

9
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTOS DEL GAS EN EL SISTEMA DE
BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO PETROLERO
PRESENTAN:
ENRIQUE GARCIA LOPEZ
MARCO LIVIO SANCHEZ HERNANDEZ



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

1994



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-028

SR. ENRIQUE GARCIA LOPEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Jesús Héctor Díaz Zertuche, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero petrolero:

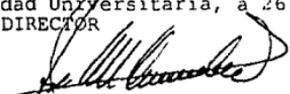
EFFECTOS DEL GAS EN EL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

- I INTRODUCCION
- I ASPECTOS GENERALES DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO
- II COMPONENTES DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO
- III CURVAS CARACTERISTICAS
- IV CALCULO DEL VOLUMEN DE GAS A LA PROFUNDIDAD DE COLOCACION DE LA BOMBA
- V DISEÑO DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO CONSIDERANDO LA PRESENCIA DE GAS LIBRE
- CONCLUSIONES
- REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de 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 HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 26 de mayo de 1994
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*gtg

21.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-027

SR. MARCO LIVIO SANCHEZ HERNANDEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor. Ing. Jesús Héctor Díaz Zertuche, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero petrolero:

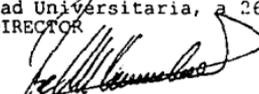
EFFECTOS DEL GAS EN EL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

- I INTRODUCCION
- I ASPECTOS GENERALES DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO
- II COMPONENTES DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO
- III CURVAS CARACTERISTICAS
- IV CALCULO DEL VOLUMEN DE GAS A LA PROFUNDIDAD DE COLOCACION DE LA BOMBA
- V DISEÑO DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO CONSIDERANDO LA PRESENCIA DE GAS LIBRE
- CONCLUSIONES
- REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de 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 HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 26 de mayo de 1994
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*gtg

SA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS: EFECTOS DEL GAS EN EL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO.

DIRECTOR: JESUS HECTOR DIAZ ZERTUCHE.

REALIZADA POR: MARCO LIVIO SANCHEZ HERNANDEZ.
ENRIQUE GARCIA LOPEZ.

NUMERO DE CUENTA: 8233869-9
8235987-4

JURADO PARA EXAMEN PROFESIONAL

PRESIDENTE: ING. SALVADOR MACIAS HERRERA.

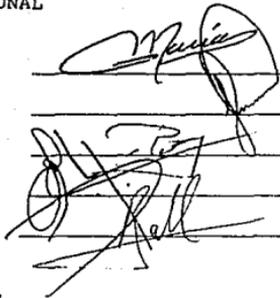
VOCAL: ING. JESUS HECTOR DIAZ ZERTUCHE.

SECRETARIO: M.I. RAFAEL RODRIGUEZ NIETO.

1ER. SPTE: M.I. JOSE ANGEL GOMEZ CABRERA.

2DO. SPTE: ING. ROBERTO PADILLA SIXTO.

QUIENES REVISARON Y APROBARON ESTE TRABAJO.

The image shows four horizontal lines representing a signature strip. The top line has a signature that appears to be 'Macias'. The second line has a signature that appears to be 'Zertuche'. The third and fourth lines have more complex, overlapping signatures that are difficult to decipher.

A la memoria de mi MADRE

Esperando que puedas verme desde
cualquier lugar del cielo.
Esta tesis es por tu apoyo y consejo
que me brindaste para superarme día con
día.
Aunque no llegaste a ver personalmente
la mayor de mis metas, estaras conmigo
siempre.

A mi PADRE

Gracias a tu apoyo y
comprensión e logrado realizar
la más grande de mis
metas.
Espero que estes
orgullosos de mí como
yo lo estoy de ti.

A mis hermanos

CARLOS, ROCIO, FCO. JAVIER y JOSE EDUARDO
por la confianza que siempre han
tenido hacia mí.

A mis compañeros y amigos por
su apoyo y amistad durante los
años que estuvimos en la facultad.

A mis profesores con respeto
y admiración por los
conocimientos y guía que me
brindaron para lograr mi meta.

A mi Facultad por todo lo que me dio, esperando poder
retribuirlo algún día.

Gracias, Señor, porque me diste un año
en que abri a tu luz mis ojos ciegos;
gracias, por que la fragua de tus fuegos
templo en acero el corazón de estaño.
Gracias por la ventura y por el daño,
por la espina y la flor; porque tus ruegos
redujeron mis pasos andariegos.
Y porque, entre tus dones, me bendiga
la duradera felicidad de una sonrisa amiga.

A Rosa Hernández R.

Gracias madre, por tu entrega
eterna e inquebrantable.

Gracias, por tu paciencia,
gracias por el cariño de madre.

A Mariana.

Por que con tu llegada, recuperamos
el significado de la palabra familia.

A mi hermana: Olimpia

Corriste a encontrar tu destino, ahora
como nunca lucha por tus ideales; ya que
siempre contarás con tu familia.

A mis hermanos:

Ivan.

Silvio.

Julio.

Antonio.

A Julio y Antonio por que sigan una auto-diciplina
saludable, honesta y triunfadora.

A María de Jesús:

Por el apoyo sincero y desinteresado, por la dicha de conocerte, por las alegrías,
temores e ilusiones compartidas. Por que nuestra amistad es para siempre.

A Laura Ontiveros:

Porque con tu afecto incondicional aprendí parte de la vida.

A mis amigos:

Luz, Ana, Jorge, Miguel, Paco, Octavio, Eduardo, Netzahualcoyotl, Héctor.

Por su amistad, esperando acrecentarla en las siguientes etapas de la vida.

haber quién organiza el siguiente campamento?

A la Generación 87-91:

Por esas prácticas y parrillasdas increíbles.

A NUESTRA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.

A NUESTRA FACULTAD DE INGENIERIA.

A todos y cada uno de mis profesores, gracias por la formación y conocimientos ofrecidos.

Al Ing. Jesús Héctor Díaz Zertuche, por la dirección de este trabajo.

"Por que ésta es nuestra tierra y por que aqui nacimos,
aquí seguiremos viviendo, con nuestras esperanzas,
con nuestros sueños; de que la paz nos bañe como el agua del río,
de que la milpa nos sonría con sus dientes de maíz, de que nuestra voz
no se vaya a perder como el canto de un pájaro en la noche."

Rosario Castellanos.

"Aquí vivimos, aquí dejamos nuestras vidas.
Digan si ven por ahí color a tierra,
digan si ven la tierra que merecemos,
digan si hay aire y nubes....
...si hay esperanza.
Si contra nuestras penas....
....hay esperanza."

Juan Rulfo.

Sigue existiendo, como ancla
un "México Profundo", diverso
y todavía muy injusto.

Hagamos algo por él !

EFFECTOS DEL GAS EN EL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

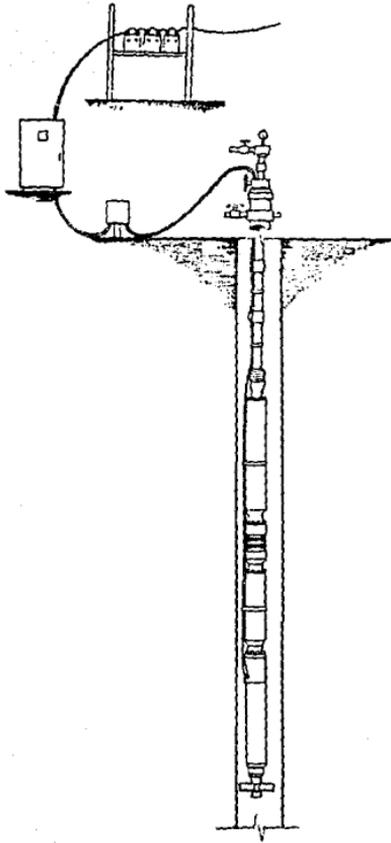
pág.

Contenido

Introducción	3
I. Aspectos Generales del Aparejo de Bombeo Electrocentrífugo.	5
I.1. Generalidades.	5
I.2. Limitaciones en el Diseño del Aparejo de Bombeo Electrocentrífugo.	7
I.3. Aplicación del Sistema en Medio Ambientes Hostiles.	12
II. Componentes del Aparejo de Bombeo Electrocentrífugo	14
II.1. Componentes Subsuperficiales.	14
II.2. Componentes Superficiales.	49
III. Curvas Características.	52
III.1. Diseño de las Curvas	52
III.2. Efectos de Diferentes Parámetros en las Curvas Características.	55
III.3. Leyes de Afinidad de las Bombas.	56
III.4. Descripción de las Curvas Características.	63
III.5. Aplicación del Controlador de Velocidad Variable en el Sistema de Bombeo Electrocentrífugo.	66

IV. Cálculo del Volumen de Gas a la Profundidad de Colocación de la Bomba.	71
IV.1. Efectos del Gas en el Sistema Bombeo Electrocentrifugo.	71
IV.2. Cálculo del Volumen de Gas a la Profundidad de Colocación de la Bomba.	74
IV.3. Efecto de la Cavitación en el Sistema Bombeo Electrocentrifugo.	76
IV.4. Pruebas con Fluidos Gaseosos en Bombas Centrifugas.	78
V. Diseño del Aparejo de Bombeo Electrocentrifugo Considerando la Presencia de Gas Libre.	99
V.1. Información Requerida.	99
V.2. Procedimiento de Diseño.	101
V.3. Selección del Aparejo.	109
Conclusiones.	110
Referencias.	113

**EFFECTOS DEL GAS EN EL SISTEMA DE
BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO**



Introducción.

El volumen de fluidos que es factible obtener en un yacimiento petrolero, depende de diversos parámetros, así como de las formas de producción que aplican los profesionales del ramo.

A medida que transcurre el tiempo de explotación del yacimiento la presión decrece, hasta el punto en que la energía aportada por él, es insuficiente para levantar la columna de fluidos hasta la superficie.

La tendencia actual en la industria petrolera es recuperar la máxima cantidad de hidrocarburos existentes en el yacimiento. Por esta razón una vez que los ritmos de producción entran en una fase de declinación, es necesario la instalación de sistemas artificiales de producción, favoreciendo la recuperación de los hidrocarburos.

La selección del sistema artificial es en función de las características específicas de cada yacimiento, así como del pozo en particular, de características de los fluidos y de los requerimientos de potencia para el equipo.

De los sistemas artificiales, el bombeo electrocéntrico sumergible, es el método más novedoso en los últimos años, ya que trabaja para rangos de producción muy amplios, y cuando se compara con la unidad de bombeo mecánico, el sistema ofrece mayor eficiencia y bajo costo de operación por barril producido.

El presente trabajo describe principalmente uno de los problemas que afecta el buen desempeño del sistema, que es la presencia de gas en la succión de la bomba, mencionando pruebas de laboratorio realizadas para diferentes porcentajes de gas libre en la succión de la bomba y los efectos que causan sobre su funcionamiento, así como en el comportamiento de sus curvas características. También, las soluciones para evitar la presencia de gas libre en la entrada, utilizando separador de gas, colocando la bomba a mayor profundidad, o bien el cambio de frecuencia de la corriente mediante el controlador de velocidad variable, que genera mayores rangos de operación de la bomba.

Los pozos candidatos a producir mediante la instalación del aparejo de bombeo electrocentrifugo y que producen cantidades apreciables de gas, representan mayor dificultad para su diseño, la variación de presión y temperatura en el pozo, hace necesario el cálculo del volumen de fluidos en el punto de colocación de la bomba, con el apoyo de diferentes correlaciones.

El diseño del aparejo de bombeo electrocentrifugo, realizado con buena información, aunado a la consideración de flujo multifásico en la tubería verá sus consecuencias en la reducción de costos y optimización de la producción, necesaria en estos tiempos.

El uso de modelos matemáticos, basado en el procedimiento de diseño que se presenta, ayuda en el desarrollo de programas de cómputo para efectuar, tanto el cálculo de gradientes de presión en tuberías, como las tendencias posibles del comportamiento del aparejo, especialmente de la bomba, y de la producción del pozo al variar los parámetros que influyen sobre dicho comportamiento: Presión de fondo fluyendo, relación gas-líquido, porcentaje de agua y la geometría del pozo.

I. ASPECTOS GENERALES DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

I.1. Generalidades.

El sistema de bombeo eléctrico sumergible a encontrado diversas aplicaciones como método de producción artificial en pozos petroleros, específicamente donde se tienen bajas relaciones gas-aceite, así como en proyectos de inyección de agua.

El aparato de bombeo electrocentrífugo (ABE) opera sumergido en el fluido del pozo y suspendido en el extremo inferior de la tubería de producción, generalmente se coloca por arriba de la zona de disparos. El sistema consiste en su parte subsuperficial de una combinación de motor eléctrico, sección de sello (protector), cable opcionalmente un separador de gas y una bomba centrífuga conectados a la sarta de producción (Figura I.A). La energía eléctrica es suministrada desde superficie a través de un cable flejado a la tubería en su parte externa, a lo largo de toda la sarta.

La optimización de métodos de producción artificial que se realiza en la industria petrolera tienen como objetivo, la máxima producción con óptimos costos.

El alto costo relativo para nuevos equipos e instalaciones de producción artificial en los campos petroleros, ha creado la necesidad de revisar la tecnología más reciente, disponible en métodos de producción artificial, especialmente el bombeo eléctrico sumergible.

La versatilidad del sistema ha sido demostrada en la optimización de producción de aceites viscosos, con densidades de 15 a 21 °API a temperaturas de 180°F. De la misma manera en campos donde se tienen altas relaciones gas-aceite, 400 scf/bl con temperaturas de 260°F con presencia de H₂S y CO₂.^{1, 2 y 3*}

*referencias al final

La característica principal del sistema, es cuando se utiliza el controlador de velocidad variable, obteniendo un amplio rango de velocidades para el motor, ocasionando amplios volúmenes de producción.^{4, 5 y 6}

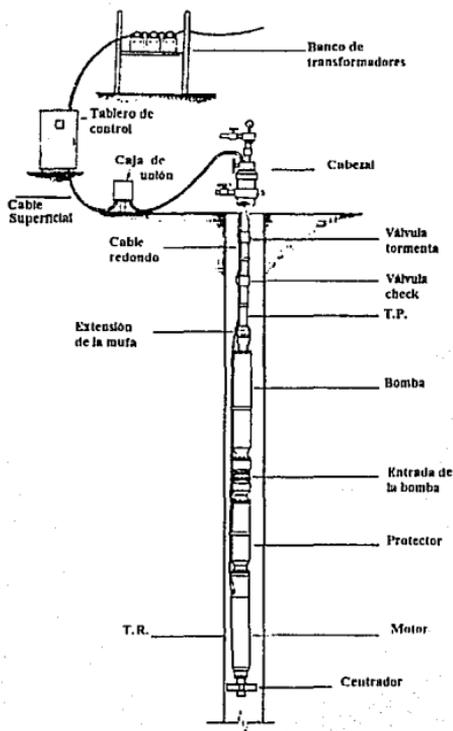


FIGURA I.A. Aparato de bombeo electrocentrífugo

1.2. Limitaciones en el Diseño del Aparejo Bombeo Electrocentrífugo.

El aparejo de bombeo eléctrico sumergible opera como se mencionó en un amplio rango de gastos. Sin embargo, existen diversos factores que restringen su diseño como: Gas libre, temperatura, profundidad, viscosidad, emulsiones, arena y parafina.^{7, 5 y 8} A continuación se describen estos factores y el efecto sobre el sistema, dejando el efecto del gas para el Capítulo IV.

La influencia de la temperatura en cada uno de los componentes es distinta. El motor puede fabricarse para operar a temperaturas de 325°F (163°C), siendo factores limitantes dentro de él:

- Cojinete de empuje, cuya máxima temperatura es 325°F (163°C).
- Aislamiento del armazón (Epoxy), con máxima de 400°F (204°C).
- Elastómeros, utilizados como recubrimiento en arandelas, empaques y conectores, con máxima de 400°F (204°C).

La sección de sello también tiene su límite, el cual depende de los aislantes con elastómeros y sellos mecánicos que tienen una resistencia hasta de 325°F (163°C).

El cable es el más afectado debido a la temperatura. a pesar de los avances técnicos. sus aislantes y recubrimientos soportan alrededor de 200°F (93°C). a mayores temperaturas. algunos aislantes se vuelven quebradizos y frágiles. ocasionando que se presenten cortos circuitos. Un cable de diseño especial con aplicaciones arriba de 400°F (204°C) esta disponible, sin embargo en pozos con temperaturas mayores de 300°F (149°C). fuerzas corrosivas y el gas interactúan con la temperatura ocasionando fallas prematuras.

Líquidos viscosos tienen influencia en el diseño del aparejo de bombeo eléctrico. Líquidos con alta viscosidad incrementan la potencia al freno y disminuyen la carga y el flujo. La curva de la figura I.1 demuestra como el comportamiento de una etapa de la bomba centrífuga es afectada.

Como no está bien definido el límite para la viscosidad de un fluido bombeado, este factor hace que se incrementen el número de etapas y la potencia requerida en el motor, cuando se incrementa la viscosidad. La profundidad del pozo y la cantidad de gas disuelto en el fluido también deben considerarse cuando se determina la probable viscosidad que se presenta en una instalación.

Otro factor limitante es el tipo de emulsión agua-aceite que se bombea. Como se conoce poco acerca de este tópico, los efectos son usualmente evaluados por ensaye y error. Debe realizarse un ajuste en casos cuando el porcentaje de agua afecta la viscosidad total del fluido. La curva de la figura I.2, provee un factor de corrección, determinado por el porcentaje de agua que se aplica a fluidos viscosos.

Las limitaciones por profundidad depende del tamaño del equipo, la presión interna a la que está sujeta la carcasa, la potencia requerida para levantar el fluido a la superficie y la carga generada sobre los cojinetes de empuje.

La presión interna para los componentes sumergibles varía de acuerdo al diámetro: Para serie 400 el límite es de 5,023 lb/pg² a 11,536 pies; serie 513 de 4,073 lb/pg² a 11,471 pies, serie 675 de 2,681 lb/pg² a 6,184 pies; y serie 875 con límite de 4,320 lb/pg² a 9,966 pies.

El cojinete de empuje en la sección de sello, también es limitado por la presión que puede resistir. La serie 400 a 9,052 pies con 3,925 lb/pg²; la serie 513 tiene la particularidad de ensamblarse con un tipo de asiento ajustable o fijo para el cojinete.

Para el asiento fijo los límites de presión-profundidad de 4,326 lb/pg² a 9,993 pies, para el asiento ajustable 6,930 a 15,989 pies.

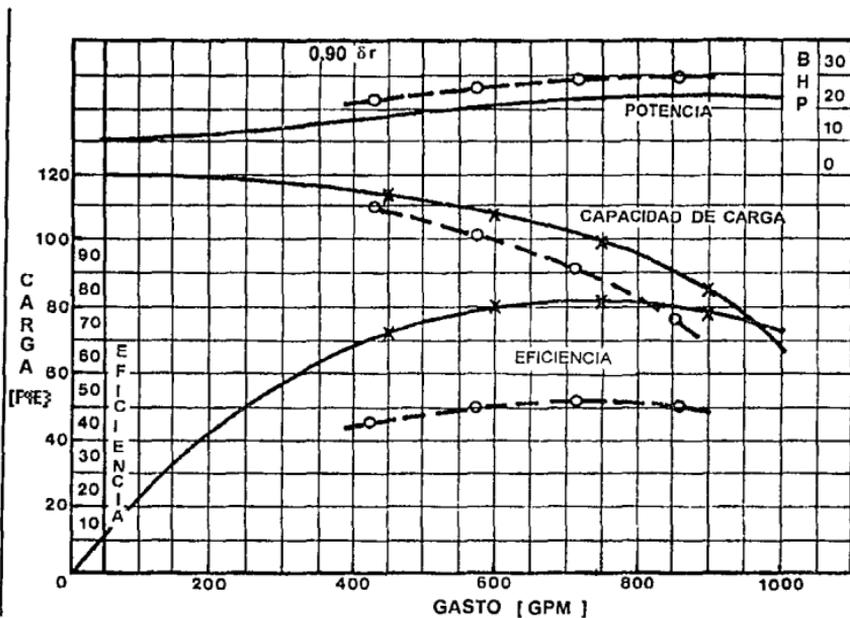


FIGURA I.1 Efecto de la viscosidad sobre las curvas de la bomba.

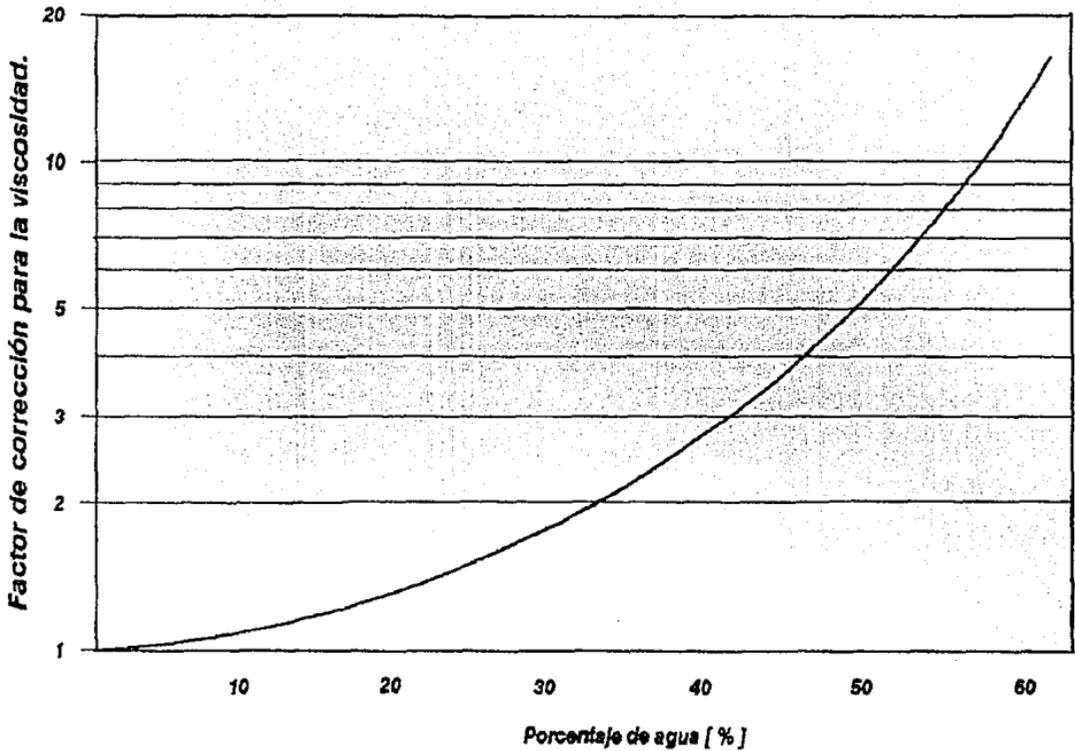


FIGURA 1.2.- AJUSTE DE LA VISCOSIDAD

Arena y parafina, suspendidas en el fluido, también limitan el rango de operación del sistema, pero no es seguro la medición de sus efectos en el comportamiento del aparejo.¹ La cantidad y tamaño tanto de la arena como de la parafina deben considerarse cuando se determina la capacidad de maniobra de un sistema en particular. Los tamaños pequeños de bombas con etapas tipo "panqué", tienden a obstruirse más fácilmente que otras series. Para minimizar los efectos en pozos con producción de arena, se debe provocar que el flujo sea lento, estrangulando a la bomba durante el arranque.

