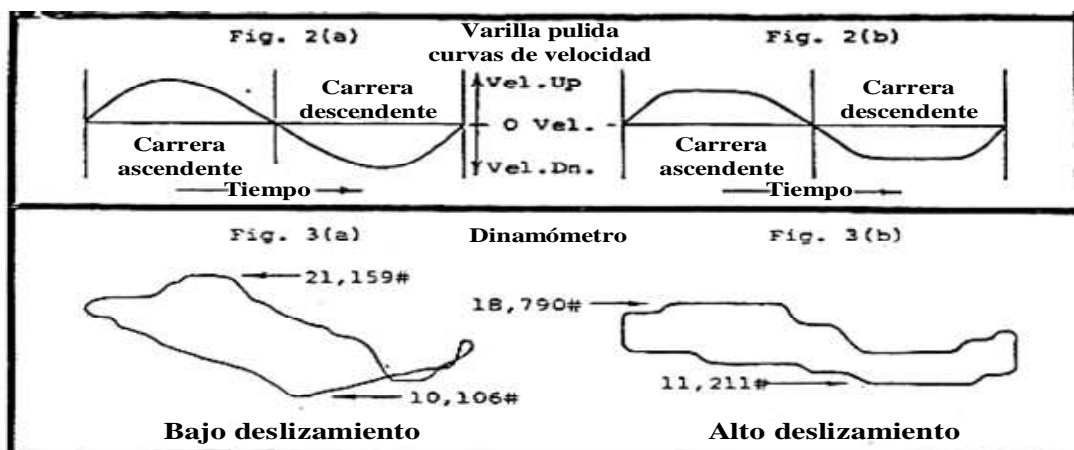


Figura 2.43 Comparación de velocidades y cargas para motores de bajo y alto deslizamiento ^[4].

Existen en el mercado cuatro tipos de motores para tal fin: (a) Nema C, con menos del 5% de deslizamiento, cuyas características operativas son: corriente de arranque normal, alto torque de arranque, capacidad de sobre carga del 200 al 250% de la carga nominal; (b) Nema D de deslizamiento medio del 5 al 8%, con las siguientes características: corriente de arranque normal, alto torque de arranque, capacidad de sobre carga mayor al 275% de la carga nominal; (c) Nema D de alto deslizamiento, esta alternativa es más común para accionar balancines. (d) motores de ultra-alto deslizamiento, con un deslizamiento entre 30 y 40 %, han ganado aceptación en los últimos años.

La mayor ventaja de los motores de alto deslizamiento es la reducción de los picos de torque. Esto se logra permitiendo al motor reducir la velocidad cuando el torque se incrementa. Al reducirse la velocidad se promueve la conversión de energía cinética de pesos y manivela en fuerza inercial. Dado que estas fuerzas son creadas por las masas de rotación, la caja de engranajes no es afectada por las mismas. Del mismo modo, se reduce el consumo de energía y se incrementa la carrera neta (por efecto del incremento en la sobrecarga).

2.16 Fallas en las unidades de bombeo mecánico.

Las unidades de bombeo presentan algunas ventajas unas con otras, también presentan desventajas que de no tener el suficiente cuidado pueden convertirse en fallas del equipo lo que repercute en pérdidas en la producción porque derivado de estas anomalías se debe parar el equipo para su reparación.

Las unidades convencionales no son tan eficientes como otras unidades, requieren una caja reductora más grande que otros tipos de unidades de bombeo, especialmente cuando se trata de varillas de acero.

Por otro lado las unidades neumáticas son mucho más complejas y requieren de mayor mantenimiento en el compresor, unos de los principales problemas que se presenta en este tipo de unidades es cuando se genera condensación de agua en el cilindro esta situación provoca serios problemas de corrosión, desgaste y por consecuencia fugas, como consecuencia de estas fugas se genera una pérdida de presión que ocasiona daños en la caja reductora.

La unidad Mark II no es tan eficiente para velocidades altas de bombeo, ya que la velocidad en la carrera descendente ocasiona problemas de rompimiento de varillas, también somete el fondo de la sarta de varillas a compresión severa, lo que causa fallas por pandeo.

2.17 Descripción de componentes (accesorios).

Existe una gran diversidad de componentes u accesorios que se pueden utilizar en una terminación con bombeo mecánico convencional, las cuales son seleccionados de acuerdo a las características de cada pozo (Figura 2.44).

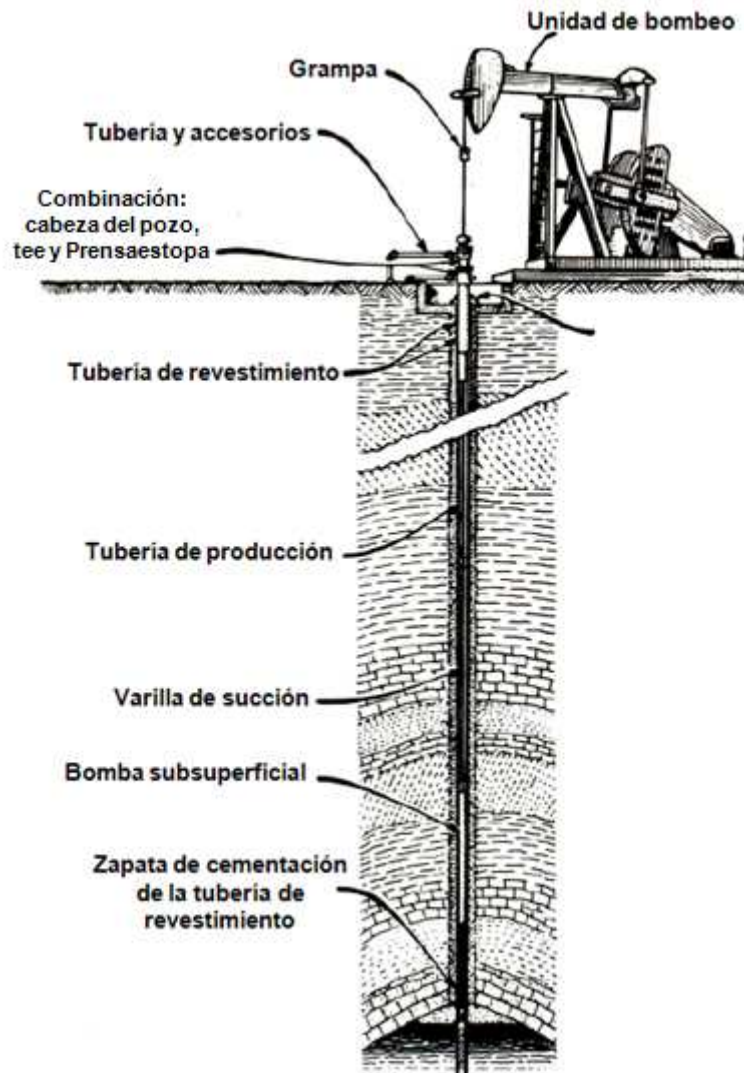


Figura 2.44 Esquema representativo de los accesorios a utilizar en una terminación de bombeo mecánico convencional ^[12].

2.17.1 Empacadores.

Los empacadores son dispositivos mecánicos cuya función es la de aislar ciertas secciones de la tubería de revestimiento (T.R). En general este dispositivo se instala como un tubo más dentro de la sarta de tubería, cuidando el colocar el empacador en el punto de la tubería que garantice la profundidad deseada. Los empacadores poseen un cuerpo de sello que permite la división de la tubería de revestimiento, pero además poseen un sistema de sujeción o garras que le permiten anclarse a la tubería de revestimiento y un cuerpo de sello para prevenir fugas (Figura 2.45).



Figura 2.45 Empacador de accionamiento mecánico ^[4].

La instalación de los empacadores cambia de acuerdo a su tipo, en general primero se instala el cuerpo de sujeción que se baja con la tubería de producción. Este cuerpo de sujeción posee elementos de sello que dividen la tubería de revestimiento (T.R) aislando la zona inferior de la superior. Luego se retira la tubería que se encuentra arriba del empacador y se coloca como tubería de cola o inicial del cuerpo de sello del empacador. Este cuerpo de sello se baja nuevamente con la tubería y luego de asegurar su posición con respecto al cuerpo de sujeción del empacador se activa.

Los empacadores son dispositivos muy útiles en pozos con varios lentes de producción (yacimientos lenticulares) ya que permiten aislar cada lente y producir simultáneamente o selectivamente. En cierto tipo de terminaciones se emplean para crear una sección entre la tubería de revestimiento (T.R) y la tubería de producción (T.P) y utilizarla para fines de producción o inyección. También es utilizada en terminaciones con inyección continua de vapor, y en la producción de pozos estimulados con vapor.

2.17.2 Anclas de tubería.

El ancla de tubería es un elemento esencial dentro de las terminaciones de bombeo mecánico convencional, en especial si la bomba se instalará a gran profundidad. El anclaje es un elemento mecánico de fijación de la tubería, cuya función es impedir la elongación de la tubería y que produzca el efecto conocido como “Buckling”. El anclaje puede ser visto como una variación sin cuerpo de sello de los empacadores; sin embargo, existe tal diversidad de modelos que debe ser tratada de manera independiente.

A nivel comercial se clasifican en tres tipos: (a) anclajes mecánicos a tensión, (b) anclaje mecánico a torsión y (c) anclajes hidráulicos. Los anclajes mecánicos, como lo describe su nombre, son fijados mecánicamente, poseen un cuerpo donde descansan un grupo de garras las cuales se activan o bien por medio de tensión (anclajes mecánicos a tensión) o por rotación (anclajes mecánicos a torsión), en general estos anclajes pueden soportar cargas a tensión entre 15,000 y 35,000 lb_f pero ello dependerá del fabricante (Figura 2.46).



Figura 2.6 Anclaje mecánico a la tensión ^[4].

Al contrario de los anclajes mecánicos, los anclajes hidráulicos activan sus garras de fijación por medio de presión aplicada sobre algún mecanismo de activación el cual generalmente se encuentra dentro de la tubería. Las presiones de accionamiento varían de acuerdo al modelo y al fabricante, pero un mínimo de $1,000 \text{ lb/pg}^2$ de presión son necesarios; estos dispositivos pueden soportar cargas superiores a las $35,000 \text{ lb}_f$ y además son más simples de instalar que los anclajes mecánicos; su desventaja radica en que son aproximadamente tres veces más costosos que los anclajes mecánicos.

2.17.3 Niples de drenaje.

El niple de drenaje es un accesorio muy utilizado en las terminaciones de bombeo mecánico convencional de gran profundidad, su función es la de drenar la tubería para facilitar las operaciones de reparación o cambio de equipo. Este niple se activa mecánicamente al aplicar una cierta tensión sobre la sarta de tubería o hidráulicamente al incrementar la presión de la tubería por encima del valor de activación. El niple suele instalarse a la descarga de la bomba subsuperficial y están diseñadas de tal forma que no obstaculizan el flujo dentro de la tubería. (Figura 2.47).

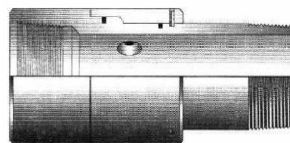


Figura 2.47 Niple de drenaje ^[4].

2.17.4 Filtros de succión.

Una de las grandes desventajas de las bombas subsuperficiales es su poco rango de tolerancia al manejo de arenas u objetos extraños que queden por la instalación del equipo. Es por ello que suele instalarse a la succión de la tubería filtros que evitan que cualquier cuerpo extraño u arena ingrese a la bomba y obstruya la acción de las válvulas o cause la falla del émbolo.

Estos filtros no son más que tuberías con ranuras o agujeros, cuyo número, distribución y tamaño definen su funcionalidad (Figura 2.48).



Figura 2.48 Filtro de succión para prevenir el manejo de arena ^[4].

2.17.5 Conexión “Flash” para varillas.

En ocasiones cuando el émbolo no puede ser extraído de la terminación a causa de la arena o de la carga de fluido sobre éste, una alternativa es el uso de las llamadas conexión “Flash” de varillas. Estas conexiones son similares a los acoplamientos convencionales de varillas con la diferencia que poseen un extremo libre que puede ser retirado del cuello aplicando una cierta tensión, así pues cuando el émbolo ofrece resistencia a ser recuperado y la posibilidad de rotura de varilla son elevadas, la conexión “Flash” permite que se recupere la varilla inicialmente y luego cuando se retire la tubería se recupere el émbolo. Las conexiones “Flash” son instaladas en las varillas cerca del émbolo pero pueden ser instaladas en cualquier punto de la sarta de varillas.

2.17.6 Separador estático de gas.

Aun cuando se profundizará sobre este tema posteriormente es importante resaltar que para bombeo mecánico sólo se emplea los separadores estáticos, dentro de los cuales el tipo “Poor-man” y el tipo “Copa” son los más utilizados. En el mercado se ofrecen una diversidad de modelos pero muchos de ellos son diseñados sin tomar en cuenta los procesos de separación dentro del equipo o la caída de presión que éstos ocasionen por lo que en algunas oportunidades en vez de ayudar a mejorar la eficiencia la empeoran.

2.17.7 Separador de arena.

Una de los accesorios cuya utilidad es más cuestionable pero que debe incluirse a modo de información general son los “separadores de arena”. Estos dispositivos son instalados a la succión de la bomba y tiene la función de separar la arena para evitar fallas en el sistema de producción. Aprovechan los ciclos de no succión de la bomba subsuperficial para fomentar la decantación de la arena y así separarla de la corriente principal de producción. Su utilidad es cuestionable ya que no está claro que hacer posteriormente con la arena separada.

CAPÍTULO 3

INSTRUMENTOS QUE PERMITEN DIAGNOSTICAR LAS ANOMALÍAS EN EL EQUIPO SUBSUPERFICIAL DEL POZOS.

Actualmente existen diferentes tipos de equipos, diseñados para diagnosticar las anomalías durante la operación del sistema de bombeo mecánico. A estos equipos se les conoce como ecómetro y dinamómetro.



3.1 Sistemas analizadores del pozo.

Su principal objetivo es el de proporcionar todos los datos necesarios para analizar el comportamiento de un sistema de bombeo mecánico y del pozo.

Desde el inicio del bombeo mecánico se ha tratado de diagnosticar las causas de la reducción de la producción así como de las fallas en los equipos, para esto, se han desarrollado instrumentos para ayudar a definir los problemas de manera más eficiente y con mayor precisión.

Actualmente existen diferentes tipos de equipos, desde los más simples (eléctricos) hasta los sistemas completos de análisis con programas de cómputo, específicamente diseñados para el análisis de dicho comportamiento. A estos equipos se les conoce como:

- a) Ecómetro.
- b) Dinamómetro.

3.2 Ecómetro.

El Ecómetro es un instrumento, cuyo principio de operación está basado en la acústica, y permite determinar la profundidad del nivel del líquido en un pozo.

Tipos de Ecómetro:

- Analógicos.
- Digitales.

Los analógicos únicamente proporcionan una tira de papel térmico en la cual se tiene que realizar la interpretación.

Los digitales debido a que cuentan con una computadora y los programas especiales, pueden proporcionar nivel de líquido, líquido sobre la bomba, presión de fondo, presión de la columna de gas.

3.2.1 Principio de operación.

Se genera un pulso de presión que viaja a través del espacio anular; al “chocar” con los coples, fluidos o alguna otra obstrucción genera un eco que es captado por un micrófono que

lo convierte de un pulso de presión a un pulso eléctrico; éste es amplificado, filtrado y finalmente grabado en un papel térmico para su interpretación.

La velocidad del sonido depende de las condiciones del medio en las que se propaga (medio acústico), temperatura, presión, densidad. Por ejemplo, la velocidad del sonido en el aire a una temperatura de 8°C es de 336 m/s y en el agua es aproximadamente 4 veces más veloz.

Del análisis de los datos que se obtienen de estos instrumentos se puede deducir principalmente:

1. El nivel de fluidos y por lo tanto, la sumergencia de la bomba.
2. La existencia de alguna restricción en el espacio anular.

3.2.2 Partes del Ecómetro.

El Ecómetro se divide en dos partes principales:

1. Pistola.

Su función es la de emitir y recibir el pulso de presión y transformarlo a pulso eléctrico; para esto consta de:

- a) Micrófono.
- b) Cámara de presión.
- c) Gatillo.
- d) Seguro.
- e) Manómetro.
- f) Conector para salida del micrófono.



Figura 3.1 Pistola ^[18].

2. Graficador.

Su función es la de amplificar, filtrar y graficar el pulso eléctrico y para esto cuenta con:

- a) Amplificador.
- b) Botón de encendido del amplificador.
- c) Controles de sensibilidad.
- d) Control de filtros.
- e) Graficador.
- f) Voltímetro.



Figura 3.2 Graficador ^[18].

3.2.3 Interpretación.

Mediante la interpretación de un registro del Ecómetro se puede obtener lo siguiente:

- a) Nivel del líquido.
- b) Variaciones en el diámetro del espacio anular (liners, desprendimiento de T.R.).
- c) Profundidad de colocación de válvulas de bombeo neumático.

Existen otros casos, que normalmente son los más comunes, en los que únicamente es posible identificar los primeros coples, en este caso lo más recomendable es obtener un factor con los coples que se distinguen claramente y extrapolar hasta el nivel de fluido.

El objetivo principal en la toma de registro de nivel en el bombeo mecánico es ver el nivel dinámico del pozo y por lo tanto la sumergencia de la bomba.

3.2.4 Fuentes de error.

Una de las principales fuentes de error está en la interpretación y/o obtención del nivel del líquido, ya que normalmente se utiliza un factor constante de centímetros por metro para todos los pozos, lo cual es debido a que la distancia entre cresta y cresta depende de las condiciones del medio acústico que no es muy preciso. En otras ocasiones se confunde el nivel del líquido con la vibración o ruido del pozo (fugas de gas, burbujeo), esto puede ser evitado utilizando las diferentes sensibilidades del aparato.

3.2.5 Ecómetro digital analizador de pozos.

Es un instrumento digital para la adquisición de datos de nivel de líquidos adquiridos por métodos acústicos, obtenidos de una presión transitoria acústica o pulso acústico de disparo.

La información del disparo, el dinamómetro y la información de la corriente y potencia del motor van a una unidad compacta electrónica en forma de datos, una computadora portátil es usada o empleada para adquirir, procesar, almacenar y mostrar los datos.

La información adquirida desde varios sensores se digitaliza a través de un convertidor análogo a digital, siendo estos datos almacenados en la computadora. Con esta información podemos medir la presión del espacio anular, la presión de fondo, el desempeño de la bimba, la medición de carga sobre la varilla pulida.

La carga de unidad de bombeo y el desempeño del rotor permite a un operador maximizar la operación de producción de aceite y minimizar los costos de operación.



Figura 3.3 Ecómetro digital analizador de pozos ^[18].

3.3 Dinamómetro.

El dinamómetro es un instrumento que sirve para evaluar las fuerzas motrices; en este caso la fuerza será igual al peso, por lo que estamos evaluando cargas o pesos. La gráfica de estas cargas en un período se le llama dinamométrica.

El dinamómetro más simple sería un resorte con una escala y una pluma o estilete unido en uno de sus extremos para registrar las deflexiones del resorte sobre un papel que se desplaza en forma perpendicular al eje del resorte (Figura 3.4).

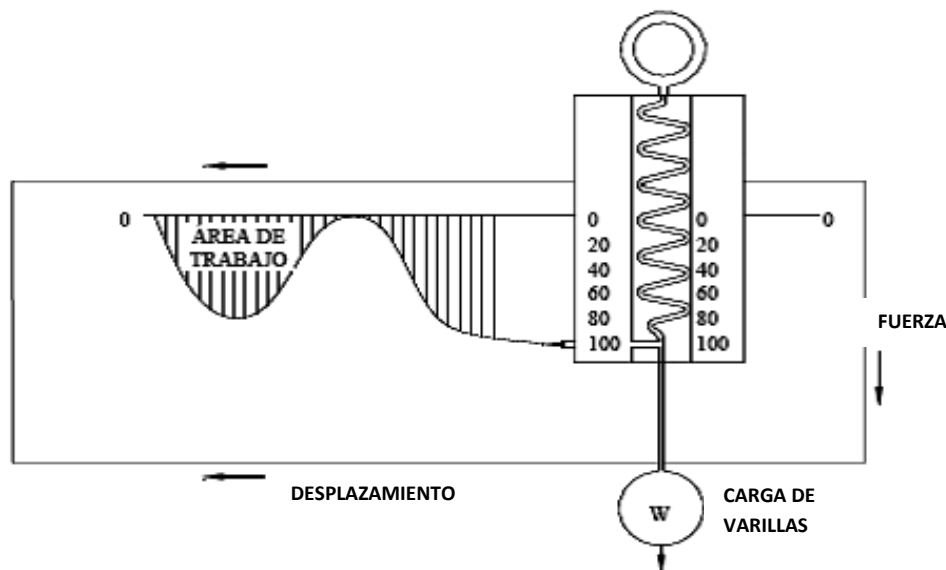


Figura 3.4 Representación del dinamómetro más simple ^[18].

El peso W representa la carga de varillas que alarga el resorte hacia abajo y luego es liberado de dicha carga. El patrón de fuerzas describe una curva senoidal, el área bajo la primera mitad del ciclo es positiva y es negativa la segunda mitad.

Debido a que el trabajo se define como la fuerza multiplicada por la distancia sobre la que actúa, el área bajo un diagrama de fuerza continua es proporcional al trabajo realizado. A este diagrama de fuerzas vs. desplazamiento, se le llama carta dinamométrica y da la medida exacta del trabajo efectuado en la varilla pulida, además de que informa de las condiciones de bombeo.

Hasta hace algunos años las cartas dinamométricas superficiales eran utilizadas para resolver o encontrar las fallas mediante la comparación de sus formas para diferentes problemas en el mismo campo. Para esto era necesario conocer perfectamente los pozos del área, además de que la interpretación no podía ser muy veraz. En 1935 W.E. Gilbert desarrolló los

instrumentos necesarios para obtener las cartas dinamométricas de fondo. Que dieron la primera idea de la relación entre el ciclo de bombeo y la forma de la carta. El trabajo de Gilbert aceleró el desarrollo de más y mejores técnicas de diagnóstico.

3.3.1 Tipos de dinamómetro.

Existen dos tipos, analógicos y digitales. La principal diferencia radica en que el digital proporciona las cartas dinamométricas de fondo, así como una mayor cantidad de datos y gráficas para ayudar a la correcta interpretación. También proporciona el análisis de esfuerzos para comprobar si el trabajo está bien diseñado.

3.3.2 Principio de operación.

Los datos del dinamómetro se obtienen mediante el transductor de cargas. Un transductor de carga es un aparato que transforma la potencia eléctrica en acústica o mecánica.

El transductor de cargas puede ser de dos tipos:

- Tipo Herradura (Figura 3.5): Consiste en una celda con un sensor de carga muy preciso. Está complementado con un sensor, para medir la aceleración en la varilla pulida y calcular así las emboladas. Este tipo de transductor de carga es muy preciso pero también requiere mayor tiempo y trabajo en su instalación.
- Tipo C o Grampa: Este transductor es muy fácil y rápido de instalar, pero no es tan preciso como el anterior en cuanto a los valores de carga se refiere, ya que consta de una serie de sensores muy sensibles que miden las variaciones en el diámetro de la varilla pulida, también tiene el sensor de aceleración, para calcular las emboladas.

3.3.3 Partes del dinamómetro.

1. Transductor de carga (Figura 3.5): Es un registrador de esfuerzos de alta sensibilidad el cual va montado en la varilla pulida. Las cargas debidas a la compresión cambian la resistencia en el registrador de esfuerzo. Las diferencias resultantes de potencial a través de los registradores son gravadas en forma de carga contra tiempo.
2. Transductor de posición o de desplazamiento (Figura 3.5): Es un servo-mecánico el cual acciona a la bobina del potenciómetro. Los cambios de potencial a través de la bobina son gravadas en el registrador en forma de desplazamiento contra tiempo.



Figura 3.5 Transductor de carga y transductor de posición o desplazamiento ^[18].

3. Registrador de canales (Figura 3.6): Es un sistema de grabación portátil diseñada para medir variables tales como: Esfuerzos, presiones, velocidades, aceleración, etc.



Figura 3.6 Registrador de canales ^[18].

En la actualidad el dinamómetro se ha convertido en una herramienta sumamente valiosa, debido a que mediante su uso es posible obtener la siguiente información:

1. Cargas en el equipo superficial.
2. Cargas en la sarta de varillas.
3. Comportamiento de la bomba subsuperficial.

La magnitud del patrón de carga es muy importante, pero también es de gran interés su forma ya que este perfil da información acerca del comportamiento de la bomba subsuperficial. El sistema de bombeo mecánico puede compararse con un sistema de comunicación en el que la sarta de varillas actúa como línea de transmisión, la bomba como transmisor y el dinamómetro en la varilla pulida como receptor (Figura 3.7).

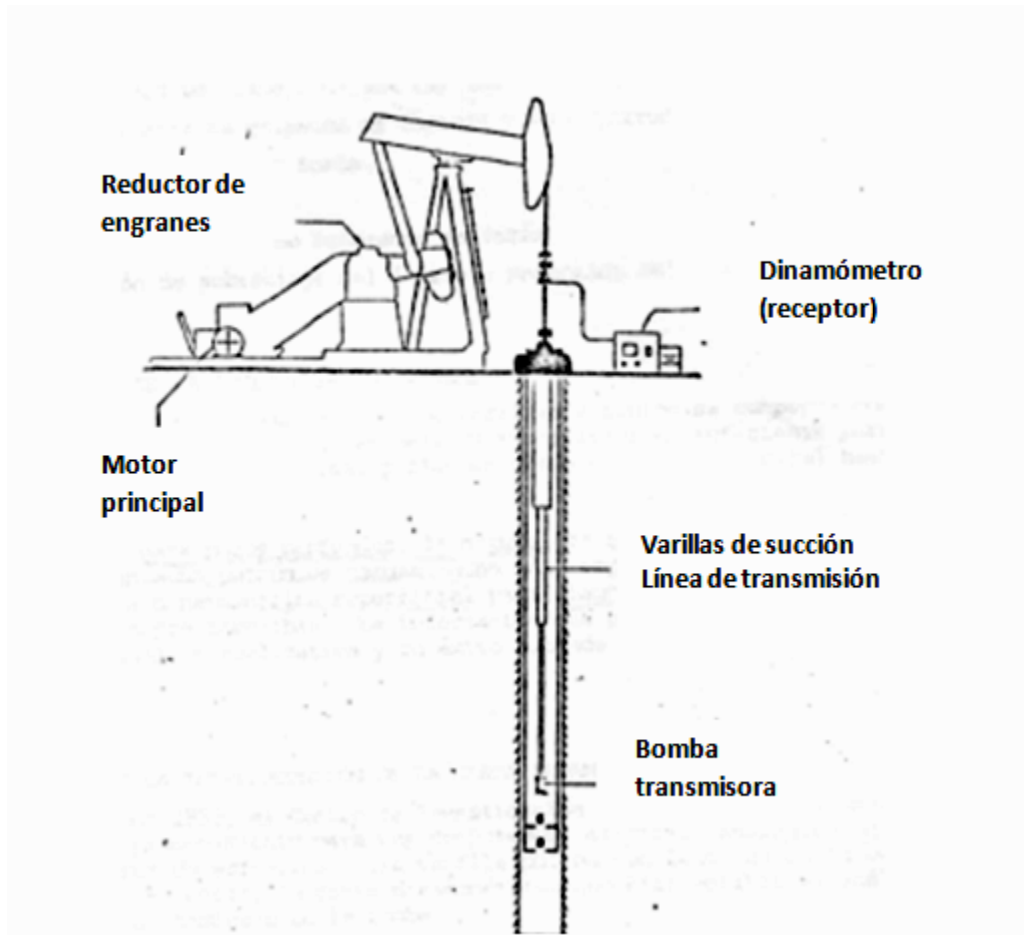


Figura 3.7 Comparación del sistema de bombeo mecánico con un sistema de comunicación

[18]

Cada vez que la bomba realiza una carrera, se envía una señal de fuerza a lo largo de la sarta de varillas a una velocidad de 15,800 pie/seg hasta la superficie, donde se registra por medio del dinamómetro. Cada condición distinta en el fondo del pozo, envía una señal de fuerza diferente a la superficie. En algunos casos, un analista experimentado puede determinar el comportamiento de la bomba interpretando la forma del perfil de la gráfica dinamométrica para diagnosticar uno o varios de los siguientes aspectos:

-
- a) Condiciones de trabajo de las válvulas viajera o de pie.
 - b) La existencia de golpeteo de fluidos y su magnitud.
 - c) Candado de gas en la bomba.
 - d) Fricción excesiva.
 - e) Si la bomba está o no bombeando en vacío.
 - f) Condición de sobreviaje del émbolo o reducción del viaje del mismo.
 - g) Registra la corriente del motor contra la posición de la varilla pulida.

3.3.4 Limitación de la interpretación visual.

En pozos someros, donde la carga de varillas y el fluido se comportan como una masa concentrada, la carta dinamométrica superficial es suficiente para determinar las cargas y diagnosticar problemas desde el motor principal hasta la bomba subsuperficial.

En cambio, para pozos profundos, la naturaleza elástica de la sarta de varillas presenta un patrón de cargas mucho más complejo y la interpretación visual de la carta dinamométrica superficial para diagnosticar problemas pozo abajo es casi imposible. La información que puede obtenerse de la interpretación visual es cualitativa y su éxito depende de la experiencia del analista.

3.3.5 Patrón típico de cargas en la varilla pulida durante un ciclo de bombeo, dividido en cuatro zonas de movimiento.

Todos los sistemas de bombeo mecánico que operan a una velocidad finita, tienen como característica común el patrón típico de cargas, ilustrado en la (Figura 3.8), no tomando en cuenta los efectos de las fuerzas de fricción y armónicas.

Si se inicia en el fondo de la carrera de la varilla pulida y se mueve hacia arriba, se tiene:

Zona 1.- Es la parte de la carrera donde la máxima carga de varillas y fluido se levanta de fondo con máxima aceleración. Esta zona se extiende desde el fondo hasta algún punto cerca de la mitad de la carrera ascendente. En esta zona, el componente de la fuerza de inercia se suma a la carga estática de la masa de varillas y fluido. Debido a que la máxima aceleración hacia arriba ocurre en esta zona, normalmente el producto de la carga compuesta de varillas y fluido por la máxima aceleración, da como resultado la carga pico o carga máxima en la varilla pulida.

Zona 2.- Es la parte de la carrera ascendente que se extiende desde cerca del punto medio hasta el tope de la carrera. En esta zona, aún se tiene la máxima masa de varillas y fluido,

pero se está desacelerando, consecuentemente, el componente de inercia de la masa de varillas y fluido se está restando del total del peso estático.

Zona 3.- Se inicia en la parte superior de la carrera descendente desplazándose hacia abajo hasta algún punto cerca de la mitad de la carrera. En esta zona únicamente se tiene el peso de las varillas flotando menos el componente de inercia. Normalmente es en esta zona donde ocurre la máxima aceleración hacia abajo.

Zona 4.- Se inicia cerca de la mitad de la carrera descendente y se extiende hasta el fondo de la carrera. En esta zona las varillas flotando se desaceleran en su preparación para detenerse en el fondo de la carrera, entonces, el componente de la inercia se suma al peso de las varillas.

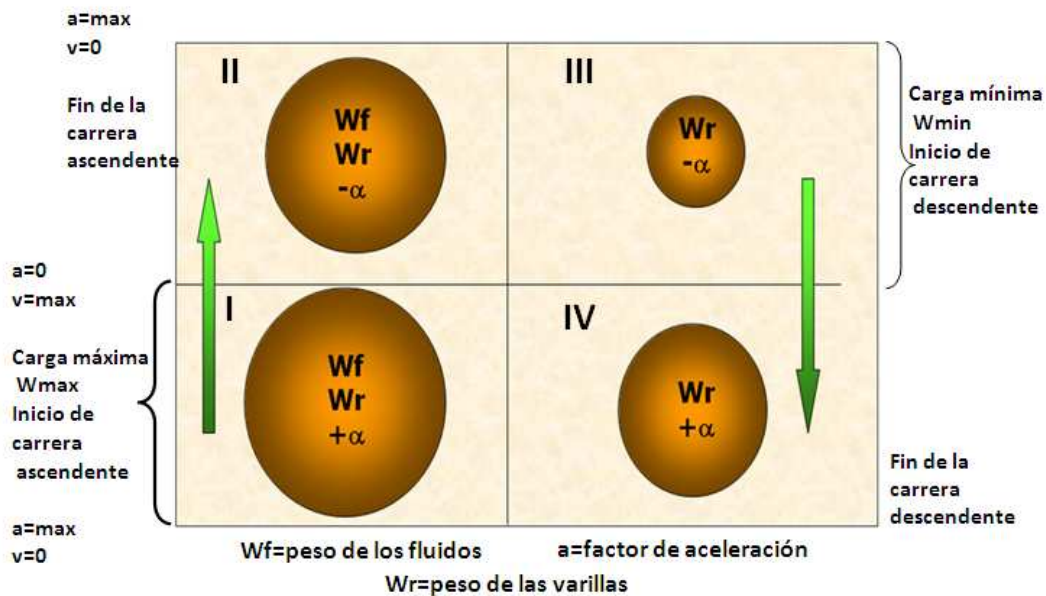


Figura 3.8 Patrón típico de cargas en la varilla pulida durante un ciclo de bombeo dividido en cuatro zonas de movimiento [7].

Todo lo anterior es una simplificación de un tema complejo debido a que se supuso una masa inelástica de varillas y fluidos, considerando inercia simple y no tomando en cuenta las fuerzas de fricción y armónicas que están involucradas. Esta simplificación en la práctica, no es completamente verdadera, debido a que una columna elástica de varillas y fluido (las fuerzas armónicas), constantemente se suman y restan a las fuerzas estáticas y de inercia, de tal forma, que las cargas exactas en la varilla pulida pueden predecirse únicamente utilizando modelos matemáticos complejos.

En un pozo con bombeo mecánico de profundidad somera a media, donde las cargas de varillas y fluido actúan como una masa concentrada, el patrón típico de cargas se considera aproximadamente verdadero. En pozos profundos, aunque dicho patrón puede ser verdadero en muchos casos, hay ocasiones en que las fuerzas armónicas modifican las cargas máximas de inercia y estáticas para producir un desplazamiento de fuerzas con un patrón de comportamiento muy complejo. Sin embargo, en cualquiera de los casos el concepto de las 4 zonas es muy importante para entender apropiadamente el desplazamiento de las fuerzas de un sistema de bombeo mecánico.

3.3.6 Construcción de una carta dinamométrica típica.

La construcción se realiza descomponiendo la carta en sus más simples elementos y paso a paso se incluyen las deformaciones que sufre hasta obtener la forma de carta dinamométrica típica. Recordando el concepto de la masa de varillas y fluido concentrado, supóngase que la varilla pulida de la unidad de bombeo, empieza a levantar la carga lentamente hasta la parte superior de la carrera; en este momento la masa concentrada se cambia por otra más pequeña equivalente al peso de las varillas solas y regresa al fondo de la carrera también lentamente.

El patrón de cargas registrado en una gráfica sería similar al de la (Figura 3.9).

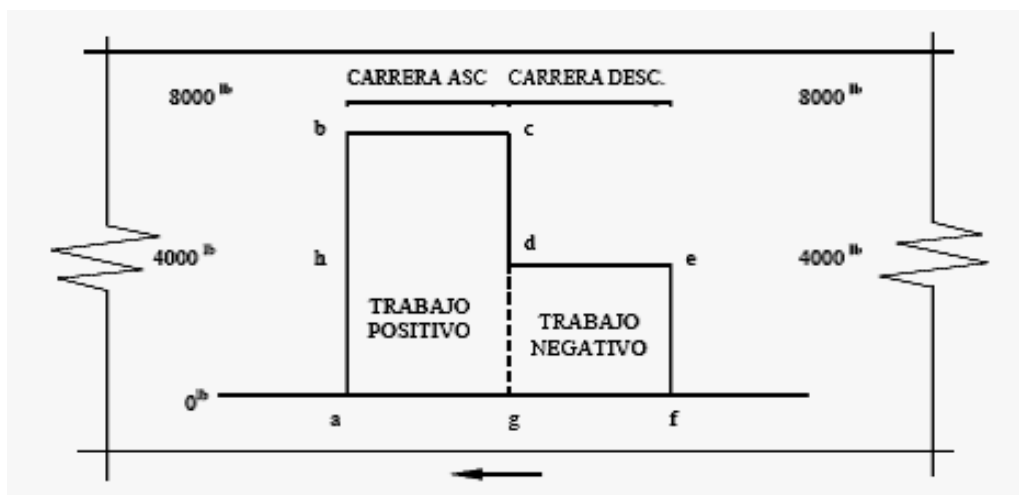
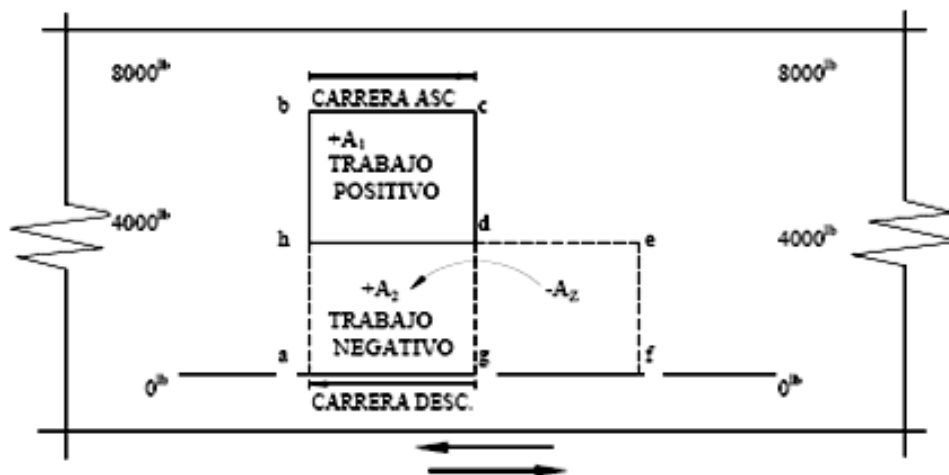


Figura 3.9 Patrón de cargas en la varilla pulida ^[18].

Figura 3.10 Trabajo neto ^[18].

El área A1 (a, h, b, c, d, g) es proporcional al trabajo positivo realizado por la unidad de la varilla pulida para elevar a las varillas y al fluido.

El área A2 (d, e, f, g) es proporcional al trabajo negativo realizado por las varillas flotando conforme son atraídas hacia abajo por la fuerza de gravedad.

Debido a que las cartas dinamométricas se dibujan en gráficas que representan movimiento, hacia adelante en la carrera ascendente y hacia atrás en la carrera descendente, la presentación de la (Figura 3.10), debe doblarse de modo que pueda apreciarse la diferencia entre las áreas A1 y A2, es decir, el trabajo neto realizado, representado por el rectángulo h, b, c, d de la (Figura 3.10).

Este rectángulo, formado por la unión de los puntos (h, b, c, d), describe un comportamiento ideal de la operación de la bomba, de acuerdo a la secuencia del ciclo de bombeo:

Comportamiento ideal.

- 1) En el punto h, la válvula viajera cierra y se inicia la carrera ascendente del émbolo.
- 2) Del punto h al punto b, la carga de fluido es transferida de la tubería de producción a la sarta de varillas.
- 3) En el punto b, la válvula de pie abre y permite la entrada de fluidos del pozo al barril de la bomba.
- 4) De b a c, la carga de fluidos es elevada por el émbolo, al mismo tiempo que se está llenando el barril de la bomba.
- 5) En el punto c, se cierra la válvula de pie y se inicia la carrera descendente del émbolo, permaneciendo cerrada la válvula viajera.

- 6) De c a d, la carga de fluido es transferida de las varillas a la tubería de producción.
- 7) En el punto d, abre la válvula viajera y se establece comunicación en el fluido del barril y el fluido en la tubería de producción.
- 8) Del punto d al h, el émbolo desplaza el fluido del barril de la bomba, a través de la válvula viajera, hacia la parte superior del émbolo. A partir del punto h el ciclo se repite.

El comportamiento ideal descrito para la bomba subsuperficial, es difícil de encontrar en una instalación de bombeo mecánico y requiere de condiciones muy especiales, como el hecho de que: el líquido bombeado no contenga gas, que las válvulas abran y cierren oportunamente, además, que sellen perfectamente sus asientos respectivos, que no exista fricción de las varillas con la tubería de producción, que no intervengan fuerzas elásticas y, que la velocidad de bombeo sea sumamente baja.

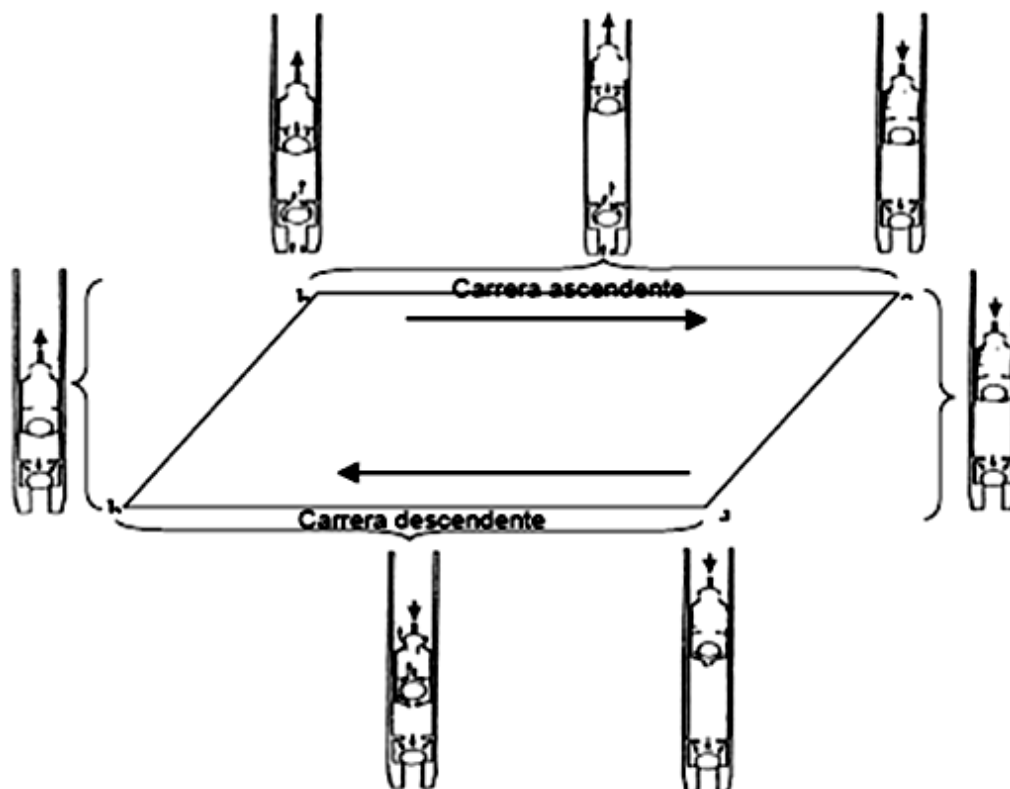


Figura 3.11 Comportamiento ideal ^[18].

3.3.7 Principios del movimiento.

Suponiendo que se tienen las mismas condiciones anteriores, excepto que la velocidad de bombeo tenga algún valor normal. En este caso el patrón de cargas rectangulares se modifica. A fin de visualizar esta modificación, es necesario recordar dos principios elementales de la física.

- 1) La fuerza requerida para acelerar cualquier masa dada es directamente proporcional a la aceleración.
- 2) En el movimiento recíprocante generado por el sistema biela-manivela, donde una masa se mueve de A a B y regresa a A, el mayor valor de aceleración se tiene en el instante en que se inicia el movimiento en A y disminuye a cero en algún punto cercano a la posición media, incrementándose una vez más hasta el máximo en la posición B.

Por lo anterior, la aceleración de la varilla pulida en movimiento, siempre es mayor cuando inicia su ascenso en el fondo y cuando inicia su descenso en la parte superior (Figura 3.12). Entonces, el arranque desde el fondo con la masa máxima equivalente al peso de varillas y fluido, se realiza con aceleración máxima requiriendo un mayor esfuerzo en la varilla pulida. Conforme esta masa se eleva, está sujeta a menos y menos aceleración hasta aproximadamente la mitad de la carrera ascendente, donde la aceleración es cero. Desde este punto hasta la parte superior de la carrera, la masa se desacelera, es decir, que el componente de aceleración se incrementa con signo negativo, por lo cual, se resta del peso estático de las varillas y el fluido. Cuando la carga de varillas solas inicia su descenso desde la parte superior de la carrera, nuevamente la aceleración es máxima y también se resta del peso estático de las varillas por lo cual, la carga sobre la varilla pulida es mínima. El componente de aceleración disminuye hasta aproximadamente la mitad de la carrera descendente, donde una vez más, comienza a sumarse el peso de las varillas que se desaceleran otra vez hasta llegar al fondo de la carrera.

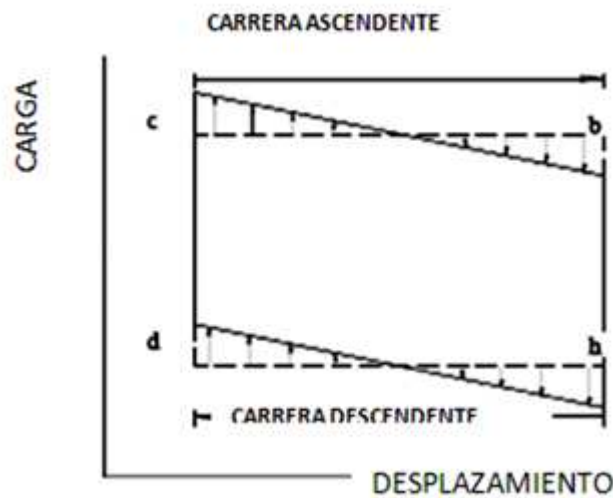


Figura 3.12 Modificación a la carta dinamométrica por efectos de aceleración [18].

El movimiento representado en la (Figura 3.12), es el movimiento armónico simple (ver Apéndice), en la varilla pulida, que tiende a desarrollar la aceleración lineal. En una unidad de bombeo real, la relación biela-manivela nunca se aproxima al infinito lo cual es necesario para desarrollar el movimiento armónico simple, entonces, el patrón de aceleración en la varilla pulida queda modificado por el llamado factor de la máquina y adquiere la forma ilustrada en la (Figura 3.13).

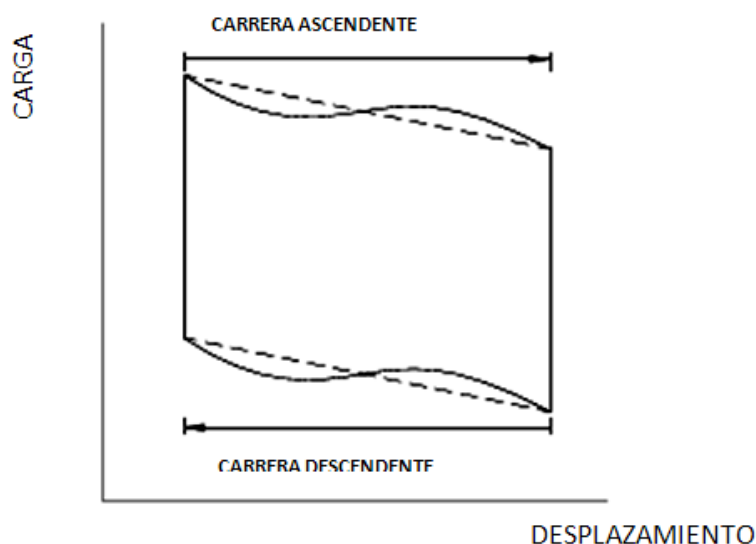


Figura 3.13 Patrón de aceleración en la varilla pulida modificado por el factor de la máquina [18].

3.3.8 Alargamiento de las varillas.

Hasta ahora, se ha considerado únicamente el movimiento recíprocante de una carga diferencial en un sistema no elástico, pero la sarta de varillas es realmente una masa elástica. La sarta de varillas elástica y su carga de fluido son elevadas por la varilla pulida, pero la carga total no se mueve hacia arriba simultáneamente como una masa concentrada, sino que cada sección de la sarta de varillas, de abajo hacia arriba, tiende a alargarse ligeramente más que la sección inmediata anterior. Conforme la varilla pulida inicia su movimiento ascendente, las varillas empiezan a alargarse y la carga en la varilla pulida se hace más y más grande. En la parte superior de la carrera, la varilla se contrae con una disminución sucesiva de la carga, la válvula viajera abre, la carga de fluido se transfiere a la tubería de producción y la sarta inicia su descenso. Este alargamiento y contracción de las varillas, modifica aún más la carta dinamométrica como se muestra en la (Figura 3.14).

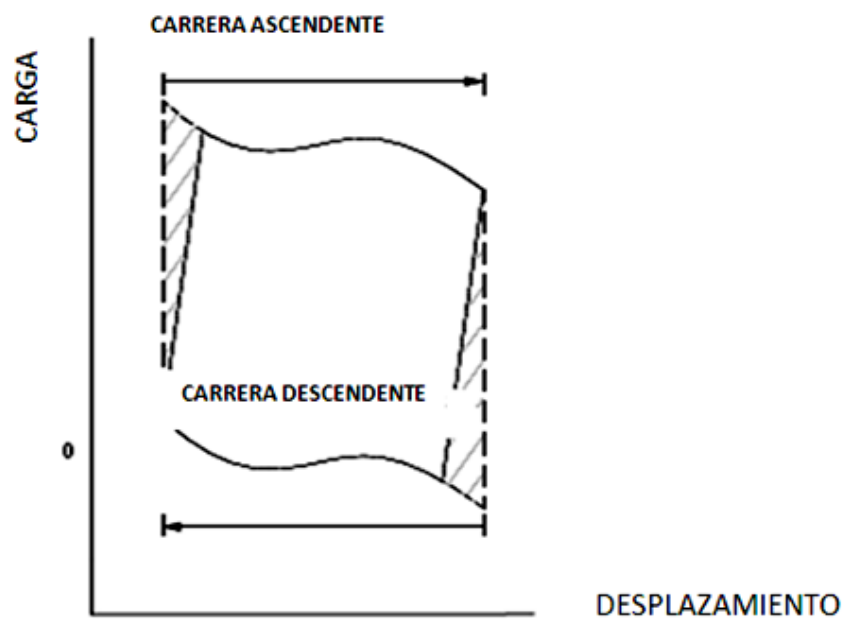


Figura 3.14 Modificación a la carta dinamométrica por efecto de alargamiento y contracción de varillas ^[18].

3.3.9 Movimiento armónico de las varillas.

Si una masa elástica de varillas está suspendida en el aire desde la parte superior de una torre alta y se le aplica una fuerza en la parte inferior la sarta se deflexiona hacia abajo y luego vuelve hacia arriba, es decir, que la sarta tiende a vibrar con una cierta frecuencia natural.

En un pozo productor, después de que ocurre el alargamiento de las varillas, la válvula viajera cierra y la sarta empieza a vibrar con una frecuencia natural. Simultáneamente, cuando las varillas llegan a la parte superior de la carrera, comienza a bajar y quedan liberadas del alargamiento, entonces, la sarta inicia nuevamente su período de frecuencia natural de vibraciones. Por lo tanto, en un sistema elástico, el diagrama de carga se modifica por el patrón de vibraciones de la sarta de varillas (Figura 3.15).

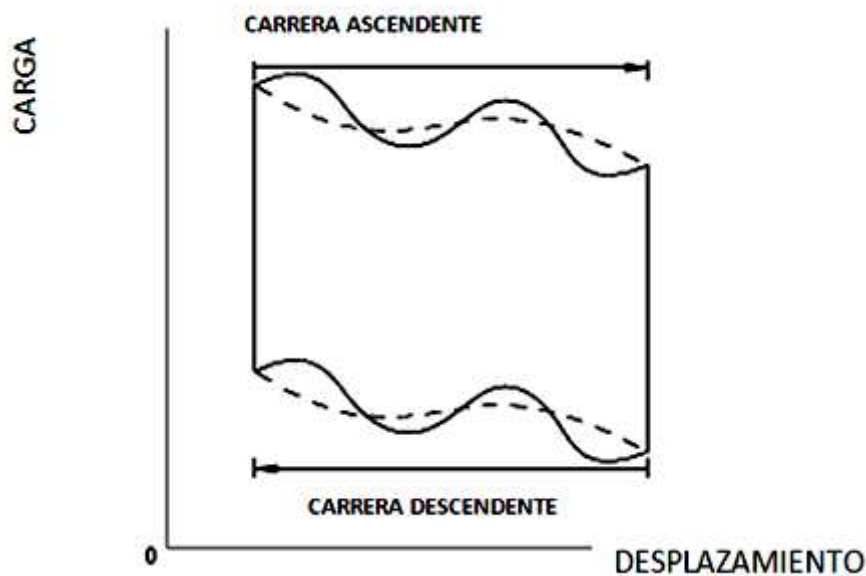


Figura 3.15 Modificación a la carta dinamométrica por efectos de vibraciones de la sarta de varillas ^[18].

Si la frecuencia natural de una sarta dada es alta con relación a la velocidad de bombeo, existirán varios picos, por otra parte, si la frecuencia natural de la sarta es baja con respecto a la velocidad de bombeo, únicamente se tendrá un pico.

3.3.10 Amortiguamiento.

Supóngase que la sarta de varillas está vibrando a su frecuencia natural en el aire; ésta seguirá oscilando con su movimiento hacia arriba y hacia abajo hasta que la fricción interna amortigüe esas vibraciones. Sin embargo en realidad la sarta de varillas vibra con una pesada carga de fluido, durante la carrera ascendente, contra una considerable fuerza de fricción, por lo que la altura de las ondas de esfuerzo, será sucesivamente menor en cada vibración (Figura 3.16). De otra manera, no solamente la fricción interna tiende a amortiguar las vibraciones, sino que la fricción externa dada por la masa de fluido, también producirá una rápida

disminución en el patrón de vibraciones. Entonces, en lugar de tener una vibración de amplitud constante, la fricción tiende a hacer que dicha vibración disminuya rápidamente.