Es importante evaluar el impacto de cada uno de estos factores para el diseño del sistema. Innovaciones como el controlador de velocidad variable, nuevos materiales para el cable, y separadores de gas ayudan a controlar algunos de estos límites con mayor facilidad. Mientras estas innovaciones sean utilizadas con más frecuencia el rango de operación del sistema, será extendido ampliamente.^{9, 8 y 6}

I.3. Aplicación del Sistema en Medio Ambientes Hostiles.

En el pasado el sistema de bombeo eléctrico sumergible fue considerado muy útil en pozos con volúmenes medios de producción, a baja temperatura y con presencia casi nula de H_2S . Hoy en día, el sistema se ha convertido en uno de los métodos más versátiles en la recuperación de fluidos a cualquier profundidad, incluyendo condiciones poco favorables, además ha sido aplicado exitosamente para producir volúmenes tan bajos como 100 bl/día.

Uno de los principales retos que el aparejo de bombeo electrocentrífugo ha tenido que vencer, han sido las altas temperaturas de fondo del pozo. El problema eran las limitaciones en los materiales del elastómero usado en el cable, arandelas y sellos. La tecnología usada en el cable ha mejorado sustancialmente. Los materiales utilizados en las arandelas son capaces de resistir temperaturas bastante altas con presencia de fluidos corrosivos.

La innovación en los aislamientos ha mejorado, dando como resultado materiales muy eficientes. Uno de estos materiales encapsulantes modernos es el conocido como "Epoxy". El Epoxy durante su período de endurecimiento, no forma burbujas a causa de gases, de esta manera el estator queda completamente sellado. El Epoxy es un excelente conductor de calor, lo que da como resultado una buena liberación del calor generado por el motor, reduciendo la temperatura en los sellos.

En ambientes corrosivos el aparejo de bombeo electrocentrífugo también presentaba demasiados problemas, principalmente en la parte externa de los componentes, el cable, todo ello debido al inadecuado aislamiento. El daño corrosivo de los materiales se elimina mediante dos formas:^{8, 10 y 11}

La primera es aplicando material metalizado no corrosivo sobre el acero y la segunda era usar material que no se viera afectado por la corrosión. La opción a utilizar dependía del medio corrosivo y las condiciones del pozo. En la mayoría de los casos la primera

opción se utilizaba cuando había presencia de H_2S . En otros se utilizaba acero inoxidable como forma de protección.

La corrosión del cable ha sido siempre un gran problema y la cubierta de monel (aleación de metales) había sido la única solución. Hoy en día existen materiales protectores que no son afectados por fluidos corrosivos y proveen protección adicional a los conductores eléctricos.

Para prevenir altas diferencias de presión a través de los sellos mecánicos, los fabricantes permiten que las presiones en el fondo sean equilibradas mediante la sección de sello la cual también permite la contracción y expansión del aceite del motor debido al calentamiento y enfriamiento.

Un problema que afecta prácticamente a todos los sistemas de bombeo, es el gas libre en la producción de fluidos. El desarrollo de un separador de gas centrífugo para el aparejo de bombeo electrocentrífugo, el cual emplea fuerza centrífuga para separar el gas libre; mediante esta adaptación, ahora un operador puede reducir los niveles de gas y así incrementar la producción de un pozo.^{11 y 12}

II.COMONENTES DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

II.1. Componentes Subsuperficiales.

Motor Sumergible.

El motor es la fuerza impulsora que hace girar a la bomba, y así pueda imprimir presión a los fluidos en el fondo del pozo (Figura II.1). Los motores eléctricos en operaciones de bombeo son bipolares, trifásicos y de inducción del tipo jaula de ardilla. Operan a una velocidad relativamente constante de 3500 rpm a 60 Hz y a 2915 rpm a 50 Hz. Los requerimientos de voltaje del motor varían de 420 a 4200 V a 60 Hz (350 a 3500 V a 50 Hz). El tamaño del motor varía de 3 3/4 a 7 1/2 pulgadas. El motor es alimentado mediante un cable conductor desde la superficie; el motor generalmente se instala por arriba del intervalo productor.¹⁴

Estos motores son llenados con un aceite mineral altamente refinado que debe proveer de resistencia dieléctrica, lubricación para los cojinetes y de un buen conductor térmico. Los cojinetes de empuje del motor transportan la carga de los rotores del motor. El aceite no conductor en la carcasa del motor lubrica los cojinetes del motor y transfiere el calor generado en el motor a la carcasa del motor. El calor de la carcasa del motor es reducido por el flujo de los fluidos que pasan por la superficie exterior del motor, por lo tanto, un motor de una unidad de bombeo nunca puede ser colocado abajo del punto de entrada de fluidos a menos que algún medio de direccionamiento del fluido hacia el motor sea utilizado, como una cubierta superior del motor, protector y succión de la bomba. En el arranque una torsión alta es permitida para llegar a una velocidad de operación menor a cincuenta ciclos.

El motor normalmente consiste de una carcasa de acero al bajo carbón con aislamiento (laminaciones) de acero y cobre prensadas. El aislamiento de acero es alineado con las secciones del rotor y el aislamiento de cobre es alineado con la camisa radial del cojinete.

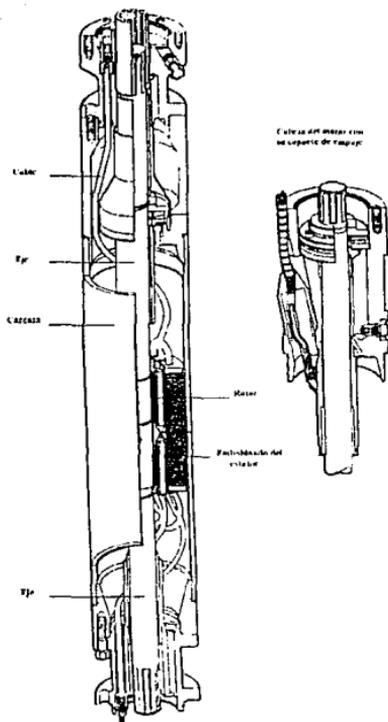


FIGURA II.1 Motor sumergible.

Las secciones del rotor y las camisas de bronce del cojinete son ensambladas y puestas a punto para una alta resistencia al acero de la flecha. La flecha es hueca para permitir la circulación del aceite. Diferentes voltajes, están disponibles para determinar la selección óptima del motor, tableros de distribución y combinaciones de cable para tener un costo mínimo en la transformación y conducción del voltaje.

La profundidad de colocación de la bomba es un factor determinante en la selección del voltaje del motor debido a las pérdidas de voltaje para un amperaje y cable particular. Cuando las pérdidas de voltaje llegan a ser demasiado grandes, se requiere un alto voltaje (bajo amperaje) al motor. En pozos profundos, la economía llega a ser un factor importante; cuando se requiere un alto voltaje en el motor, es posible utilizar un reductor y cable con menor dilatación. Sin embargo, con un voltaje alto (cable con mayor dilatación) se puede implementar un tablero de distribución.

La potencia del motor es calculada haciendo la multiplicación de la potencia máxima por etapa de la curva de la bomba (curva característica) por el número de etapas de la bomba y corregida por la densidad relativa del fluido.

La potencia requerida es lograda por simple incremento de la longitud de la sección del motor. El motor esta constituido por rotores usualmente de 12 a 18 pulgadas de longitud, que están empotrados en una flecha y se localizan en el embobinado eléctrico (estator) montado dentro de la carcasa del motor. El ensamblaje más grande de un motor individual es de aproximadamente de 30 pies de longitud y tiene un potencia de 20 a 250 HP, donde la serie de motores es de aproximadamente de 100 pies de longitud y tiene una potencia de 1000 HP.^{13 y 14}

La figura II.2 muestra las curvas características del motor para un motor sumergible típico. Estas curvas características del motor están basadas en la potencia medida con un dinamómetro. Observese que una reducción en la velocidad del motor del 10% reduce el incremento de la temperatura únicamente 4°F del incremento normal de la temperatura de

48°F. Una reducción del 20% reduce el incremento de la temperatura en 8°F. En otros casos un incremento de 4°F u 8°F es insignificante y puede ser ignorado.

La figura II.3 representa las curvas de funcionamiento típicas para un motor eléctrico mostrando los cambios de velocidad, eficiencia, potencia, amperaje y kilowatts de entrada para una carga constante con variación del voltaje. La operación a menor voltaje que el de la placa de voltaje resulta en una velocidad menor, mayor corriente (amperaje) y mayores Kilowatts. Velocidades bajas implican menor flujo de producción, ya que el volumen varía directamente con la velocidad y la carga bombeada varía con el cuadrado de la velocidad. La operación a mayor voltaje que el de la placa de voltaje no afecta significativamente el amperaje y los kilowatts, pero resulta en una reducción en la potencia. La práctica ideal es el probar y utilizar el 100% de voltaje requerido en superficie más o menos el 2%. Esto provee el mejor funcionamiento en conjunto. Una variación mayor del 2% es aceptable por el sistema cuando sea necesario, siempre que se tenga la energía requerida.

La figura II.4 muestra el incremento de temperatura para 100% de carga en agua (calor específico igual a 1.0) y para crudo (calor específico igual a 0.4) para un motor completamente cargado. Observe el alto incremento de temperatura (92°F) cuando el crudo está en un enfriamiento medio. Si incrementamos 20% en este caso, el incremento de calor es reducido únicamente 15°F. Además 15°F en relación a 300-350 °F no es un factor significativo. De la figura II.4, es evidente que la velocidad del fluido es justamente tan importante como la temperatura ambiente del fluido, sino es que más.

El motor puede tener un cojinete de empuje el cual transfiere todos los empujes de carga a la flecha del motor. De manera similar al ensamble del cojinete de empuje de la sección de sello, este cojinete es un tipo de corredera Kingsberry. Aunque los rotores del motor operan en otra dirección, el cojinete de empuje del motor puede girar en la dirección apropiada para prevenir una falla prematura.

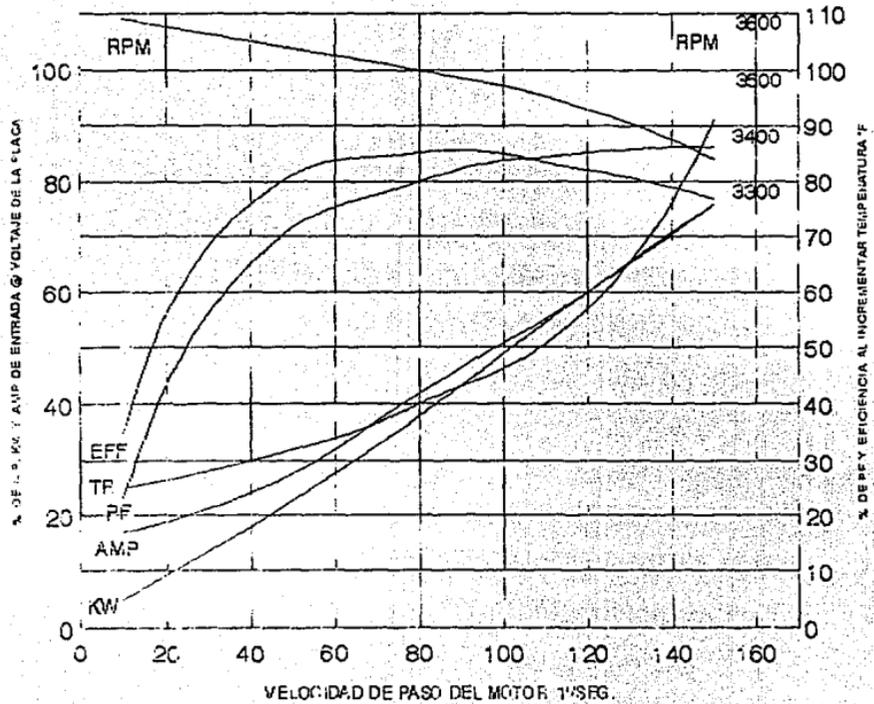


FIGURA II.2 Curvas características del motor

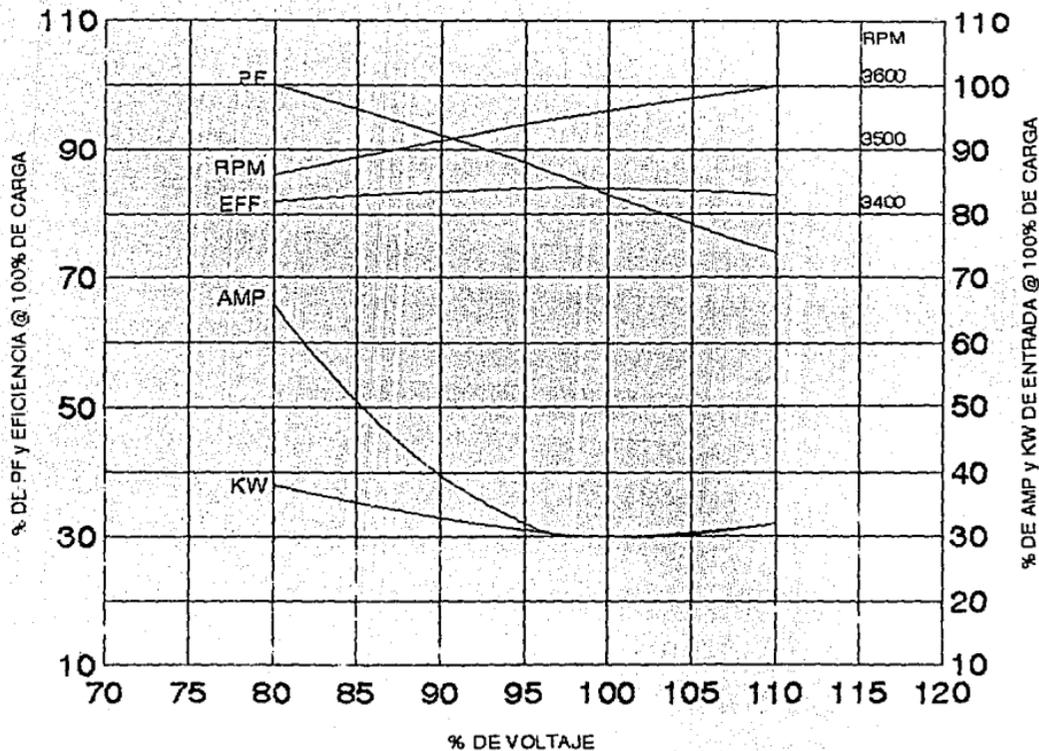


FIGURA II.3 Curvas características de funcionamiento del motor

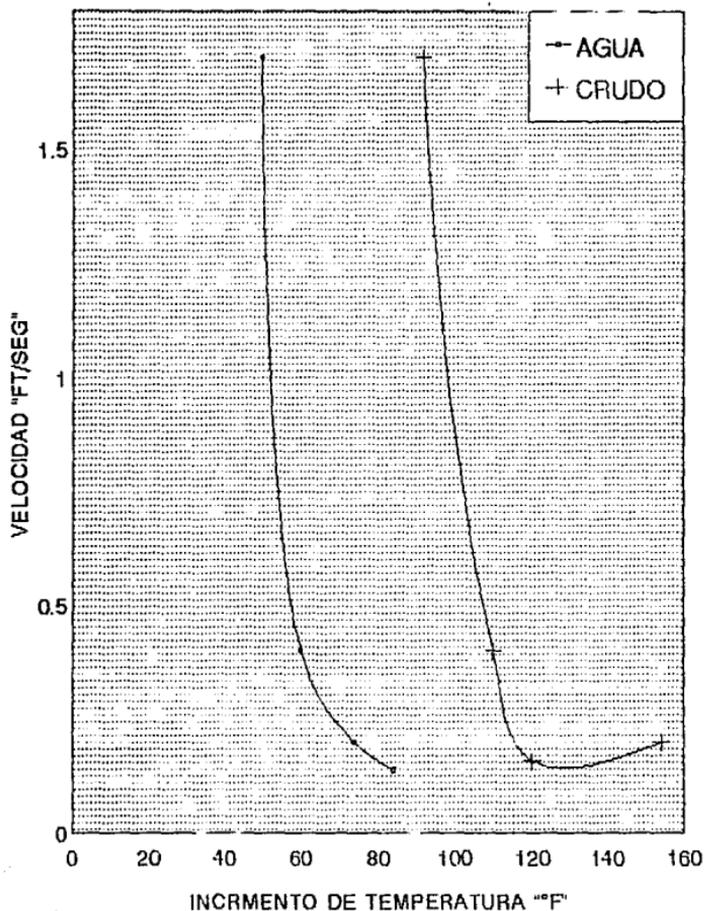


FIGURA II.4 INCREMENTO DE TEMPERATURA EN MOTORES

Si el voltaje aplicado al motor instalado es más alto que el voltaje de la placa, el motor puede correr a mayor velocidad, consumiendo más corriente (sobrealimentación), teniendo una potencia baja, y desarrollando más potencia para suministrar la demanda de la bomba centrífuga. Lo contrario, se presenta cuando el voltaje es bajo.

Los materiales para aislar motores son estimados en aproximadamente 180°C (350°F). Algunos motores son impregnados por método Epoxy. Este sistema de ranura de impregnación es empleada para mejorar la transferencia de calor del motor mientras los bronceos finales se mueven contra la vibración.^{9 y 11}

Protector o Sección de Sello.

La sección de sello ejecuta cuatro funciones básicas:

1. Conecta la carcasa de la bomba y el motor; uniendo la flecha del motor con la flecha de la bomba.
2. Aloja un cojinete que absorbe el empuje axial desarrollado por la bomba.
3. Evita la entrada de fluido del pozo al motor.
4. Realiza la función de recipiente para compensar la expansión y contracción del aceite en el motor, debido al calentamiento y enfriamiento del motor cuando la unidad trabaja o se detiene.

El diseño mecánico y el principio de operación de la sección de sello varía de un fabricante a otro. La principal diferencia está en la manera en que el aceite del motor es aislado del fluido del pozo. La figura 11.5 muestra la sección transversal de la sección de sello común. Está diseñado como una parte integral del motor la cual permite llenarse de aceite y sella el motor en la fábrica mejor que bajo condiciones de campo adversas. En su

diseño la presión interna del motor es igualada a la presión del pozo con la ayuda de un fuelle metálico instalado en la parte inferior del motor.¹⁴

El aceite del motor es sellado positivamente del fluido del pozo por medio de una bolsa que además compenza la expansión y contracción del aceite del motor. La entrada del fluido del pozo a lo largo de la flecha es eliminada por el uso de dos sellos mecánicos de flecha.

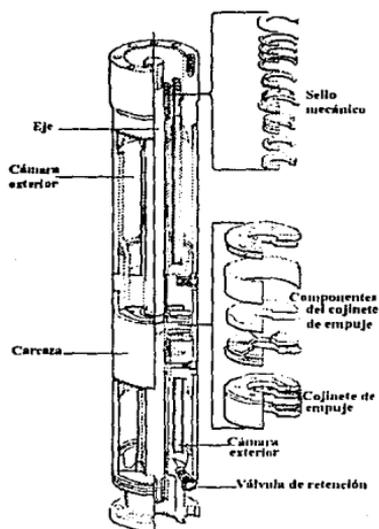


FIGURA II.5 Sección de sello (Protector del motor)

En la sección de sello mostrada en la figura II.6, el aceite del motor es aislado del fluido del pozo por el uso de un líquido de alta densidad relativa. A causa de la comunicación directa entre el fluido del pozo, el fluido barrera y el aceite del motor, la presión interna del motor es siempre igual a la presión del pozo. La variación en la altura del fluido del pozo es compensada por la expansión y contracción del aceite del motor.

El fluido del pozo en la sección de sello mostrada en la figura II.6 se comunica con el aceite a través de una serpentin y por este medio protege al motor de los efectos adversos de la entrada de fluido del pozo.

Todas las secciones de sello están equipadas con cojinetes de empuje de tipo móvil capaces de soportar toda la carga axial desarrollada por la bomba. Dependiendo del diseño, estos sellos pueden ser de asiento fijo o de asiento de inclinación de alineación automática. También los asientos pueden ser de pivoteo central o de descentrado pequeño.

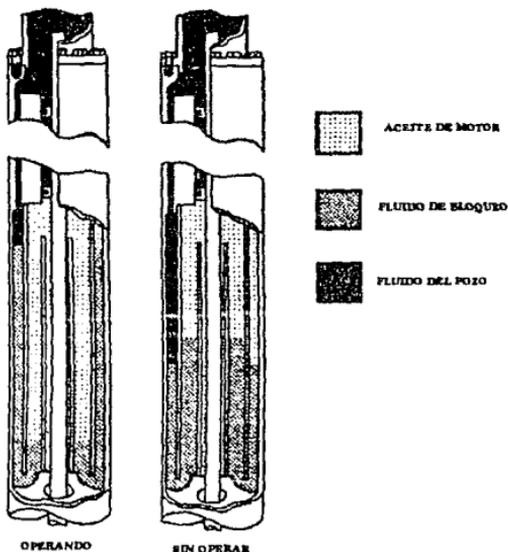


FIGURA II.6 Funcionamiento de la sección de sello.

Todos estos detalles de diseño pueden no tener mucho significado para un operador de bomba, pero tienen un efecto directo en la operación de la bomba. El cojinete de pivoteo

central puede operar igualmente bien en cualquier dirección de rotación. Sin embargo, si los asientos son de pivote de descentrado pequeño, puede ocurrir un daño severo si gira en la dirección inversa. También, la capacidad de soportar carga del cojinete puede limitar el tamaño de la bomba, de manera de no sobrecargar el cojinete bajo condiciones de operación dadas.

La unión de la sección de sello viene en varios tamaños para unir diferentes tamaños de motor a la bomba. Suficiente espacio entre la carcaza y el diámetro interior de la tubería de revestimiento es de gran importancia cuando se selecciona la bomba y la unión de la sección de sello. Este espacio permite el paso entre la carcaza y el diámetro interior de la tubería de revestimiento de la porción de cable eléctrico para colocar el motor en la parte de abajo del ensamblaje. El extremo inferior de la flecha de la sección de sello ajusta en la flecha del motor y esta diseñada para permitir alargamiento y contracción de la flecha del motor debido al incremento de la temperatura. El extremo superior de la flecha de la sección de sello es acoplada con la flecha de la bomba de tal manera que el peso de la flecha de la bomba, la carga hidráulica longitudinal en la flecha de la bomba, y en algunos casos las cargas longitudinales desequilibradas del impulsor sean transmitidas desde la bomba a la flecha del ensamblaje de la sección de sello. Estas cargas son transferidas al cojinete de carga.

Separador de gas.