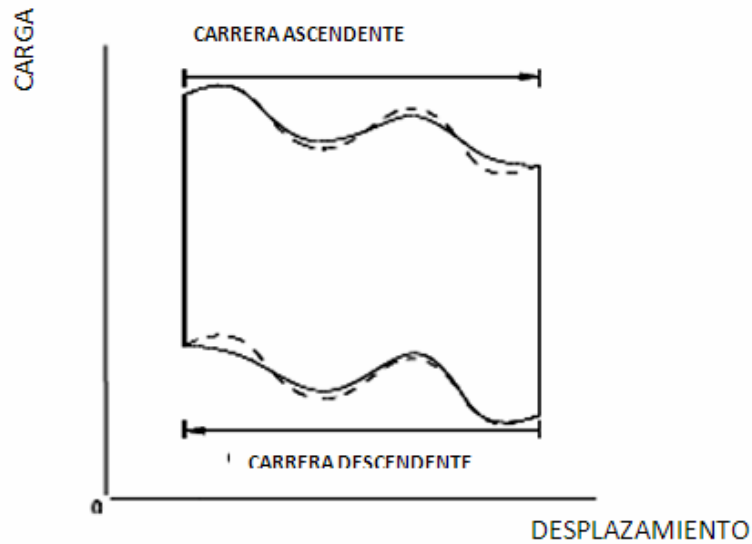


Figura 3.16 Modificación a la carta dinamoétrica por efectos de amortiguamiento ^[18].

Aunque todo lo anterior es una simplificación de un tema complejo, se considera que da una idea para entender la naturaleza y estructura de la carta dinamoétrica y lo que ella enseña del comportamiento de la bomba y del sistema de bombeo mecánico.

El conocimiento de la carta dinamoétrica y su análisis, pueden maximizar los beneficios de muchos pozos productores, asegurando que la unidad de bombeo y varillas operen en la forma más económica y dentro de sus rangos de cargas, además, que la bomba subsuperficial está ejecutando su trabajo con máxima eficiencia ^[18].

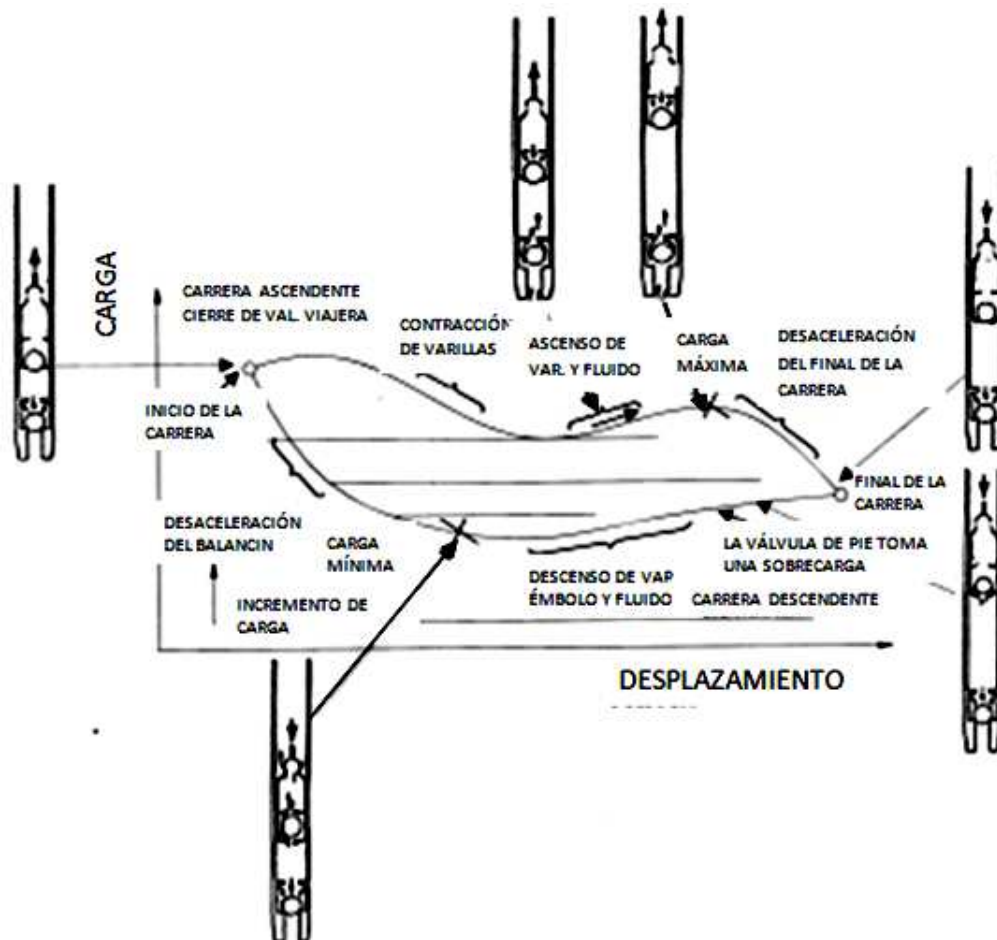


Figura 3.17 Carta dinamo-métrica típica ^[18].

3.3.11 Procedimiento para interpretar una carta dinamo-métrica.

1. Conocer la historia de producción del pozo.
2. Conocer las propiedades PVT del crudo.
3. Obtener información de las fallas de aparejo que ha tenido el pozo con anterioridad (Cuando el equipo de RTP saca el aparejo y la información de la detección de anomalías en la revisión de la bomba en los talleres de producción).
4. Conocer los últimos datos de operación (unidad de bombeo mecánico, carrera, velocidad, tamaño del motor).
5. Conocer los últimos registros del nivel (para verificar la sumergencia de la bomba).
6. Conocer los últimos reportes del personal, antes de la falla, tales como: Prueba de producción, presión de flujo, contrapresión, presencia de gas en TP ó TR, algún forzamiento o flotación de varillas etc.).
7. Obtener el último diseño de pozo con el estado mecánico.

8. De la carta dinamométrica de fondo, obtener la siguiente información:
 - a) Carga máxima y mínima de la sarta de varillas, estos datos deben ser muy parecidos de acuerdo al diseño, de lo contrario: al tener una carga máxima cerca del límite permitido, quiere decir que (existe azolvamiento de la bomba, alguna fricción excesiva). Lo anterior es demasiado peligroso y hay que parar la UBM de inmediato ya que de lo contrario es probable que se caiga dicha unidad; al tener una carga mínima cerca de cero quiere decir que no tenemos peso y que muy probablemente este rota la sarta de varillas.
 - b) Verificar la hermeticidad de la válvula viajera y válvula de pie.
 - c) Verificar si existe algún candado de gas.
 - d) Verificar si existe golpeteo de fluidos y su magnitud.
 - e) Obtener de la carta la carga total del émbolo, carrera efectiva del émbolo, fuerza de flotación sobre las varillas.
 - f) Esfuerzos de la varilla y rango de carga.

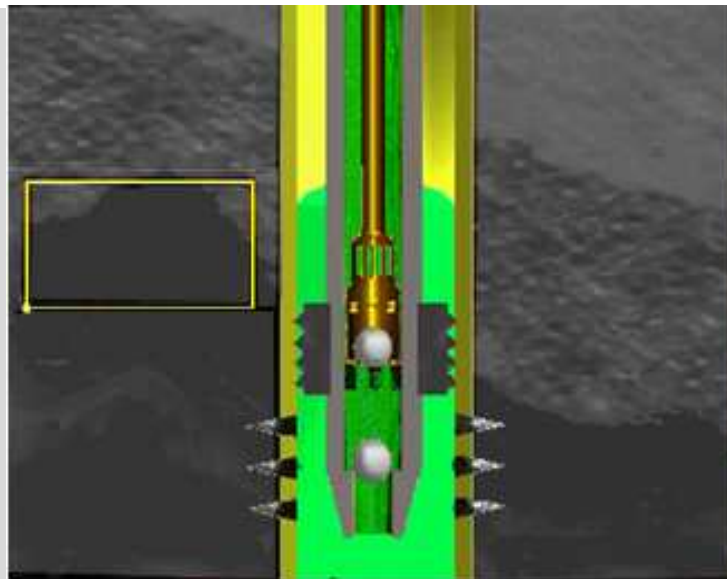
De la carta dinamométrica de superficie, obtener la siguiente información:

- a) Cargas máximas y mínimas en la estructura de la unidad de bombeo.
 - b) Torsión en el reductor de engranes y en el motor principal.
 - c) Contrabalanceo.
 - d) Trabajo realizado por la varilla pulida, para elevar el fluido y vencer la fricción.
9. Comparar la carta dinamométrica con otras cartas obtenidas con anterioridad de algunas fallas o compararlas con las cartas típicas de fallas.
10. Es conveniente escuchar al personal, respecto al comportamiento del pozo y de la unidad de bombeo mecánico para tener un mejor diagnostico ^[16].

CAPÍTULO 4

PROBLEMAS Y SOLUCIONES PARA EQUIPOS DE BOMBEO MECÁNICO.

Gran parte de la información, se deriva de la representación gráfica del dinamómetro, por lo que se considera conveniente establecer los lineamientos que deben observarse para llevar a cabo la interpretación correcta de dicha gráfica.



4.1 Problemas en el equipo superficial.

Problemas en el motor.

Cuando la unidad de bombeo mecánico de un pozo que está produciendo adecuadamente presenta una falla en el tablero de control del motor, que ocasionará el paro de la unidad, representaría una pérdida en la producción al suspender el bombeo de crudo por una falla ajena al pozo. Tal es el caso del problema de pérdida de fase de las líneas de energía que alimentan al motor de la unidad de bombeo mecánico. Cuando se presenta esta condición el motor puede continuar operando aún con todas las protecciones del tablero de control e inclusive se puede llegar a quemar. El cambio de motor en una unidad de bombeo mecánico es una maniobra que puede durar hasta varias horas dependiendo de la ubicación del pozo y disponibilidad de equipo de repuesto, personal y equipo de maniobras.

Unidad de bombeo desbalanceada.

De igual forma una unidad desbalanceada reduce la eficiencia del sistema y produce un estrés adicional al funcionamiento del sistema mecánico de la unidad de bombeo. El desbalance se puede percibir con el sonido que produce el motor en la carrera ascendente y en la descendente, así como con la velocidad de la manivela en cada embolada.

Fugas en los empaques.

En la parte superficial de la tubería de producción se encuentra el estopero con los empaques que impiden que el fluido extraído salga de lo que es la tubería y se ponga en contacto con el medio ambiente. Estos empaques están en contacto con la varilla pulida y por lo tanto su desgaste depende de las condiciones de operación de la unidad de bombeo mecánico. Cuando un pozo tiene problemas para fluir por sí mismo al inicio o durante la operación, la varilla pulida queda sin lubricación y en movimiento. Esta condición provoca un calentamiento en la varilla pulida al estar en contacto con los empaques que ejercen una presión sobre ella. Este calor por fricción desgasta los empaques haciendo que pierdan presión sobre la varilla al perder material. Si esta condición se mantiene por un tiempo considerable sin que se haga algo para mejorarla o eliminarla se producirá una fuga en la parte superior del estopero cuando el pozo

comience a fluir y al continuar la unidad en operación, el mismo movimiento de la varilla ocasionará una dispersión de aceite en un radio alrededor del pozo.

Otro tipo de fugas se presenta cuando por alguna razón la tubería que conduce el fluido hasta los tanques de almacenamiento se encuentra obstruida y en consecuencia la presión en la misma va incrementándose en medida que el pozo sigue bombeando. Si no se detecta el problema y se libera la presión acumulada puede llegar a fracturarse la tubería y comenzaría a salir el fluido con alta presión.

4.2 Problemas comunes que afectan el comportamiento ideal.

En vista que gran parte de la información que se obtiene, se deriva de la gráfica de la bomba, se considera conveniente establecer los lineamientos que deben observarse para llevar a cabo la interpretación correcta de dicha gráfica. Con este propósito se presentan a continuación algunos problemas ideales más frecuentes en el bombeo mecánico y la forma en que se manifiestan en la gráfica aludida.

La gráfica ideal que indica una operación óptima de la bomba es aproximadamente de forma rectangular (Figura 4.1).

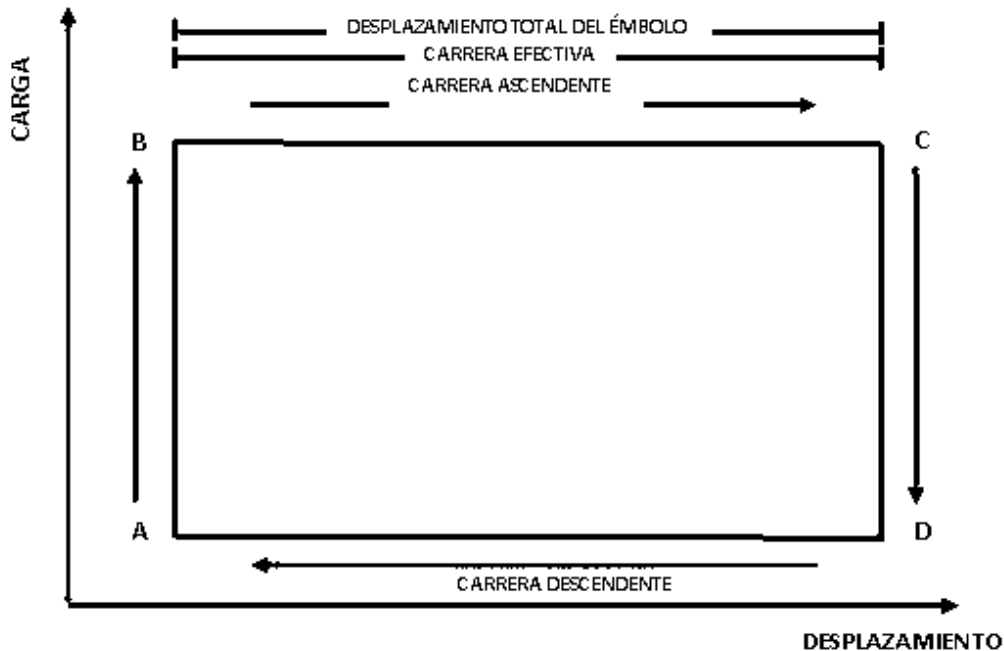


Figura 4.1 Gráfica ideal obtenida a la profundidad de la bomba ^[2].

En la (Figura 4.2), se indica compresión y expansión de gas dentro del barril de la bomba. Este problema ocasiona que la carrera efectiva del émbolo disminuya notablemente, dependiendo de la cantidad de gas almacenado dentro barril. Lo anterior puede deberse a una operación deficiente del separador de gas y se corrige colocando la bomba a una profundidad mayor, en donde exista menos gas libre.

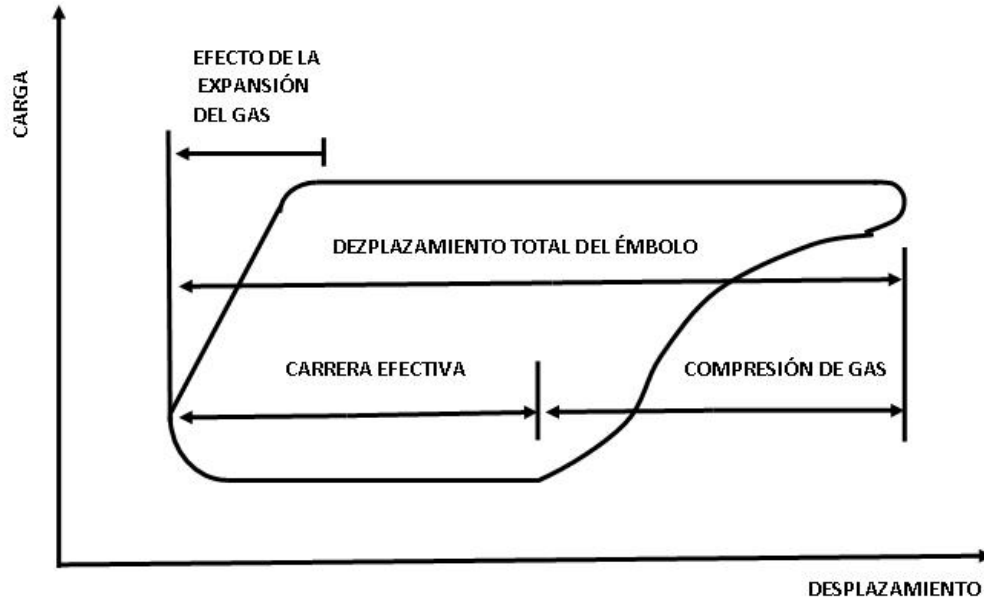


Figura 4.2 Gráfica de la bomba indicando compresión de gas ^[2].

La (Figura 4.3), representa un caso clásico de fuga en la válvula viajera o en el émbolo. Esta situación, originada por un asentamiento inadecuado de la canica de la válvula viajera o por desgaste excesivo del émbolo y el barril, ocasiona disminuciones notables en la producción de aceite. La forma arqueada de la gráfica se debe a la pérdida de carga al inicio y al final de la carrera ascendente, cuando la velocidad del émbolo es más baja. Obviamente, la medida será extraer la bomba y reponer las piezas defectuosas.

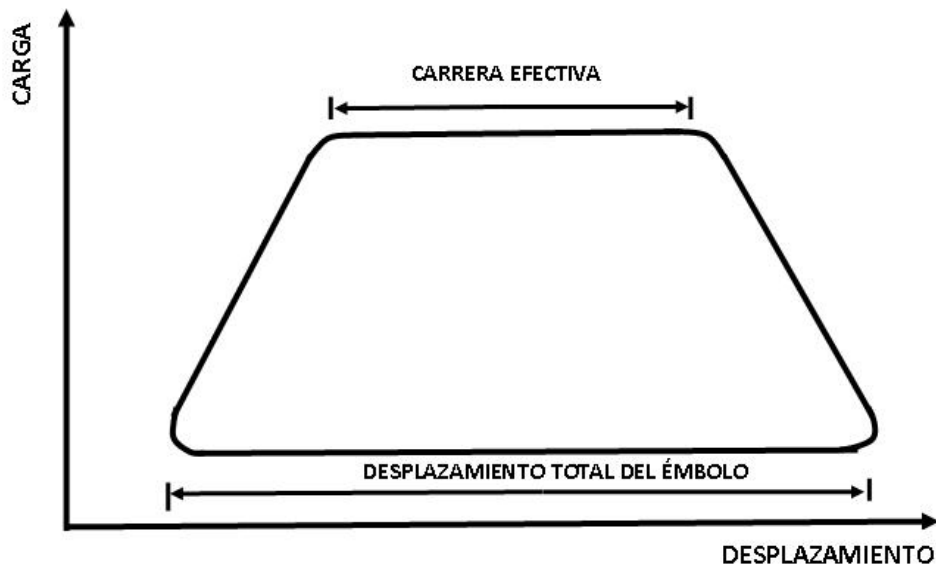


Figura 4.3 Gráfica de la bomba indicando fuga de la válvula viajera o en el émbolo [2].

La (Figura 4.4), es la gráfica típica de la bomba cuando se presentan fugas en la válvula de pie. Como en el caso anterior, se origina por un asentamiento inadecuado de la canica de la válvula de pie. Esto puede deberse a que la canica y/o el asiento se encuentran deteriorados; o bien, que en el asiento se haya depositado algún material, como arena, que impida el sello correcto de la canica. El traspaso de la carga de varillas a la tubería de producción y viceversa, es gradual, ocasionando la concavidad hacia arriba de la figura.

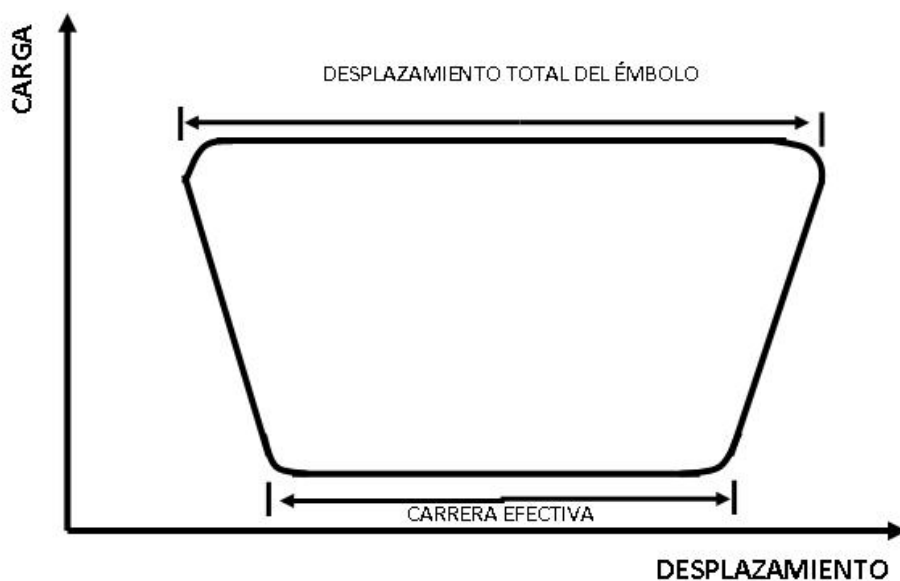


Figura 4.4 Gráfica de la bomba indicando fuga en la válvula de pie [2].

La (Figura 4.5), muestra una gráfica de la bomba para el caso de tubería de producción desanclada. Este problema sólo puede detectarse con precisión en pozos que producen poco gas; ya que para aquéllos que producen con alta relación gas-aceite, puede enmascarse con efectos de compresión y expansión.



Figura 4.5 Gráfica de la bomba indicando tubería desanclada [2].

La (Figura 4.6), muestra los efectos combinados de tubería desanclada y fuga en la válvula viajera o en el émbolo. Este problema puede detectarse, ya que ambos efectos se suman al iniciarse la carrera ascendente y se anulan en la carrera descendente. Al principio de la carrera el problema se agudiza mientras que al final tiende a cancelarse.

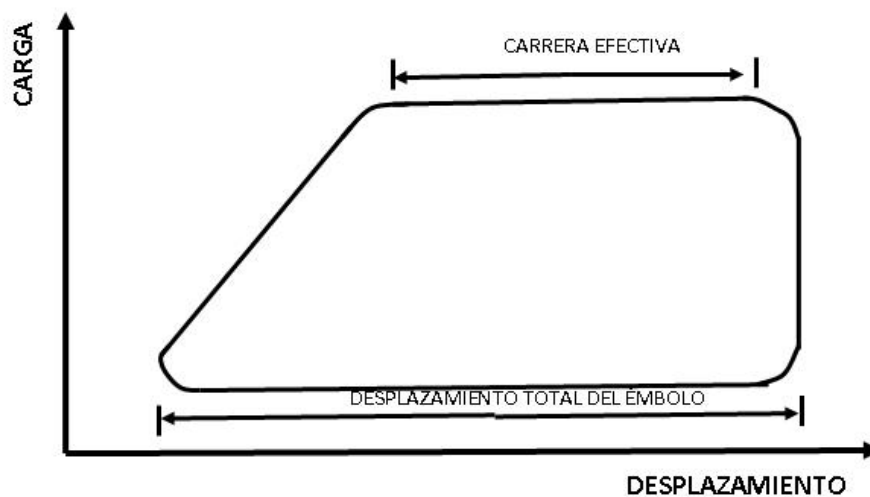


Figura 4.6 Gráfica de la bomba indicando efectos combinados de tubería desanclada y fuga en la válvula viajera [2].

La (Figura 4.7) presenta una anomalía debido a que la bomba subsuperficial se encuentra en mal estado (dañada), este daño en la bomba se causa principalmente al momento de instalar la bomba en el pozo.

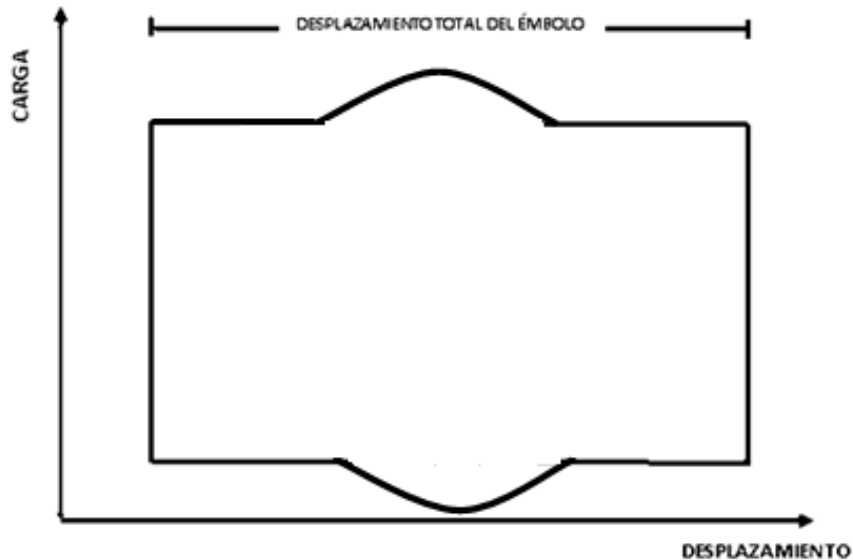


Figura 4.7 Gráfica de la bomba subsuperficial colapsada ^[2].

En esta representación gráfica de la anomalía, se observa que debido a la deformación que presenta la bomba subsuperficial, la gráfica modifica su comportamiento ideal, principalmente al momento de llenar el cilindro con el fluido (líquido) que aporta el yacimiento, también cuando comienza la carrera descendente del émbolo para desplazar el fluido; esto se origina debido a la fricción que ejerce el émbolo con la pared de la bomba.

La única recomendación para cuando se tiene esta anomalía es la sustitución del equipo, con la finalidad de evitar una abrasión severa, lo que implicaría mayores problemas, y menor tiempo de vida útil de las demás partes del equipo, así como mayores costos.

La (Figura 4.8) muestra una anomalía que se origina principalmente por los agentes corrosivos que se pueden presentar en los hidrocarburos o también se deberá a la abrasión, provocada por el roce del émbolo con el cilindro; con lo que se producirá una disminución de carga cuando inicie la carrera efectiva del émbolo, producto de la filtración (pérdida) del fluido.

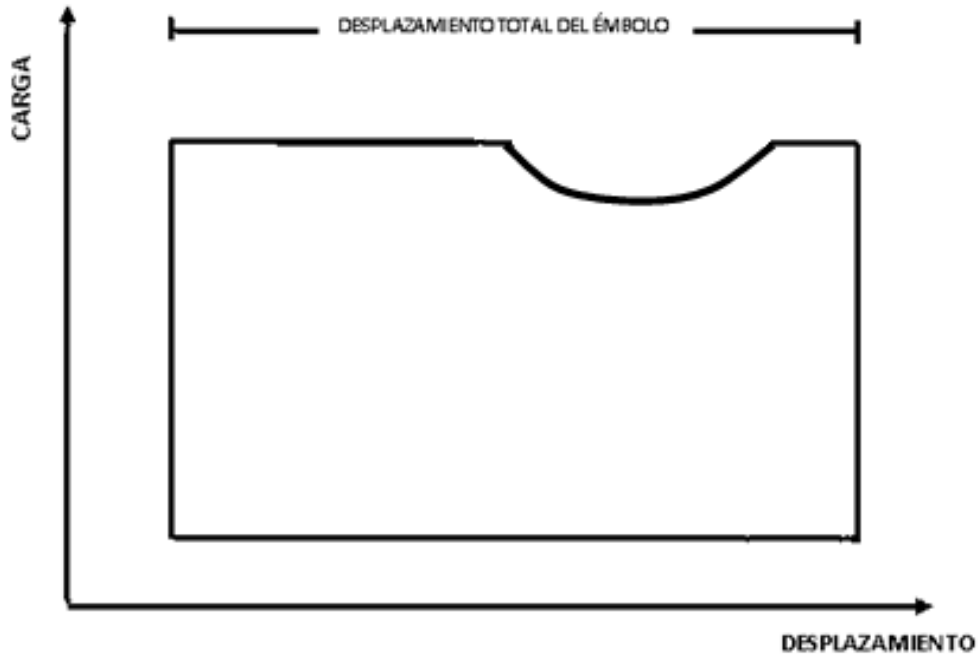


Figura 4.8 Gráfica de la bomba subsuperficial deformada ^[2].

Debido a la deformación que se tiene en la camisa, la representación gráfica del dinamómetro registrará una anomalía en la carrera efectiva del émbolo, lo que repercute en la producción de los fluidos.

En este caso se recomienda realizar un estudio costo beneficio para determinar si es necesario cambiar la bomba subsuperficial o se puede seguir trabajando así.

También esta anomalía se puede prevenir con anticipación ya sea con la inyección de inhibidores de corrosión o la implementación de un equipo extra (separador de arena o filtro) para evitar que se presente una abrasión.

La (Figura 4.9) indica una gráfica en la que la anomalía se presenta como resultado de un mal funcionamiento del equipo de anclaje, cuya principal función es la de anclar la bomba subsuperficial a la tubería de producción, provocando que la bomba se desplace de su posición original cuando el émbolo inicia su carrera ascendente (debido a la fuerza que se aplica) y regrese al mismo cuando esté comienza su carrera descendente.

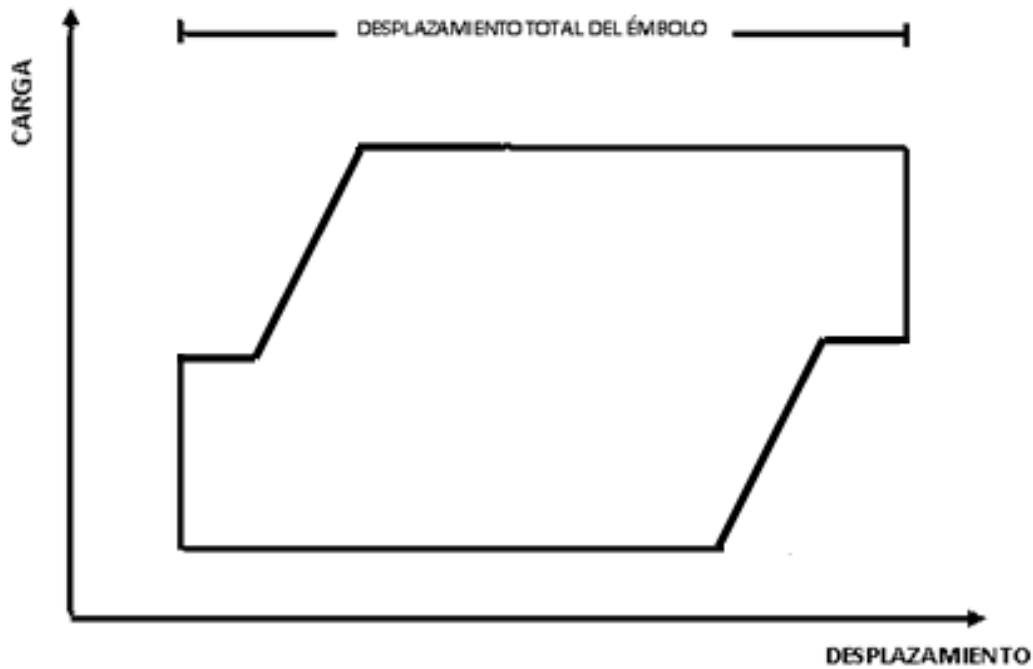


Figura 4.9 Gráfica de la bomba indicando deficiencia en el mecanismo de anclaje [2].

En la gráfica se observa que la tensión de la varilla será mayor al momento en que el émbolo comienza su carrera ascendente, las varillas tendrán que cargar también con el peso de la bomba, esto debido al mal funcionamiento del equipo de anclaje, esta anomalía también se presentará cuando comienza la carrera descendente (efecto gravitacional), intentando llegar a su estado original.

Debido a que esta anomalía se presenta por un mal funcionamiento del mecanismo de anclaje, es necesaria la presencia de equipo de R.T.P. para reanclar la bomba superficial con la tubería de producción

La (Figura 4.10) muestra una anomalía que se presenta al momento en que inicia la carrera ascendente del émbolo, ya que cuando comienza el llenado del cilindro con hidrocarburos, éste queda parcialmente vacío, esto se debe principalmente a que el pozo no está produciendo de manera óptima o por la presencia de gas, es por este vacío en el cilindro que se presenta el golpe de fluido.

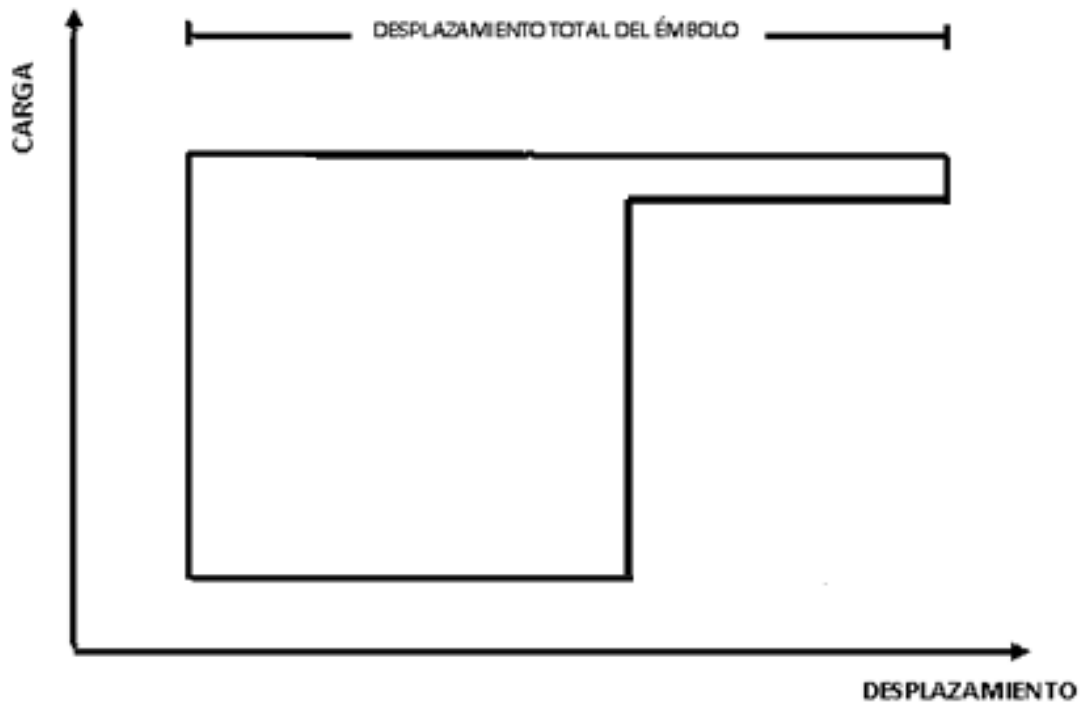


Figura 4.10 Gráfica de la bomba indicando golpe de fluido ^[2].

En la gráfica se observa que la absorción del fluido, el cual queda contenido en el cilindro se desarrolla de forma adecuada, pero en el momento en que el émbolo comienza su carrera descendente, lo que desplazará primero es el gas que se encuentra almacenado en el cilindro, posteriormente se observa un cambio abrupto en la gráfica, es en ese instante cuando se presenta el golpe de fluido; para continuar con el desplazamiento del líquido que se encuentra en el cilindro.

En este caso lo que se recomienda es primero que nada realizar un nuevo diseño del sistema de bombeo mecánico, con la finalidad de establecer la verdadera capacidad de hidrocarburo (líquido) que se tendrá en el cilindro.

Otra opción sería que al momento de rediseñar, se aumentara la profundidad de la bomba subsuperficial, para que se tenga una mejor producción de hidrocarburo (líquido).

La (Figura 4.11) muestra una anomalía que se puede presentar debido al peso del fluido; es decir, una vez que el émbolo comience a desplazar al fluido, éste, debido a su densidad no permita que al momento de repetir el ciclo, el émbolo llene adecuadamente

el cilindro y el desplazamiento del fluido no llegue a ser el mismo que en el ciclo anterior.

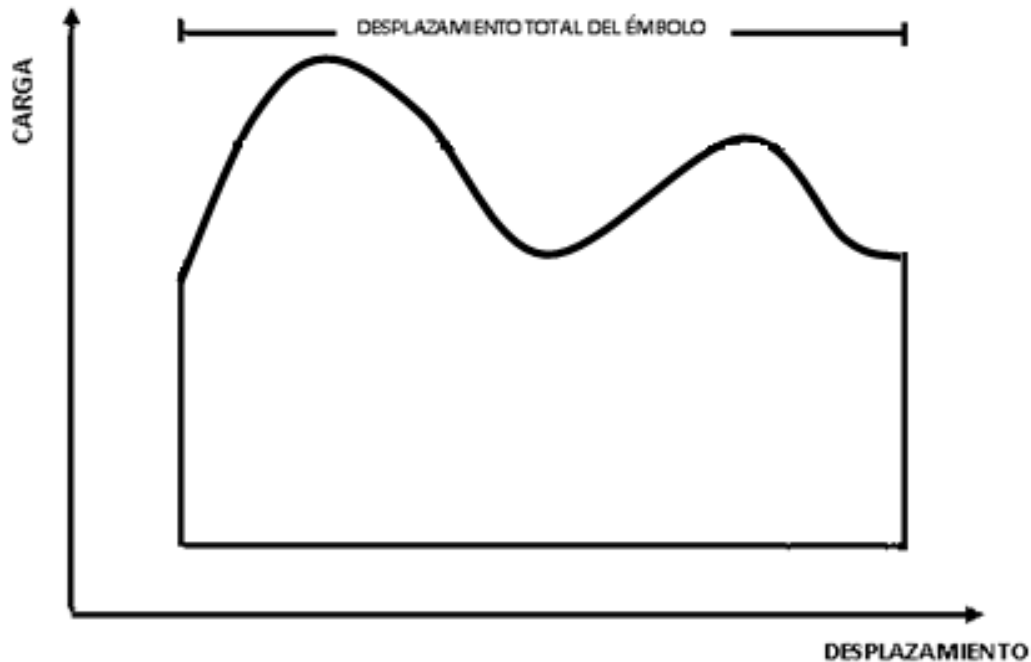


Figura 4.11 Gráfica de la bomba indicando inercia de fluido ^[2].

En la gráfica se muestra que el fluido que se tiene por arriba del émbolo no permite un llenado óptimo del cilindro en un determinado tiempo, es por tal motivo en la misma se perciben unos montículos (crestas) en el lapso en que el cilindro succiona fluidos y por esa razón el desplazamiento del líquido no será la misma en los ciclos continuos.

Aumentar la potencia del motor, con lo que se podría vencer la inercia provocado por el fluido.

La (Figura 4.12) indica una anomalía que se presenta cuando se tiene gas presente junto con el hidrocarburo, esta falla provoca un decremento en la carrera efectiva del émbolo y por lo tanto afecta la producción.

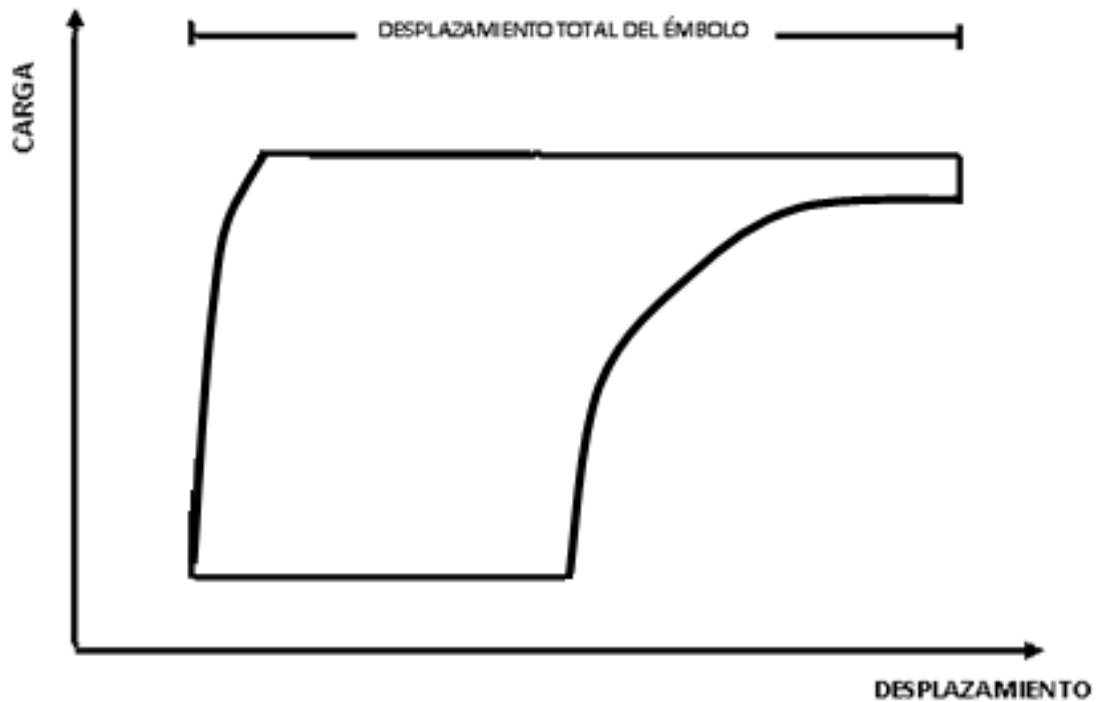


Figura 4.12 Gráfica de la bomba indicando interferencia de gas ^[2].

En la gráfica se observa una pequeña variación de la tensión de las varillas al momento en que el émbolo comienza su carrera ascendente, debido a que en el cilindro se cuenta con la presencia de dos fases de los fluidos, al momento de comenzar a desplazar los fluidos se observa en la misma gráfica una anomalía muy parecido al golpe de fluido debido a la presencia de gas.

Una solución puede ser la instalación de una válvula anticandado de gas.

Mal diseño de la bomba subsuperficial.

Como su nombre lo indica, ésta anomalía se presenta cuando en el análisis previo a la instalación del sistema artificial, el encargado de realizar el diseño del sistema artificial (bombeo mecánico), lo realiza de manera inapropiada, ya que no consideró cuánto hidrocarburo realmente está aportando el yacimiento; por lo tanto, llega un momento en el que se tendrán más emboladas por minuto, con lo que no se contará con el tiempo adecuado para que el yacimiento pueda aportar el suficiente hidrocarburo, por tal motivo se presentará gas en el cilindro, por esta interface se pueden provocar golpes de fluido. Por ende esto repercutiría principalmente en la producción de hidrocarburo y en el equipo, dañando a este último con el paso del tiempo.

Realizar un diseño adecuado para las características que se tengan en el pozo.

Reducir las emboladas por minuto del sistema, esto con la finalidad de permitirle al yacimiento un mejor aporte de hidrocarburos.

Aumentar la profundidad de la bomba subsuperficial.

En general, puede decirse que estos son los principales problemas que afectan la operación de la bomba en el fondo del pozo.

Un factor que dificulta la interpretación de las gráficas, es la fricción excesiva de las varillas de succión con la tubería de producción. Sólo en este caso la técnica queda limitada, debido a que resultan gráficas de las que no es posible obtener una explicación satisfactoria. El problema es frecuente en pozos que sufrieron desviaciones apreciables durante la perforación ^[2].

4.3 Cambio de varilla pulida.

La varilla pulida se llega a cambiar en los pozos con bombeo mecánico por:

- a) Corrosión (oxidada y erosionada).
- b) Deflexión (varilla chueca).
- c) Acinturada (cuello de botella).

4.3.1 Corrosión.

La corrosión en una varilla pulida (oxidada y erosionada), tiene la particularidad de desgastar los hules sellos del estopero-preventor y en determinado momento tener fuga a través de los hules sellos y sólo se resuelve este problema cambiando la varilla pulida.

4.3.2 Deflexión.

La deflexión (varilla chueca), esta anomalía se presenta cuando existe azolvamiento o atoramiento de la sarta de varillas, esto hace que el cable colgador se desnivele y provoque a su vez que se deflexione (enchueque) la varilla, por la misma deflexión puede fracturarse y precipitarse la sarta de varilla al interior del pozo quedando sin control en ese momento y contaminando el entorno ecológico con el aceite producido por el pozo. Para que esto no suceda se tiene que cambiar la varilla pulida previamente.

4.3.3 Varilla acinturada.

Esta anomalía se presenta cuando la varilla pulida ha estado trabajando por períodos largos en una misma carrera y sufre un desgaste en la parte donde está trabajando, mientras que en la parte superior queda con el diámetro original, llamándosele a esto cuello de botella o varilla acinturada; cuando se desea trabajar a una carrera menor, el cuello de botella trabaja sobre los hules-sellos del estopero-preventor no habiendo un buen sello provocando fugas, esto también se remedia cambiando la varilla pulida.

El cambio de varilla pulida se efectúa con una grúa y se utiliza el mismo procedimiento de modificación al ajuste de la sarta de varillas con la diferencia que en este punto, se cambia exclusivamente la varilla pulida ^[18].

4.4 Problemas por los que deja de fluir un pozo.

A continuación se presentan algunos de los principales problemas por los que un pozo puede dejar de fluir.

1. Bomba engasada.
2. Calzamiento de válvulas viajera, de pie y azolvamiento de la bomba.
3. Falta de nivel dinámico.
4. Pozos desviados.
5. Bomba desanclada.
6. Sarta de varillas rotas.
7. T.P. rota o fisurada.
8. Flotamiento de sarta de varillas.

4.4.1. Bomba engasada (candado de gas).

Esta falla se logra observar con más claridad en una carta dinamométrica de fondo y a veces se logra eliminar de la siguiente manera:

1. Desfogando el espacio anular (tubería de revestimiento.) a 0 Kg/cm² de presión.
2. Represionando la tubería de producción a 30 Kg/cm² en varias ocasiones hasta lograr que se escuche puro líquido y no pase gas ^[18].

La falta de sumergencia de la bomba subsuperficial y la interferencia del gas de formación son las principales causas para una pobre eficiencia de la misma. Los dos, crean golpe de fluido, que contribuye en gran medida al daño del sistema tanto en el cojinete central de la unidad de bombeo y engranes de la unidad reductora de velocidad, como en el motor de la unidad.

El gas que entra a la bomba junto con el aceite, causa serias pérdidas de eficiencia y puede a veces, evitar la operación de las válvulas. Este gas libre que entra con el aceite a través de la válvula estacionaria o que se libera del aceite por reducción de la presión, llenará parcialmente el espacio entre las dos válvulas al terminar la carrera ascendente del émbolo, así, en la carrera descendente, se desplazará menos aceite por la válvula viajera que si no hubiera gas presente. La presencia de gas en la bomba es generalmente advertida por fuertes vibraciones en la varilla pulida en la carrera descendente.

La interferencia de gas no solamente reduce el desplazamiento volumétrico del aceite, sino que también retardará seriamente la acción de las válvulas, ya que el gas que queda atrapado entre las válvulas debe comprimirse en la carrera descendente del émbolo a la presión de la columna de aceite contenido en la tubería de producción antes de que la válvula viajera abra y permita la entrada del aceite, y en la carrera ascendente del émbolo, el gas que queda debajo de la válvula viajera debe expandirse a la presión del aceite que esta debajo de la válvula estacionaria antes que abra y deje el paso libre del aceite, causando una pérdida significativa en la longitud de la carrera del émbolo.

Si una cantidad de gas se acumula en el barril de la bomba, las válvulas pueden permanecer cerradas y el émbolo solamente comprime y expansiona el gas cada vez que sube y baja formándose lo que se denomina candado de gas, cuya presencia puede detectarse por medio de una carta dinamométrica.

Ahora bien, parte del gas de la formación se libera y entra por las perforaciones a la tubería de revestimiento como gas libre, y escapa por el espacio anular a través del aceite. También algo de gas permanece en solución aun cuando pasa por la bomba y se libera cuando alcanza la presión de saturación y por lo general fluye solo. En ambos casos el gas no representa problema alguno.

El bombeo intermitente con paros programados, reducirá en gran medida el daño al equipo donde el golpe de fluido es creado por la falta de sumergencia de la bomba.

La dificultad debida a la presencia de gas en la bomba, no se puede evitar, pero si controlarse instalando un separador de gas subsuperficial, ya que mientras más gas sea separado del aceite y fluya por el espacio anular, evitando que entre a la bomba, es mejor, dándole a la bomba la suficiente sumergencia de modo que se libere menos gas; la distancia entre la válvula viajera y estacionaria al final de la carrera debe reducirse a un mínimo, pues entre más pequeño sea el volumen de fluido que se deja entre las válvulas, menos será la dificultad experimentada debida a la compresión y expansión alternativa de gas ^[21].

La presencia de gas en el bombeo mecánico es el problema más fuerte que se tiene en el Distrito Poza Rica, ya que por ser yacimientos depresionados se presentan altas relaciones gas-aceite (RGA) las cuales últimamente han tenido un aumento significativo (de $150 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a $300 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y en algunos casos hasta a más de $500 \text{ m}^3/\text{m}^3$).

Para solucionar los problemas generados por el gas, desde la implantación del sistema se han tenido que implementar y mejorar diversos accesorios, diseños y procedimientos, que de acuerdo al estado mecánico y características del pozo permitan explotarlo de manera eficiente.

4.4.1.1 Válvulas anticandado de gas.

Las válvulas anticandado de gas fueron de los primeros accesorios que se emplearon para mejorar el bombeo mecánico.

Éste es un accesorio que va instalado en el extremo superior de la bomba subsuperficial y cuya finalidad principal es la de eliminar los candados de gas y tratar de prevenir que el fluido golpee en la parte superior e inferior de la carrera.

En el principio de la carrera descendente, el sello de presión metal a metal (émbolo), cierra y mantiene el peso hidrostático de la carga del fluido, sin presionar sobre la válvula viajera, causando que la misma abra inmediatamente. Esta acción previene que el fluido depositado golpee en la carrera descendente y también elimina el candado de gas al terminar la carrera descendente.

El sello de presión metal a metal (émbolo) abre, descargando la carga hidrostática en la válvula viajera, expulsando o comprimiendo los gases. La válvula de pie y la válvula eliminadora de candados de gas, abren simultáneamente con el principio de la carrera ascendente, previniendo que el fluido impacte o golpee en la carrera ascendente.

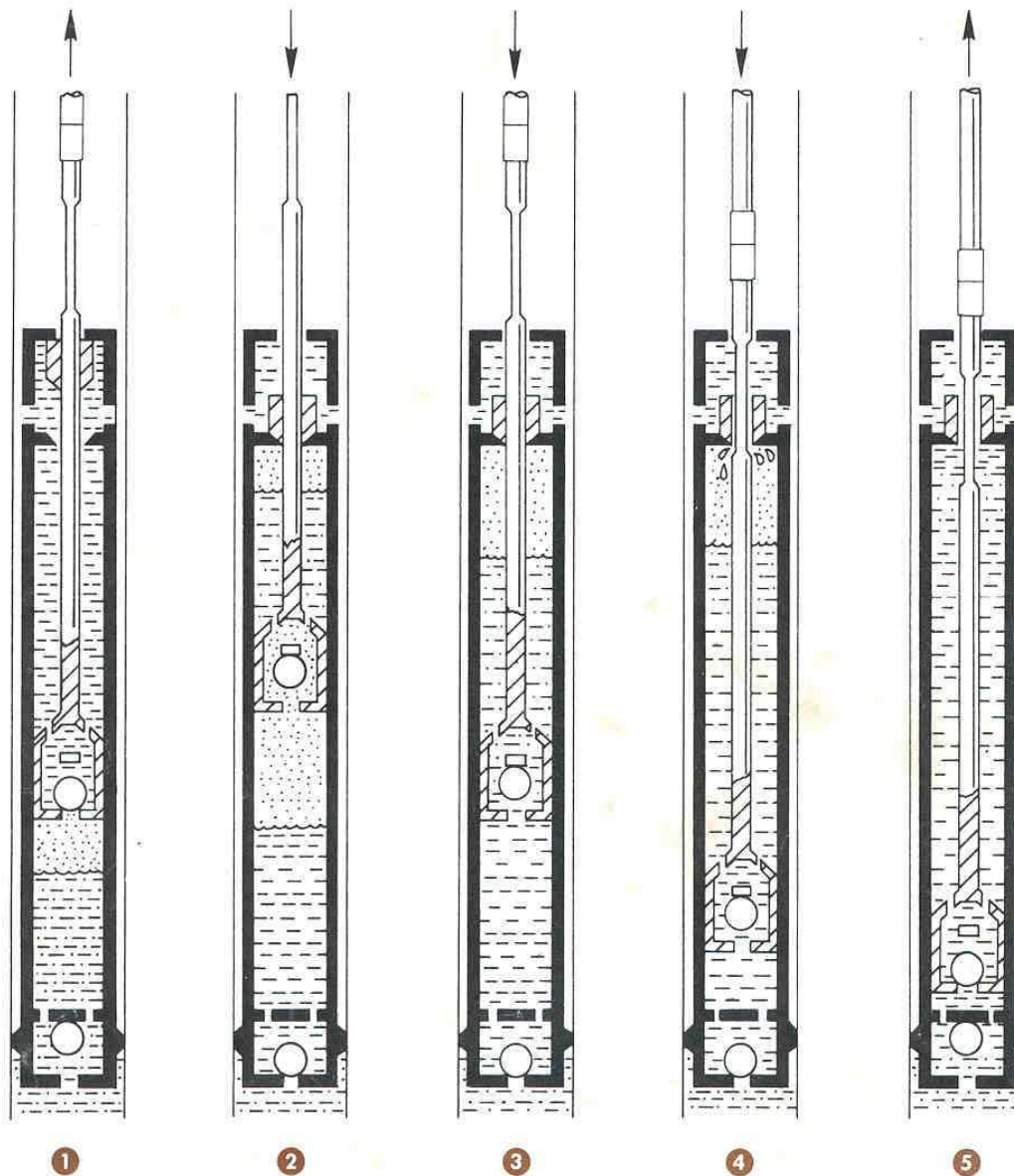


Figura 4.13 Funcionamiento de la válvula eliminadora de candados de gas ^[9].