El separador de gas es un dispositivo opcional; es una sección normalmente colocada entre la sección de sello y la bomba, y sirve como succión o entrada de la bomba. Separa el gas libre del fluido y lo desvía de la succión de la bomba. El separador puede ser efectivo pero es difícil determinar su eficiencia con exactitud. La eliminación del gas no es necesariamente la forma óptima de bombear fluido en el pozo. Es decir, aunque el

volumen total en la succión de la bomba se reduce, la presión de descarga se incrementa debido a la menor cantidad de gas en la columna de fluidos por arriba de la bomba.^{13 y 14}

El separador es una ayuda en la prevención de candados de gas y normalmente proporciona bombeo mas eficiente en pozos con alta presencia de gas. Por lo general existen dos tipos de separadores, los convencionales (de flujo inverso) y los centrifugos. Las figuras II.7 y II.8 ilustran los separadores de gas típicos.

Separador de Gas Convencional.

En la figura II.7 se muestra el separador de gas convencional (de flujo inverso), el funcionamiento de este separador depende de los efectos de flotabilidad y tensión superficial y un bien marcado flujo invertido para conseguir la separación del gas, al ingresar el fluido del pozo a la sección de succión, cambia necesariamente dirección en este punto, debido a la disminución de presión existirá separación de gas en la succión. El gas separado se mueve hacia la parte superior del espacio anular y es descargado fuera de la tubería de revestimiento por el cabezal. El fluido sin embargo contiene gas ingresa en la succión del separador de gas moviéndose descendentemente y nuevamente se cambia la dirección cuando el fluido es tomado por el impulsor de la primera etapa. Este impulsor provoca una turbulencia en el fluido que causa un vórtice. Este vórtice provoca que el gas se mueva a lo largo de la flecha y al fluido a moverse en el exterior del espacio anular interior. Esta operación provee a la primera etapa de la bomba, un fluido de alta densidad, así como el permitir el escape previo del gas (a ocurrir en esta primera etapa).^{2 y 15}

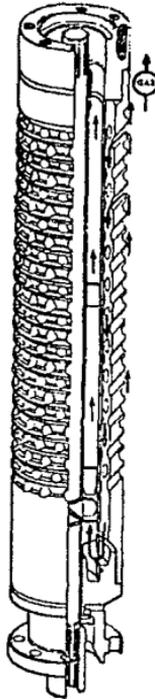


FIGURA II.7 Separador convencional.

El impulsor produce algo de carga y ayuda en la admisión de la bomba para la misma recarga con líquido si hay un cierre por gas. Si se presenta el llamado "candado de gas" en la bomba a causa de una acumulación de gas libre o un gran bache de gas, el fluido puede regresar a través del impulsor, permitiendo de este modo al impulsor la recarga en la primera etapa de la bomba. Esto reduce el número de paros de la unidad por el mecanismo de protección de sobrecarga.

Separador de Gas Centrifugo.

El separador de gas centrifugo como el mostrado en la figura II.8, consiste de un impulsor y una alta capacidad volumétrica, más etapas de bombeo de fluido mixto, seguidas de una cámara de separación. El impulsor y las etapas de bombeo son incorporadas para proveer un medio para vencer la resistencia al flujo interno y los pasajes u orificios de escape. Ambos, el impulsor y las etapas de la bomba, realizaron pruebas por separado y mostraron la capacidad de producción de una pequeña cantidad de carga sin surgencia de fluidos con alto contenido de gas libre.^{14 y 16}

La cámara de separación consiste de una unidad rotaria con álabes radiales y un armazón exterior integral. El armazón exterior rotatorio de la cámara es un rasgo significativo de este separador. Provee un cierre radical de la cámara donde el flujo de corte o turbulento es minimizado a causa de los giros del fluido con la cámara como un cuerpo sólido. El área de corte transversal de la cámara es conservada tan grande como sea posible para mantener la velocidad mínima de flujo axial, con lo cual se permite el máximo tiempo de residencia en la cámara donde actúan intensas fuerzas centrifugas. Los fluidos pesados se acumulan cerca de la pared exterior y el gas libre se acumula cerca del eje (flecha) debido a estas fuerzas. Estos fluidos entonces son separados físicamente en la sección de superior de la cámara del separador y son conducidos a la primera etapa de la bomba. Los gases son ventilados al espacio anular de la tubería de revestimiento usando un difusor cruzado.

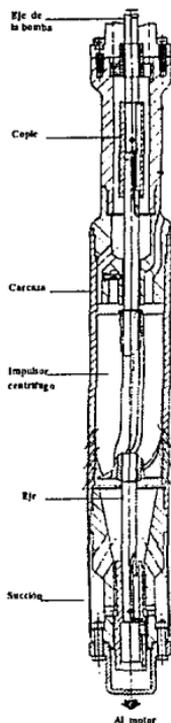


FIGURA II.8 Separador centrífugo.

La figura II.9 muestra un separador de gas centrífugo. Su operación se basa en el principio de separación de partículas de diferentes densidades bajo la acción de fuerzas centrífugas. En el diseño bajo análisis, el impulsor giratorio crea un campo de fuerzas centrífugas.

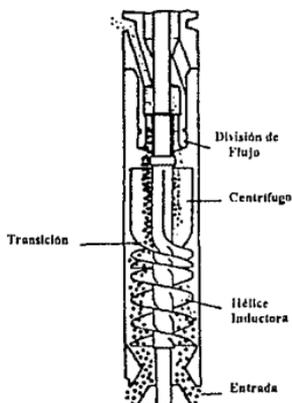


FIGURA II.9 Flujo de gas a través del separador.

Como el fluido del pozo (consistente de líquido y gas) pasa a través del impulsor, es sujeto a la acción de las fuerzas centrífugas. Las partículas de líquido, inicialmente de alta densidad, son arrojadas hacia la periferia del impulsor mientras las partículas de gas forman un núcleo cerca del centro. El gas es descargado al espacio anular mientras el líquido libre de gas entra en el ojo del impulsor de la bomba.

Bomba Centrífuga.

La bomba está constituida por un número de etapas, éste número es determinado por los requerimientos de carga y la potencia requerida. Las bombas son diseñadas en un amplio rango de capacidades, para tener una aplicación virtualmente a todo tipo de condiciones en los pozos, la figura II.10 muestra una bomba típica.^{11, 13 y 14}

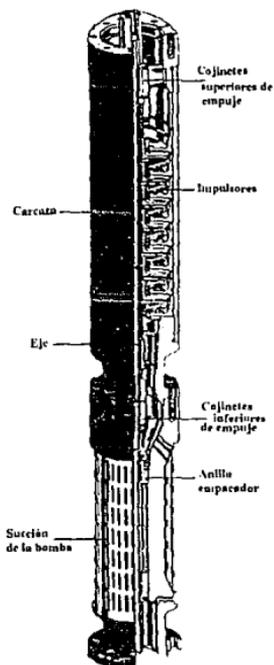


FIGURA II.1 Bomba centrífuga sumergible.

Cada etapa consiste de un impulsor y un difusor conectados a una flecha de transmisión, la función del difusor es dirigir el flujo del fluido de un etapa a la siguiente; el tipo de etapa que se use determina el volumen de fluidos que va a producirse.

El cambio de presión es realizado como un bombeo de líquido alrededor del impulsor, el movimiento giratorio del impulsor imparte un movimiento giratorio al líquido. El impulsor genera un movimiento tangencial en el diámetro exterior del impulsor. Este movimiento crea una fuerza, la cual ocasiona flujo en una dirección radial. Por consiguiente el líquido es llevado a través del impulsor con una componente tangencial y radial. El resultado de estas dos componentes es la dirección verdadera de flujo.

El difusor cambia algo de la alta velocidad a una velocidad relativamente baja, mientras que el flujo es dirigido a la entrada de la siguiente etapa (impulsor). En aplicaciones profundas, los impulsores son del tipo flotante o balanceado. Para un volumen alto, se requiere de unidades de mayor diámetro y un tipo de impulsor fijo.

En una bomba flotante, el impulsor se mueve axialmente a lo largo de la flecha. En la posición de operación, el impulsor descansa en un cojinete en un empuje ascendente o descendente dependiendo del gasto de flujo. Hecho de esta manera, el empuje axial desarrollado por cada impulsor es soportado en arandelas de empuje ascendente o descendente provistas en cada cojinete del impulsor y difusor. La fuerza axial debida a la diferencial de presión a través de la bomba actúa en el final del eje donde es soportada por el cojinete de empuje en la sección de sello.

En una bomba fija, el impulsor esta fijo y no puede moverse axialmente. Además no descansa en cualquiera de los cojinetes del difusor. El empuje axial total desarrollado por el impulsor, así como el debido a la diferencia en presión: es soportado en el cojinete de empuje externo instalado en la sección de sello.

En una bomba combinada, un cierto porcentaje de las etapas son flotantes y el resto fijas. La bomba es armada de tal manera que el empuje hidráulico desarrollado por los impulsores es compartido de igual manera por cada impulsor.

Sin embargo, la fuerza axial debida a la diferencia de presión actuante en la parte final de la flecha es soportada únicamente por las etapas fijas. El cojinete de empuje externo en semejante diseño no es cargado durante toda la operación normal.

El empuje axial desarrollado por un impulsor depende del diseño hidráulico y mecánico del impulsor y del punto de operación de la bomba. Una bomba operando a un gasto mayor que el gasto de diseño puede producir un excesivo empuje ascendente. Inversamente, una bomba operando a un menor gasto que el gasto de diseño produce un excesivo empuje descendente dando como resultado que el cojinete externo y el anillo de empuje descendente muestren señales de uso excesivo. Debido a estas razones, una bomba centrífuga puede ser operada dentro de un rango de capacidad recomendado. Este rango de capacidades recomendadas varía con los diferentes tipos de bombas diseñadas y son usualmente mostrados en curvas de comportamiento de la bomba (curvas características). En ausencia de tales datos, un rango de 75 a 125% del mejor punto de eficiencia puede ser tomado como una buena primera aproximación.

La longitud de una sección de bomba individual esta limitada alrededor de 20 a 25 pies para facilitar el correcto armado y manejo. Sin embargo, un número de secciones de bomba pueden ser unidas para desarrollar la carga requerida. El tamaño (número de etapas) de una bomba es determinado basandose en una o más de las siguientes limitaciones:

- a) El rango de potencia de la flecha de la bomba.
- b) El rango de presión de la carcaza de la bomba.
- c) La capacidad para soportar carga del cojinete de empuje.

Las reacciones longitudinales o empujes en impulsores fijos y flechas son transferidos al cojinete de empuje de la unidad, pero para impulsores flotantes son transferidos a la carcaza de la bomba.

Los impulsores son diseñados con álabes con determinada inclinación, cuya eficiencia máxima es una función del diseño del impulsor y cuyo tipo de eficiencia de operación es una función del porcentaje de la capacidad de diseño a la cual la bomba es operada.

Cada etapa de una bomba sumergible maneja el mismo volumen de fluido en ausencia de gas libre y produce una cierta cantidad de carga. Esta carga de presión es sumada; por ejemplo, si una etapa produce 20 pies de carga, 100 etapas podran producir 2000 pies de carga. El tipo de etapa utilizada determina el volumen de fluido a ser producido. La adición de más etapas a un diseño puede no incrementar el volumen a menos que el diseño tenga suficiente carga inicial.

Las etapas son fabricadas de materiales que proporcionan características de funcionamiento óptimas y para presentar la máxima resistencia a la corrosión y abrasión. Flechas de K-Monel (aleación de metales) pueden ser provistas como equipo estándar.^{13 y14}

Cojinete de Empuje.

Los cojinetes de empuje diseñados¹⁴ son del tipo de asiento rígido o del tipo de asiento pivote. El de asiento rígido es actualmente un nombre inapropiado. Implica que estos no tienen flexibilidad en los asientos individuales, pero este no es el caso. El cojinete consiste normalmente de seis asientos individuales los cuales son montados en un pedestal localizado en el centro del asiento. El pedestal es bastante flexible así que puede hacerse girar. La operación de cualquier cojinete depende del giro de las partes manteniendo una película de aceite a través de la superficie del cojinete. En el caso de un cojinete de asiento pivote o de asiento rígido la carrera de empuje jala los fluidos a través del anillo. En cada caso, una película de aceite debe de ser formada y mantenida para contrarrestar posibles fallas.

Al mismo tiempo el asiento del pivote y el pedestal montado en el asiento giran en la orilla de la entrada, así se permite a la película de aceite ser formada. Una película de aceite puede ser mantenida por únicamente una distancia limitada debido a los efectos de viscosidad, carga y temperatura. Como el asiento debe de girar, la película de aceite llega a ser en forma de cuña y el asiento no debe ser demasiado largo para permitir que la película sea sacada antes de llegar al final del asiento. Para un diámetro dado hay un número óptimo de asientos de un ancho y longitud dados. Para variar cualquiera de los tres se requiere un cambio de los otros dos.

El pedestal montado en el asiento es menos tolerante al desalineamiento que el asiento pivote y su resistencia al giro requiere que tenga un porcentaje de carga menor.

Se puede ver que la viscosidad del aceite utilizado es un factor importante para la vida del cojinete de empuje y en el mantenimiento de las partes del montaje, manteniéndolo tan limpio como sea posible.

En resumen, los enemigos de la vida del cojinete de empuje son baja transferencia térmica debido a la viscosidad, el desalineamiento, las partículas extrañas y la vibración. La vibración y el desalineamiento pueden causar la destrucción de la película de aceite, lo cual permite el contacto entre metal y metal. Lodo y/o partículas extrañas pueden causar rasgaduras y contribuir a la pérdida de la película de aceite.

Rango de Empuje.

Los impulsores son diseñados para una fuerza neta pequeña, pero disminuye a la eficiencia de carga. Un impulsor opera a un gasto significativamente más grande que su capacidad de diseño, demostrándose que las fuerzas en un empuje ascendente son menores en la descarga que en la succión en cada etapa. Inversamente, cuando la bomba es operada a gastos menores que el gasto de diseño, la fuerza generada es más grande en el lado de la descarga de la etapa y resulta en un desgaste de empuje descendente.^{4, 5, 12 y}

Por estas razones, las bombas deben de ser operadas dentro de un rango de capacidades para un óptimo desgaste del impulsor y del cojinete de empuje. Este rango de capacidad varía con los diferentes tipos de bombas. Una buena regla de modo empírico es que el rango mínimo de capacidad no debe caer abajo del 75% del punto máximo del rango de capacidad (el máximo de eficiencia de la bomba) y que el rango máximo de capacidad no debe exceder del 125% del punto máximo del rango de capacidad. La figura II.11 muestra un ejemplo de este rango óptimo. El rango algunas veces se refiere como el "rango del cojinete de empuje". Según la operación dentro de este rango, el desgaste del cojinete puede ser minimizado.

El gasto y la presión descarga de una bomba centrífuga sumergible depende de la velocidad de rotación (rpm), el tamaño del impulsor, el diseño del impulsor y difusor, el número de etapas, la carga dinámica contra la cual la bomba esta operando, y las propiedades físicas del fluido que esta siendo bombeado. Las cargas o presiones generadas por cada etapa son sumadas. La carga dinámica total de la bomba es el producto del número de etapas y la carga generada por una etapa individual.^{1, 6, 14 y 18}

Cable.

La potencia se suministra al motor por medio de un cable eléctrico (Figura II.12). Una variedad de tamaños de cable conductor permite cubrir los requerimientos del motor. Existen dos estilos de cable, el redondo y el plano. Los cables pueden instalarse en pozos con temperaturas superiores a 300°F. Dependiendo de las condiciones del pozo, el cable puede tener una armadura de acero, bronce o monel. El tamaño apropiado del cable lo determina el amperaje, la caída de voltaje y el espacio disponible entre la tubería de revestimiento y la de producción. El mejor tipo de cable se selecciona en base a la temperatura de fondo y los fluidos producidos.

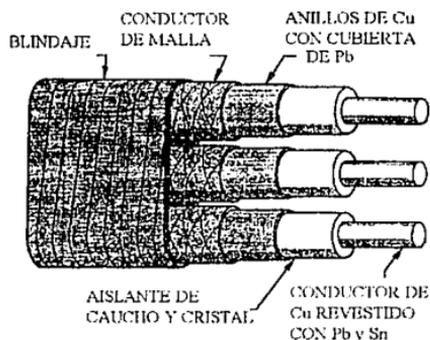


FIGURA II.12 Cable de configuración plana.

Se tienen dos configuraciones diferentes de cable (plana y redonda), los diseños son variados dependiendo de las necesidades del cliente, las compañías fabricantes de bombas proveen de ambas configuraciones de cable, plano y redondo con tamaños de conductor del No. 2 hasta el No. 6, el material utilizado en los conductores, para ambas configuraciones son: Cobre y aluminio.

En el cable eléctrico sumergido los elementos conductores utilizados son cobre y aluminio. Las mediciones de resistividad en estos dos elementos están hechas a 20°C y son 10.37 para el cobre y 17.0 para el aluminio. 7, 9 y 14

Las grampas (protectores) del cable deben ser proporcionados por el fabricante y algunos son mostrados en las figuras II.13 y II.14.

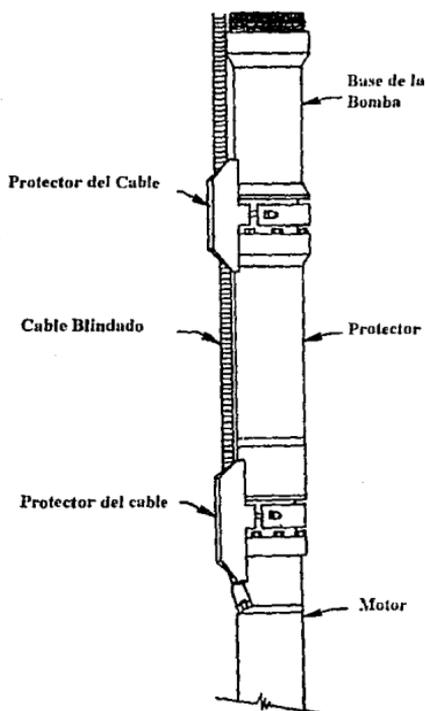


FIGURA II.13 Protector del cable.

El cable es empalmado inicialmente en la parte plana de la bomba para cable plano, para cable redondo en la tubería.

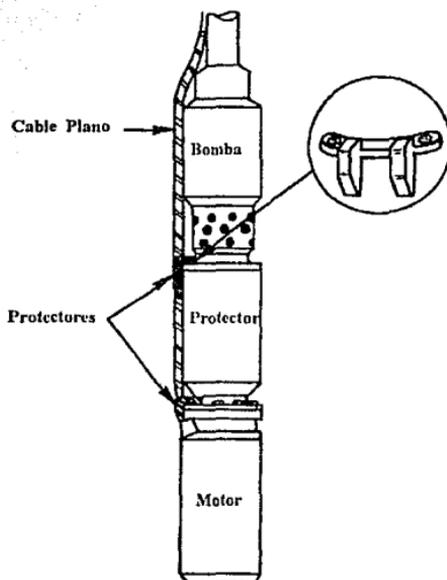


FIGURA II.14 Protector para cable plano.

La resistividad de un conductor es inversamente proporcional al número de electrones libres en la unidad de volumen, y esto a su tiempo depende de la naturaleza de la sustancia.

Considerando la longitud del cable, para un voltaje aplicado, los volts por pie disminuyen cuando la longitud del alambre es incrementada, como una consecuencia de la disminución de la velocidad del electrón y esto da como resultado una reducción de la corriente o en otras palabras "la resistencia es directamente proporcional a la longitud del conductor".¹⁴

Al aumentar la sección transversal de un cable, por otro lado, tiene un efecto inverso sobre la resistencia a causa del número de electrones libres por unidad de longitud aumentando con el área. Bajo esta condición la corriente puede incrementarse para un emf aplicado que hace que más electrones sean movidos en la unidad de tiempo, en otras palabras, "la resistencia es inversamente proporcional al área de la sección transversal".

Una fórmula para la resistencia en términos de la resistividad (Rho), la longitud (L) y el área (CM) en mils (milésima de pulgada) circulares es¹⁴.

$$R = \text{Rho} \frac{L}{CM}$$

Por ejemplo; calcular la resistencia del siguiente conductor a 20°C.

a) Material: cobre

$$L = 3000 \text{ pies}$$

$$CM = 162 \text{ mils}$$

b) Material: aluminio

$$L = 3000 \text{ pies}$$

$$CM = 204 \text{ mils}$$

a)

$$R = 10.37 \frac{3000}{162^2}$$

b)

$$R = 17.00 \frac{3000}{204^2}$$

Nota: El área en mils circulares es determinada por el cuadrado del diámetro (d), este último expresado en mils.

Los tamaños de cable más comunes en la industria de bombeo sumergible son de conductores de cobre del No. 1, No. 2, No. 4 y No. 6. Los conductores de aluminio son del No. 2/0, No. 1/0, No. 2 y No. 4. La tabla No. 1 lista los tamaños de cable del No. 1 al No. 8 con datos de diámetro en mils, área en mils circulares, resistencia en ohms y número de pies por libra para un conductor sencillo estándar con alambres redondos de cobre fortalecido.

Cable (Sumergible).

Cuando el cable es utilizado en sistemas de alto voltaje, cada uno de los conductores que lleva corriente, es frecuentemente rodeado por un espesor considerable de aislamiento de alto grado y algunas veces de una envoltura de plomo. Aunque la corriente normal es a lo largo de la longitud del conductor, ahí existen pequeñas corrientes de escape de un conductor a otro (Figura.II.15).

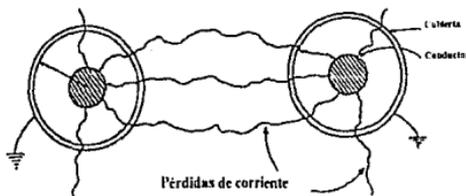


FIGURA II.15 Pérdida de corriente en el cable.

El cable de bombeo sumergible es construido en ambas configuraciones, plana y redonda, y cada conductor puede ser sólido o multi-hebras (tipo torón). El cable plano es construido con los conductores situados de extremo a extremo y es blindado. Es

usado principalmente donde las limitaciones de espacio son dictadas por la tubería de revestimiento utilizada.

El cable redondo convencional esta formado de conductores multi-hebras, cada una aislada individualmente y también aislada como un unidad. Una armadura galvanizada es aplicada al exterior para la prevención de un daño físico.

Los cables en aplicaciones sumergibles son diseñados para mantener las pérdidas de voltaje en el fondo del pozo a un valor mínimo. Las pérdidas de voltaje por cada 1000 pies para los tamaños de cable común en aplicaciones sumergibles son mostrados en las Figuras II.16, II.17 y II.18. Cuando se dimensiona el cable, las pérdidas de voltaje mostradas en la tabla No.1 pueden ser usadas. Sin embargo, las curvas de pérdida de voltaje están disponibles para toda aplicación de bombeo eléctrico sumergible.

El aislamiento para estos cables tiene que resistir temperaturas y presiones de fondo del pozo, y resistir la impregnación de los fluidos del pozo. Sin embargo, hay limitaciones de los materiales utilizados en su construcción. Cables estándar son estimados generalmente para una vida de 10 años a una temperatura máxima de 167°F, con una vida corta a la mitad por cada 15°F arriba del máximo. El medio ambiente bajo el cual es operado el cable en el pozo también afecta directamente su vida.^{13 y 14}

Algunos autores¹⁴ dan reglas de dedo (tabla No. 2) para ser utilizadas en la selección del cable, también listan los cables comerciales disponibles, como es mencionado en la tabla No. 3. Los materiales con los que ellos hacen su listado, también listan sus fallas y limitaciones, hacen notar que el ambiente químico tiene un efecto severo mayor en la vida del cable. Puede cambiar las propiedades de tensión, volumen y dureza. Uno de los factores que tiene efectos severos es la penetración de gas. Normalmente, esto se ve cuando se arranca el pozo debido a la depresurización del cable, entonces, un severo aumento puede ocurrir y hay que preocuparse de tener que hacer alguna otra corrida usando el cable.

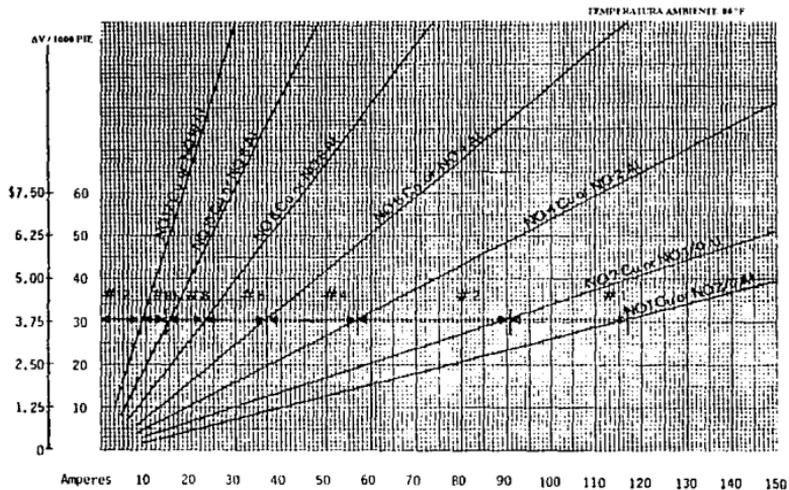


FIGURA II.16 Gráfica de pérdida de voltaje.

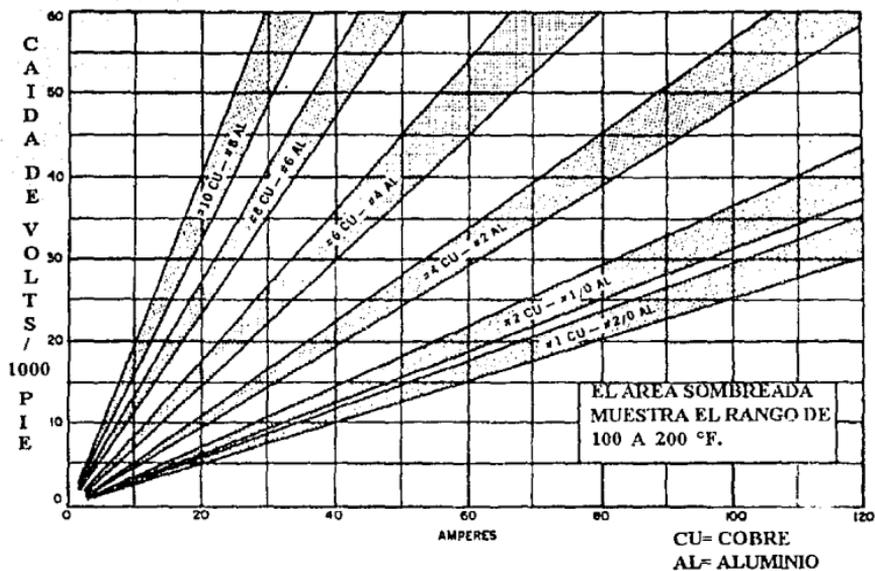


FIGURA II.17 Gráfica de pérdida de voltaje.

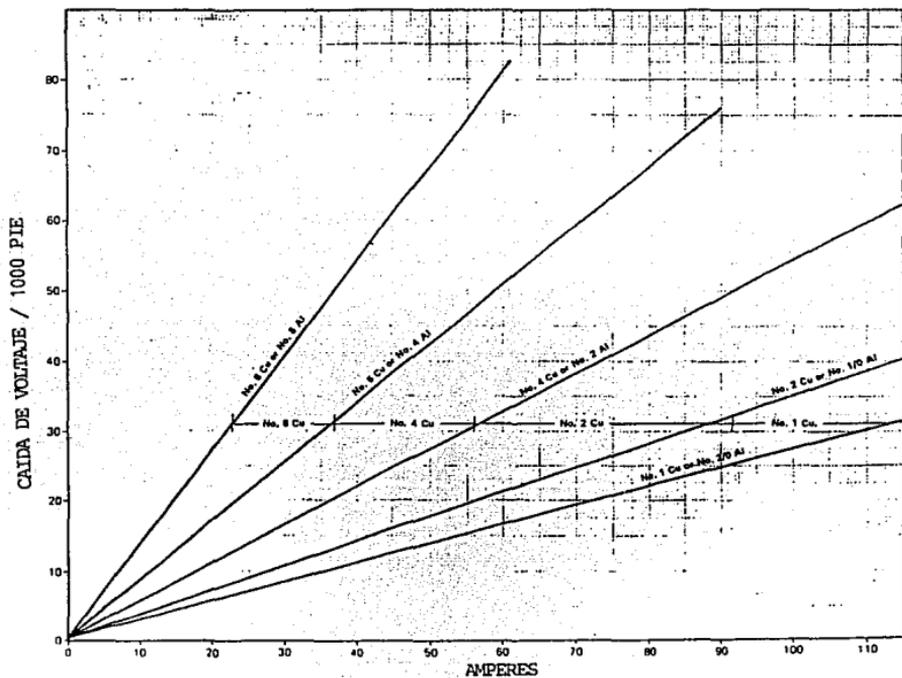


FIGURA II.18 Gráfica de pérdida de voltaje.

TABLA No. 1

PERDIDAS DE VOLTAJE EN CABLES

Tamaño del cable	Caída de voltaje por amp. por 1000 pies @100% PF @ 20F
#12 Cu ó #10 Al	3.32
#10 Cu ó # 8 Al	2.08
# 8 Cu ó # 6 Al	1.32
# 6 Cu ó # 4 Al	0.84
# 4 Cu ó # 2 Al	0.53
# 2 Cu ó # 1/0 Al	0.53
# 1 Cu ó # 2/0 Al	0.26

TABLA No. 2

Reglas de dedo para la selección del cable.
TODOS
los cables y uniones se deterioran con el tiempo, pero...
los ritmos dependen de
LAS CONDICIONES + LOS MATERIALES
Quando es expuesto a agua, minerales e inorganicos
PLASTICOS - Inafectado
HULES - Permeable
Quando es expuesto a aceite
PLASTICOS - Suavizado únicamente (a menos que sea altamente plástico)
HULES - Más suavizado
Algunos endurecen a altas temperaturas
Quando es expuesto a gases
PLASTICOS - Permeable a baja presión
HULES - Altamente permeable
Quando es SOBRECIENTADO BREVEMENTE después de una exposición prolongada al aceite
PLASTICOS - Se funde rápidamente
HULES - Se deforma y agrieta
LARGA EXPOSICION a calor moderado
PLASTICOS - Lenta deformación o hacerse quebradizo
HULES - Se endurece y agrieta

TABLA No. 3

CONFIGURACION				
Configuracion	envoltura	aislamiento	armazon	temp.max.limite*
Plano	Plomo	Hule EPR	Metal	325 F
Plano	Nitrilo	Hule EPR	Metal	250 F
Plano	Ninguna	Polietileno	Ninguno	190 F
Plano	Ninguna	PVC	Ninguno	200 F
Plano	Neopreno	Hule EPR	Metal	250 F
Redondo	Nitrilo	Copolimero	Metal	230 F
		polipropileno		
Redondo	Hule de epiclorhidrina	Homopolimero polipropileno	Metal	275 F
Redondo	Hule de acrilato	Hule EPR	Metal	300 F
Redondo	Nitrilo	Polietileno	Ninguno	190 F
		degradado		
Redondo	Polietileno	Copolimero	Ninguno	150 F
		polipropileno		
Redondo	Hule EPR	Hule EPR	Metal	325 F
Redondo	Nitrilo	Hule EPR	Metal	250 F
*Esto no hace reducir el limite de temperatura por efecto del aire, agua, aceite largo tiempo de exposici3n y resistencia al calentamiento				

TABLA No. 3 (CONTINUACION)

Cualidades
La uni3n de la envoltura para hule dificulta su construcci3n. F3cilmente dañable, costoso.
El aislamiento tiene una pobre resistencia al aceite.
El nitrilo viejo endurece despu3s de un uso prolongado. El aislamiento tiene una pobre resistencia al aceite.
El polietileno degradado se suaviza y se desliza a elevada temperatura y tiene una pobre resistencia al aceite.
El PVC se hace quebradizo con el tiempo y tiene una pobre resistencia al aceite.
El neopreno tiene una buena resistencia al aceite y el aislamiento de hule EPR es pobre en el aceite.
El aislamiento emplea limites de temperatura por su baja deformaci3n al calor.
El aislamiento se incrementa en cables empleados con temperatura pero decrece su utilidad a baja temperatura.
L3mitado por su buena resistencia al aceite y pobre resistencia al agua. El hule acrilato endurece con el envejecimiento.
El nitrilo viejo endurece y el polietileno degradado tienen una pobre resistencia al aceite.
La envoltura tiene un punto bajo de distorsi3n de calor y 3nicamente tiene una buena resistencia al aceite.
3nicamente tiene una buena resistencia al aceite en la envoltura y el aislamiento.
El nitrilo endurece con el envejecimiento. El hule EPR no es resistente al aceite.

Muchas investigaciones continúan en el área del mejoramiento del cable y con el advenimiento de nuevos materiales y procedimientos de construcción, la vida del cable puede ser mucho mejor en el futuro.

Efecto de la Temperatura en Cables

Cable de polietileno están limitadas a 130°F. El aislamiento de polipropileno con armadura esta limitado a 180°F. La cubierta de plomo EPR esta limitada a 250°F.

Una atención considerable debe ser dada a la selección del tipo y tamaño del cable para una aplicación de bombeo eléctrico sumergible, como una parte muy importante de la instalación y en muchos casos de la vida de operación de toda la instalación.^{13 y14}

Extensión de la Mufa.

Es un cable plano que permite la unión del motor con el cable mismo.

Válvula de Retención.

Se coloca de 1 a 3 lingadas por arriba de la bomba, su función es permitir el flujo únicamente en sentido ascendente, es un dispositivo protector para impedir el giro inverso de la flecha del motor y de la bomba.

Válvula de Drene.

Como la tubería de producción queda llena de fluido del pozo, siempre que se detiene el funcionamiento de la bomba; y es necesario sacar el aparejo del pozo, se debe extraer todo el fluido contenido en la tubería. También establece una comunicación entre la tubería de producción y el espacio anular, por lo que la tubería de producción se puede extraer vacía.

II.2. Componentes Superficiales.

Cabezal.

El cabezal debe ser del tipo que permita la introducción del aparejo, así como el paso del cable y además permitir un sello efectivo.

Caja de Vento.

Por razones de seguridad la caja se localiza entre el cabezal y el transformador. La caja de viento (caja de unión) impide el viaje del gas a través del cable superficial hasta el tablero de control, eliminando así riesgos de un incendio o explosión (Figura II.19).

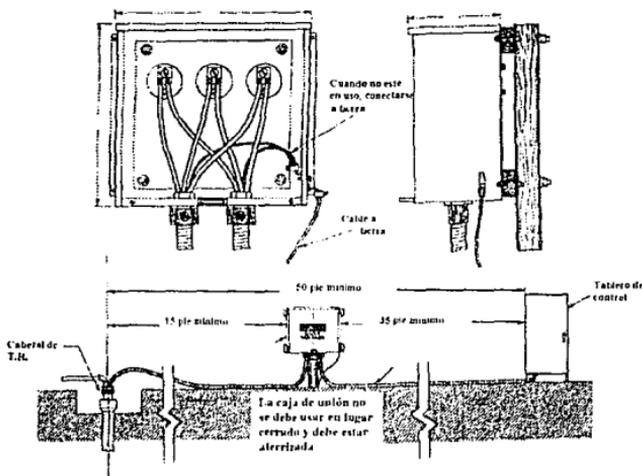


FIGURA II.19 Caja de unión.

Tablero de Control.

Los tableros de control estándar son a prueba de agua y están disponibles en varios tamaños, acompañados de accesorios para ajustarse a cualquier instalación de bombeo. Los hay desde unidades muy simples, con un botón magnético para protección de sobrecarga; hasta muy complejos, ensamblados con fusibles de conexión, amperímetro, protección de bajacarga y sobrecarga, controles de relojería de presión, instrumentos para la operación automática como lo es el controlador de velocidad variable (Figura II.20).

Transformadores.

Es el equipo que suministra la energía necesaria para el funcionamiento del motor, así como para las caídas de voltaje en el cable conductor. Para uso en equipo superficial, se fabrican transformadores estándar trifásicos, autotransformadores trifásicos, o bien, conjuntos de tres transformadores monofásicos (Figura II.20).

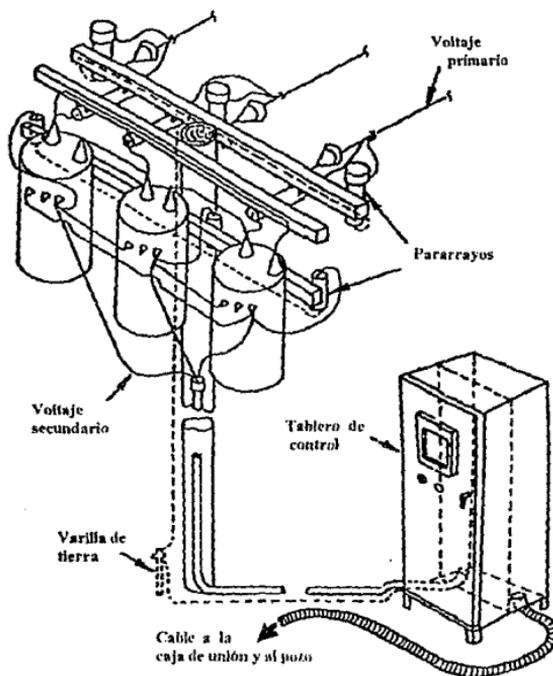


FIGURA II.20 Transformadores y tablero de control.

III CURVAS CARACTERISTICAS DE LA BOMBA CENTRIFUGA

III.1. Diseño de las Curvas.

Una bomba centrífuga que opera a velocidad constante puede desarrollar cualquier capacidad de carga, desde cero a un valor máximo que depende del tamaño de la bomba, diseño y condiciones de succión. Las curvas características, muestran la relación existente entre columna hidráulica (carga total generada), potencia y eficiencia contra la capacidad volumétrica (gasto) que maneja la bomba, para un diámetro específico de impulsor y para un tamaño determinado de carcasa. Las relaciones mencionadas se muestran mejor gráficamente, y la gráfica obtenida se llama *Gráfica de las Curvas Características de la Bomba* (Figura III. 1).

La prueba de una bomba se realiza haciéndola trabajar a velocidad constante y estrangulando la descarga. Durante la prueba se miden a diferentes tiempos: el gasto, el incremento de presión a través de la bomba y la potencia al freno. El incremento de presión se convierte en carga y se calcula la eficiencia total de la bomba. Para trazar ésta curvas características, se procede de la siguiente manera¹⁹:

- a) El gasto "Q" se determinará por medio de recipientes de medición, vertederos y orificios calibrados.
- b) La altura total de elevación "H", fijándose la altura de succión por medio de un vacuómetro y la altura de descarga por medio de un manómetro.
- c) La potencia "Hp" por medio de un dinamómetro o por la potencia que alcance el motor eléctrico, tomando en consideración su rendimiento.

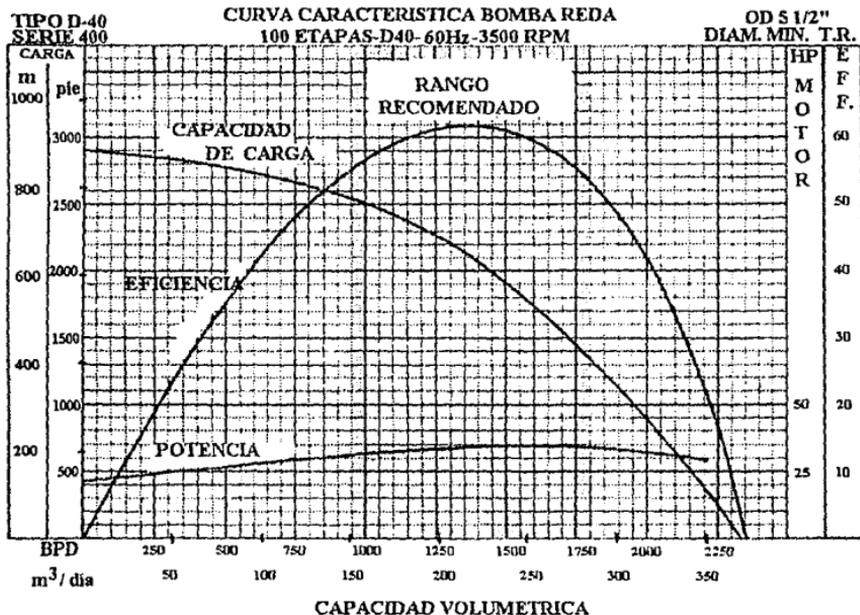


FIGURA III.1 Gráfica de curvas características.

- d) La velocidad de la unidad (número de revoluciones por minuto), se obtiene por medio de un tacómetro.
- e) La eficiencia se obtiene despejándola de la fórmula de potencia.

$$E = \frac{\Delta p * 144 * Q}{H_p * 7.48 * 60 * 550 * n}$$

Donde:

Δp : Incremento de presión.

Q: Gasto [gpm]

H_p : Potencia.

n: Número de etapas.

Las curvas de comportamiento publicadas por los fabricantes,²⁰ son referidas a determinadas características de diseño como: fluido de trabajo, agua dulce con densidad relativa $G=1$ y viscosidad igual a 1 c.p., trabajando a velocidad constante (R.P.M.). Sin embargo, las bombas centrífugas en la industria petrolera se utilizan en la práctica, para condiciones diferentes; producción de líquidos con viscosidades y densidades relativas diferentes, un amplio rango de velocidades; con ello será necesario predecir el comportamiento de la bomba bajo las condiciones de operación que se presenten.

III.2. Efectos de Diferentes Parámetros en las Curvas Características.

Efecto de la densidad relativa (δ).

La carga producida por un impulsor no depende de la densidad relativa, esto debido a que la velocidad periférica del impulsor es constante, con lo que la carga generada por la bomba será siempre la misma, independientemente del fluido que se trate; así la curva de capacidad de carga no depende de la densidad relativa. La potencia varía directamente con la densidad relativa y la eficiencia de la bomba permanece constante, independientemente de la densidad relativa del líquido. 7, 14 y 19

Efecto del cambio de diámetro del impulsor.

La capacidad volumétrica (gasto) varía directamente con el diámetro, la capacidad de carga varía directamente con el cuadrado del diámetro y la potencia con el cubo del diámetro, la eficiencia no tiene ninguna variación. 2, 5, 14, 17, 19 y 21

Efecto del cambio de la velocidad (N)

El gasto varía en proporción directa con la velocidad de la bomba. La carga generada es proporcional al cuadrado de la velocidad, la potencia es proporcional al cubo de la velocidad, la eficiencia de la bomba permanece constante con los cambios de velocidad. 4, 5, 12 y 14

III.3. Leyes de Afinidad de las Bombas.

Considerando los dos últimos efectos como los más importantes o trascendentes se tienen las siguientes relaciones^{1, 5, 14 y 19}.

Con diámetro de impulsor constante :

$$\begin{array}{ll} Q_1 = D_1 & Q_2 = D_2 \\ H_1 = (D_1)^2 & H_2 = (D_2)^2 \\ HP_1 = (D_1)^3 & HP_2 = (D_2)^3 \end{array}$$

Con velocidad constante:

$$\begin{array}{ll} Q_1 = N_1 & Q_2 = N_2 \\ H_1 = (N_1)^2 & H_2 = (N_2)^2 \\ HP_1 = (N_1)^3 & HP_2 = (N_2)^3 \end{array}$$

Donde:

Q_1, H_1, HP_1, D_1 y N_1 son: Gasto, carga, potencia, diámetro y velocidad a la frecuencia en la cual se opera, que es normalmente de 60 Hz.

Q_2, H_2, HP_2, D_2 y N_2 son: Gasto, carga, potencia, diámetro y velocidad que se busca a la nueva frecuencia.

Estas relaciones pueden manipularse fácilmente mediante cualquier artificio matemático, generando las llamadas *leyes de afinidad de las bombas*. Estas relaciones son utilizadas para configurar el comportamiento de cualquier bomba de una velocidad determinada a otra, y se utilizan para condiciones de flujo similares.

De los efectos generados por cada uno de los parámetros y las relaciones generadas por ellos, se obtienen nuevas relaciones, las cuales se utilizan para reconfigurar el comportamiento de la bomba debido al cambio de diámetro del impulsor o la velocidad de rotación del impulsor.

CAMBIO DE DIAMETRO

(D)

$$Q_2 = Q_1 (D_2 / D_1)$$

$$H_2 = H_1 (D_2 / D_1)^2$$

$$HP_2 = HP_1 (D_2 / D_1)^3$$

CAMBIO DE VELOCIDAD

(N)

$$Q_2 = Q_1 (N_2 / N_1)$$

$$H_2 = H_1 (N_2 / N_1)^2$$

$$HP_2 = HP_1 (N_2 / N_1)^3$$

Cuando se tiene el cambio simultáneo de los parámetros involucrados obtenemos las relaciones siguientes:

CAMBIO DE DIAMETRO Y DE VELOCIDAD SIMULTANEO

$$Q_2 = Q_1 [(D_2 / D_1) * (N_2 / N_1)]$$

$$H_2 = H_1 [(D_2 / D_1) * (N_2 / N_1)]^2$$

$$HP_2 = HP_1 [(D_2 / D_1) * (N_2 / N_1)]^3$$

Usando las relaciones se podrán desarrollar nuevas curvas características de las bombas a cualquier frecuencia, ello indica que para cualquier punto de una curva

característica a 60 Hz. se podrá obtener su respectiva proyección a otra nueva frecuencia, utilizando las leyes de afinidad.

A manera de ejemplo, si se realiza un cambio de velocidad, de 60 a 50 Hz., el gasto, la carga y la potencia se conocerán de la siguiente forma:

$$Q_{50\text{Hz}} = Q_{60\text{Hz}} * [N_{50\text{Hz}} / N_{60\text{Hz}}]$$

$$H_{50\text{Hz}} = H_{60\text{Hz}} * [N_{50\text{Hz}} / N_{60\text{Hz}}]^2$$

$$HP_{50\text{Hz}} = HP_{60\text{Hz}} * [N_{50\text{Hz}} / N_{60\text{Hz}}]^3$$

Datos : Diámetro de T.R. = 5 1/2 pg.

Gasto = 1600 bl/día.