4.4.1.1 Funcionamiento de la válvula eliminadora de candados de gas.

1. La válvula de pie y la válvula eliminadora de candados de gas abren simultáneamente.
2. La válvula eliminadora de candados de gas cierra y la bola de la válvula viajera se levanta de su asiento.
3. El gas y demás fluidos pasan a través de la válvula viajera.
4. En el punto muerto inferior, la válvula eliminadora de candados de gas abre, dejando al gas escapar a través de la tolerancia entre varilla y la válvula

eliminadora de candados de gas, con lo cual el nivel de fluido dentro del émbolo sube, desalojando completamente el gas.

5. La válvula de pie abre, la válvula viajera cierra y la válvula eliminadora de candados de gas abre, para dejar pasar la producción ^[9].

Válvulas de accionamiento hidráulico.

Para eliminar la interferencia de válvulas y los candados de gas en la bomba, se introdujo el uso de la válvula “CHARGER 927”, la cual permite que el gas atrapado en la bomba, sea desalojado por la columna de fluido cuando el émbolo se encuentra en el punto inferior de la carrera.

El éxito alcanzado con el uso de esta válvula permitió la explotación de los pozos con relación gas-aceite menor de $200 \text{ m}^3/\text{m}^3$, razón por la cual se integró a todas las bombas adquiridas y usadas en el Distrito; con el incremento del gas (R. G. A. $> 300 \text{ m}^3/\text{m}^3$) se rebaso su capacidad de manejo, por lo que se implementó aunado a la válvula “CHARGER 927” el uso de separadores, los cuales permitieron operar los pozos con mayor eficiencia.

Válvulas de accionamiento mecánico.

Con la introducción del bombeo mecánico en pozos con relación gas-aceite mayores de $600 \text{ m}^3/\text{m}^3$, fue necesario emplear nuevas válvulas para romper candados de gas (anticandado), las cuales substituyeron en la bomba a la válvula viajera convencional, la característica principal de estas nuevas válvulas, a diferencia de las convencionales, es que son accionadas mecánicamente por la sarta de varillas o algún aditamento integrado a la bomba, esto hace que con cada embolada la válvula se abra sin importar que exista únicamente gas en la bomba, las válvulas (“PETROVALVE” y “SIDEKICKER”) han arrojado buenos resultados en sus pruebas.

Separadores de gas.

Cuando se tienen altas relaciones gas-aceite para mejorar el bombeo, es necesario separar el gas y direccionarlo a la tubería de revestimiento antes de que entre en la bomba, para lograr lo anterior, se instalaron separadores de fondo (anclas de gas) en el aparejo de bombeo mecánico ^[17].

Su función básicamente es reducir a un mínimo la entrada de gas con la bomba para mantener una eficiencia de separación relativamente alta (80%). No todos los separadores de gas pueden mantener esa eficiencia por razones de diseño.

El mecanismo de separación, consiste en desviar en 180° el flujo de gas a través del espacio anular entre el tubo de succión y el separador, durante el movimiento descendente de la mezcla, el gas en virtud de tener una densidad más baja se dirige a la superficie y el aceite hacia abajo.

Consideraciones básicas para un separador de gas:

1. El área de paso de fluido hacia abajo, debe ser lo más amplia posible para aminorar la velocidad del aceite hacia abajo.
2. El tamaño del tubo de succión dentro del separador de gas debe ser diseñado para que produzca el mínimo de caída de presión.
3. El área de las perforaciones en el separador de gas, debe ser entre 2 a 4 veces el área anular entre el separador y el tubo de succión.
4. El separador de gas debe colocarse cerca de la bomba, la velocidad de bajada en el espacio anular entre el separador y el tubo de succión, debe ser menos de 0.5 pie/seg ya que velocidades mayores no permiten que las burbujas de gas se separen y suban a la superficie. En este último caso solamente una porción de gas se separa y la eficiencia volumétrica será más baja ^[9].

A lo largo del tiempo estos separadores se han adecuado a la existencia de material, así como, a las necesidades de los pozos, y debido a los buenos resultados han tenido un gran desarrollo.

Separadores naturales.

Los primeros separadores utilizados fueron los que se implementaron con la misma tubería, colocando el extremo de ésta por debajo de los intervalos y se les dio el nombre de naturales, su limitante principal surge cuando se tiene problemas mecánicos (pescados) o el pozo tiene baja presión y es necesario instalar un empacador.

Separadores modificados.

El siguiente paso fue construir un separador de gas que permitiera la explotación de los pozos depresionados o con pescado, el primero fue el tipo “GUIBERSON”, el cual direcciona el flujo del pozo arriba del nivel dinámico a través de una tubería de 1" de diámetro flejada a la tubería de producción, su funcionamiento fue satisfactorio, pero por su diseño, generaron pescados difíciles de recuperar al reacondicionar los pozos, lo que propició que dejaran de utilizarse; por este motivo se diseñó el separador tipo “HECHIZO”, que no cuenta con partes externas flejadas, el único inconveniente es que por sus dimensiones no puede utilizarse en pozos con tuberías de revestimiento de 4 ½”.

Separadores integrados con la bomba.

Con la adquisición de un adaptador mecánico para las bombas de inserción, se pudo adicionar en su parte inferior un tramo de tubería de 5m x 1" de diámetro, que permitió elaborar un nuevo separador “DE ADAPTADOR” con la misma tubería de producción utilizada en el pozo, esto eliminó el problema del diámetro exterior excesivo, y permitió que las bombas se instalaran a profundidades mayores.

Actualmente se utilizan separadores de fondo, se ha generalizado en pozos donde la relación gas-aceite es superior a $300 \text{ m}^3/\text{m}^3$, permitiendo operar estos pozos con alta eficiencia.

Controladores de velocidad.

En pozos con una alta relación gas-aceite aun con la aplicación de los anteriores accesorios, es necesario que se modifiquen las condiciones de explotación (carrera y emboladas por minuto) disminuyendo al máximo la velocidad de bombeo y aumentando la carrera de la unidad para contrarrestar el decremento de producción. El tipo y capacidad de las unidades de bombeo existentes limita en muchos casos la reducción de la velocidad de bombeo a los valores mínimos requeridos, evitando que se obtengan los resultados deseados.

Motores de velocidad variable.

Estos motores permiten mantener un control estricto de la velocidad de bombeo de acuerdo al requerimiento del pozo, pudiendo reducirse o aumentarse con el solo movimiento de las perillas de selección, además una de sus innovaciones es la de permitir el control por separado de la velocidad ascendente y descendente, la cual en los

pozos con alta RGA debe ser lenta y rápida respectivamente, lo anterior permite un llenado más efectivo de la bomba y por consiguiente un aumento en su eficiencia.

Un inconveniente de este equipo es su alto costo, además de que requiere mayor supervisión que los motores convencionales.

Reductores de velocidad.

Son equipos simples, constan de un juego de poleas variables que nos permiten controlar la velocidad de bombeo obtenido hasta 2 epm sin forzar la unidad; son de fácil montaje no requieren supervisión constante y su mantenimiento es mínimo.

Las ventajas adicionales al mejoramiento de la eficiencia, son: su bajo costo (1/3 del costo de los motores de velocidad variable), el ahorro de energía, y la reducción del tamaño del motor eléctrico utilizado.

Compresores de gas, de la tubería de revestimiento.

Aun cuando con los accesorios antes mencionados se logra una separación eficiente de gas en el fondo del aparejo, los problemas originados para éste no se resuelven, ya que su acumulación en el espacio anular entre la tubería de producción y la tubería de revestimiento, provoca un incremento en la contrapresión a la formación que restringe el flujo de fluidos y fuerza al gas a entrar a la tubería de producción, ocasionado nuevamente una baja eficiencia de bombeo; anteriormente la forma más sencilla y económica de eliminar este gas era desfogarlo a la atmósfera y quemarlo, pero con la aplicación de las normas ecológicas esta práctica dejó de realizarse.

Para desalojar el gas acumulado en el espacio anular, se probó un compresor de gas accionado por la viga viajera de la unidad de bombeo mecánico, por medio del cual se succiona al gas del espacio anular, se comprime y se inyecta a la línea de descarga, disminuyendo con esto la contrapresión a la formación y aligerando la columna de fluido de la línea de descarga, además se disminuye la entrada de gas en la bomba, al permitir que el gas libre se desplace en el espacio anular con la ayuda del compresor.

Las ventajas que se obtienen con la instalación de este equipo son:

- Reducción de problemas generados por el gas (candado de gas).
- Incremento de producción de aceite.

- Eliminación de la contaminación generada al quemar el gas.
- Aprovechamiento de la totalidad del gas producido.

Modificación de condiciones de explotación.

Aun con la aplicación de los equipos y/o herramientas anteriores, es necesario implementar procedimientos de explotación fuera de lo tradicional, que en algunos casos se contraponen a los principios de explotación con sistemas artificiales de producción; uno de estos procedimientos aplicados en pozos con alta relación gas-aceite, es estrangular la descarga del pozo, lo cual nos permite mantener represionada la tubería de producción en una presión estable de 10 a 20 kg/cm² de acuerdo a la necesidad del pozo, esto evita que el gas se disgregue al pasar por la bomba (por la diferencia de presión que se crea durante el bombeo) y se generan candados de gas que afectan la eficiencia de la bomba.

Para aplicar lo anterior es necesario que los accesorios superficiales de control se encuentren en buen estado, y se realicen pruebas hasta determinar la presión óptima de trabajo ^[17].

4.4.2 Calzamiento en válvula viajera, de pie y azolvamiento de la bomba.

En estos dos puntos también se logra observar la falla a través de una carta dinamométrica y a veces se logra solucionar con una circulación inversa con Diesel ^[18].

En caso de que el calzamiento sea en la válvula de pie o estacionaria, no permitiría la retención del aceite en el interior de la camisa de la bomba subsuperficial, ocasionando una disminución en la eficiencia de la misma y como consecuencia una baja producción del pozo.

Si el calzamiento es en la válvula viajera, no retendría la carga del aceite en el interior del émbolo, para efectuar su desplazamiento a la superficie, reduciéndose notablemente la eficiencia de la bomba y en caso extremo se podría llegar a que el pozo no aportara carga ^[9].

Sedimento.

La segunda causa de fallas en los aparejos de bombeo mecánico, es la presencia de sedimento en las bombas, en algunos campos esta situación se agrava por producir aceite viscoso, que origina que se arrastre mayor cantidad de finos y se provoque una cantidad mayor de fallas; los casos más trascendentales se presentan en pozos que deben fracturarse para permitir su explotación.

Para superar esto, se han realizado pruebas para el control de arena y finos de formación, desde el momento mismo en que se fracturan los pozos, utilizándose arenas resinadas, (sin mucho éxito), y más recientemente diseños de fractura para alcanzar la multicapa en la cara de ésta, la aplicación de esta técnica de fracturamiento arrojó buenos resultados en el control de arena, no así con los finos de formación, los cuales siguieron provocando fallas.

Debido al éxito obtenido en los yacimientos de la zona sur en el control de sedimentos, se realizaron dos pruebas con cedazos engravados en dos pozos del campo Tajín, utilizando la técnica y la arena recomendadas; sin embargo, por el diámetro de los finos de formación y la cantidad de estos únicamente se retuvo la aportación de arena.

Filtros para arena.

Son accesorios diseñados para tratar de evitar la entrada de sólidos (sulfuros, sedimentos, arenas, material vegetal, etc.) al área de la bomba subsuperficial, ya que, la entrada de los mismos ocasionaría el probable calzamiento de las válvulas tanto de pie como viajera.

La necesidad de controlar los finos originó que se realizaran pruebas con filtros para arena "STANLEY", que se instalaron en el extremo de la tubería de producción; sin embargo, el resultado no fue del todo satisfactorio, pues a pesar de haber superado el período de pruebas, se detectó que la contención de finos no fue muy efectiva, además de que el material sintético con que estaba construido sufrió demasiado daño.

Por los resultados de la prueba, se buscó un filtro con las siguientes características.

- Que fuera de material resistente y durable.
- Capacidad para retener finos de formación de hasta 8 micrones.
- Manejo de diferentes producciones.

- Que se pudiera introducir con la bomba.

El filtro que reunió todos los requisitos fue el “PUMPGARD”, construido en acero inoxidable con filtrado de hasta 5 micrones, y diseño modular para manejar diversos gastos y capacidad para conectarse a cualquier tipo de bomba (incluyendo las de anclaje mecánico inferior que se utilizan en Poza Rica). El filtro se ha introducido en pozos con alta producción de arena y sedimento permitiendo profundizar la bomba y colocarla frente al intervalo (en algunos casos hasta 200 metros desde el punto en que se colocaban anteriormente), dando como resultado, una disminución de problemas y aumentos de producciones que fluctúan desde 25 bpd hasta 75 bpd ^[17].

4.4.3 Falta de nivel dinámico.

Esta anomalía se detecta claramente con un registro de nivel (Ecómetro) en la tubería de revestimiento al momento de la falla de la bomba (que deje de fluir el pozo).

El agotamiento del nivel dinámico puede ser consecuencia de lo siguiente:

1. Demasiadas emboladas en la unidad de bombeo mecánico. Esto se corrige superficialmente cambiando a menor diámetro la polea del motor de la unidad de bombeo mecánico a modo que se ajuste a las emboladas necesarias y si cuenta con motor de velocidad variable se efectuará moviendo las perillas en el tablero. En determinado momento se tendrá que cambiar de una carrera mayor a una menor.
2. Una bomba de inserción de mayor diámetro. Ésta solamente puede ser cambiada a menor diámetro entrando equipo de R.T.P. ya que es equipo subsuperficial.
3. Una contrapresión alta en línea de descarga. Por consecuencia de esta anomalía, el gas en la tubería de revestimiento ejerce una fuerza, que a una formación depresionada (débil), se dificulta vencer y la aportación del yacimiento a la zona de los disparos es poca.

En ocasiones ésto se remedia purgando el espacio anular, si en la batería de separación donde llega este pozo se cuenta con un separador, se hará el trabajo a dicho separador bajando la presión de separación a lo mínimo, si da resultado positivo esta operación tendrá que efectuarse en forma diaria (rutinaria).

4. Si este problema se presenta en un pozo que ha estado trabajando normalmente, es posible que tengamos una deficiencia del yacimiento a la zona de los disparos (obstruida por asfaltenos). Tendrá que programarse una estimulación orgánica.
5. Y si la obstrucción es por arena y sedimentos, tendrá que entrar equipo de R.T.P. y lavar el fondo del pozo ^[18].

Baja presión de fondo.

Dentro de los yacimientos del área Poza Rica, existen pozos con bajas presiones de fondo, tales que no soportan una columna de kerosina o diesel, esto ocasiona que las operaciones de limpieza o desgasamiento de los aparejos de bombeo mecánico, al ser bombeado el fluido, en lugar de circular a través de la bomba se pierde en la formación sin obtener los resultados esperados. La sustitución del ancla mecánica por un empacador con válvula de pie y un niple de circulación sobre ellos, forzó la circulación a través de la bomba, solucionando con esto el problema existente ^[17].

4.4.4 Pozos Desviados.

Cuando los pozos son desviados, la sarta de varillas está sometida a fuertes fricciones con la tubería, estas fricciones llegan a desgastar los coples de las varillas en tiempos que fluctúan entre uno a dos años, además de que se ocasionan sobre esfuerzos en el equipo, y vibraciones en la bomba que evitan que las válvulas sellen apropiadamente y se pierda parte del fluido desplazado.

Al agudizarse los problemas de gas y abatirse los niveles de fluido, fue necesario profundizar los puntos de bombeo, incrementando con esto los problemas originados por la desviación, por lo que para contrarrestarlos se modificó primeramente la operación de las unidades de bombeo, disminuyendo al máximo posible las emboladas por minuto; posteriormente se introdujo el uso de “centradores de rodillos”, los cuales disminuyeron la fricción y el golpeteo entre la sarta de varillas y la tubería de producción, incrementando además el desplazamiento efectivo de la bomba ^[17].

Dependiendo de la profundidad, el ángulo máximo para la sección desviada que se ha dado del agujero, puede estar comprendido en un rango máximo de 50° fuera de la vertical.

Una regla común para la utilización del bombeo mecánico en pozos desviados es evitar un máximo de 2° por cada 1000 pies durante la perforación.

Los problemas más serios y que se presentan con mayor frecuencia son los siguientes:

1. Desgastes prematuros de las varillas y la T.P.
2. Altas pérdidas de carga por fricción ^[22].

4.4.5 Bomba desanclada.

Esta anomalía puede ser detectada claramente a través de una carta dinamométrica superficial y de fondo.

En caso de bomba desanclada se tendrá que efectuar una prueba de reanclaje.

4.4.6 Sarta de varillas rotas.

Esta anomalía se puede detectar superficialmente, cuando la rotura de las varillas está somera se logran observar los siguientes puntos:

1. Se alcanza a dar vueltas a la sarta de varillas con mucha facilidad (manualmente) y el motor tiene un forzamiento cuando los contrapesos van hacia arriba.
2. También se logra observar que al parar el motor de la U.B.M. ésta da varias emboladas y al final presenta mucha oscilación que tarda en parar totalmente quedando la unidad de bombeo mecánico en su punto muerto superior (esto suele suceder en U.B.M. balanceada por contrapesos).
3. En unidades aerobalanceadas, al parar dicha unidad se va hasta su punto muerto superior ya que el balanceo que tiene es para la totalidad del peso de la sarta y al haber una diferencia de peso ésta se va al punto antes mencionado.

La anomalía también es detectada con una carta dinamométrica ^[18].

Se ha comprobado que el comportamiento de las varillas es generalmente como una indicación directa de la eficiencia con la cual el pozo está bombeando.

Manejo y transporte.

Teniendo en cuenta que la instalación de bombeo ha sido apropiadamente diseñada, el primero y tal vez el factor más importante para prevenir una rotura de varillas es asegurarse de su manejo correcto durante el embarque, almacenaje, así como su correcta introducción y extracción del pozo. Además en medios corrosivos las grietas en la superficie de las varillas favorecen al deterioro pues permiten que agentes corrosivos tengan acceso al metal más rápido y por lo tanto aceleran el tiempo en que la rotura se puede presentar.

Para poder discutir este problema y llegar a una solución, supondremos que para un cuerpo elástico, la rotura ocurre cuando se sobrepasa el límite elástico, es decir, cuando ya no es constante la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante (elongación) en el cuerpo (Ley de Hooke, ver Apéndice), el esfuerzo en el cual la rotura ocurre es llamado límite proporcional del material. El límite proporcional no puede ser usado como un criterio para establecer el máximo esfuerzo de trabajo permisible en las varillas, ya que repetidas cargas cíclicas impuestas a estas ocasionan roturas por fatigas, las cuales ocurren generalmente muy por debajo del límite de proporcionalidad. Por lo tanto hay que considerar el límite de resistencia, es decir el máximo esfuerzo (sin rotura) el cual puede ser aplicado por un número predeterminado de cargas o esfuerzos, alternativos. Sin embargo, un material lógicamente no puede resistir un número infinito de cargas, para el acero se ha determinado que el límite de resistencia puede tomarse como el máximo esfuerzo aquel que permite 10×10^6 de esfuerzos sin rotura.

Hay un límite de resistencia para las varillas, este límite depende de diversos factores que son los siguientes:

1. De los componentes presentes en el acero como carbón, manganeso, silicón, níquel, vanadio, boro, cromo, molibdeno, cobre.
2. De los agentes corrosivos presentes en el fluido del pozo, como ácido sulfhídrico, bióxido de carbono y oxígeno.
3. El tamaño de los esfuerzos a los cuales están sujetas las varillas.

Existen algunas formas de solucionar los problemas cuando se tiene un líquido corrosivo en el pozo.

La sarta de varillas debe ser de acero al níquel el cual es más resistente a la corrosión o el fluido puede ser tratado químicamente con objeto de reducir el daño causado por los agentes corrosivos mediante el uso de inhibidores ^[22].

4.4.7 Tubería de producción rota.

Esta anomalía se logra detectar en la superficie por el forzamiento del motor en su carrera ascendente y el pozo sin fluir, en ocasiones se encuentran las bandas quemadas y la unidad de bombeo mecánico en su punto muerto inferior.

Cuando se tiene la sospecha de esta falla, lo mejor es efectuar una prueba de tubería de producción, esto es, una prueba de hermeticidad con equipo de alta presión y diesel.

1. Cuando la rotura de la tubería de producción está arriba del nivel dinámico, puede comprobarse depresionando totalmente el espacio anular (tubería de revestimiento) a cero, posteriormente abrir la válvula de flujo y no debe tener presión la tubería de producción ya que ésta suele depresionarse al igual que la tubería de revestimiento al existir dicha anomalía.

4.4.8 Flotamiento de sarta de varillas.

Esta anomalía se logra observar superficialmente porque la varilla pulida se queda suspendida en determinado punto y su origen puede ser por lo siguiente:

1. Atrapamiento del émbolo de la bomba en el interior de la camisa por carbonato de calcio y sedimentos.
2. Atrapamiento del pistón de la válvula eliminadora de candados de gas por carbonato de calcio y sedimentos.

Estos problemas se corrigen únicamente con la intervención del equipo de R.T.P.

3. Pozos con aceite viscoso.

Este problema se puede corregir con circulación inversa.

4. Azolvamiento de la bomba por sólidos.

Éste, de igual, forma se puede corregir únicamente con la intervención del equipo de R.T.P.

- Si se va a dejar la unidad de bombeo mecánico inoperante por varias horas o días en espera de alguna circulación inversa u otro motivo y que tendrá que operarse posteriormente, debe dejarse frenada en su punto muerto superior, por el asentamiento de los sólidos en T.P., ya que suele suceder que en un pozo que ha estado operando normalmente, la bomba tenga las copas que van alojadas en el niple sello, rotas o deterioradas y esto hace que todos los sólidos se asienten sobre el émbolo viajero en caso de estar en su punto muerto inferior y quede éste atorado ^[18].

Fluido viscoso.

Cuando el fluido producido es de una viscosidad del orden de 60 cp medido a condiciones de yacimiento, el desplazamiento del émbolo en la bomba se torna difícil, debido a que la sarta de varillas tiende a flotar y se requiere mayor esfuerzo para el desplazamiento de aceite a la superficie.

La innovación en este renglón fue la prueba de un sistema llamado "Bomba Caliente" el cual disminuye la viscosidad del aceite al calentarlo en un punto inferior a la bomba, esto se logra colocando una resistencia que es alimentada por un cable eléctrico que pasa a través de una sarta de varillas huecas, la energía eléctrica es regulada en un centro de control de acuerdo a los requerimientos del pozo.

La prueba realizada en el campo Copal con aceite de 61 cp medido a condiciones de temperatura de yacimiento resultó satisfactoria, ampliando la posibilidad de mejorar el bombeo mecánico en campos con viscosidades altas; el problema detectado fue el refaccionamiento para este equipo, ya que su origen es chino y no se tiene un suministro rápido y oportuno para corregir fallas tanto en el aparejo subsuperficial como en el equipo de generación y control ^[17].

4.5 Análisis de las fallas de las varillas de bombeo.

El análisis de la causa de las fallas es esencial para la reducción de la frecuencia de las fallas en los pozos con extracción artificial.

La mayoría de las fallas asociadas con los sistemas de levantamiento artificial puede ser atribuida a uno de los tres componentes principales del fondo del pozo: la bomba del fondo, varilla de bombeo o sarta de la tubería de producción. Una falla de la bomba del subsuelo, de la varilla de bombeo o de los tubos es definida como cualquier evento catastrófico que requiere que el personal de servicio extraiga o reemplace uno o más de estos componentes. Por esta definición el índice de la frecuencia de las fallas es el número total de las fallas de los componentes, que ocurren por pozo, por año. Los pozos que producen marginalmente con índices altos de frecuencia de fallas son clasificados, a menudo, como pozos “problema” y las prácticas efectivas del manejo de las fallas pueden significar la diferencia entre operar y taponar estos pozos. El manejo de las fallas incluye, impedir, identificar, implementar y registrar la causa “real” de cada falla y es importante para la gestión eficaz de los activos, en función de los costos.

La gestión eficaz de las fallas en función de los costos, empieza con la prevención y el momento de detener la próxima falla es antes de un incidente. Simplemente, rescatar y colgar el pozo después de una falla de una varilla de bombeo, no evitará la repetición de la falla. Realmente, la mayoría de las fallas continúan con mayor frecuencia hasta que toda la varilla de bombeo sea extraída y reemplazada. Las reducciones de la frecuencia de las fallas que se puedan obtener requieren de un análisis preciso de la causa de la falla, y la implementación de medidas de acción correctiva, para impedir la repetición de la falla. Se necesita una base de datos capaz de averiguar el historial de los “servicios” del pozo, para rastrear e identificar las tendencias de las fallas. Una vez que se identifica la tendencia de una falla, se deberían implementar medidas para remediarla durante las operaciones de servicio del pozo, a fin de impedir las fallas prematuras de la varilla de bombeo. El historial de fallas en la base de datos debería incluir información del tipo, lugar, profundidad, causa de la falla y las medidas de acción correctiva implementadas ^[20].

4.6 Mecanismo de las fallas.

Todas las fallas de la varilla de bombeo, varilla corta y de acoples, son fallas por tensión o fatiga. Las fallas por tensión ocurren cuando la carga aplicada excede la resistencia a la tensión de la varilla. La carga se concentrará en algún punto de la sarta de varillas, y crean una apariencia de estrechamiento alrededor de la circunferencia de la varilla, y la fractura ocurre donde se reduce la sección transversal. Este raro mecanismo de las

fallas, sólo ocurre cuando se aplica demasiada carga en la sarta de varillas (como al intentar sacar de su asentamiento una bomba atascada). Para evitar las fallas por tensión, el indicador de peso máximo utilizado, para una varilla de bombeo en condiciones “como nueva”, nunca debería exceder el 90% de fuerza de ruptura para la dimensión y grado conocidos de la varilla de bombeo de diámetro más pequeño. En caso de condiciones, dimensiones o grados desconocidos de la varilla de bombeo, se debería aplicar un factor de reducción suficiente al peso máximo utilizado. Todas las otras fallas de la varilla de bombeo, varilla corta y acoples son fallas por fatiga.

Las fallas por fatiga son progresivas y comienzan como pequeñas grietas por esfuerzo que crecen bajo la acción de los esfuerzos cíclicos. Los esfuerzos asociados con esta falla, tienen un valor máximo que es menor que la resistencia a la tensión del acero de la varilla de bombeo. Debido a que la carga aplicada es distribuida casi igualmente sobre el área de la sección transversal de la sarta de las varillas de bombeo, cualquier daño que reduzca el área de la sección transversal, aumentará la carga o el esfuerzo en ese punto, y es un elevador de esfuerzo. Una pequeña grieta de fatiga por esfuerzo se forma en la base del elevador de medida que progresa la grieta por fatiga, reduce el área efectiva de la sección transversal de la varilla de bombeo, hasta que no queda metal suficiente para sostener la carga y la varilla de bombeo, simplemente se fractura en dos. Las superficies de la fractura de una típica falla por fatiga, tienen una parte por fatiga, una parte de desgarramiento por tensión y un desgarramiento final por esfuerzo cortante.

Las fallas por fatiga son iniciadas por una multitud de elevadores de esfuerzo. Los elevadores de esfuerzo son discontinuidades visibles o microscópicas que causan un aumento del esfuerzo local en la sarta de varillas durante la carga. Los elevadores de esfuerzo visibles típicos, en las varillas de bombeo, varillas cortas y acoples, son inflexiones, corrosión, grietas, daños mecánicos, roscas y desgaste o cualquier combinación de lo anterior. Este efecto aumentado del esfuerzo, es el más crítico cuando la discontinuidad en la sarta de varillas es transversal (normal) al esfuerzo de tensión principal. Para determinar el origen de un elevador de esfuerzo en una falla por fatiga, la parte de la fatiga opuesta al desgarramiento final por esfuerzo cortante debe ser limpiada con cuidado y examinada minuciosamente. Las fallas por fatiga tienen características identificables visibles o macroscópicas en la superficie de la fractura, las cuales ayudan a identificar la ubicación del elevador de esfuerzo.



Figura 4.14 Mecanismos de falla por tensión y fatiga ^[20].

La (Figura 4.14), es un ejemplo de los mecanismos de fallas por tensión y fatiga. Los dos ejemplos de la derecha son fallas por tensión. Una falla por tensión se caracteriza por una reducción del diámetro de la zona de la sección transversal en el punto de la fractura. El segundo ejemplo de la derecha es típico en apariencia de las fallas por tensión. Las fracturas de las fallas por tensión, tienen rotura o esfuerzo cortante de ángulos de 45° a los esfuerzos aplicados. Una fisura de fatiga por esfuerzo es principalmente responsable de esta falla, a pesar que la fractura haya ocurrido al tratar de sacar la bomba de su asentamiento.

4.6.1 Fallas de diseño y operación.

La prevención de las fallas de la varilla de bombeo comienza con el diseño. Es posible que las sartas de varillas deficientemente diseñadas contribuyan a las fallas de otros componentes del sistema de levantamiento artificial, tales como el corte de los tubos de la varilla, resultado de cargas compresoras de la varilla. El diseño del sistema de extracción artificial es un compromiso entre la cantidad de trabajo por hacer y el gasto para hacerlo, durante un período económico de tiempo. La selección del tamaño y grado de la varilla de bombeo depende de muchos factores, incluyendo, esfuerzos máximos previstos, márgenes de los esfuerzos y ambientes de operación.

El desgaste abrasivo causa las fallas de la sarta de varillas al reducir la sección transversal del metal y expone la superficie del metal nuevo a la corrosión y causa las fallas en la conexión de la varilla de bombeo por impacto y daño del reborde. En la (Figura 4.15), el acople de Clase T de la izquierda y el acople de Clase SM de en medio, son ejemplos de desgaste abrasivo. En la (Figura 4.16), el cuerpo de la varilla de la izquierda, es un ejemplo de desgaste abrasivo. El desgaste abrasivo de la sarta de varillas es definido como una remoción progresiva del metal superficial, por contacto

con la sarta de tubos. El desgaste abrasivo que es igual en longitud, ancho y profundidad, sugiere usualmente un hoyo desviado o torcido. Los patrones de desgaste abrasivo angular indican sartas de varillas que están contactando agresivamente, en ángulo, con los tubos, generalmente como resultado del golpe del émbolo con el fluido, la interferencia del gas o tubos sin anclaje o anclados en forma inadecuada.

El desgaste abrasivo también remueve las películas que inhiben la corrosión y expone la superficie de los metales nuevos a los fluidos corrosivos, los cuales aceleran la tasa de corrosión.



Figura 4.15 Desgaste abrasivo ^[20].



Figura 4.16 Desgaste abrasivo ^[20].

4.6.2 Fallas mecánicas.

Las fallas mecánicas son responsables de un gran porcentaje del número total de todas las fallas de las sartas de varillas, incluyen todos los tipos de fallas, excepto las fallas por corrosión y los defectos de fabricación. El daño mecánico a la sarta de varillas contribuye a un elevador de esfuerzo, el cual causará las fallas de las varillas de bombeo. El daño mecánico puede ser causado por el diseño ineficaz del elevador artificial, procedimientos inadecuados de cuidado y manipulación, procedimientos descuidados de montaje y desconexión, prácticas de operación discontinuadas o cualquier combinación de estos elementos.

4.6.3 Fallas de la varilla por flexión.

Las fallas de fatiga por flexión son responsables de un considerable número de todas las fallas mecánicas. Es un hecho que todas las varillas de bombeo dobladas, eventualmente fallan. Cuando el cuerpo de la varilla doblada es jalado en forma recta durante la carga, se alcanza rápidamente la resistencia a la rotura del material. El ciclo de exceder continuamente la resistencia de rotura del material, es repetida durante el ciclo de

bombeo y causa fisuras de fatiga por esfuerzo en el lado cóncavo de la flexión. Estas fisuras de fatiga por esfuerzo progresan a través de la varilla durante la carga, hasta que no quede suficiente metal en la varilla, para sostener la carga y ocurre la fractura.



Figura 4.17 Falla de la varilla por flexión ^[20].

4.6.4 Fallas por daños superficiales.

Los daños superficiales aumentan el esfuerzo durante las cargas aplicadas, causando potencialmente, fallas de la sarta de varillas. El tipo de daño y su orientación, contribuye a este efecto de esfuerzo aumentado. La orientación del daño contribuye a mayores esfuerzos y el daño transversal tiene esfuerzos incrementados sobre aquellos relacionados con los daños longitudinales.

Las varillas de bombeo con indicación de daños en la superficie no se deben usar y deben ser reemplazadas. Se debe evitar todo contacto de metal con metal que podría ocasionar abolladuras, mellas o raspaduras.

4.6.5 Fallas de conexión.

La conexión API de la varilla de bombeo está diseñada como una conexión con soporte rotativo cargado con fricción. Debido a que la resistencia de la conexión de la varilla de bombeo es baja, cuando se le somete a cargas cíclicas, es necesario limitar las cargas cíclicas con precarga de unión macho (pin). Si la precarga del pasador es mayor que la carga aplicada, la carga en la conexión permanece constante y no ocurre fatiga de cargas cíclicas. La carga por fricción que se desarrolla entre la cara del soporte de la unión macho y la cara del soporte del acople ayuda a afianzar la conexión, para impedir que se suelte en el fondo del pozo. Sin embargo, si la precarga es menor que la carga aplicada, la cara del soporte de la unión macho y la cara del soporte del acople se separarán bajo la carga, durante el movimiento cíclico de la unidad de bombeo. Una vez que estas caras se separen, la conexión es cargada cíclicamente y ocasionará una falla por pérdida de desplazamiento o pérdida de ajuste. Las fallas por pérdida de desplazamiento pueden

ocurrir por una lubricación no adecuada, por montaje (apriete) inadecuado, exceso de torsión, desgaste por golpeteo de los tubos o cualquier combinación de estos elementos.

4.6.6 Fallas de fatiga por corrosión.

La corrosión es uno de los mayores problemas que se encuentran en los fluidos producidos y es responsable de casi dos tercios de todas las fallas de las varillas de bombeo. La corrosión es el resultado destructor de una reacción electroquímica entre el acero utilizado para hacer varillas de bombeo y el medio ambiente de la operación al cual están sometidas. Simplemente, la corrosión es la forma en que la naturaleza revierte un material de un estado de energía más alto (acero), hecho por el hombre, a su condición básica (mineral natural), tal como fue hallado en la naturaleza. El elemento hierro del acero, se combina con la humedad o los ácidos, para formar otros compuestos, tales como, óxido, sulfato, carbonato de hierro, etc. Alguna forma y concentración de agua está presente en todos los pozos considerados corrosivos y la mayoría contienen cantidades considerables de impurezas y gases disueltos. Por ejemplo, los gases ácidos de dióxido de carbono (anhídrido carbónico – CO_2) y el sulfato de hidrógeno (ácido sulfhídrico – H_2S), comunes en la mayoría de los pozos, son altamente solubles y se disuelven rápidamente en el agua - la cual tiende a bajar su pH. La capacidad de corrosión del agua es una función de la cantidad de estos dos gases que están contenidos en solución. Toda el agua con valores bajos de pH es considerada corrosiva al acero, con valores más bajos que representan mayor acidez, o capacidad de corrosión.

Todos los ambientes del fondo del pozo son corrosivos hasta cierto grado. Algunos fluidos corrosivos pueden ser considerados no corrosivos si la tasa de penetración de la corrosión, registrada en mm (milímetros) de pérdida de espesor por año, es lo suficientemente baja, que no causará problemas. Sin embargo, la mayoría de los pozos en producción están plagados con problemas de corrosión y ninguna varilla de bombeo fabricada en la actualidad puede soportar con éxito, sola, los efectos de esta corrosión. A pesar de que la corrosión no puede ser eliminada completamente, es posible controlar su reacción. Todos los grados de las varillas de bombeo deben ser protegidos adecuadamente, mediante el uso de programas eficaces de inhibición química. Algunos grados de varillas de bombeo, debido a las diferentes combinaciones de elementos de aleación, microestructuras y niveles de dureza, son capaces de tener una vida más larga

de servicio en los pozos con corrosión inhibida, que las de otros grados de alta o baja resistencia a la tensión.

4.6.6.1 Corrosión por ácido.

La (Figura 4.18), es un ejemplo de corrosión por ácido. Las compañías de servicios usan ácido para los trabajos de estimulación y limpieza del pozo. Todos los trabajos con ácido deberían tener un inhibidor efectivo mezclado con el ácido, antes de inyectarlo dentro del pozo. Los ácidos usados son aún corrosivos al acero y el pozo debería ser “lavado” el tiempo suficiente para recuperar todo el ácido utilizado. Raras veces, algunas aguas producidas contienen ácidos orgánicos que se han formado en el fondo del pozo, tales como los ácidos acético, clorhídrico y sulfúrico.

La corrosión por los ácidos es un adelgazamiento general del metal, que deja la superficie con la apariencia de nódulos de metal residual agudos, plumeados o como una trama. En las picaduras no se formarán incrustaciones de metal.



Figura 4.18 Corrosión por ácido ^[20].

4.6.6.2 Corrosión por cloruros.

La (Figura 4.19), es un ejemplo de corrosión por cloruros. Los cloruros contribuyen a la posibilidad de un aumento de la corrosión, relacionada con las fallas de las varillas de bombeo. La corrosividad del agua aumenta, a medida que aumenta la concentración de los cloruros. Los inhibidores de corrosión tienen más dificultad en penetrar y proteger la superficie de acero de las varillas de bombeo, en los pozos con alta concentración de cloruros. La corrosión del agua con alta concentración de cloruros, tiene la tendencia de ser más agresiva a las varillas de bombeo de acero al carbono, que a las varillas de bombeo de acero aleado. La corrosión por cloruros tiende a picar uniformemente toda el área de la superficie de las varillas de bombeo de acero al carbono, con picaduras superficiales, de fondo plano y de forma irregular. Las características de la forma de las picaduras incluyen, paredes empinadas y bordes agudos de picaduras.



Figura 4.19 Corrosión por cloruros ^[20].

4.6.6.3 Corrosión por CO₂.

La corrosión por el gas ácido CO₂, se combina con el agua para formar el ácido carbónico, el cual reduce el pH del agua. El ácido carbónico es muy agresivo al acero, origina áreas grandes de pérdida rápida del metal, lo cual puede erosionar completamente las varillas de bombeo y los acoples. La severidad de la corrosión aumenta con el incremento de la presión y temperatura parcial del CO₂. Las picaduras de la corrosión por CO₂, tienen fondo redondo, bordes agudos de picaduras. Las picaduras están generalmente interconectadas en líneas largas, pero en ocasiones pueden ser individuales y estar aisladas. Los fondos de las picaduras se llenarán con incrustaciones de carbonato de hierro, un depósito gris, de adherencia suelta, el cual es un subproducto de la corrosión del gas ácido CO₂. Las (Figuras 4.19 y 4.20), muestran ejemplos típicos de la corrosión por el gas ácido CO₂.



Figura 4.19



Figura 4.20

Ejemplos de corrosión por CO₂ ^[20].

4.6.6.4 Corrosión de metales distintos.

Una falla extremadamente rara, la corrosión de metales distintos puede originarse cuando se juntan dos metales con diferencias en potenciales de solución, en la misma solución. Un metal tiene una tendencia marcada a ser corroído, con preferencia al otro y bajo ciertas condiciones de fluido, el metal menos noble se corroe con mayor rapidez. La corrosión en metales distintos es usualmente mayor, cerca de la unión de los dos metales. Debido a que la mayoría de los materiales de las varillas de bombeo son compatibles, esta corrosión es rara vez vista en la sarta de varillas.

4.6.6.5 Corrosión por H₂S.

La corrosión por el gas ácido H₂S es de fondo redondo y de profundos bordes biselados de la picadura. Es usualmente pequeña, ocasional y dispersada sobre toda la superficie de la varilla de bombeo. Un segundo agente de corrosión, generado por el H₂S, es la incrustación de sulfuro de hierro. Las superficies de las varillas de bombeo y de las picaduras quedarán cubiertas con una incrustación negra muy adherente. La incrustación de sulfuro de hierro es altamente insoluble y catódica al acero, la cual tiende a acelerar las tasas de penetración de la corrosión. Un tercer mecanismo de corrosión es la friabilidad del hidrógeno, lo cual causa que la superficie de la fractura tenga una apariencia friable o granular. Un punto de iniciación de la fisura puede o no, ser visible y una parte de la fatiga puede o no, estar presente en la superficie de la fractura. El desgarramiento por el esfuerzo cortante de una falla por la acritud del hidrógeno es inmediato durante la fractura, debido a la absorción de hidrógeno y la pérdida de ductilidad del acero. A pesar de que es un ácido relativamente débil (cuando se compara con el gas ácido CO₂), cualquier cantidad de trazas, que se pueda medir, del gas ácido H₂S, es considerada una justificación para los programas de inhibición química, cuando también esté presente alguna cantidad de trazas de agua (H₂O), que se pueda medir.



Figura 4.21



Figura 4.22

Ejemplos de corrosión por H_2S ^[20].

4.6.6.6 Corrosión influenciada microbiológicamente.

La (Figura 4.23), muestra varios ejemplos de corrosión influenciada microbiológicamente (MIC) en los cuerpos de las varillas. Cierta cantidad de forma de vida microscópica está presente en esencialmente todos los pozos en producción. De gran inquietud respecto a la sarta de varillas, son los organismos unicelulares capaces de vivir en toda clase de condiciones y multiplicarse con increíble velocidad, comúnmente referido a ellos como bacterias o “bichos”. Las bacterias están clasificadas de acuerdo a sus requerimientos de oxígeno (O_2): aeróbicas (requieren O_2), anaeróbicas (no requieren O_2) y facultativas (cualquier forma de requerimiento). Algunas bacterias generan H_2S , producen ácidos orgánicos o enzimas. La MIC es muy agresiva y todas las varillas de bombeo se corroen rápidamente en ambientes del fondo del pozo que contengan bacterias. Los fluidos sospechables deberían ser controlados continuamente, mediante muestreo, identificación y conteo de las bacterias. La técnica de dilución de extinción es usada comúnmente para cultivar bacterias a fin de calcular el número de éstas que están presentes en el pozo. Se debería usar bactericida o biocida en todos los fluidos sospechables, para controlar las poblaciones de bacterias.



Figura 4.23 Corrosión influenciada microbiológicamente ^[20].

4.6.6.7 Bacterias productoras de ácido.

La (Figura 4.24), es un ejemplo de bacterias productoras de ácido (APB- Acid Producing Bacteria) en un cuerpo de varillas, y la (Figura 4.25), es un ejemplo de APB en un acople. Las picaduras de la corrosión debido a las APB tienen las mismas características básicas de forma de picadura que la corrosión por el gas ácido CO_2 . Las picaduras de la corrosión por las APB tienen paredes con apariencia cavernosa, con bordes cortantes y la base es generalmente estriada o granulosa. La picadura no contiene depósitos de incrustaciones.

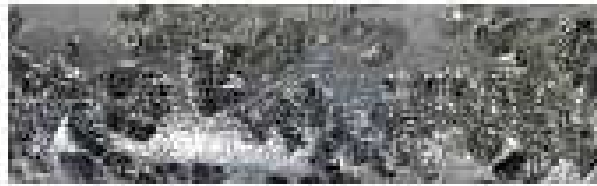


Figura 4.24 Bacterias productoras de ácido en el cuerpo de las varillas ^[20].

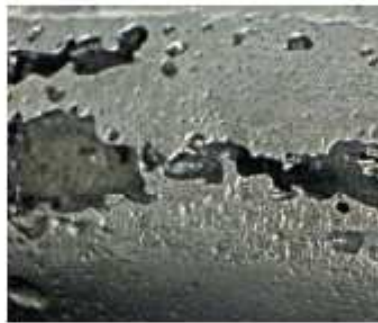


Figura 4.25 Bacterias productoras de ácido en un acople ^[20].

4.6.6.8 Bacterias reductoras de sulfato (SRB).

La (Figura 4.26), es un ejemplo de las bacterias reductoras de sulfato (SRB-Sulfate Reducer Bacteria) en un cuerpo de varillas. Las SRB son aquellas que producen H_2S , probablemente causan más problemas al equipo del fondo del pozo, que cualquier otro tipo de bacterias. La corrosión debida a las SRB tiene las mismas características básicas de la forma de corrosión por el gas ácido H_2S , a menudo con múltiples fisuras por esfuerzo en la base de la picadura, túneles alrededor de los bordes de las picaduras (picaduras dentro de picaduras), racimos de picaduras y/o anomalías inusuales (ésto es, manchas brillantes en la superficie de las varillas). Las múltiples fisuras en la base de las picaduras son el resultado del subproducto del sulfuro de hidrógeno, subproducto del

estilo de vida de las bacterias, el cual corroe y vuelve friable la superficie del acero, que esté bajo la colonia.



Figura 4.26 Bacterias reductoras de sulfato en un cuerpo de varillas ^[20].

4.6.6.9 Corrosión intensificada por oxígeno (O₂).

La corrosión intensificada por O₂ será la más predominante en los acoples, con unos pocos casos hallados en los engrosamientos de las varillas. La corrosión intensificada por O₂ es rara vez vista en el cuerpo de las varillas. En realidad, la corrosión agresiva intensificada por O₂, puede erosionar acoples sin dañar las varillas de bombeo en alguno de los lados. El índice de la corrosión intensificada por O₂ es directamente proporcional a la concentración de O₂ disuelto, al contenido de cloruros del agua producida y/o a la presencia de otros gases ácidos. El O₂ disuelto puede causar una corrosión severa en concentraciones extremadamente bajas y erosionar grandes cantidades de metal. Las picaduras son generalmente superficiales, de base plana y ancha, con la tendencia de una picadura a combinarse con otra. Las características de la forma de las picaduras pueden incluir bordes agudos y lados empinados, si son acompañadas con CO₂, o cráteres anchos y suaves con bordes biselados, si son acompañadas con H₂S. Los índices de corrosión aumentan con concentraciones incrementadas de O₂ disuelto.



Figura 4.27



Figura 4.28

Corrosión intensificada por O₂ ^[20].

4.6.6.10 Corrosión por corrientes parásitas.

Es raramente vista, en la mayoría de los pozos la corrosión por corrientes parásitas se refiere a las corrientes eléctricas inducidas o extraviadas que fluyen a, o de, la sarta de varillas. La corrosión por corrientes parásitas puede ser causada al conectar a tierra, el equipo eléctrico del cabezal del pozo, de la tubería de revestimiento o de los sistemas de protección catódica cercanos (tuberías). Los arcos originados por la sarta de varillas dejan picaduras profundas de forma irregular, con lados lisos y bordes agudos, y un pequeño cono en la base de la picadura. Los arcos originados por la tubería dejan picaduras profundas con lados lisos y bordes agudos, que son aleatorios en dimensión e irregulares en forma. Las picaduras de la corrosión por las corrientes parásitas son usualmente únicas y aisladas en una hilera debajo de un lado de la varilla de bombeo, cerca de los engrosamientos.

4.6.6.11 Corrosión por subdepósitos.

Se debería impedir que las incrustaciones, tales como, sulfato de bario, carbonato de calcio, sulfato de calcio, carbonato de hierro, óxido de hierro (herrumbre), sulfuro de hierro y sulfato de estroncio, se formen en las varillas de bombeo. A pesar de que las costras en las varilla de bombeo retrasa la tasa de penetración de la corrosión, también reduce la efectividad de los inhibidores químicos. La corrosión severa, localizada en las picaduras, ocasiona que en cualquier momento la incrustación se raje por un movimiento de flexión o se quite por abrasión ^[5].

4.7 Problemas de mayor relevancia en el bombeo mecánico.

Problema	Causa	Solución
Bomba desanclada.	Este problema se puede presentar debido a un mal manejo del equipo o a la extracción de la sarta de varillas.	Para esta anomalía el equipo de terminación y reparación de pozos (T.R.P.) deberá efectuar una prueba de reanclaje.
Bomba engasada.	El gas que entra a la bomba junto con el aceite, causa serias pérdidas de eficiencia y puede a veces evitar la operación de las válvulas.	Cuando se tienen altas relaciones gas-aceite, para mejorar el bombeo, es necesario separar el gas y direccionarlo a la tubería de revestimiento antes de que entre en la bomba.
Bomba subsuperficial colapsada.	Esta anomalía se presenta debido a que la bomba subsuperficial se encuentra en mal estado, este daño se origina principalmente al momento de instalar la bomba en el pozo.	Se recomienda la sustitución del equipo, con la finalidad de evitar una abrasión de las demás partes del equipo.
Bomba subsuperficial deformada.	Se origina principalmente por los agentes corrosivos, o por la abrasión que se provoca por el roce del émbolo con el cilindro.	Se puede prevenir con la inyección de inhibidores de corrosión, o con la implementación de un equipo extra para evitar la entrada de sedimentos que puedan originar la abrasión.
Deficiencia en el mecanismo de anclaje.	Se presenta como resultado de un mal funcionamiento en el equipo de anclaje, cuya función principal es la de sujetar la bomba con la tubería de producción.	Se debe llamar al equipo de R.T.P. para que realice una prueba de reanclaje.
Falta de nivel dinámico.	Una de las causas que originan esta falla son demasiadas emboladas en la unidad de bombeo mecánico.	Esto se corrige ajustando la velocidad para obtener las emboladas correctas.
Flotamiento de la sarta de varillas.	Se presenta en pozos con aceite viscoso.	Se puede corregir con circulación inversa.

Fuga en las válvulas (de pie y viajera).	Esta situación se origina principalmente por un asentamiento inadecuado de la canica en alguna de las canicas o por un desgaste excesivo del émbolo o barril.	La solución para esta anomalía es mediante la extracción de la bomba para reponer las piezas dañadas.
Golpe de fluido de la bomba.	Se presenta principalmente por que el pozo no esta produciendo de manera óptima o por la presencia de gas.	Una solución es aumentar la profundidad de la bomba, hasta que se tenga una buena sumergencia.
Interferencia de gas.	Esta anomalía se presenta cuando se tiene gas presente junto con el hidrocarburo, esta falla provoca un decremento en la carrera efectiva del émbolo afectando la producción.	Este problema se puede corregir con la implementación de una válvula anticandado de gas.
Mal diseño de la bomba subsuperficial.	Esta anomalía se presenta cuando en el diseño no se considero cuanto hidrocarburo aportaría el yacimiento, por tal motivo resultan demasiadas las emboladas y como consecuencia el barril no se llenará por completo, repercutiendo en la producción.	Reducir las emboladas por minuto, esto con la finalidad de permitirle al yacimiento un mejor aporte de hidrocarburos.
Pozos desviados.	Se presenta desgaste entre la varilla y la tubería de producción, además ocurren altas pérdidas de cargas por fricción.	Modificando la operación de las unidades de bombeo, es decir, disminuir lo más posible las emboladas por minuto.
Sarta de varillas rotas.	Esta anomalía se puede detectar con una carta dinamométrica.	Se requiere la intervención del equipo de R.T.P. para recuperar la sarta de varillas y posteriormente para realizar el cambio de dicha sarta.
Tubería de producción rota.	Esta anomalía se detecta por que el pozo esta sin fluir y el motor presenta forzamiento en su carrera ascendente.	Es necesaria la intervención del equipo de R.T.P., para que realice el cambio de tubería.

Varilla pulida.	Pueden presentarse problemas de corrosión, deflexión o varilla acinturada.	Para evitar que por estas causas se rompa la varilla pulida o afecte a otras partes del equipo lo más recomendable es el cambio de la varilla.
Problemas en el motor.	Se presenta cuando hay una pérdida de fase en las líneas de energía que alimentan al motor.	Cuando esto ocurre la principal consecuencia es que el motor se puede quemar, y lo único que se puede hacer es el cambio de motor.
Unidad de bombeo desbalanceada.	El desbalance se puede percibir con el sonido que produce el motor en la carrera ascendente y descendente, así como la velocidad de la manivela en cada embolada.	Se debe realizar una corrección (estabilizar) del equipo pues de no hacerlo se reduciría la eficiencia del sistema.
Fugas en los empaques.	Cuando un pozo tiene problemas para fluir por si mismo al inicio o durante la operación, la varilla pulida queda sin lubricación y en movimiento.	La solución es el cambio de estos empaques para evitar fugas.

CAPÍTULO 5

BASE DE DATOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN A UN PROBLEMA ESPECÍFICO EN UNA U.B.M.

El almacenamiento y la renovación de los problemas documentados por la Industria Petrolera facilitará y mejorará la comprensión de las nuevas generaciones de ingenieros Petroleros.

UNAM | FI | GRAFICA IDEAL



SOLUCIONES PARA PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN EL BOMBEO MECÁNICO.

BARRÓN PARRA OSVALDO
SÁNCHEZ FONSECA GERARDO

ASESOR: ING. MARÍA ISABEL VILLEGAS JAVIER

En el desarrollo del presente trabajo, logramos recopilar información en la que se describe en forma general los principales problemas que se presentan durante la operación del sistema de bombeo mecánico, dando como resultado final la base de datos. Esta información se almacena mediante la utilización de un software (Dreamweaver CS3), el cual nos permite crear páginas web profesionales.

La información que se precargo en el software, contiene una descripción general del problema que se haya seleccionado previamente; así como las anomalías que se presentan en el equipo subsuperficial, determinadas por los instrumentos de medición instalados en el sistema de bombeo mecánico, estas se pueden diagnosticar debido a los resultados gráficos de estos instrumentos (dinamómetro). En algunos casos se cuenta con una representación visual (video) de dichas anomalías y una explicación general del comportamiento gráfico de está anomalía. También cuenta con un apartado en el que se sugieren algunas soluciones para estas anomalías.

La finalidad principal de recopilar está información es para que las personas interesadas puedan consultarla y les sirva como una ayuda para la comprensión y una detección más rápida de las anomalías del equipo.