A 60 Hz., corresponde una velocidad de 3500 rpm. De gráfica a 50 Hz., se tiene una velocidad de 2915 rpm. Por lo tanto el gasto a la nueva velocidad es:

$$Q_{50\text{Hz}} = 1600 (2915/3500)$$

$$Q_{50\text{Hz}} = 1332.6 \text{ bl/día}$$

Para la carga; el valor obtenido en la curva de 60 Hz, es de 1750 pies, quedando la relación:

$$H_{50\text{Hz}} = 1750 (2915/3500)^2$$

$$H_{50\text{Hz}} = 1214 \text{ pies}$$

Para la potencia; el valor obtenido en la curva de 60 Hz., con el gasto de 1600 la potencia es de 34 Hp. Siendo la potencia a 50 Hz de:

$$HP_{50Hz} = 19.7 \text{ Hp.}$$

Los resultados obtenidos, mediante las leyes de afinidad, se marcan en la Figura III.2, que es la curva a 50 Hz, demostrándose que la bomba sigue trabajando dentro del rango recomendado por los fabricantes y con una eficiencia alta, después del cambio de velocidad.

Como ninguno de los parámetros involucrados afecta la curva de eficiencia, Para generar la curva a la nueva frecuencia se procede de la siguiente manera: Al punto de máxima eficiencia le corresponde un Q_x a 60 Hz, se obtiene el nuevo valor del gasto Q_x a la velocidad que se desea cambiar (Q_{cv}), a este nuevo gasto, también le corresponde el mismo punto de máxima eficiencia. De igual forma se hace al análisis para gastos mayores y menores al punto de máxima eficiencia en la curva de 60 Hz, se calculan los nuevos gastos, a los cuales les corresponderán los mismos valores de eficiencia. Uniendo estos puntos se obtendrá la curva de eficiencia a la nueva velocidad. El punto de máxima eficiencia para las nuevas curvas, ocurre a un gasto menor para velocidades menores a 60 Hz., siendo a un gasto mayor para velocidades mayores a 60 Hz. (Figura.III.3).

Como se menciona anteriormente el rango de operación recomendado por los fabricantes, para la marcha eficiente de la bomba corresponde a 75% y 125% del punto de máxima eficiencia. La intersección de dicho rango con la curva de capacidad de carga generan dos puntos, por cada curva a diferente velocidad. En una gráfica en la que se representen las diferentes curvas de capacidad de carga contra gasto, se marcan los puntos de intersección obtenidos a su respectiva velocidad y gasto. La zona comprendida entre las líneas generadas por dichos puntos, es llamada rango de

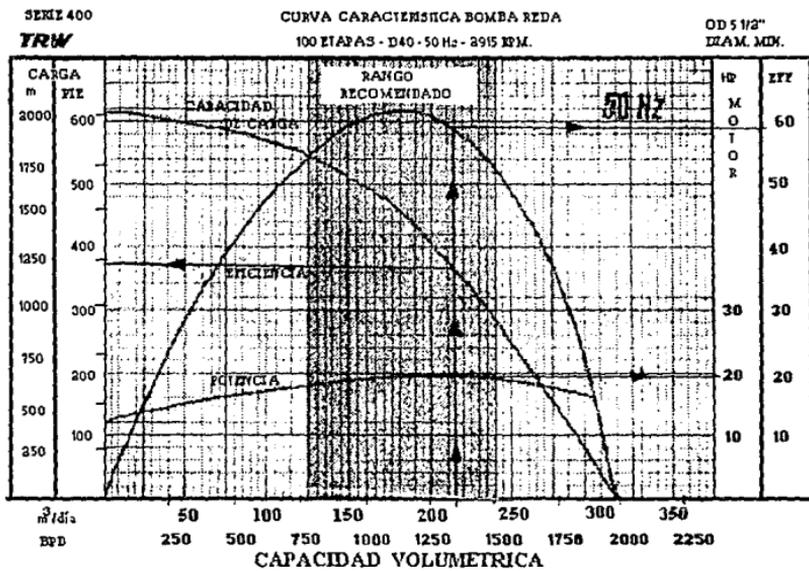


FIGURA III.2 Gráfica de curvas características a 50 Hz.

eficiencia general o *ventana de operación* (Figura III.4), que representa la zona en la cual debe operar la bomba cuando se realizan cambios de velocidad y la que indica el comportamiento de la bomba a su más alta eficiencia.^{4, 5 y 18} Cuando la bomba opera fuera de este rango, se producen empujes axiales sobre la flecha de la bomba, que a su vez generan desgaste y excesivo calor sobre las chumaceras (Figura II.11). Los empujes pueden ser ascendentes o descendentes dependiendo de que la bomba trabaje por arriba o debajo del rango recomendado respectivamente.

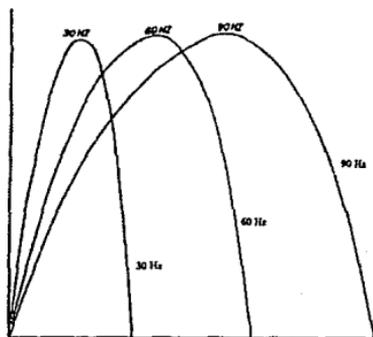
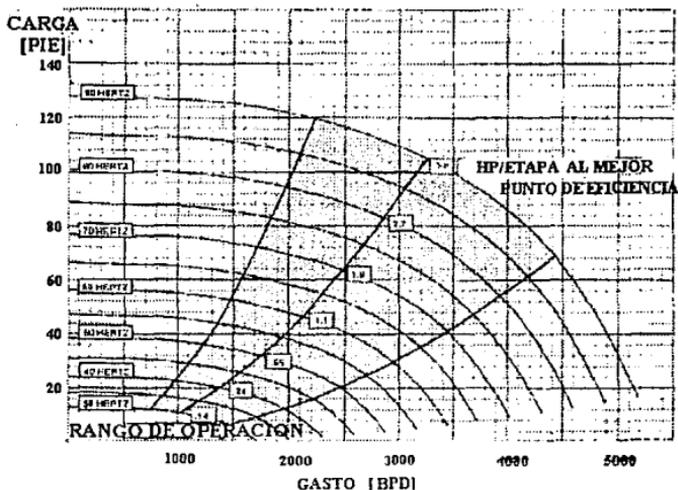


FIGURA III.3 Efecto de la velocidad en la curva de eficiencia.

El uso de las leyes de afinidad es porque en el diseño de un aparejo de bombeo electrocentrífugo se utiliza el controlador de velocidad variable.

El Controlador de Velocidad Variable, tiene la capacidad de cambiar la frecuencia suministrada al motor, lo cual influye directamente en la velocidad periférica de los impulsores.



BOMBA: GC2200



OD 5 1/2" SERIE 513 Sp.Gr.=1.0

FIGURA III.4 Ventana de operación.

III.4. Descripción de las Curvas Características.

Para familiarizarse con las curvas de comportamiento se dará una breve explicación:

La curva de capacidad de carga, muestra la relación entre la capacidad volumétrica (gasto) y la carga generada.

La curva de potencia, muestra la relación entre la potencia necesaria y la capacidad volumétrica (gasto) de la bomba, y es la curva de Potencia-Capacidad; pero generalmente se refiere a ella como la curva de potencia al freno.

La curva de eficiencia, muestra la relación entre la eficiencia y la capacidad volumétrica (gasto), se llama propiamente, curva de Eficiencia-Capacidad.

Generalmente, la gráfica de las curvas características de la bomba es elaborada para una variación de capacidad cero a la capacidad máxima de operación de la unidad. Las escalas en la gráfica para carga, eficiencia y potencia al freno, tienen todas la misma línea base, cero en el vértice inferior izquierdo.

También la gráfica debe contener en su parte superior, el número de etapas para la cual esta diseñada dicha bomba, así como número de serie, frecuencia a la cual opera, velocidad en revoluciones por minuto (rpm) y el diámetro exterior de la bomba correspondiente al diámetro interno de la tubería de revestimiento.

Cada fabricante señala el rango de operación recomendado para su mejor funcionamiento, este rango se localiza en la zona de mayor eficiencia (75%, 125% del punto de máxima eficiencia), mayor potencia y una capacidad de carga media (Figura II.11).

En el extremo izquierdo de la curva, se localiza una escala de carga expresada en metros y pies; la carga por etapa se determina entrando con el gasto en el eje horizontal, de donde se desplaza verticalmente hasta intersectar la curva de capacidad de carga y posteriormente de este punto en forma horizontal hacia la izquierda, hasta el

eje de carga, se obtiene un valor de carga por etapa, el cual se debe multiplicar por el número de etapas de la bomba (Figura III.5).

El requerimiento de potencia, se determina inicialmente de la misma forma que el anterior, pero ahora intersectando la curva de potencia, se desplaza horizontalmente hacia la derecha donde se tiene la escala de potencia en caballos fuerza (HP), también se obtiene un valor de potencia por etapa. Para obtener la potencia total se debe multiplicar el valor leído en el eje de potencia por el número de etapas de la bomba (Figura III.5).

La eficiencia de la bomba se obtiene de manera similar, ahora intersectando la curva de eficiencia y desplazarse hacia el eje derecho donde se encuentra una escala de eficiencia expresada en porcentaje (Figura III.5).

Cabe recordar que para seleccionar una curva característica, se deberá elegir de entre las curvas publicadas por los fabricantes la de la bomba que tenga la más alta eficiencia para el gasto que se desea producir. La bomba seleccionada deberá ser de diámetro exterior menor al diámetro interno de la tubería de revestimiento del aparejo en el pozo a instalar.

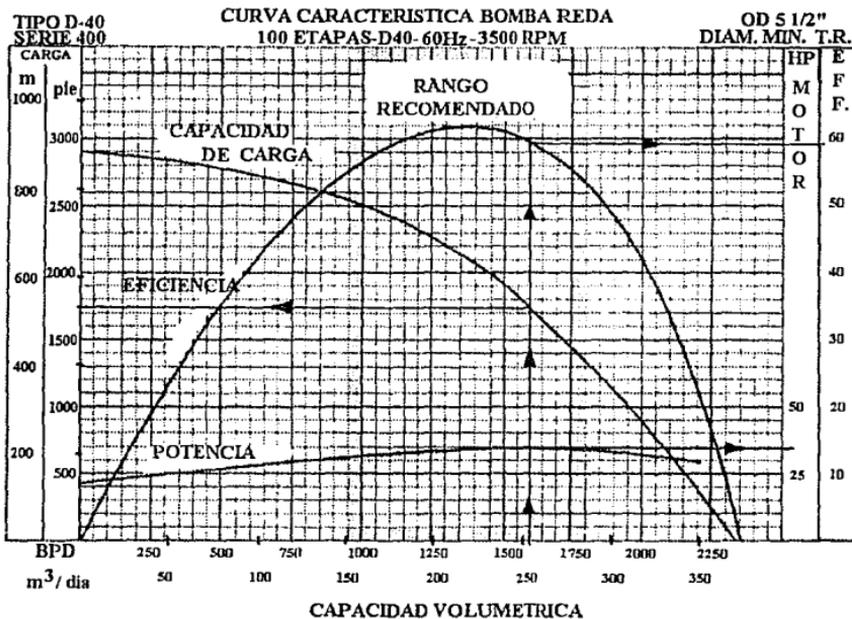


FIGURA III.5 Gráfica de curvas características.

III.5. Aplicación del Controlador de Velocidad Variable en el Sistema de Bombeo Electrocentrifugo.

Para mantenerse a la par con la tecnología, la industria petrolera ha utilizado la transmisión de velocidad variable en el ABE. El uso de esta se remonta al año de 1977. Fue tan eficiente su trabajo que en marzo de 1983 se tenían operando aproximadamente 350 unidades alrededor del mundo⁶ y ¹⁸

La característica de este equipo, es el incremento de los rangos de producción para el sistema (aproximadamente en 150%), eliminando redimensionamientos asociados a operaciones normales de 60 Hz.

Existen en estos momentos tres tipos de Transmisión de Velocidad Variable y son:

- a) Fuente Invertidora de Corriente.
- b) Pulsador de Modulación Media y
- c) Fuente Invertidora de Voltaje Variable (en México se le conoce como *Controlador de Velocidad Variable*).

Todas ellas presentan pros y contras, por lo que una pequeña discusión al respecto será importante para entender porque el Controlador de Velocidad Variable se utiliza con mayor frecuencia.

a) Una Fuente Invertidora de Corriente común, típicamente se utiliza con un rectificador de control de fase (RCF) para generar corriente continua DC. El RCF produce la corriente requerida la cual subsecuentemente es filtrada por un reactor de enlace para corriente continua. El Invertidor entonces produce la corriente de frecuencia variable requerida y cambia el voltaje del motor con la carga.⁶

Sus ventajas son:

- . El costo se justifica en aplicaciones donde no se desea alta torsión en el arranque.

- . El RCF puede utilizarse debido a su bajo costo.

Las desventajas son:

- . Se requiere sobrediseñar la unidad cuando se tiene alta torsión
- . Como el motor se considera parte integral del circuito, hay dificultad para instalar diferentes tamaños de motor con la Fuente invertidora de corriente.
- . Baja eficiencia.
- . Circuito demasiado complejo.

Estos aspectos hacen que dicha transmisión no sea utilizada comunmente.

b) El Pulsador de Modulación Media, generalmente usa un diodo rectificador para producir corriente continua DC. La frecuencia y el voltaje son creados en un invertidor mediante un ciclo de encendido y apagado.⁶ Sus ventajas son:

- Buen factor de potencia al cambio de frecuencia.
- . Eficiente.

Sus desventajas son:

- . Alta tensión en el motor debido a fluctuaciones por ciclo y alto nivel de potencia.
- . Alta torsión en el arranque requiere de un mayor tamaño del Pulsador.
- . Incapacidad para incrementar el voltaje por arriba de los 60 ciclos, ocasionando con ello un sobrediseño del motor.

e) Un Controlador de Velocidad Variable, utiliza un rectificador controlador de fase (RCF) para producir el voltaje requerido.^{5, 6, 14 y 22}

Las ventajas que presenta el Controlador de Velocidad Variable son:

- Voltaje ajustable, pero constante para cada ciclo de salida a cualquier frecuencia. Un voltaje variable por ciclo de salida menor a la relación voltaje/hertz es producida, la cual requiere el motor a cualquier frecuencia. Esto elimina un sobrediseño del motor.
- Elimina las molestias de paro en la unidad ocasionadas por el aligeramiento de la columna hidráulica debido al gas libre, viscosidad intermitente, cambios en los porcentajes de agua y problemas por depositaciones.
- Capacidad para evitar alta torsión al arranque. Por que la bomba centrífuga sumergible muchas veces maneja material extraño a través de las diferentes etapas que ocasionan un arranque difícil, como el desplazamiento del fluido de control, cuando se introduce por primera vez el sistema ABE.
- En pozos que producen fluidos abrasivos (formaciones de arena o de fracturas), se puede producir a bajas velocidades, extendiendo la vida de la bomba, manteniéndola, hasta poder incrementar el flujo y presión cuando los abrasivos disminuyan.
- El consumo de energía puede eliminarse mediante la optimización de la presión de descarga, reduciendo los requerimientos de energía en el arranque, teniendo un bombeo eficiente y continuo dentro del rango de operación de la bomba.
- En aplicaciones a 60 Hz., la producción es limitada por el diámetro de la tubería de revestimiento. Utilizando el CVV la producción es mayor debido al incremento en el rango de operación, para cualquier diámetro.

El aspecto negativo del Controlador de Velocidad Variable es el pobre factor de potencia y bajos voltajes de salida.

Aunque el costo de una Transmisión de Velocidad Variable sea el 30% del total del sistema ABE, el incremento en la producción justifica la instalación de dicho equipo.

Existen comunmente cuatro razones por las que el motor presenta fallas siendo éstas: Efectos transitorios, desequilibrio de voltaje, arranques severos y medio ambiente adverso.

Los efectos transitorios son definidos como disturbios en el sistema eléctrico-electrónico causados por el interruptor de encendido hasta fenómenos meteorológicos como los relámpagos. Un primer efecto quizá no cause daño, pero debilita los aislamientos, haciendo más susceptible a fallas en el siguiente efecto.

Una función del Controlador de Velocidad Variable es prevenir éstos efectos durante el funcionamiento del motor. Esta capacidad alarga la vida útil del motor.

El desequilibrio de voltaje es ocasionado por un sin número de factores, tales como sobrecarga en líneas de distribución, mayores cantidades de carga en una fase simple en el sistema, transformadores abiertos tipo delta, configuración de líneas de potencia, etc. El desequilibrio de voltaje produce un exceso de calor en el motor.

Un motor eléctrico sumergible tiene un estator que genera un campo de fuerzas a 3600 rpm, con el rotor girando aproximadamente a 3500 rpm. Esta diferencia induce corrientes al interior de los conductores del rotor, lo cual es normal. El desequilibrio de voltaje produce también una componente giratoria inversa al campo del estator, dicha componente de velocidad relativa al rotor es de 7500 rpm.

La diferencial de velocidad, aunado a un pequeño desequilibrio de voltaje crea grandes corrientes en el rotor resultando dos problemas:

- 1) Una fuerza de oposición a la torsión y
- 2) Debido a los campos generados y las 7500 rpm se generan pulsaciones en la componente de torque, ocasionando vibraciones en el motor y en la bomba.

Como regla, el incremento en pérdidas de voltaje en el motor y el efecto del calor debido al desequilibrio de voltaje es aproximadamente dos veces el cuadrado del porcentaje de desequilibrio. Por ejemplo, un 5% de desequilibrio causa 50% de incremento en pérdidas de voltaje y generación de calor.

Un Controlador de Velocidad Variable está provisto de tres fases de entrada y transforma la corriente AC a un conductor DC. Las tres fases de salida son creadas por el mismo conductor, eliminando el desequilibrio de voltaje.

El arranque de la bomba puede ser muy nocivo a la instalación. El arranque en el motor produce gran cantidad de torsión. En un arranque normal el motor consume 4 u 8 veces más de energía que en su operación normal. Este tipo de arranque lleva a torsión excesiva de la flecha, quemando el motor y el cable.

Un controlador de velocidad variable reduce el impacto del arranque, iniciando a 10 Hz y llegando en solo diez segundos a 50 ó 60 Hz., reduciendo la torsión en la flecha.

Cuando se instala el Controlador de Velocidad Variable en un aparejo de bombeo electrocentrífugo, se requiere de analizar todo el equipo, esto debido al incremento de los rangos de operación de la bomba a mayores o menores velocidades.

IV. CALCULO DEL VOLUMEN DE GAS A LA PROFUNDIDAD DE COLOCACION DE LA BOMBA

IV.1. Efectos del Gas en el Sistema de Bombeo Electrocentrífugo.

La instalación del aparejo de bombeo electrocentrífugo en pozos con cantidades considerables de gas libre a la profundidad de colocación de la bomba complica el diseño del aparejo, por lo que es conveniente considerar el flujo multifásico a través de la línea de producción.^{22, 23 y 24}

La presencia excesiva de gas en la succión de la bomba crea un ciclo encendido y apagado, por lo tanto una operación irregular se presentará como evidencia en la gráfica del amperímetro, un nivel dinámico mayor y la vida de operación del equipo se verá reducida. Como resultado se tiene la reducción en la producción de aceite y gas e incremento de los costos de operación.

Si existe gas libre en el pozo, es indicativo que a cualquier profundidad se tiene diferente cantidad de gas y líquido, ya que la presión y temperatura no son iguales en ningún punto en el interior del pozo.

El cambio constante de densidad a través del pozo, afecta sensiblemente a las caídas de presión en la tubería y por consiguiente el dimensionamiento de la bomba y el motor.

Como el volumen en la succión de la bomba es mayor que el de la descarga, esto debido al incremento de presión que se imprime a los fluidos desde la entrada hasta la descarga lleva a realizar un diseño telescopiado, de dos o más secciones de bombas con etapas que manejan diferente capacidad volumétrica; operando con máxima eficiencia el volumen variable en el interior de la bomba, redundando en el número de etapas requerido.

También se presenta la necesidad de calcular por intervalos a lo largo de la columna de flujo el volumen de fluidos (la carga generada por ellos), siendo la presión de descarga la sumatoria de cargas de los intervalos considerados.

El funcionamiento de la bomba y del motor se ven afectados por la cantidad de gas libre que pasa a través de la bomba, una mayor cantidad de gas libre y gas en solución tienen un efecto positivo sobre la columna hidráulica, disminuyendo su peso en la tubería de producción, ocasionando que la demanda de potencia del motor sea menor, por otro lado la bomba tendrá que manejar un volumen mayor. Es decir que la capacidad volumétrica de la bomba se incrementa debido al aumento de la relación gas libre-líquido (RGL). Entre más gas este en solución al entrar a la bomba, su comportamiento es más fiel al señalado por sus curvas características.^{17 23 y 25}

Con el propósito de que dichos efectos sean debidamente considerados en el cálculo de: la profundidad de colocación del aparejo, presiones de succión y de descarga de la bomba, variación volumétrica en su interior; es recomendable la aplicación de las siguientes correlaciones:^{22 y 24}

- Orkiszewski.
- Beggs y Brill.
- Hagedorn y Brown.
- Dun y Ros.
- Poettman y Carpenter.

Para el cálculo de propiedades PVT se utilizan las siguientes:

- Lasater, Standing, Vázquez y Beggs para (Rs).
- Standing, Vázquez y Beggs para (Bo).
- Beal-Chew y Conally para viscosidad (μ).

De la combinación de estas correlaciones que reproduzcan con mayor aproximación los datos medidos de la prueba de producción, se elige para calcular los perfiles de presión fluyendo; considerando que en todos los casos se bombea un porcentaje de gas libre.

IV.2. Cálculo del Volumen de Gas a la Profundidad de Colocación de la Bomba.

Los pozos candidatos a producir mediante la instalación del sistema ABE y que producen cantidades apreciables de gas, representan mayores dificultades en su diseño.

La variación de presión y temperatura en el pozo y su efecto en la mezcla de fluidos, a través de la tubería de producción desde el fondo del pozo hasta la superficie, hace indispensable el cálculo del volumen de la mezcla en el punto de colocación de la bomba.^{22,24 y 27} Para obtener con mayor eficiencia las condiciones a la que esta sometida la mezcla se hace uso de correlaciones, como la de Standing. Esta correlación establece relaciones empíricas observadas entre la presión de saturación (Ps) y el factor de volumen del aceite (Bo), en función de la relación gas disuelto-aceite (Rs), las densidades del gas y aceite producidos, la presión y temperatura.

La correlación de Standing esta basada en aceites y gases producidos en California y otros sistemas de crudo de bajo encogimiento.

La relación gas disuelto-aceite se correlacionó de la siguiente forma:

$$R_s = \delta_g \left| \frac{P_b}{18} \right| \left| \frac{10^{0.0125 \cdot \delta_o}}{10^{0.00091 \cdot T}} \right|^{1/0.83}$$

Donde.

P_b= Presión de saturación [lb/pg² abs].

δ_o= Densidad del aceite [API].

δ_g= Densidad relativa del gas.

R_s= Relación gas disuelto-aceite [pie³/bl].