5.1 Ejecución de la base de datos.

Para la ejecución de esta base de datos, se puede acceder desde cualquier equipo de cómputo con acceso a internet (para un óptimo funcionamiento de esta información es recomendable utilizar el navegador Internet Explorer), en la barra superior de su navegador de internet se ingresa la siguiente dirección:

<http://www.institucionalfa.org/TESIS/inicio.php>

Posteriormente se abrirá una ventana de inicio en la que se muestra una restricción de usuario (Figura 5.1), en ella se deben llenar los campos con la información de usuario y contraseña (password), una vez que se ingreso la información correcta en los campos y tras oprimir el botón de acceder; se tendrá acceso a la base de datos, de lo contrario se mostrara una advertencia.

Nota: las personas interesadas en consultar la base de datos, deberán enviar un correo electrónico a gerardo.sanchezf@hotmail.com o valdoparra@gmail.com, posteriormente recibirán a la brevedad posible una respuesta, la cual contendrá el nombre de usuario, así como el password para que puedan realizar la consulta.

FACULTAD DE INGENIERIA


usuario

password

Figura 5.1 Ventana para datos de usuario y password.

Después de cumplir con los requerimientos que se solicitan en la ventana de inicio se desplegará la pantalla principal (Figura 5.2).

UNAM | FI GRAFICA IDEAL



SOLUCIONES PARA PROBLEMAS
QUE SE PRESENTAN EN EL BOMBEO MECÁNICO.

BARRÓN PARRA OSVALDO
SÁNCHEZ FONSECA GERARDO

ASESOR: ING. MARÍA ISABEL VILLEGAS JAVIER

<p>Bibliografía</p> <p>Bomba desanclada</p> <p>Bomba engasada</p> <p>Bomba subsuperficial colapsada</p> <p>Bomba subsuperficial deformada</p> <p>Deficiencia en el mecanismo de anclaje</p>	<p>Falta de nivel dinámico</p> <p>Flotamiento de sarta de varillas</p> <p>Fuga en las válvulas</p> <p>Golpe de fluido de la bomba</p> <p>Inercia del fluido en la bomba</p> <p>Interferencia de gas</p>	<p>Mal diseño de la bomba subsuperficial</p> <p>Mecanismos de las fallas</p> <p>Pozos desviados</p> <p>Sarta de varillas rotas</p> <p>Tubería de producción rota</p> <p>Varilla pulida</p>
---	---	--

Fig. 5.2 Muestra el menú principal de la base de datos.

La pantalla principal está conformada de la siguiente manera: en la parte superior se encuentra una barra, en la parte superior izquierda se puede consultar el comportamiento de una gráfica ideal, así como, una breve descripción de la misma, en la parte central se observa el título de la tesis, nombre de los tesistas y el nombre del asesor; por último en la parte inferior se presenta un menú principal con los problemas y la bibliografía en la que nos basamos para la elaboración de la base de datos.

Este menú principal se puede manipular de tal manera que se tiene acceso a los diferentes problemas contenidos en esta base de datos

En los problemas se muestra una descripción, gráfica, video y la solución (Figura 5.3), de acuerdo al problema seleccionado, cabe mencionar que algunos de los casos no presentan este mismo formato.

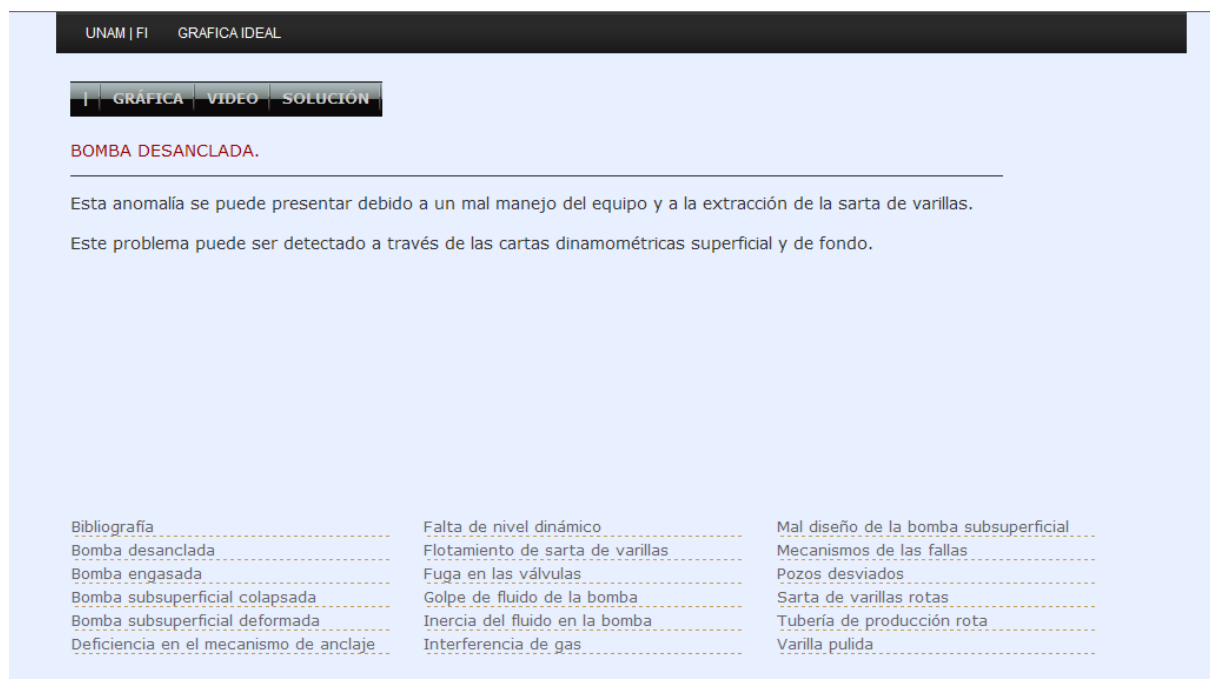


Figura 5.3 Muestra la descripción de uno de los problemas.


Al seleccionar el botón de gráfica te despliega una explicación de ésta, en ella se muestra la anomalía que se está presentando en el equipo subsuperficial, así como, las causas que la originan (Figura 5.4).

UNAM | FI GRAFICA IDEAL

GRAFICA VIDEO SOLUCIÓN

GRAFICA | BOMBA DESANCLADA.

La aceleración de la varilla pulida en movimiento debe ser mayor cuando inicia su ascenso que cuando inicia el descenso en la parte superior; Entonces, la gráfica muestra que en el arranque desde el fondo con la masa máxima, se requiere de un mayor esfuerzo en la varilla pulida. Conforme esta masa se eleva, su aceleración será menor hasta aproximadamente la mitad de la carrera ascendente, en ese instante la varilla pulida comenzara a alargarse y la carga en está será mayor. En la parte superior de la varilla pulida se comenzará a contraer con una disminución sucesiva de la carga, en su descenso la aceleración disminuirá hasta aproximarse a la mitad de la carrera descendente, donde una vez más, comienza a sumarse al peso de las varillas que se desacelera hasta llegar al fondo de la carrera.



<p>Bibliografía</p> <p>Bomba desanclada</p> <p>Bomba engasada</p> <p>Bomba subsuperficial colapsada</p> <p>Bomba subsuperficial deformada</p> <p>Deficiencia en el mecanismo de anclaje</p>	<p>Falta de nivel dinámico</p> <p>Flotamiento de sarta de varillas</p> <p>Fuga en las válvulas</p> <p>Golpe de fluido de la bomba</p> <p>Inercia del fluido en la bomba</p> <p>Interferencia de gas</p>	<p>Mal diseño de la bomba subsuperficial</p> <p>Mecanismos de las fallas</p> <p>Pozos desviados</p> <p>Sarta de varillas rotas</p> <p>Tubería de producción rota</p> <p>Varilla pulida</p>
--	---	--

Figura 5.4 Descripción de la gráfica ideal en una bomba desanclada.

Otra aplicación que presenta esta base de datos es la de poder seleccionar el apartado de video, nos despliega una pantalla en la cual se puede visualizar el funcionamiento de la válvula subsuperficial para así tener una mejor comprensión de la anomalía (Figura 5.5).

UNAM | FI GRAFICA IDEAL

GRAFICA VIDEO SOLUCIÓN

VIDEO | BOMBA DESANCLADA.

La aceleración de la varilla pulida en movimiento debe ser mayor cuando inicia su ascenso que cuando inicia el descenso en la parte superior; Entonces, la gráfica muestra que en el arranque desde el fondo con la masa máxima, se requiere de un mayor esfuerzo en la varilla pulida. Conforme esta masa se eleva, su aceleración será menor hasta aproximadamente la mitad de la carrera ascendente, en ese instante la varilla pulida comenzara a alargarse y la carga en está será mayor. En la parte superior de la varilla pulida se comenzará a contraer con una disminución sucesiva de la carga, en su descenso la aceleración disminuirá hasta aproximarse a la mitad de la carrera descendente, donde una vez más, comienza a sumarse al peso de las varillas que se desacelera hasta llegar al fondo de la carrera.



<p>Bibliografía</p> <p>Bomba desanclada</p> <p>Bomba engasada</p> <p>Bomba subsuperficial colapsada</p> <p>Bomba subsuperficial deformada</p> <p>Deficiencia en el mecanismo de anclaje</p>	<p>Falta de nivel dinámico</p> <p>Flotamiento de sarta de varillas</p> <p>Fuga en las válvulas</p> <p>Golpe de fluido de la bomba</p> <p>Inercia del fluido en la bomba</p> <p>Interferencia de gas</p>	<p>Mal diseño de la bomba subsuperficial</p> <p>Mecanismos de las fallas</p> <p>Pozos desviados</p> <p>Sarta de varillas rotas</p> <p>Tubería de producción rota</p> <p>Varilla pulida</p>
--	---	--

Figura 5.5 Video de una bomba desanclada.

Por último se presenta un apartado de sugerencia para solucionar el problema (Figura 5.6), es conveniente mencionar que en muchos casos la única solución es la intervención del equipo de terminación y reparación de pozos (R.T.P.) así como la implementación de un equipo o la sustitución de la parte afectada.

UNAM | FI GRAFICA IDEAL

GRAFICA VIDEO SOLUCIÓN

SOLUCIÓN | BOMBA DESANCLADA

Para esta anomalía el equipo de reparación y terminación de pozos (R.T.P) deberá efectuar una prueba de reanclaje, como su nombre lo dice consiste en anclar (estabilizar) la bomba al momento de la producción del aceite.

Bibliografía	Falta de nivel dinámico	Mal diseño de la bomba subsuperficial
Bomba desanclada	Flotamiento de sarta de varillas	Mecanismos de las fallas
Bomba engasada	Fuga en las válvulas	Pozos desviados
Bomba subsuperficial colapsada	Golpe de fluido de la bomba	Sarta de varillas rotas
Bomba subsuperficial deformada	Inercia del fluido en la bomba	Tubería de producción rota
Deficiencia en el mecanismo de anclaje	Interferencia de gas	Varilla pulida

Figura 5.6 Solución a un problema específico.

Conclusiones.

La finalidad de instalar un sistema artificial de producción, es mejorar la producción en los pozos que han disminuido su gasto, o aquellos que están cerrados por que la presión de yacimiento resulta insuficiente para transportar los fluidos hasta la superficie.

El sistema de bombeo mecánico es el más utilizado en pozos someros o de baja productividad, pero sobre todo, es el sistema que mejor se adapta en zonas urbanas por el bajo riesgo que éste representa, ya que con este sistema no son necesarios gasoductos a alta presión como en el bombeo neumático, además, resulta económico en cuanto a su instalación y mantenimiento.

El rango de gastos que puede manejar el sistema está directamente relacionado con diversos factores como son: la capacidad de la bomba, el tipo de unidad que se decida instalar, el diseño de la sarta de varillas, el diámetro de las tuberías, que finalmente se seleccionaran en función del índice de productividad, el porcentaje de agua, la presión de fondo fluyendo, la geometría del pozo, etc.

Una de las principales limitantes de este sistema es la profundidad, pues mientras más profundo es el pozo, mayor es el peso de la sarta y por lo tanto, se requiere un equipo más grande para el levantamiento de los fluidos, que, como consecuencia aumenta el costo de instalación, adicional al riesgo que se corre de que se rompa o desprenda la sarta de varillas.

Cuando se tienen pozos desviados, la sarta de varillas es sometida a fuertes fricciones con la tubería de producción; estas fricciones llegan a desgastar los acoplamientos de las varillas, y se genera un sobre esfuerzo en el equipo, vibraciones en la bomba que evitan que las válvulas sellen apropiadamente y se pierda parte del fluido desplazado.

El monitoreo continuo de las instalaciones de bombeo mecánico, refleja las condiciones que se tienen de operación; con esto se logran detectar problemas en el pozo oportunamente, y permite tomar medidas correctivas para una operación más eficiente.

Recomendaciones

Antes de decidir instalar un sistema artificial se debe realizar un estudio técnico-económico para seleccionar el sistema más adecuado de acuerdo a las condiciones tanto del pozo como de los fluidos, ya que esto asegurará el éxito de su implementación.

Realizar un buen diagnóstico de las condiciones del pozo es muy importante, ya que, con esto no sólo se lleva un estricto control sobre el comportamiento de la unidad de bombeo, sino, que también es posible detectar fallas en el equipo para poder corregirlos antes de que se presente un problema de mayor importancia y resulte más costosa su reparación.

También es importante tener conocimiento de los factores que modifican la toma de un registro dinamométrico, como son: la aceleración, la elongación de las varillas, vibración de la sarta, entre otros; si el intérprete de estos datos los ignora, realizará un análisis erróneo, que tendría como consecuencia hasta la implementación de un equipo innecesario para el buen funcionamiento del sistema.

La velocidad de bombeo es un factor importante, pues a medida que aumenta, se presenta mayor elongación en las varillas, y provoca la reducción de la carrera efectiva del émbolo; otro problema que se presenta con la velocidad es que mientras más grande es, la duración del equipo es menor; por lo tanto si se mantiene una velocidad adecuada, puede alargarse la vida del equipo.

Cuando se abaten los niveles de fluido es necesario profundizar la colocación de la bomba, incrementando con esto los problemas generados por la desviación del pozo; una forma de contrarrestar estos problemas es colocando centradores que reducen la fricción y el golpeteo que se presenta entre la sarta de varillas y la tubería de producción.

Cuando se tiene una excesiva presencia de gas liberado, la bomba puede presentar un problema de engasamiento, que repercutirá en la producción; la mejor solución es bajar la bomba hasta que se tenga una mejor sumergencia de la misma, o se instala un separador de gas por debajo de la bomba, y la distancia entre las válvulas viajeras y de pie deberá acortarse.

Realizar un correcto análisis de las propiedades de los fluidos, para la selección óptima de las partes del equipo subsuperficial y los materiales con que estén hechos, pueden prevenir problemas futuros de corrosión.

La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria para una barra en tensión o compresión simple se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma = E\epsilon \quad \dots \quad (1)$$

En donde σ es el esfuerzo axial, ϵ es la deformación unitaria axial y E es una constante de proporcionalidad conocida como módulo de elasticidad del material. El módulo de elasticidad será la pendiente del diagrama de esfuerzo-deformación unitaria en la región linealmente elástica. Como la deformación unitaria es adimensional, las unidades de E serán la misma que la del esfuerzo (lb / pg²).

La ecuación (1) se conoce como la ley de Hooke, en honor del científico inglés Robert Hooke, quien fue el precursor en la investigación de las propiedades elásticas de los materiales poniendo a prueba varios de éstos como metal, tendones, madera, etc. Hooke midió el alargamiento de alambres largos, los que soportaban pesos y observó que los estiramientos “siempre mantienen las mismas proporciones entre sí de acuerdo con los pesos que los causaron”. Así, Hooke estableció la relación lineal entre las cargas aplicadas y los alargamientos resultantes.

La ecuación (1) en realidad es una versión limitada de la ley de Hooke debido a que sólo relaciona los esfuerzos longitudinales y las deformaciones unitarias desarrolladas en tensión compresión simple de la barra (esfuerzo uniaxial).

El módulo de elasticidad tiene valores relativamente grandes para materiales que son muy rígidos, como los metales estructurales. (Tabla 1). Para la mayoría de los materiales el valor de E en compresión es casi el mismo que en tensión.

Relación de Poisson.

Cuando una barra prismática se somete a tensión la elongación axial va acompañada de una contracción lateral (es decir, contracción normal a la dirección de la carga aplicada). Está contracción se puede observar fácilmente estirando una banda de caucho, pero en los metales los cambios en las dimensiones laterales (en la región linealmente elástica) usualmente son demasiado pequeños para observarlos, por lo que es necesario la utilización de dispositivos sensoriales de medición.

La deformación unilateral ϵ' en cualquier punto de la barra es proporcional a la deformación unitaria axial ϵ en el mismo punto si el material es linealmente elástico. La relación de esas

deformaciones unitarias es una propiedad del material que se conoce como relación de Poisson. Esta relación adimensional, que en general se denota por la letra griega ν , se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\nu = - \frac{\text{deformación unitaria lateral}}{\text{deformación unitaria axial}} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (2)$$

El signo menos que representa la ecuación es para compensar el hecho de que las deformaciones unitarias lateral y axial por lo general tienen signos opuestos. Por ejemplo, la deformación unitaria axial en una barra en tensión es positiva y la deformación unitaria lateral es negativa (debido a que el ancho de la barra disminuye). Para la compresión se presenta una situación contraria ya que la barra se acorta (deformación unitaria axial negativa) y se hace más ancha (deformación unitaria lateral positiva). Por lo tanto la relación de Poisson tendrá un valor positivo.

Cuando se conoce la relación de Poisson para un material, podemos obtener la deformación unitaria lateral a partir de la deformación unitaria como sigue:

$$\varepsilon' = -\nu\varepsilon \quad \dots\dots\dots (3)$$

al emplear las ecuaciones (2) y (3) se debe tener en cuenta que sólo se aplican a una barra sometida a esfuerzo axial, es decir, una barra para la que el único esfuerzo normal σ en la dirección axial.

Para el caso del sistema de bombeo mecánico se asume la ley de Hooke para determinar el límite elástico en las sartas de varillas, esto hace referencia para cuando el esfuerzo de tensión aplicado da como resultado la deformación (elongación) de la sarta de varillas; el esfuerzo de tensión al cual esta falla ocurre, es cuando el material llega a su límite proporcional. El límite proporcional se utiliza como un criterio para establecer el esfuerzo de tensión máximo de trabajo permisible de la sarta, entonces se repite el ciclo de transmisión de esfuerzo de cargas en las varillas dando como resultado la fatiga y falla de las mismas, lo cual ocurre generalmente abajo del límite proporcional.

El límite de duración de la sarta depende principalmente de:

- Los componentes que presenta el acero (carbón, manganeso, silicón, níquel, cromo y molibdeno).

- De los agentes corrosivos que se presentan en los fluidos del pozo (ácido sulfhídrico, dióxido de carbono, oxígeno).
- El rango de esfuerzos de tensión en las varillas ^[23].

Material	Módulo de elasticidad E		Módulo de elasticidad G		Relación de Poisson ν	
	ksi	GPa	ksi	GPa		
Acero	28,000–30,000	190–210	10,800–11,800	75–80	0.27–0.30	
Aleaciones de aluminio	10,000–1,400	70–79	3800–4300	26–30	0.33	
	2014-T6	10,600	73	4000	28	0.33
	6061-T6	10,000	70	3800	26	0.33
	7075-T6	10,400	72	3900	27	0.33
Aleaciones de magnesio	15,000–17,000	100–120	5600–6400	39–44	0.33	
Aleaciones de titanio	6000–6500	41–45	2200–2400	15–17	0.35	
Bronce	14,000–17,000	96–120	5200–6300	36–44	0.34	
Concreto (compresión)	2500–4500	17–31			0.1–0.2	
Cobre y aleaciones de cobre	16,000–18,000	110–120	5800–6800	40–47	0.33–0.36	
Caucho	0.1–0.6	0.0007–0.004	0.03–0.2	0.0002–0.001	0.45–0.50	
Fundición gris	12,000–25,000	83–170	4600–10,000	32–69	0.2–0.3	
Latón	14,000–16,000	96–110	5200–6000	36–41	0.34	
Madera (flexión)						
	Abeto Douglas	1600–1900	11–13			
	Roble	1600–1800	11–12			
Pino del sur	1600–2000	11–14				
Monel (67% Ni, 30% Cu)	25,000	170	9500	66	0.32	
Níquel	30,000	210	11,400	80	0.31	
Plástico						
	Nailon	300–500	2.1–3.4		0.4	
Polietileno	100–200	0.7–1.4			0.4	
Roca (compresión)						
	Granito, mármol, cuarzo	6000–14,000	40–100		0.2–0.3	
Caliza, arenisca	3000–10,000	20–70			0.2–0.3	
Tungsteno	50,000–55,000	340–380	21,000–23,000	140–160	0.2	
Vidrio	7000–12,000	48–83	2700–5100	19–35	0.17–0.27	

Tabla 1 Módulo de elasticidad y relación de Poisson ^[23].

La relación entre la fuerza de flotación y el líquido desplazado fue descubierta por Arquímedes, en el siglo III a.C. se enuncia de la siguiente manera:

Cuando un cuerpo se encuentra total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, el fluido ejerce sobre él una fuerza vertical F_B , dirigida hacia arriba, a la que se conoce como empuje o fuerza de flotación, la cual será igual al peso del fluido desalojado por el cuerpo sumergido.

La expresión matemática que sintetiza el principio de Arquímedes se puede deducir por el análisis de un cuerpo sumergido, parcial o totalmente en un fluido de peso específico γ

$$F_B = \gamma V_{CS} \quad \dots\dots \quad (1)$$

F_B = empuje o fuerza de flotación, γ = peso específico del fluido, V_{CS} = volumen del fluido desplazado por el cuerpo que es igual al volumen del cuerpo sumergido. Por otra parte se puede mostrar que el empuje actúa a través del centro de gravedad del volumen del fluido desalojado, conocido como centro de flotación, mientras que el peso del cuerpo actúa a través del centro de gravedad.

Para el caso del sistema de bombeo mecánico se pueden concluir en base al principio de flotación los siguientes puntos:

- a) Cuando el peso del cuerpo es menor que el empuje ascendente y se encuentra en el fondo, el cuerpo sale a la superficie y flota.
- b) Cuando el peso del cuerpo es igual al empuje ascendente, el cuerpo queda en equilibrio dentro del líquido.
- c) Cuando el peso del cuerpo es mayor que el empuje ascendente, éste se hunde pero aparentemente disminuye su peso ^[7].

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 1) 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 1 Posición de ambas unidades para iniciar la carrera ascendente [2].

Mientras que en la (Figura 2) 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 2 Inicio del movimiento ascendente [2].

Por otra parte, en la (Figura 3), 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 Movimiento de bombeo a los 90° [2].

La unidad convencional alcanza la parte superior de la carrera a los 180°, como se muestra en la (Figura 4), 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 4 Movimiento de bombeo a los 180° [2].

En la (Figura 5), 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.

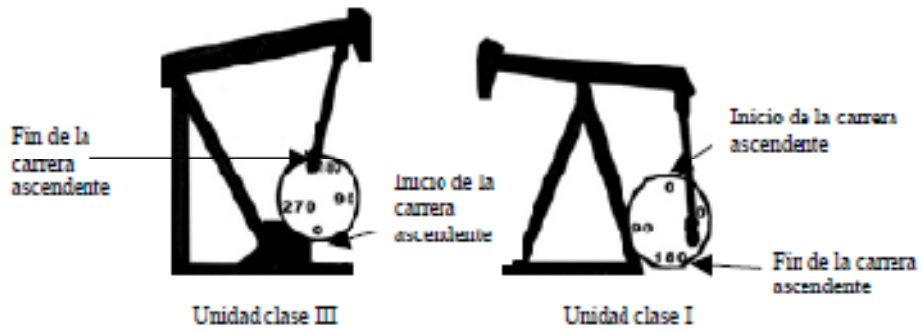


Figura 5 Movimiento de bombeo a los 225° [2].

A los 270°, en la (Figura 6), la unidad clase III ha rebasado la carrera de la unidad convencional y rápidamente empieza a reducir su velocidad.



Figura 6 Movimiento de bombeo a los 270° [2].

La longitud de la carrera de las dos unidades casi es la misma a los 315° de desplazamiento de la manivela, (Figura 7).

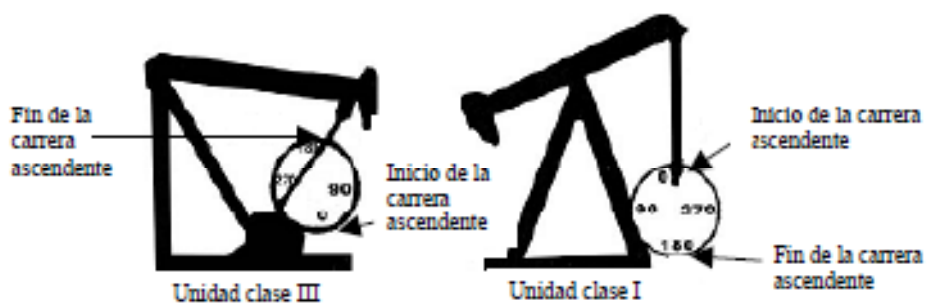
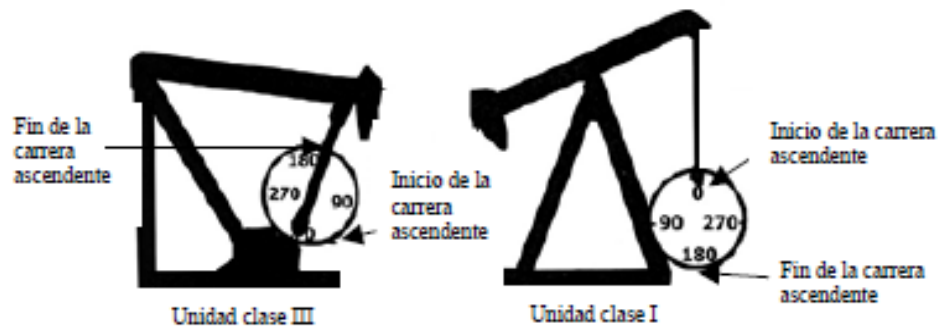


Figura 7 Movimiento de bombeo a los 315° [2].

Al complementarse el ciclo de la manivela las dos unidades llegan simultáneamente al fondo de la carrera descendente como se muestra en la (Figura 8).

Figura 8 Fin del ciclo ^[2].

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 ^[2].