De ésta ecuación despejamos la presión de saturación:

$$P_b = 18 \left| \left| \frac{R_s}{\delta_g} \right|^{0.83} 10^{(0.00091 - 0.0125 \delta_o)} \right|$$

Gráficamente se puede obtener con facilidad la relación gas disuelto-aceite o presión de saturación mediante un nomograma elaborado mediante la correlación de Standing.

El factor de volumen del aceite (B_o), es únicamente un factor usado para predecir el cambio de volumen del aceite que experimenta al cambiar la presión y temperatura. El cambio en el volumen es una combinación de los efectos de compresibilidad, expansión térmica y transferencia de masa.

La correlación empírica para predecir el factor de volumen del aceite fue correlacionada por Standing. El factor de volumen del aceite fue correlacionada con la relación gas disuelto-aceite, temperatura, la densidad relativa del gas y la densidad del aceite, de la forma siguiente:

$$F = R_s \left| \frac{\delta_g}{\delta_o} \right|^{0.5} + 1.25 * T$$

$$B_o = 0.972 + 0.000147 * F^{1.175}$$

También se dispone de un nomograma para obtener el factor de volumen del aceite, mediante la correlación de Standing.

El uso de esta correlación, es de gran utilidad para conocer las propiedades de los fluidos a diferentes condiciones de presión y temperatura dentro del pozo. Para este estudio es de gran importancia pues es una base para determinar la cantidad de gas libre a la profundidad de colocación de la bomba, que implica un diseño del aparejo de bombeo electrocentrífugo eficiente.

IV.3. Efecto de la Cavitación en el Sistema de Bombeo Electrocentrifugo.

Cuando la presión absoluta del líquido en cualquier parte dentro de la bomba, desciende por debajo de la presión de saturación correspondiente a la temperatura de operación, en ese momento se generarán pequeñas burbujas de vapor. Estas burbujas son arrastradas por el flujo del líquido o mezcla, hacia zonas de mayor presión, donde se condensarán. A éste fenómeno se le llama cavitación, la condensación de las burbujas genera un incremento significativo de presión, lo que resulta en algo similar a un golpe o choque. Dependiendo de la magnitud de la cavitación, ésta puede ocasionar la destrucción de las piezas mecánicas, sellos e inclusive del mismo cuerpo de la bomba, en pruebas de laboratorio se han estimado presiones alrededor de 10^4 atm. cuando ocurre el colapso de las burbujas; también durante pruebas controladas con agua indican que el daño ocasionado al metal depende de la temperatura del líquido, cuando se presenta en la succión, el principal daño es en los álabes del impulsor, los cuales sufren desgaste en las partes periféricas. En las bombas centrífugas cuando es insuficiente la carga de succión (presión de entrada), y no está por arriba de la presión de saturación, la parte más sensible usualmente es el lado de baja presión del álabe del impulsor, ocasionando daño al refuerzo del álabe, cambiando como se mencionó la curvatura del impulsor; teniendo como consecuencia efectos directos sobre las curvas características de la bomba, además de afectar considerablemente la capacidad de carga y la eficiencia.^{5, 18 y 19}

El efecto de la cavitación sobre las curvas de comportamiento de la bomba es muy severo puesto que la curva de capacidad de carga, tiene una caída casi vertical y la curva de eficiencia, tiende a reducirse (Figura IV.1).

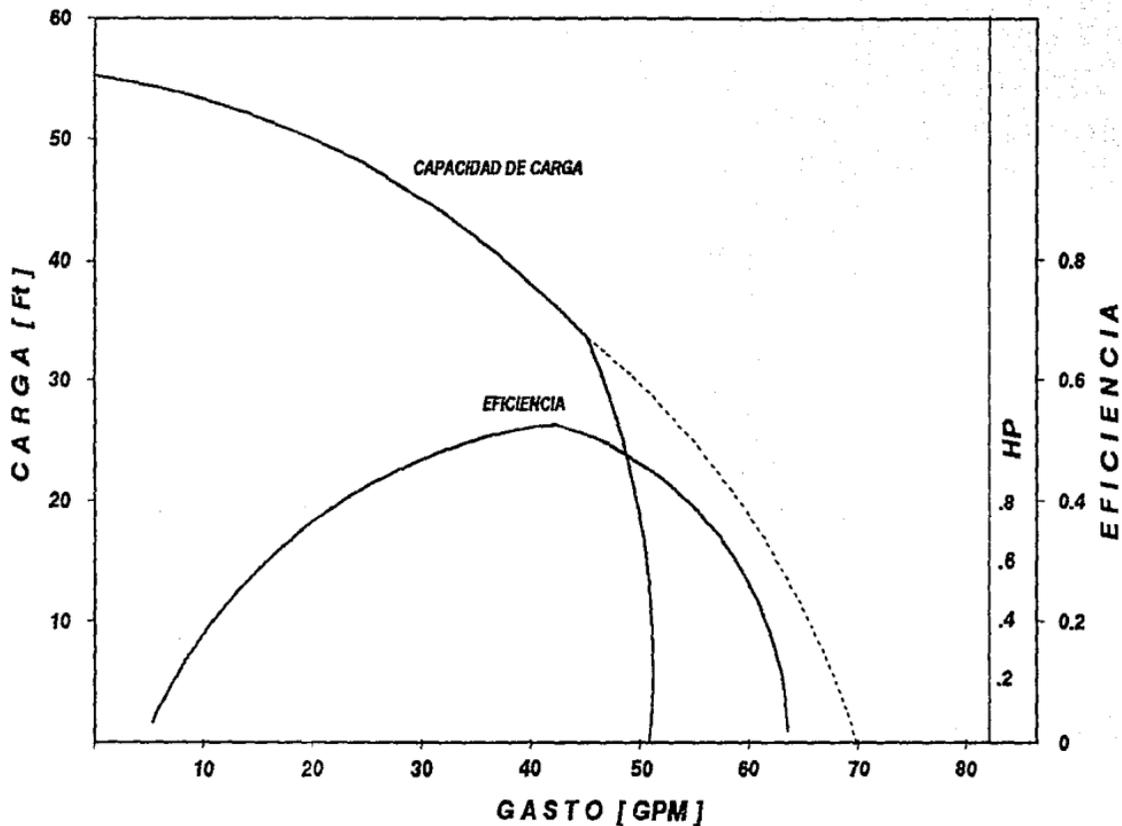


FIGURA IV.1.- Efecto de la cavitación en el comportamiento de la bomba.

IV.4. Pruebas con Fluidos Gaseosos en Bombas Centrifugas.

La presencia de gas libre reconocida como tal, en general es un efecto nocivo en el funcionamiento de una bomba centrífuga sumergible. Se ha realizado una sola prueba para la industria petrolera,^{1 y 2} debidamente documentada durante la existencia del sistema de bombeo electrocentrifugo, en la cual se describen programas de prueba para definir los efectos del gas libre en el funcionamiento de este tipo de bombeo. Los efectos del gas muestran un deterioro de la curva de capacidad de carga, así como áreas de producción inestables (presiones de surgencia) y efectos similares a la cavitación a grandes flujos. Dependiendo de la cantidad total de gas libre a través de la bomba, estos efectos pueden variar desde una ligera interferencia hasta un entrapamiento de gas conocido como "candado de gas". La interferencia por gas es indicada en superficie mediante la gráfica del amperímetro, pues presenta una rápida variación del consumo de energía del motor. El "candado de gas" ocurre cuando la bomba ingiere una cantidad excesiva de gas y de hecho se detiene el bombeo porque su carga (presión) es drásticamente disminuída. Esto causa que el motor trabaje de manera irregular, parando su marcha debido a la baja carga (control de protección).

Cuando se diseña un aparejo de bombeo eléctrico para pozos donde se tiene alta relación gas-aceite, es deseable conocer la cantidad de gas libre que la bomba puede tolerar y comparar esto con las condiciones a la profundidad de colocación de la bomba en pozo.

Las pruebas realizadas consideraron:

- 1) Agua y aire
- 2) Diesel y CO₂.

El propósito de ambas pruebas, fue definir el comportamiento de las etapas de la bomba centrífuga cuando diferentes cantidades de gas libre eran ingestadas en la succión, bajo diferentes condiciones de presión y flujo.

Prueba con Agua-Aire.

El programa de prueba fue diseñado para evaluar el desempeño de la bomba mediante un incremento gradual en el porcentaje de gas libre del volumen total a la entrada de la bomba, hasta que se presentaron fallas a niveles significativos de gas.

Los datos obtenidos fueron reducidos, para compararlos con las curvas de comportamiento publicadas por los fabricantes, incluyendo la carga, eficiencia y los valores de potencia desarrollados por la bomba en prueba.

La potencia del motor que se entrega al sistema fue calculada. Para obtener este valor, el amperaje suministrado al motor fue medido a 400 V., y se utilizó para calcular la curva de potencia. La carga promedio producida (H) en una etapa fue calculada de los incrementos de presión a través de la bomba, también la densidad de la mezcla fue calculada. La eficiencia de la bomba (E) para una etapa fue calculada de la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada de la forma siguiente:

$$E = \frac{\Delta p * 144 * Q}{H_p * 7.48 * 60 * 550 * n}$$

Donde:

Δp : Incremento de presión.

Q: Gasto [gpm]

H_p: Potencia.

n: Número de etapas.

Los resultados obtenidos se comparan con las curvas publicadas en las Figuras IV.2 a IV.8, el principal enfoque fue para el rango de operación recomendado por el fabricante. Cada Figura muestra un valor diferente del porcentaje del volumen total. Los porcentajes de gas libre son valores promedio, debido a que los datos calculados al final, consideran cambios de temperatura. Los resultados muestran el inicio de una fuerte desviación de la curva de carga alrededor del 7% de gas libre del volumen total y

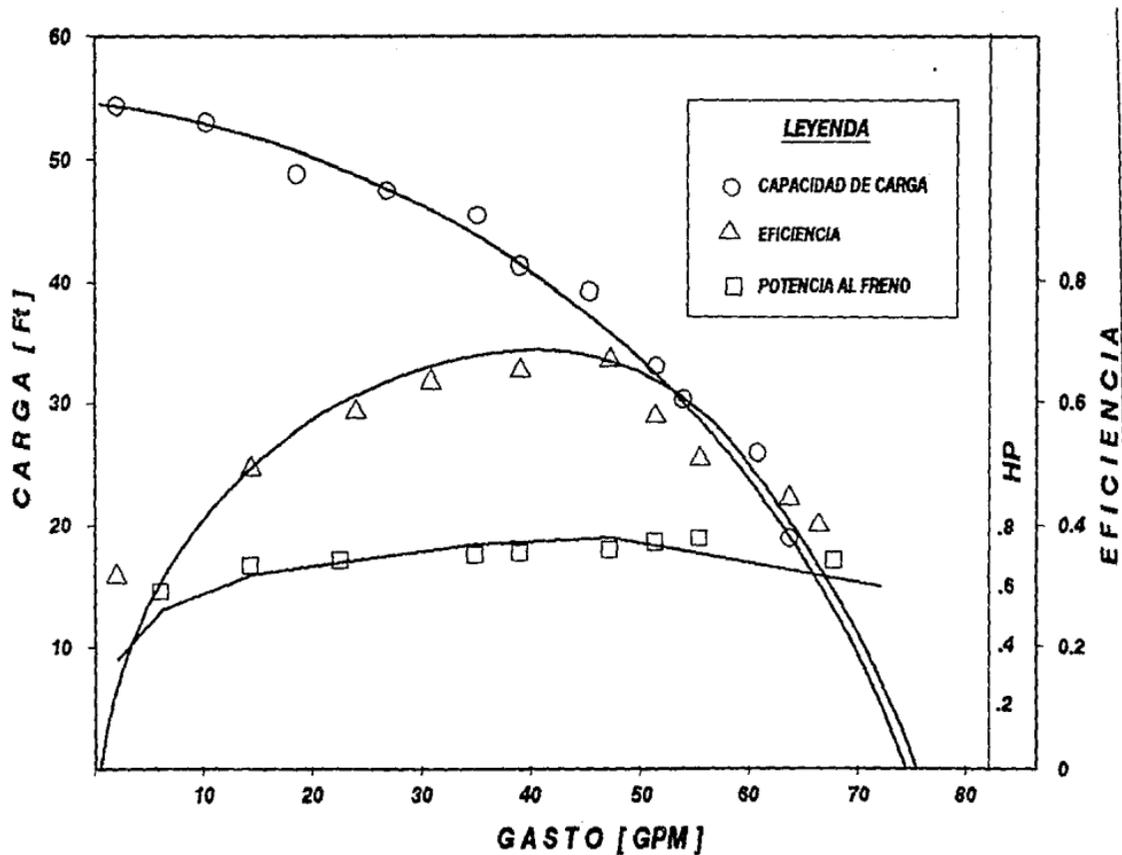


FIGURA IV.2.- Comportamiento de la bomba con 100% agua.

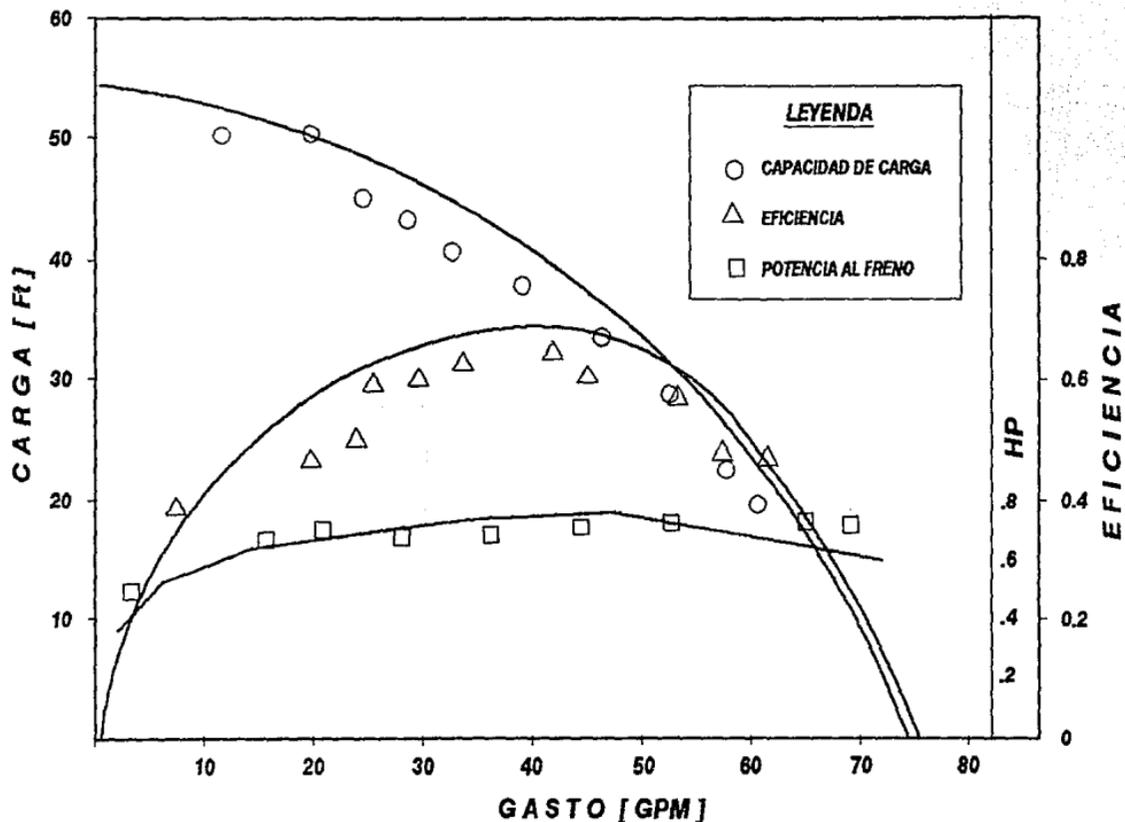


FIGURA IV.3.- Comportamiento de la bomba con 3.1% de gas libre.

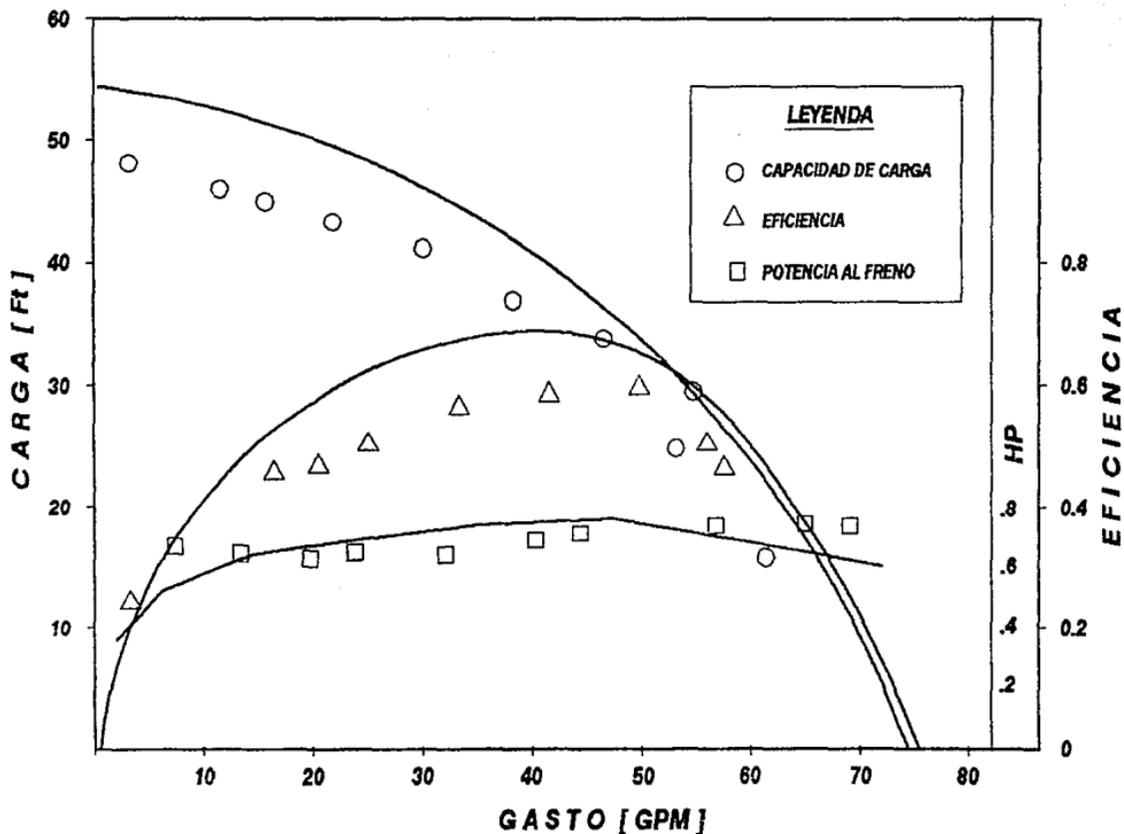


FIGURA IV.4.- Comportamiento de la bomba con 4.5% de gas libre.

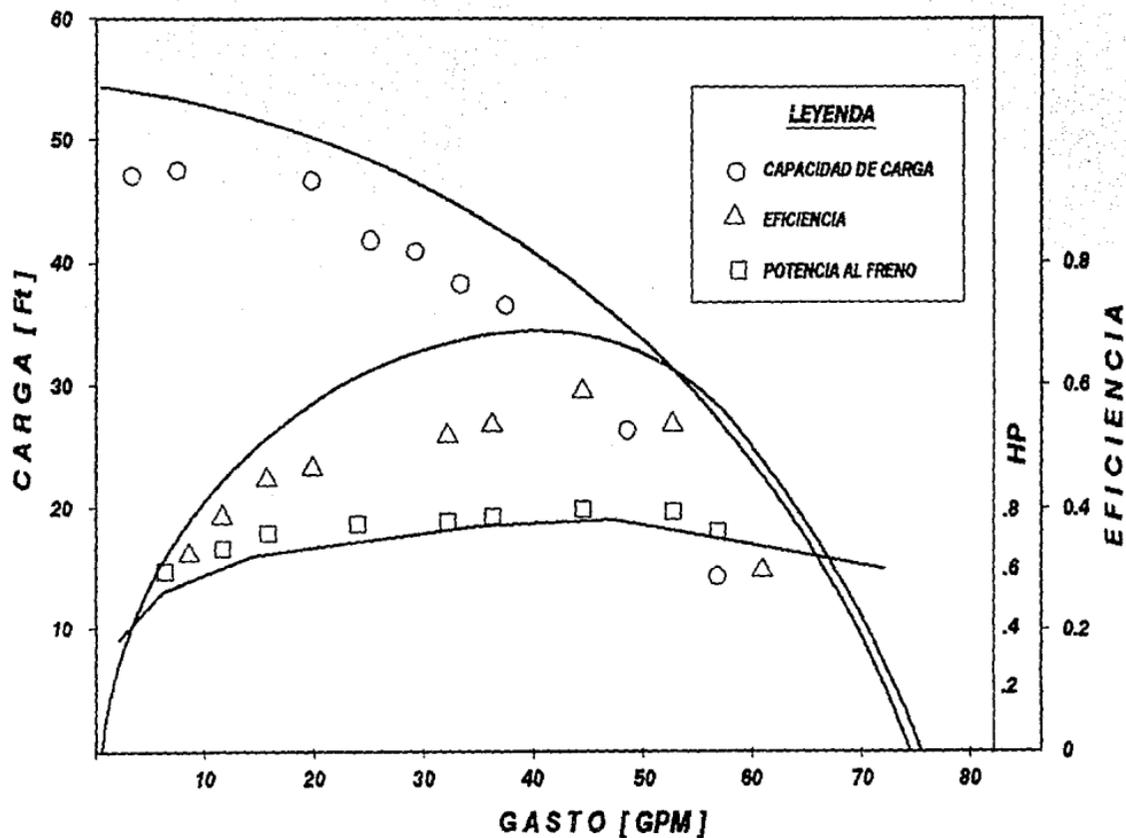


FIGURA IV.5.- Comportamiento de la bomba con 7% de gas libre.

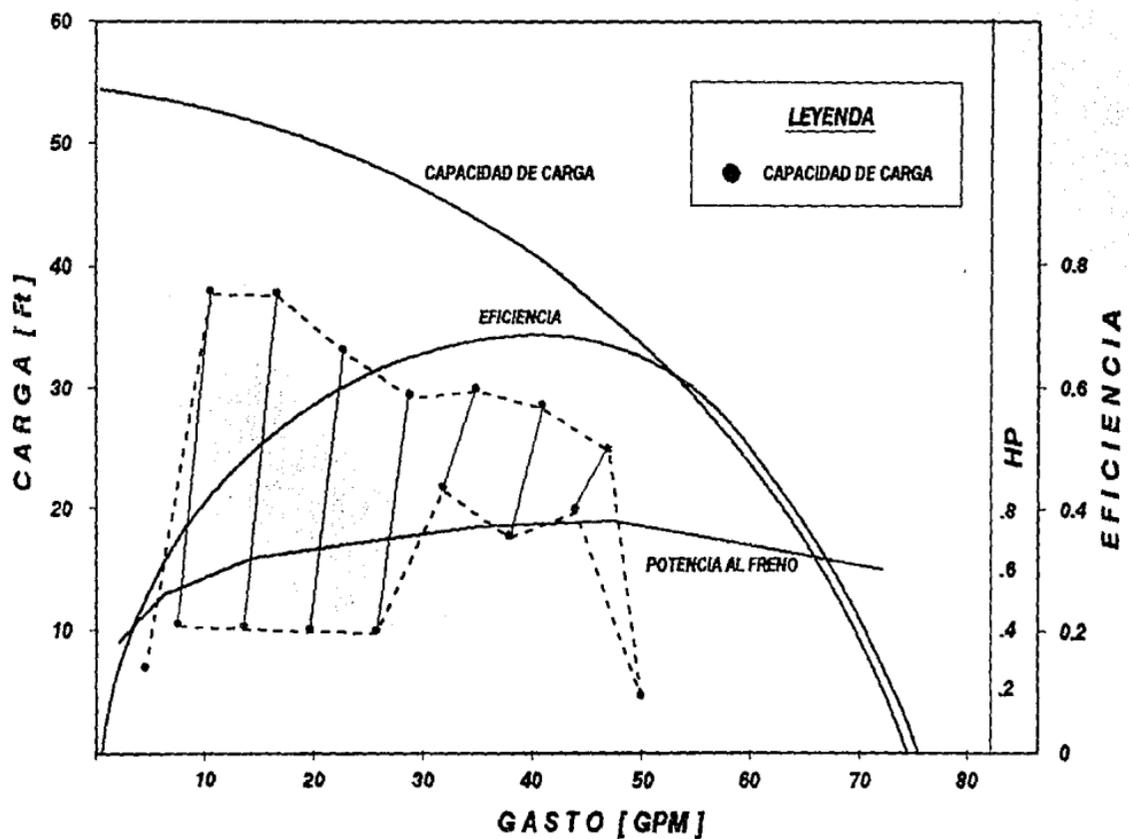


FIGURA IV.6.- Comportamiento de la bomba con 11% de gas libre.

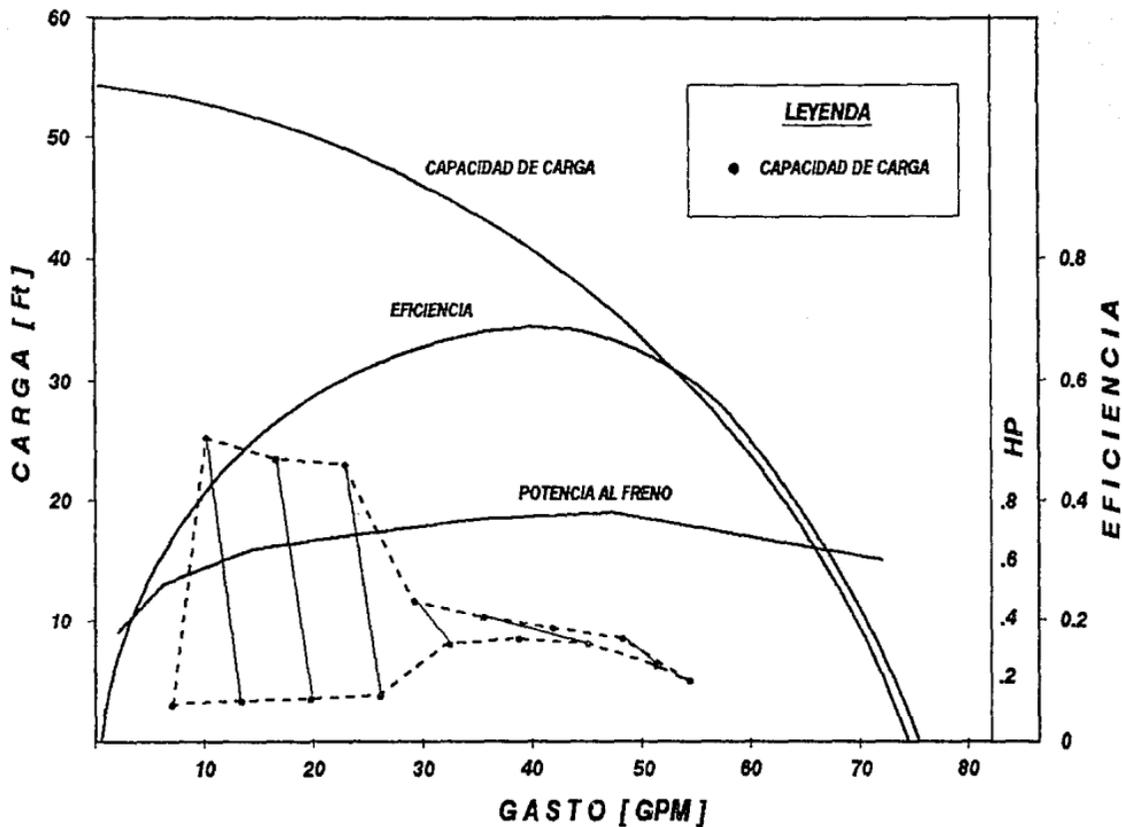


FIGURA IV.7.- Comportamiento de la bomba con 14% de gas libre.

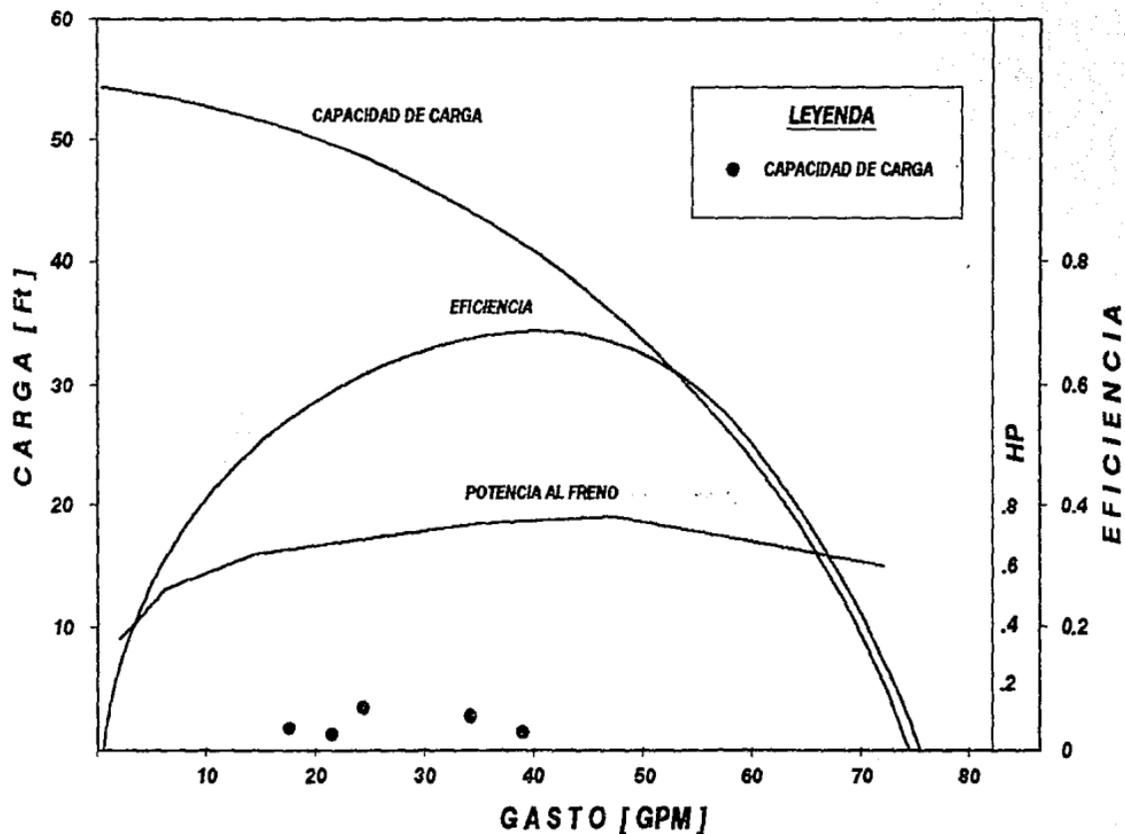
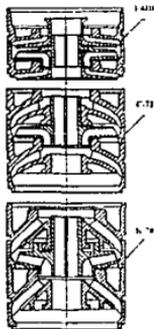


FIGURA IV.8.- Comportamiento de la bomba con 17% de gas libre.

entrapamiento intermitente aproximadamente al 11%. Las líneas de carga que se muestran en las Figuras IV.6 y IV.7 indican que la carga osciló de valores mayores a menores en un lapso de uno a dos segundos. Esto corresponde a una severa oscilación en las gráficas del amperímetro. Si bien hay una carga periódica fija para un volumen superior al 11 % de gas en la entrada de la bomba, se ve efectivamente que el comportamiento en cualquier punto no es ni siquiera aproximado a los valores de carga publicados, una vez que el porcentaje por volumen de gas excede algún valor entre 7 y 11% del volumen de entrada.

Prueba con Diesel-CO₂.

El programa de prueba incluyó bombas centrífugas convencionales (etapas radial y axial) y nuevos diseños para fluidos gaseosos (etapa mixta), que se muestran en las Figuras IV.9, IV.10 y IV.11. Los datos recopilados incluyeron gasto, presión diferencial de la bomba, presión en la tubería de revestimiento, velocidad de la flecha de la bomba y temperatura de descarga de la bomba.



FIGURAS IV.9, IV.10 y IV.11 Etapas de las bombas en prueba.

Los datos obtenidos de las diferentes mezclas de fluidos y pruebas de presión fueron graficadas como curvas de presión/gasto y comparadas con curvas de presión/gasto de la misma bomba con 100 % de diesel.

Los resultados de las pruebas de diesel/CO₂ se muestran en las Figuras.IV.12 a IV.19. Las tres primeras gráficas (Figuras. IV.12, IV.13 y IV.14) corresponden a pruebas realizadas en la bomba I-42B y muestran la variación del porcentaje gas/liquido, para diferentes presiones de entrada. La presión fue convertida a carga (pie), para compararlas con las gráficas de la prueba aire-agua.

Se tienen tres diferentes conclusiones de las pruebas realizadas, analizando las Figuras de comportamiento de las bombas y son:

1. El desempeño de la bomba es una función tanto del porcentaje de gas libre como de la presión de succión. En general la medición de la carga a la derecha de las curvas de comportamiento tienen un descenso de presión en la entrada. Las presiones de entrada más altas requieren un porcentaje más bajo de compresión de gas a través de la bomba.
2. A porcentajes mayores del 15 % del volumen total, la bomba entra en un área de severa oscilación de carga con gastos menores que el volumen de flujo en el punto de diseño, el cual en este caso fue de 50 gal/min. Finalmente:
3. A porcentajes mayores, la curva de carga toma un declive casi vertical, similar al efecto de cavitación.

El efecto del CVV se muestra en la Figura IV.15. Una misma bomba fue probada a diferentes velocidades, para investigar los efectos de la velocidad. en la capacidad de manejo de la bomba, cuando se tiene gas. El comportamiento obedece a las leyes de afinidad de las bombas.

Los efectos del gas libre sobre el funcionamiento de diferentes tipos de etapas (mixtas y radiales) se muestran en las Figuras IV.16, IV.17, IV.18 y IV.19.

Ambas etapas son diseñadas para condiciones similares, por lo que la diferencia para manejar gas estriba únicamente en el diseño. De las figuras se nota que aunque ambas etapas tienen una región surgente, el diseño para flujo mixto tiene un menor deterioro en su curva presión/gasto.

Cabe mencionar que para ambas pruebas, se presenta un región de surgencia a gastos menores que el de diseño (C-72, $Q_d = 73$ gpm. y K-70, $Q_d = 80$ gpm.), cuando el porcentaje de gas presente en la entrada excedió la máxima cantidad permisible por la bomba sin que se afecten las curvas características de la bomba (límites críticos). El máximo porcentaje de gas para la prueba agua-aire a 25 lb/pg^2 fue de 10 %. Para la prueba Diesel- CO_2 se localizó al 15 % con 50 lb/pg^2 .

Para gastos por arriba de el diseño y a presiones de entrada bajas, el gasto-cero, la carga-máxima y la carga-cero, el gasto-máximo continuamente disminuyen con la presencia de gas, generando curvas de carga con la apariencia de funcionamiento con cavitación. Conforme la presión de entrada es incrementada y el volumen de gas disminuye, las curvas de carga se mueven hacia arriba y a la derecha, pero se mantienen alejadas del comportamiento de las curvas para 100% líquido (Figuras IV.12, IV.13 y IV.14).

El uso de un impulsor para flujo mixto, comparado con un impulsor de flujo radial, incrementa el desempeño a la derecha del punto de diseño, pero la surgencia se presenta aún a la izquierda para volúmenes mayores de gas ($> 15 \%$), como se muestran en las figuras IV.18 y IV.19.

Los resultados enfatizan la necesidad de calcular el volumen de gas en el pozo a la profundidad de colocación de la bomba y de esta manera realizar un adecuado diseño de la bomba y el equipo.

Reducción del gas en la succión de la bomba mediante la utilización del separador centrífugo.

El deterioro del funcionamiento de bombas centrífugas sumergibles a consecuencia del gas en la succión, ha sido explicado. Resultados de pruebas de laboratorio y de campo, utilizando separador de gas centrífugo en la instalación del aparejo, indican eficiencias de separación del 90% del gas¹⁵ y ¹⁶. Los cálculos de las pruebas de aire-agua y diesel-CO₂, indican que a un 15% del volumen total, el comportamiento de la bomba es irregular. El separador centrífugo parece ser una buena opción u alternativa para el bombeo de fluidos gaseosos (alta RGA) y además para reducir la cantidad de gas libre que se localiza en la succión de la bomba. La utilización del separador comienza a ser útil, sin embargo habrá que monitorearlo bajo diversas condiciones de operación.

Cabe hacer mención que con la utilización del separador centrífugo la vida del equipo es extendida en un promedio de 60 a 70%. Estos resultados influyen en los costos de operación, que de la misma manera se ven reducidos.

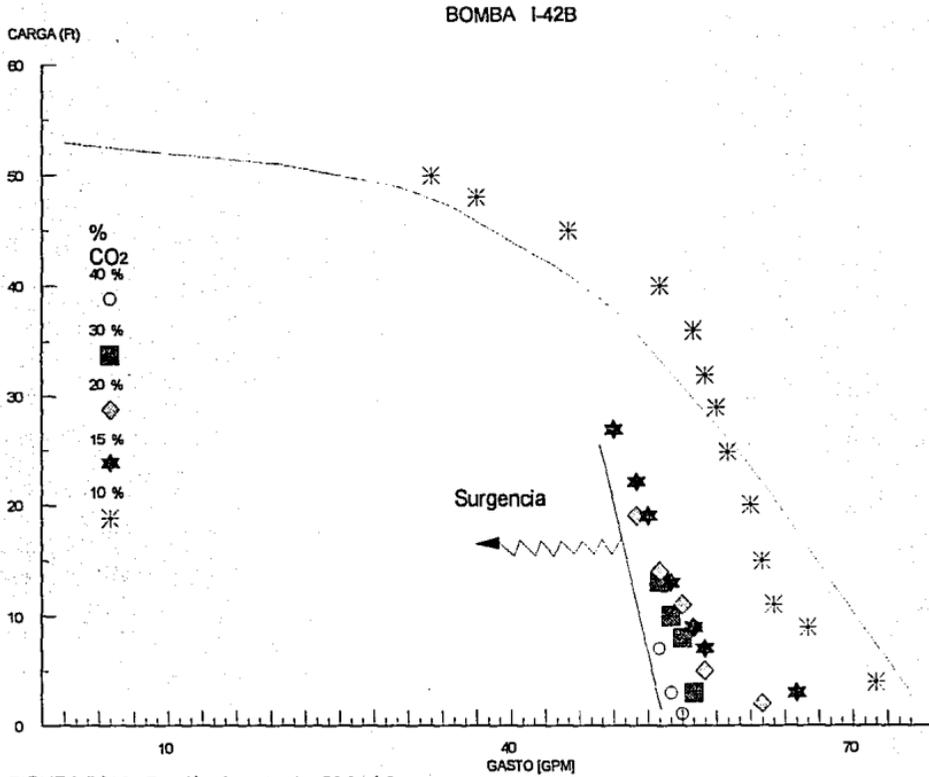


FIGURA IV.12 Presión de entrada 50 [psia]

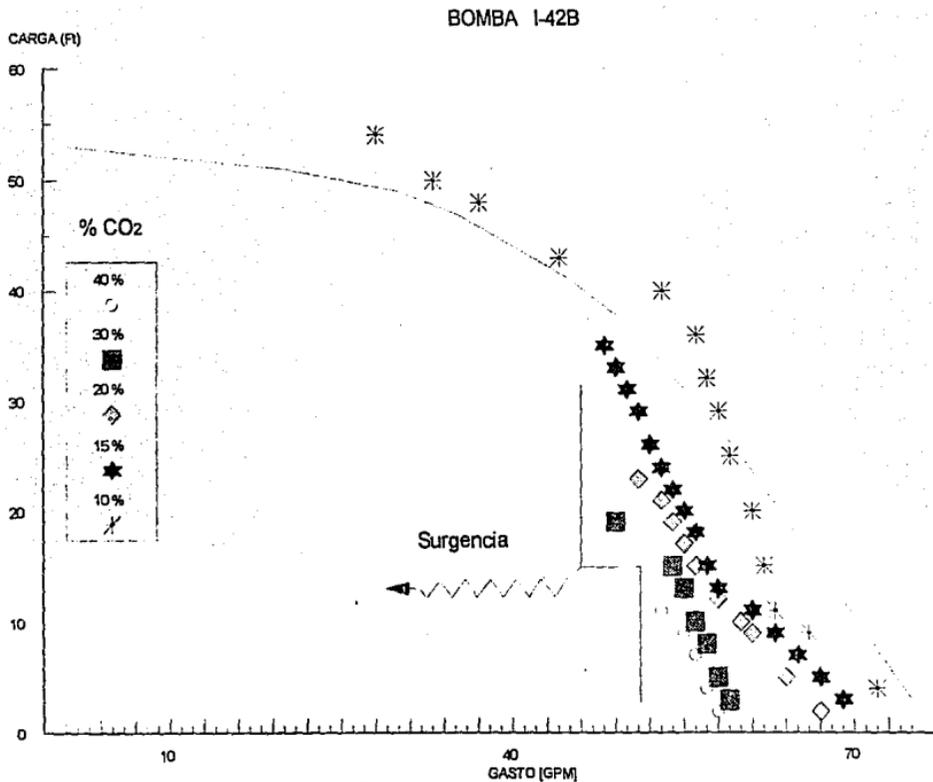


FIGURA IV.13 Presión de entrada 100 [psia].

BOMBA I - 428

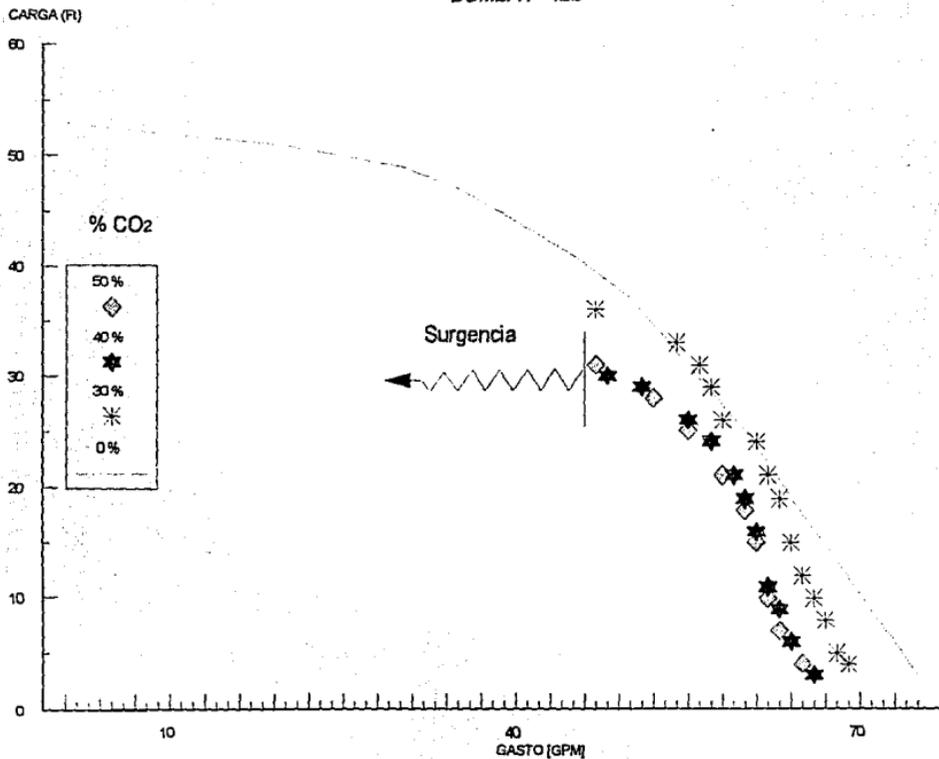


FIGURA IV.14 Presión de entrada 400 [psia]

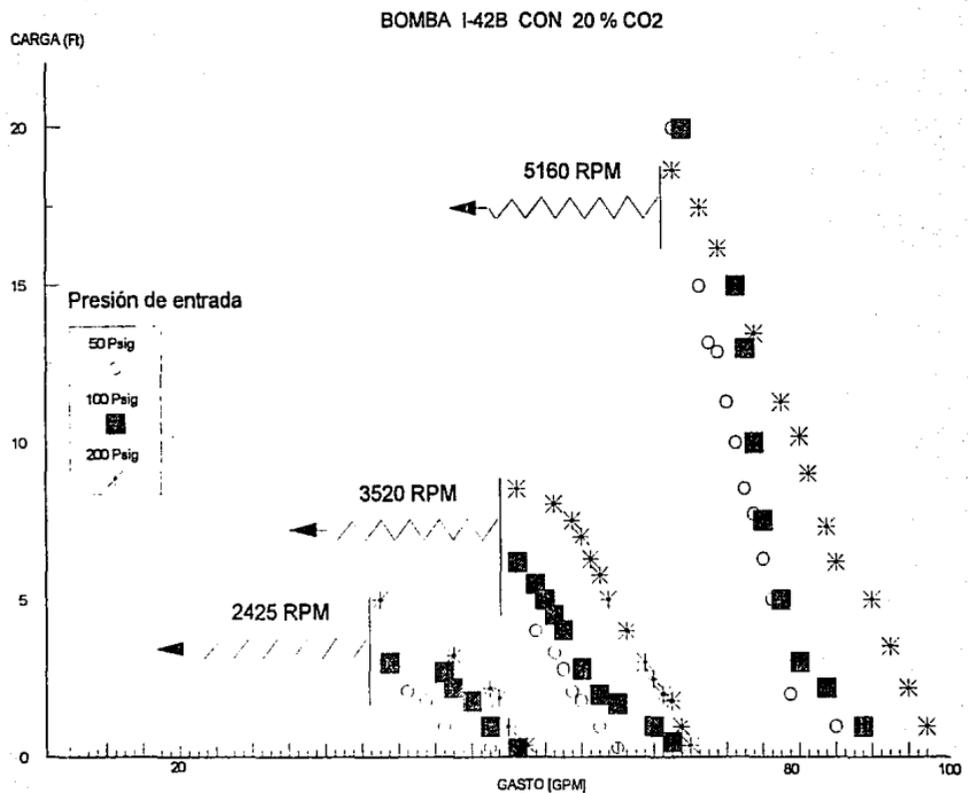


FIGURA IV.15 Variación de la velocidad.