DUREZA ROCKWELL				DUREZA SUPERFICIAL ROCKWELL			Dureza Vickers	Dureza Brinell P: 3.000 kg. bola de acero Ø 10 mm		Resistencia a la Tracción Mpa
HRC	HRB	HRA	HRD				HV			
Escala C P.150 kg. Cono de diamante	Escala B P.100 kg. Bola de acero Ø 1/16"	Escala A P.60 kg. Cono de diamante	Escala D P.100 kg. Cono de diamante	Escala 15-N P.15 kg. Cono de diamante	Escala 30-N P.30 kg. Cono de diamante	Escala 45-N P.45 kg. Cono de diamante	P.30 kg. Pirámide de diamante	Bola Standard	Bola Tungsteno	
68	---	85,6	76,9	93,2	84,4	75,4	940	---	---	---
67	---	85,0	76,1	92,9	83,6	74,2	900	---	---	---
66	---	84,5	75,4	92,5	82,8	73,3	865	---	---	---
65	---	83,9	74,5	92,2	81,9	72,0	832	---	(739)	---
64	---	83,4	73,8	91,8	81,1	71,0	800	---	(722)	---
63	---	82,8	73,0	91,4	80,1	69,9	772	---	(705)	---
62	---	82,3	72,2	91,1	79,3	68,8	746	---	(688)	---
61	---	81,8	71,5	90,7	78,4	67,7	720	---	(670)	---
60	---	81,2	70,7	90,2	77,5	66,6	697	---	(654)	---
59	---	80,7	69,9	89,8	76,6	65,5	674	---	(634)	---
58	---	80,1	69,2	89,3	75,7	64,3	653	---	615	---
57	---	79,6	68,5	88,9	74,8	63,2	633	---	595	---
56	---	79,0	67,7	88,3	73,9	62,0	613	---	577	---
55	---	78,5	66,9	87,9	73,0	60,9	595	---	560	2075
54	---	78,0	66,1	87,4	72,0	59,8	577	---	543	2015
53	---	77,4	65,4	86,9	71,2	58,6	560	---	525	1950
52	---	76,8	64,6	86,4	70,2	57,4	544	(500)	512	1880
51	---	76,3	63,8	85,9	69,4	56,1	528	(487)	496	1820
50	---	75,9	63,1	85,5	68,5	55,0	513	(475)	481	1760
49	---	75,2	62,1	85,0	67,6	53,8	498	(464)	469	1695
48	---	74,7	61,4	84,5	66,7	52,5	484	451	455	1635
47	---	74,1	60,8	83,9	65,8	51,4	471	442	443	1580
46	---	73,6	60,0	83,5	64,8	50,3	458	432	432	1530
45	---	73,1	59,2	83,0	64,0	49,0	446	421	421	1480
44	---	72,5	58,5	82,5	63,1	47,8	434	409	409	1435
43	---	72,0	57,7	82,0	62,2	46,7	423	400	400	1385
42	---	71,5	56,9	81,5	61,3	45,5	412	390	390	1340
41	---	70,9	56,2	80,9	60,4	44,3	402	381	381	1295
40	---	70,4	55,4	80,4	59,5	43,1	392	371	371	1250
39	---	69,9	54,6	79,9	58,6	41,9	382	362	362	1215
38	---	69,4	53,8	79,4	57,7	40,8	372	353	353	1180
37	---	68,9	53,1	78,8	56,8	39,6	363	344	344	1160
36	(109,0)	68,4	52,3	78,3	55,9	38,4	354	336	336	1115
35	(108,5)	67,9	51,5	77,7	55,0	37,2	345	327	327	1080
34	(108,0)	67,4	50,8	77,2	54,2	36,1	336	319	319	1055
33	(107,5)	66,8	50,0	76,6	53,3	34,9	327	311	311	1025
32	(107,0)	66,3	49,2	76,1	52,1	33,7	318	301	301	1000
31	(106,0)	65,8	48,4	75,6	51,3	32,5	310	294	294	980
30	(105,5)	65,3	47,7	75,0	50,4	31,3	302	286	286	950
29	(104,5)	64,7	47,0	74,5	49,5	30,1	294	279	279	930
28	(104,0)	64,3	46,1	73,9	48,6	28,9	286	271	271	910
27	(103,0)	63,8	45,2	73,3	47,7	27,8	279	264	264	880
26	(102,5)	63,3	44,6	72,8	46,8	26,7	272	258	258	860
25	(101,5)	62,8	43,8	72,2	45,9	25,5	266	253	253	840
24	(101,0)	62,4	43,1	71,6	45,0	24,3	260	247	247	825
23	100,0	62,0	42,1	71,0	44,0	23,1	254	243	243	805
22	99,0	61,5	41,6	70,5	43,2	22,0	248	237	237	785
21	98,5	61,0	40,9	69,9	42,3	20,7	243	231	231	770
20	97,8	60,5	40,1	69,4	41,5	19,6	238	226	226	760
(18)	96,7	---	---	---	---	---	230	219	219	730
(16)	95,5	---	---	---	---	---	222	212	212	705
(14)	93,9	---	---	---	---	---	213	203	203	675
(12)	92,3	---	---	---	---	---	204	194	194	650
(10)	90,7	---	---	---	---	---	196	187	187	620
(8)	89,5	---	---	---	---	---	188	179	179	600
(6)	87,1	---	---	---	---	---	180	171	171	580
(4)	85,5	---	---	---	---	---	173	165	165	550
(2)	83,5	---	---	---	---	---	166	158	158	530
(0)	81,7	---	---	---	---	---	160	152	152	515

Según ASTM E 140

Escalas de Dureza utilizadas por Antidesgast, S.A.

Dureza Vickers de los productos Antidesgast, S.A.

Producto	Dureza	Producto	Dureza	Producto	Dureza	Producto	Dureza
Desiplast 68	68 Shore D	Alresist 323	323 Vickers	Altrom 800	700-800 Vickers	Basaltyc 720	720 Vickers
Desipol 85	85 Shore A	Alresist 402	340-410 Vickers	Carbutung 900	720-830 Vickers	Zirkon 1312	1300 Vickers
Desipol 87	87 Shore A	Alresist 512	440-520 Vickers	Funresist 1450	1450 Vickers	Deslisint 1500	1500 Vickers
Desipol 93	93 Shore A	Deslinox 424	420 Vickers	Brikolast 903	--	Zirtherm 2002	2000 Vickers
Biresist 626	Interior 620 Vickers Exterior 150-250	Altrom 700	630-700 Vickers	Brikolast M6	--	Carbusil 2400	2300 Vickers

Tabla 1 Escala de durezas [30].

Este tipo de movimiento es uniforme y periódico, (Figura 1). 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.

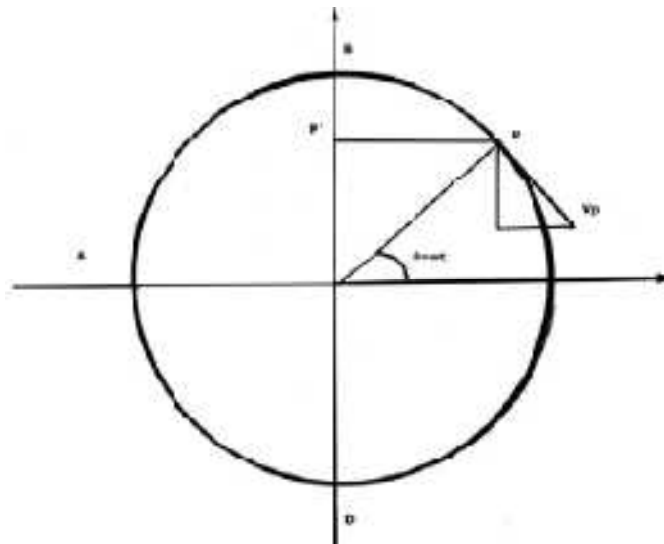


Figura 1 Movimiento Armónico Simple (MAS) ^[12].

Movimiento de biela y manivela.

La manivela es conectada por medio de un perno (Figura 2), 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 2), 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, BP, y la biela, 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 biela-manivela, 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' .

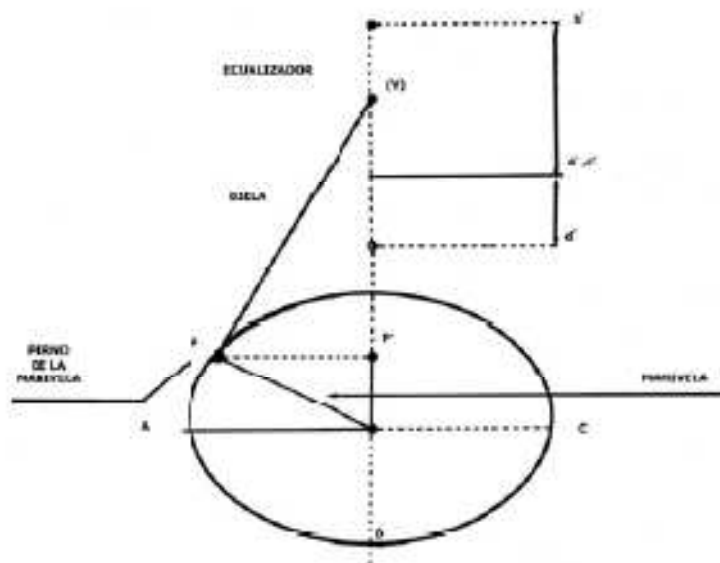


Figura 2 Movimiento biela-manivela ^[12].

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 ^[12].

ABATIMIENTO (DRAW DOWN): La diferencia entre la presión de fondo estática y la presión de fondo fluyendo. La distancia entre el nivel estático y el nivel de bombeo del fluido en el espacio anular de un pozo con Bombeo Mecánico.

ABRASIÓN: Acción y efecto de desgastar una superficie por medio de fricción.

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

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

ANCLA: Cualquier dispositivo que asegura o fija un equipo.

BALANCÍN: Miembro horizontal de acero de una unidad de Bombeo Mecánico, que tiene un movimiento de balanceo recíprocante.

BARRIL (JACKET): Pieza tubular de acero de la bomba de varillas de succión dentro de la cual se coloca una camisa cuidadosamente ajustada y pulida. En este tipo de bomba el émbolo se mueve hacia arriba y hacia abajo dentro de la camisa, y ésta se encuentra dentro del barril.

BARRIL (UNIDAD DE VOLUMEN): Medida de volumen para productos petroleros. Un barril es equivalente a 42 galones americanos ó 0.15899 metros cúbicos; Un metro cúbico equivale a 6.2897 barriles.

BIELA (BRAZO PITMAN): Brazo que conecta la manivela con el balancín en una unidad de bombeo, por medio del cual el movimiento rotatorio se convierte en movimiento recíprocante.

BIMBA: Sobrenombre de la unidad de Bombeo Mecánico en el lenguaje petrolero.

BOMBA DE FONDO: Cualquier bomba de varillas de succión hidráulica o centrífuga instalada cerca o en el fondo del pozo que se utiliza para elevar los fluidos.

BOMBA DE INSERCIÓN: Bomba de varillas de succión que se coloca dentro de 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.

BOMBA DE VARILLAS DE SUCCIÓN: Arreglo en el fondo del pozo, empleado para elevar el fluido a la superficie por medio de la acción reciprocante de la sarta de varillas de succión. Los componentes básicos son: el barril de trabajo, la camisa, el émbolo, las válvulas y el ancla. Los dos tipos de bombas de varillas de succión son la bomba de tubería de producción, en la cual el barril se conecta a aquella, y la bomba de inserción, la cual se coloca dentro del pozo como una unidad completa, a través de la tubería de producción.

BOMBA RECIPROCANTE: Bomba que emplea un émbolo que se mueve dentro de un cilindro. El cilindro está equipado con válvulas de succión y descarga. En la embolada de admisión, la válvula de succión se abre y el fluido entra al cilindro. En la embolada de escape, la válvula de succión cierra y la de descarga abre haciendo que el fluido se force fuera del cilindro.

BOMBA: Dispositivo que incrementa la presión a un fluido o lo eleva a un nivel más alto. Existen varios tipos de bombas como las reciprocantes, centrífugas, rotatorias, a chorro, de varillas de succión, hidráulicas, de lodo, sumergibles y de fondo.

BOMBEO ARTIFICIAL: Cualquier método utilizado para elevar el aceite a la superficie a través de un pozo después de que la presión del yacimiento ha declinado hasta el punto en el cual ya no producirá por medio de energía natural. Las formas más comunes son: el Bombeo Mecánico, Bombeo Neumático, Bombeo Hidráulico y el Bombeo Electrocentrífugo.

BOMBEO MECÁNICO: Método de bombeo en el que una bomba de fondo está localizada cerca del fondo del pozo, conectada a una sarta de varillas de succión. Se emplea para elevar los fluidos de éste a la superficie. El peso de la sarta de varillas y el del 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.

BRIDA (BRIDLE): Cable en una unidad de bombeo que pasa sobre la cabeza de caballo del balancín y está conectado a la barra portadora para soportar la grampa de la varilla pulida

CABALLOS DE FUERZA: Es la unidad de potencia en el sistema de unidades inglés de ingeniería. Un caballo de fuerza (hp) es igual a 550 libras por pie sobre segundo ó 746 watts. El caballo de fuerza es una unidad de magnitud conveniente para medir la potencia generada por una máquina.

CABEZA DE CABALLO: Sección curva del balancín de una unidad de Bombeo Mecánico, localizada arriba del pozo y de la cual se suspende la brida.

CAMISA, BARRIL: El cilindro o camisa en la cual el émbolo de una bomba de varillas de succión sube y baja.

CANDADO DE GAS: Es la interrupción del funcionamiento eficiente de la bomba, causado por la existencia excesiva de gas en la misma.

CANDADO DE GAS (GAS LOCK): Condición que se encuentra algunas veces en un pozo de Bombeo Mecánico, cuando el gas disuelto se libera durante el ascenso del émbolo, aparece como gas libre entre las válvulas. Si la presión del gas es suficientemente grande, la válvula de pie permanece cerrada y no permite el paso de líquido a la tubería de producción.

CAPACIDAD MÁXIMA: Rendimiento máximo de un sistema o una unidad como una refinería, planta de gasolina, unidad de bombeo o pozo productor.

CARGA DE CONTRAPESO: Es el peso en libras que se coloca en los contrapesos de las unidades de Bombeo Mecánico Convencional y Mark II, para proporcionar una distribución equilibrada de cargas y mantener al motor trabajando dentro del amperaje normal.

CARGA MÁXIMA: Es la máxima carga en libras, que puede soportar la varilla pulida, está compuesta por el peso de las varillas y el peso del fluido debido a la aceleración en su carrera ascendente.

CARGA MÍNIMA: Es la mínima carga en libras que soporta la varilla pulida y consiste en el peso de las varillas flotando en el líquido, debido a la fuerza de gravedad y aceleración en su carrera descendente.

CARRERA DEL ÉMBOLO: La longitud del movimiento, en pulgadas, de un émbolo en una bomba reciprocante del punto muerto superior al punto muerto inferior.

CIGÜEÑAL, EN B.M. FLECHA DEL REDUCTOR DE ENGRANES (CRANKSHAFT): Eje rotatorio al cual se conectan las bielas. Transforma el movimiento reciprocante (hacia arriba y hacia abajo) del pistón en movimiento rotatorio.

CONEXIÓN HEMBRA: Que tiene la rosca interna.

CONEXIÓN MACHO: Que tiene la rosca externa.

CONTRAPESO DEL BALANCÍN (BEAM COUNTEBALANCE): Pesos en una unidad de Bombeo Mecánico que se instala al final del balancín, el cual se encuentra del lado opuesto a la vertical del pozo. El contrapeso del balancín compensa o balancea el peso de las varillas de succión y la bomba instalada dentro del pozo.

COPE DE VARILLA DE SUCCIÓN: Cople con rosca interna empleado para unir varillas de succión.

CHECK: Válvula de retención que permite el paso del flujo en un solo sentido.

DENSIDAD RELATIVA: Es la relación entre el peso de un volumen dado de un producto y el peso de un volumen igual, se utiliza como referencia al agua.

DINAMÓMETRO: Es un instrumento que permite evaluar las cargas o pesos de la sarta de varillas a través del esfuerzo de la varilla pulida representado en una carta superficial y el comportamiento de la bomba subsuperficial en una carta de fondo.

ECÓMETRO: Es un instrumento, cuyo principio está basado en la acústica y nos permite determinar la profundidad del nivel del líquido en un pozo.

EFICIENCIA VOLUMÉTRICA: Volumen real de fluido bombeado por una bomba, dividido entre el volumen desplazado por un pistón o pistones, otro dispositivo, en la bomba. La eficiencia volumétrica generalmente se expresa como un porcentaje.

EQUIPO DE RTP: Es un equipo de terminación y reparación de pozos, con la capacidad suficiente para llevar a cabo las operaciones de control del pozo, sacar e introducir las tuberías de producción, para la correcta operación de los diferentes sistemas artificiales de producción.

ELONGACIÓN: Estiramiento de las varillas por velocidad y peso.

EMBOLADA: Ciclo de bombeo (cierre de un círculo en dirección o en contra de las manecillas del reloj).

EMPACADOR: Dispositivo que cierra el espacio anular entre las tuberías de revestimiento y de producción, se instala cerca del fondo del pozo. Herramienta que va dentro del pozo, consiste de un dispositivo colgador y un paso interior para los fluidos. Se emplea para bloquear el flujo de fluidos a través del espacio anular entre la tubería de producción y la de

revestimiento. Generalmente se coloca con la sarta de tubería de producción a cierta distancia arriba del intervalo productor.

ESPACIAMIENTO: Distancia que se deja entre la válvula de pie y viajera.

FLOTACIÓN: Pérdida aparente de peso de un objeto inmerso en el fluido. Si el objeto flota, el peso del volumen de fluido desplazado por la parte sumergida es igual al peso de esa sección del objeto.

FONDO DEL POZO: Parte más baja o profunda de un pozo.

FRICCIÓN: Resistencia al movimiento, creada cuando dos superficies se ponen en contacto. Cuando la fricción se presenta, el movimiento entre las superficies produce calor.

FUERZA DE TENSIÓN: Fuerza desarrollada por un material que soporta una carga de tensión.

GOLPE ASCENDENTE: Cuando el émbolo golpea en el interior de la bomba en su punto muerto superior, provocando un posible desanclamiento de la misma.

GOLPE DE FLUIDO: Es el impacto errático del émbolo 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.

GOLPE DESCENDENTE: Cuando la sarta de varillas golpea en su punto muerto inferior el adaptador con la válvula guía de la varilla del émbolo, ocasionado por la elongación de las varillas.

GRADIENTE DE PRESIÓN: Escala de diferencias de presión en la cual hay una variación uniforme de ésta de un punto a otro. El gradiente de una columna de agua dulce es de 0.1 kg/cm² por metro de elevación (0.433 lbs/pg²/pie).

L.D.: Línea de descarga de un pozo.

LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA: Es el máximo esfuerzo, bajo ciertas condiciones establecidas, en o bajo el cual el metal soportará un número de esfuerzos infinitos sin fallar. Se expresa en lb/pg².

NIVEL DE FLUIDO: Profundidad de la columna de fluido en la tubería de producción o de revestimiento de un pozo. El nivel estático de fluido se toma cuando el pozo no está

produciendo y está estabilizado. El nivel dinámico o de bombeo, es el punto al cual llega el nivel estático cuando el pozo está produciendo.

NIVEL DINÁMICO: Es el nivel de recuperación por la presión del yacimiento.

NIVEL ESTÁTICO DEL LÍQUIDO: El nivel del líquido en un pozo cuando está cerrado.

PESO DE CONTRABALANCEO: Peso aplicado para compensar una carga o fuerza. En las unidades de Bombeo Mecánico, los pesos de contrabalanceo se usan para compensar el peso de las varillas de succión y del aceite extraído.

ÉMBOLO O PISTÓN: Pieza cilíndrica deslizante que es movida o que se mueve contra la presión de un fluido, dentro de un recipiente cilíndrico de confinamiento.

POLEA: Rueda con canto acanalado, empleada para jalar o elevar.

PONY: Varilla de succión de una pulgada de diámetro, existen de 2, 4, 6 y 8 pies de longitud.

POSTE MAESTRO: Miembro de una unidad de Bombeo Mecánico que soporta el balancín.

PRESIÓN DE FONDO: Es la presión que se registra en la zona de los disparos.

PRESIÓN MÁXIMA PERMISIBLE: La mayor presión que puede aplicarse con seguridad a una estructura, tubería o reciprocante. Una presión mayor a ésta puede provocar una falla o explosión.

PREVENTOR PARA VARILLAS: Dispositivo de arietes empleado para cerrar el espacio anular alrededor de la varilla pulida o varilla de succión en un pozo con Bombeo Mecánico.

PUNTO MUERTO INFERIOR: Es la posición donde termina la carrera descendente de la U.B.M.

PUNTO MUERTO SUPERIOR: Es la posición donde termina la carrera ascendente de la U.B.M.

RAMS: Juego de hules (2) que pueden ser vulcanizados o en hule vitón y alojados en el interior del preventor.

RANGO DE CARGA: En el Bombeo Mecánico, es la diferencia entre la carga máxima y la carga mínima en la varilla pulida.

RELACIÓN GAS-ACEITE: Es la cantidad de gas producido en pies cúbicos con cada barril de aceite.

SARTA DE VARILLAS: Sarta de varillas de succión. La longitud total de las varillas de succión consta de una serie de varillas conectadas entre sí. La sarta de varillas sirve como un eslabón mecánico de la unidad de bombeo en la superficie con la bomba cerca del fondo del pozo.

SARTA TELESCOPIADA: Tubería de perforación, de producción o de varillas de succión, formadas por secciones de diámetros distintos: el diámetro mayor se encuentra en la parte superior y disminuyen hacia abajo.

SARTA: La longitud total de la tubería de revestimiento, producción, perforación o de varillas de succión que se corren en un pozo.

SEDIMENTOS: Material sólido presente en el aceite crudo, como arenas, tierras, etc.

TENSIÓN: La condición de un cable, una tubería o una varilla que se estira entre dos puntos.

TORSIÓN (TORQUE): La fuerza de rotación que se aplica a un eje u otro mecanismo rotatorio para hacer que gire o que tienda a hacerlo. La torsión se mide en unidades de longitud por fuerza como lb-pg.

T.P.: Tubería de producción.

T.R.: Tubería de revestimiento.

TIEBEN: Unidad de Bombeo Mecánico Hidroneumática.

UNIDAD DE BOMBEO MECÁNICO: Máquina diseñada específicamente para bombear con 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 de contrapresión colocada en la succión de una bomba y que permite que ésta permanezca llena de líquido cuando no está operando. Válvula fija de canica y asiento, colocada en el extremo inferior del barril de trabajo de una bomba de varillas de succión. La válvula de pie y su jaula no se mueven como lo hace la válvula viajera.

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 de succión. Al subir las varillas, la canica de la válvula se asienta, 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.

VARILLA PULIDA: La varilla colocada en el extremo superior de una sarta de varillas de succión, empleada para elevar fluidos por Bombeo Mecánico. Tiene un diámetro uniforme y está pulida para sellar perfectamente en el estopero preventor colocado en la parte superior del pozo.

VARILLAS DE SUCCIÓN: Varilla especial de acero de bombeo. Varias varillas se conectan para formar el eslabón mecánico desde la unidad de bombeo en la superficie hasta la bomba. Las varillas de succión se enroscan en cada extremo y se fabrican en dimensiones estándar y con las especificaciones del metal establecidas por la industria petrolera. Las longitudes varían alrededor de 25 a 30 pies, los diámetros varían de ½” a 1 1/8”.

VISCOSIDAD: Es la resistencia que opone un fluido a deslizarse sobre sí mismo.

YACIMIENTO: Es un cuerpo de roca donde se acumula el hidrocarburo, sus características deben de ser: porosidad, permeabilidad y continuidad.

ZONA DE DISPAROS: Es la vía de comunicación entre el pozo y el yacimiento.

1. MI. José Ángel Gómez Cabrera, Apuntes de Pozos fluyentes, Bombeo Neumático y Bombeo Hidráulico. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
2. Leonardo Garrido, Ana Gabriela. Tesis de Licenciatura: Bombeo Mecánico: Descripción, Diseño y Diagnostico. UNAM, Facultad de Ingeniería, 1999.
3. González Carmona, Eduardo. Tesis de Licenciatura: Automatización del procedimiento del diseño API del sistema de Bombeo Mecánico aplicando la técnica de Spline cúbico. UNAM, Facultad de Ingeniería, 2009.
4. Oscar Becerra, José Gambo. Curso de Bombeo Mecánico Convencional, Villahermosa México, 2003.
5. William C. Lyons, Gary J. Plisga. Standard Handbook of Petroleum and Gas Natural Engineering. Segunda edición, Editorial Elsevier Science, 2005.
6. Boyun Gud, William C. Lyons, Ali Ghalambor. Petroleum Production Engineering a Computer-Assisted Approach. Editorial Elsevier Science and Technology Books, 2007.
7. Apuntes de la Asignatura de Sistemas Artificiales de Producción.
8. Apuntes de la Asignatura de Comportamiento de Pozos.
9. Hernández Cortés, Mario Arturo. Operación de Bombeo Mecánico I. Administración del Activo de Producción Poza Rica, 31 de Enero de 2000, Poza Rica Veracruz.
10. Modón Alberto Marcelo, Pich Jose y Tricoli Osvaldo. “Unidad de Bombeo Hidroneumático de velocidad variable VSH”. Weatherford ALS.
11. Ing. Antoniulli Mauricio. Unidades de Bombeo de Carrera Larga Mejoran la Eficiencia de la Extracción, Weatherford, Mendoza-Septiembre 2006.

12. Kermit E. Brown.. Artificial lift Methods 2A. The University of Tulsa, Pennwell Books.
13. Howard B. Bradley. Petroleum Engineering Handbook. Third Printing, Society of Petroleum Engineers Richardson, TX, U.S.A.
14. Nind T.E.W. Principles of oil Wellproduction Hydrocarbon Reservoir and Well Performance.
15. UNAM Beam pumping, University of Tulsa.
16. Craft B.C., Holden Rod Sucker Pumping.
17. León Hernández, Eduardo. Tesis de Licenciatura: Control de Pozos Depresionados con Sistema Artificial de Bombeo Mecánico. UNAM, Facultad de Ingeniería, 2005.
18. Hernández Cortés, Mario Arturo. Operación de Bombeo Mecánico II. Administración del Activo de Producción Poza Rica, 30 de Abril de 2000, Poza Rica Veracruz.
19. Ing. Dottore, Eduardo J. Deformaciones elásticas en varillas. Bollan & Cia. S.A. Mendoza Argentina, Agosto de 2004.
20. Análisis de las fallas de las varillas de bombeo, Norris a Dover Company.
21. Cervantes Sánchez, Agustín. Tesis de Licenciatura: Sistema Artificial de Bombeo Mecánico, Problemas de Gas y Solución en el Campo Poza Rica. UNAM, Facultad de Ingeniería, 1980.
22. Aranda Rodríguez, j. Guadalupe. Tesis de Licenciatura: Bombeo mecánico en Pozos Direccionales. UNAM, Facultad de Ingeniería, 1980.
23. James M. Gere, Barry J. Goodno. Mecánica de materiales. Séptima edición. Ed. Cengage Learning Editores, 2009.

24. http://www.most.gov.mm/techuni/media/PE_05033_5.pdf
25. http://www.albertaoiltool.com/pdf/small_SuckerRodFailureAnalysis.pdf
26. <http://www.norrisrods.com/spanish/index3.html>
27. http://www.lufkin-arg.com/productos_unidades_de_bombeo.htm
28. <http://www.wos.ab.ca/>
29. <http://www.netoil-international.com/products/pumps.htm>
30. <http://www.antidesgast.com/downloads/durezas.pdf>