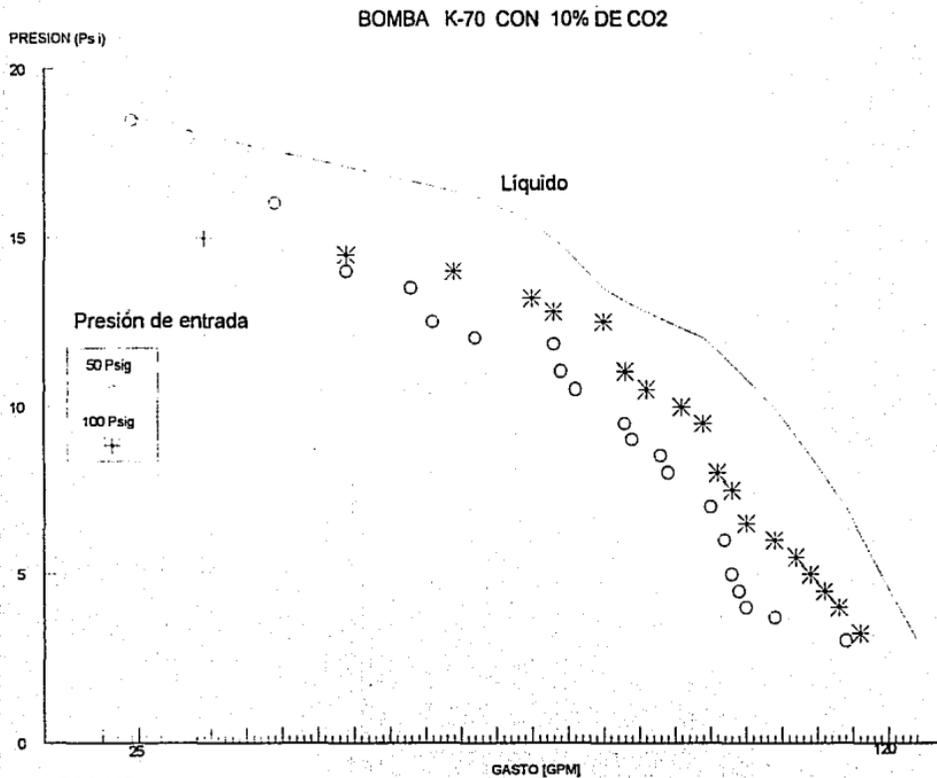


FIGURA IV.16 Comportamiento de la bomba.

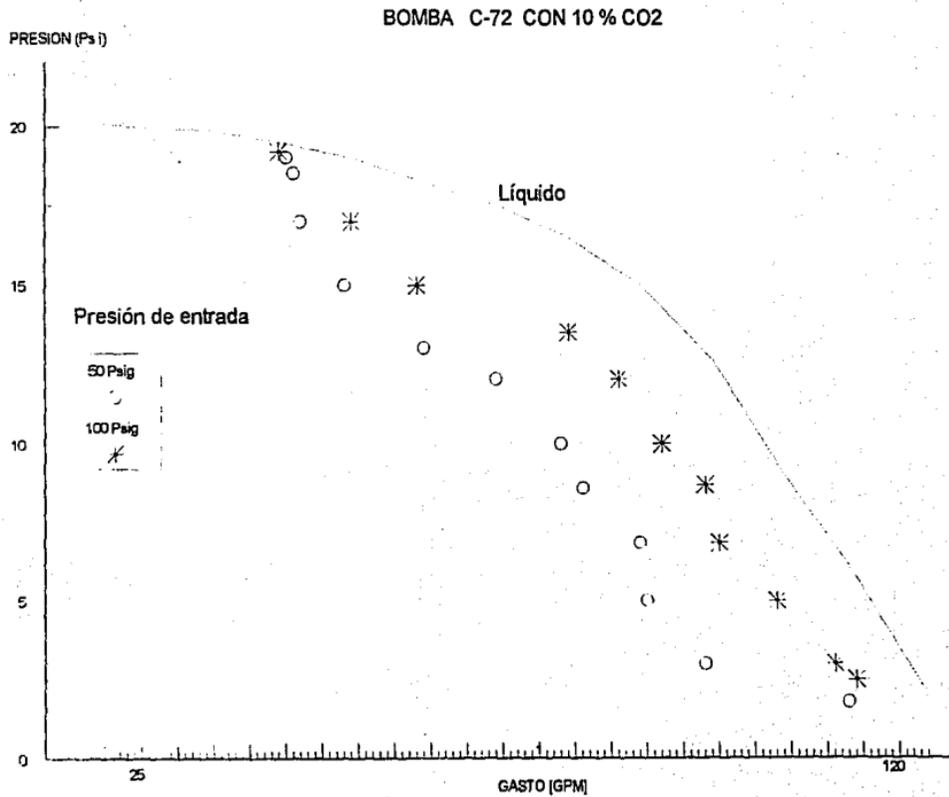
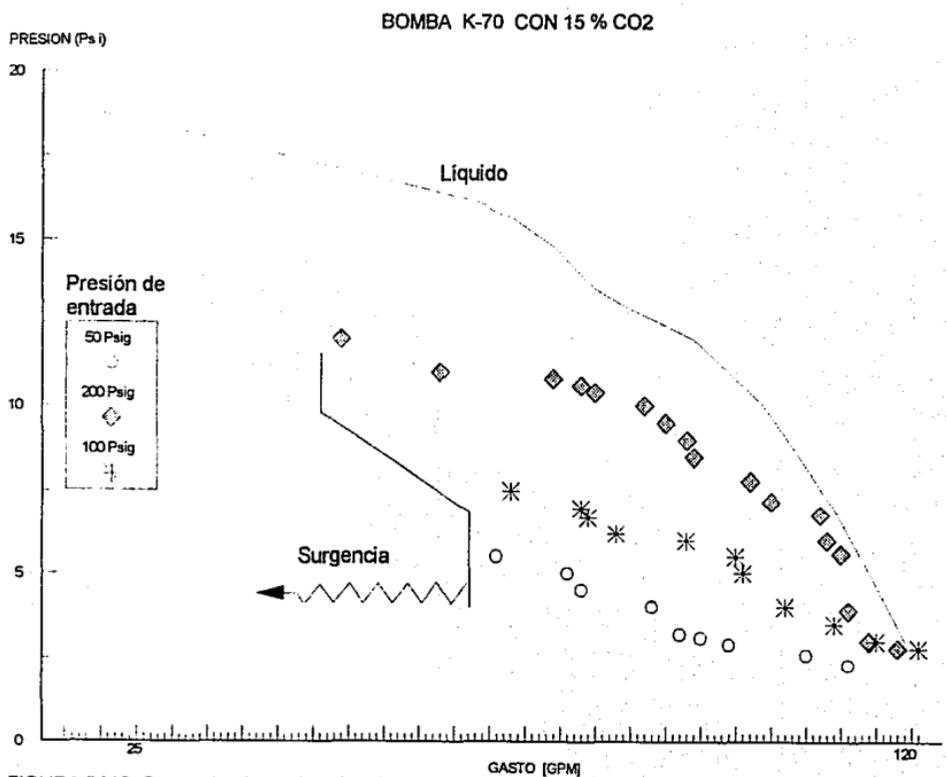


FIGURA IV 17 Comportamiento de la bomba.



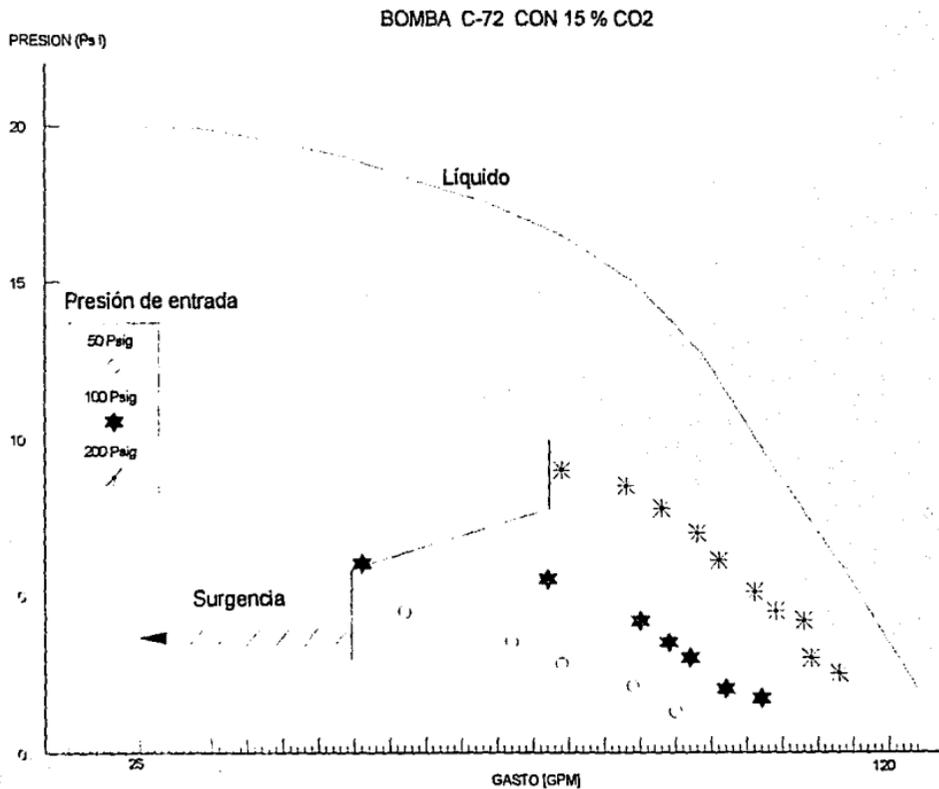


FIGURA IV.19 Comportamiento de la bomba.

V. DISEÑO DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO CONSIDERANDO LA PRESENCIA DE GAS LIBRE.

V.1. Información Requerida.

El diseño de una bomba sumergible que opera a velocidad variable, en la mayoría de las aplicaciones es relativamente sencillo, cuando se han entendido los fundamentos básicos del equipo sumergible y las leyes de afinidad de las bombas.

Para poder elegir un aparejo de bombeo electrocentrífugo como sistema artificial de producción, es necesario recopilar información confiable que asegure una operación eficiente^{6, 8 y 14}. Por lo que la siguiente información debe ser estimada:

Datos del pozo: Diámetro y peso de la tubería de revestimiento (T.R.), diámetro de la tubería de producción (T.P.), así como el tipo de cuerda, intervalo disparado (profundidad media de producción).

Datos de Producción: Presión de descarga en la cabeza, nivel dinámico del fluido (P_{wf}) o presión a la entrada de la bomba (en la succión), nivel estático del fluido (P_{ws}), temperatura del fondo, relación gas-aceite e intervalo actual de producción.

Condiciones del fluido: Densidad relativa del fluido, presión de saturación del gas, viscosidad del aceite y densidad relativa del gas.

Fuente de poder: Disponibilidad de la energía (Voltaje primario), o bien frecuencia y capacidad de la fuente de poder.

Posibles Problemas: Considerar presencia de gas, temperatura de fondo, corrosión, arena, parafina, emulsiones y depositaciones.

El tamaño y peso de la tubería de revestimiento, establece el diámetro del motor, y la bomba. La profundidad total, como la del intervalo disparado determinan la posible profundidad de colocación de la bomba. El voltaje disponible determinará el tamaño de los transformadores, cable y otros componentes eléctricos. El tamaño de la T.P. generalmente está asociado con el diámetro de la bomba. El tamaño de la bomba determina las pérdidas por fricción que deben incluirse en la carga dinámica total (CDT). El tamaño y tipo de rosca debe conocerse a fin de que las válvulas de contrapresión, de drene y el cabezal del aparejo puedan seleccionarse adecuadamente. La temperatura en el pozo, debe ser considerada para conocer las condiciones de operación del motor pues de ella dependerá la longevidad de la bomba. De igual forma para la selección del cable es un parámetro primordial.

La viscosidad afecta el comportamiento de las bombas, reduciendo su capacidad de carga y disminuyendo su eficiencia, ocasionando que al punto de máxima eficiencia ocurra a un menor gasto. Cuando se producen fluidos viscosos la selección de la bomba será de mayor capacidad y mayor carga, lo cual aumenta considerablemente el tamaño del motor requerido.

Con el comportamiento de flujo se establece la máxima capacidad de producción y también se determina la presión para cualquier gasto menor al máximo. Se utiliza el índice de productividad constante (J), si a la profundidad de colocación de la bomba todo el gas esta en solución. De otro modo, la curva de comportamiento de afluencia (IPR), se usa cuando la presión del yacimiento está por debajo de la presión de saturación en el flujo hacia el pozo, causando que el gas se libere y existan dos fases.²²

V.2. Procedimiento de Diseño.

El siguiente procedimiento^{1, 14, 18 y 24}, representa claramente el diseño de un aparato de bombeo electrocentrífugo cuando se tiene presencia de gas libre en la succión de la bomba.

1. Teniendo la información anteriormente mencionada, el gasto que se desea producir en superficie y la presión en la cabeza del pozo, con la ayuda de la ecuación empírica de Vogel, se determina la presión de fondo fluyendo (P_{wf}).

$$Q_0 \text{ max} = \frac{Q_0}{1 - 0.2 (P_{wf} / P_{ws}) - 0.8 (P_{wf} / P_{ws})^2}$$

Donde:

Q_0 = Gasto [m^3/d]

Q_{max} = Gasto máximo [m^3/d]

P_{wf} = Presión de fondo fluyendo [Kg/cm^2]

P_{ws} = Presión de fondo estática [Kg/cm^2]

2. Obtener el perfil de presión ascendente, a partir de la presión de fondo fluyendo (P_{wf}) correspondiente al gasto deseado, dicho perfil se calcula con la relación gas-liquido natural (RGL), hasta el punto donde la cantidad de gas libre a condiciones de escurrimiento, menos la fracción que el separador envía al espacio anular sea igual a la cantidad de gas libre que la bomba acepte (Figura V.1).

$$G_l @ c.e. = (RGA - R_s) * \left(\frac{B_g}{B_o} \right) \quad [m^3 g/m^3 @ c.e.]$$

$$G_l * (1 - Ef_{sep}) = G_{ltb} \quad [m^3 g/m^3 @ c.e.]$$

Donde:

Efsep = Eficiencia del separador de gas.

Gltb = Relación gas libre-aceite que tolera la bomba.

La profundidad de colocación de la bomba y presión de succión, serán las coordenadas de dicho punto (A).

3. Calcular el perfil de presión descendente partiendo de la presión requerida en la cabeza del pozo, con la relación gas-líquido (RGL) menos la cantidad de gas libre enviado al espacio anular, hasta alcanzar la profundidad de colocación de la bomba (Figura V.1).

4. Calcular la Carga Dinámica Total (CDT), que es el incremento total de presión requerido, y que la bomba debe imprimir a los fluidos para vencer la longitud hidráulica, y llevarlos a la superficie, siendo equivalente a:

$$P_d - P_s = \Delta P_t$$

Donde:

Pd: Presión de Descarga.

Ps: Presión de Succión.

ΔP_t : Incremento total de Presión Ejercido por la Bomba.

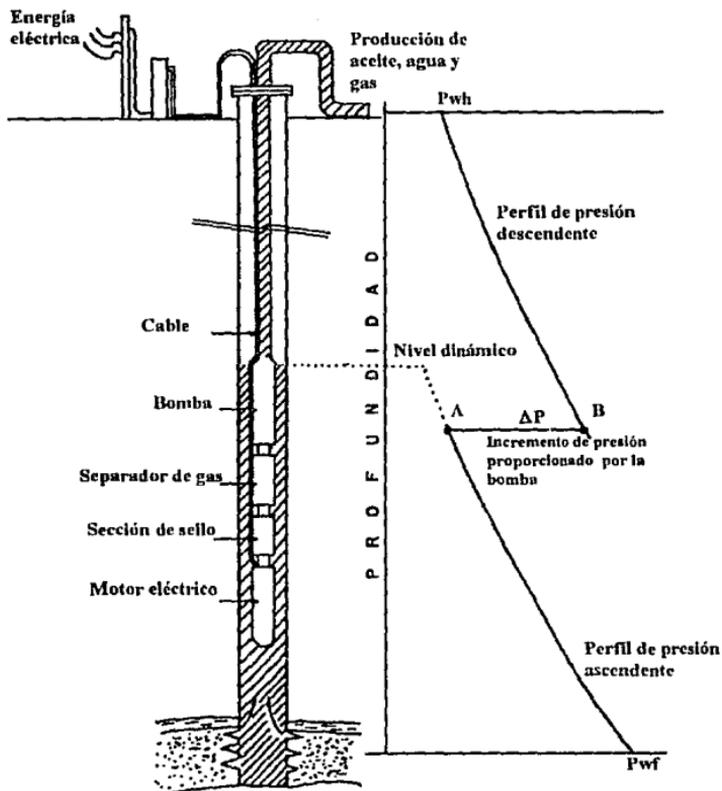


FIGURA V.1 Gradientes de presión fluyendo

5. Teniendo el incremento total de presión se divide en "n" incrementos iguales.

$$\frac{\Delta P_t}{n} = \Delta P_i$$

Cabe mencionar que el volumen que llega a la succión será diferente del que se tenga en la descarga y aún más diferente al que se obtenga en la superficie. En cada etapa la presión se va incrementando, lo que ocasiona que el volumen de la mezcla se reduzca, ocasionando que las etapas siguientes tengan menor capacidad volumétrica. Por lo tanto, la bomba puede manejar una o más secciones de etapas con diferente capacidad volumétrica, manejando con máxima eficiencia el volumen de fluido variable en el interior de la bomba.

6. Calcular el gasto, masa y densidad de la mezcla a condiciones de presión inicial y final del incremento "n".

$$V = B_o + \frac{(Q_t - Q_o)}{Q_o} * B_w + (RGA - R_s) * B_g \quad [m^3 o, g, w @ c.e. / m^3 o @ atm]$$

Donde:

V = Volumen de la mezcla a condiciones de escurrimiento entre volumen de aceite a

condiciones atmosféricas.

Q_t = Gasto total de líquido [$m^3 / día @ c. atm.$]

Q_o = Gasto de aceite [$m^3 / día @ c. atm.$]

B_w = Factor de volumen del agua.

$$Q_b = V * Q_o$$

$$[m^3 o, g, w @ c.e./día]$$

Q_b = Gasto de la mezcla a condiciones de escurrimiento.

$$M = RGA * \delta_g + \delta_o + \delta_w * [Fa/(1-Fa)] \quad [Kg/m^3]$$

M = masa

δ_g = Densidad del gas [kg/m^3]

δ_o = Densidad del aceite [Kg/m^3]

δ_w = Densidad del agua [Kg/m^3]

Fa = Fracción de agua.

$$\delta_m = M / V \quad [Kg/m^3, o, g, w @ c.c.]$$

δ_m = Densidad de la mezcla.

7. Obtener la densidad relativa promedio de la mezcla en el intervalo "n" :

$$\delta_{rm} = \delta_m / \delta_w$$

8. Calcular el gradiente de presión en los puntos inicial y final del incremento "n" y el gradiente de presión promedio entre estos puntos:

$$\text{Grad. presión} = Gr = \delta m / 100 \quad [Kg/cm^3/m]$$

9. Calcular el gasto promedio en el intervalo "n".

10. Seleccionar el grupo de curvas características de bomba que tengan un diámetro exterior menor al diámetro interior de la tubería de revestimiento, así como la de la bomba que tenga la más alta eficiencia para el gasto deseado.

Como el volumen de la mezcla va reduciéndose progresivamente con los incrementos de presión en el interior de la bomba, la gráfica de las curvas características seleccionadas puede variar, lo que lleva a que el manejo de la capacidad volumétrica de las primeras etapas este fuera del rango de máxima eficiencia, por lo que se seleccionará otra gráfica que cumpla con ello. Esto causa que el diseño sea de dos secciones o más.

11. para el cálculo de la carga total desarrollada y la potencia que se requiere por etapa para un gasto promedio, leer en las curvas características los valores correspondientes.

12. Determinar el incremento de presión por etapa, multiplicando por el gradiente promedio de la siguiente manera:

$$\Delta P_e = \frac{H}{\text{etapa}} * Gr \quad [Kg/cm^2] \text{ etapa}$$

Donde:

ΔP_e = Incremento de presión por etapa.

$H/et.$ = Carga de columna de fluido por etapa [m/etapa]

13. Calcular el número de etapas requerido por la bomba, para suministrar la carga para impulsar al gasto deseado.

$$\text{Número de etapas} = Ne = \frac{\Delta P_i}{\Delta P_e}$$

14. Calcular la potencia requerida por el motor, utilizando la densidad relativa del fluido producido, multiplicar la potencia por etapa por el número de etapas y por la densidad relativa promedio del intervalo "n".

$$HP = \frac{Hp}{\text{etapa}} * Ne * m$$

HP = Potencia requerida para impulsar las etapas del intervalo "n".

Se deberá seleccionar el motor que tenga el valor más próximo (superior preferentemente) a la potencia requerida. Respecto del protector este será generalmente de la misma serie del motor seleccionado.

15. Sumar al valor "n" la unidad y repetir los cálculos señalados a partir del punto 6 hasta que la presión final del incremento "n" sea igual a la presión de descarga de la bomba.

$$Pd = Ps + \sum_{n=1}^n \frac{\Delta Pt}{n}$$

El número total de etapas y la potencia total requerida, se obtienen sumando los valores calculados en los puntos 11 y 12 respectivamente, cada vez que se repiten los cálculos (n veces).

16. Seleccionar el tamaño y tipo de cable más económico, considerando el medio ambiente del pozo.

17. Determinar las pérdidas de voltaje en el cable y el voltaje superficial requerido. Este valor establece el tamaño del tablero de control.

18. Calcular los requerimientos de "poder" (Kva) a fin de dimensionar los transformadores de la siguiente manera:

$$Kva = \frac{Vs * Amp * 1.73}{1000}$$

Donde:

Vs: Voltaje requerido en superficie (volts del motor + pérdidas de voltaje en el cable).

Amp: Amperaje del motor.

19. Seleccionar los accesorios necesarios tales como:

Cabezal (Bola Colgadora).

Válvula de Drene.

Válvula de Retención.

Equipo de servicio necesario para terminar la instalación.

Equipo opcional.

20. Determinar que otros dispositivos, accesorios y aditamentos se requieren para asegurar una buena operación, tales como :

Protecciones anticorrosivas necesarias, y el uso de materiales inhibidores de corrosión.

Usar, si se requiere una cubierta en forma de camisa en el aparejo.

V.3. Selección del Aparejo.

Una vez obtenido el número de etapas de la bomba y la potencia requerida, se procede a la selección del la bomba, y la del motor, recurriendo a los catálogos de los fabricantes. el motor deberá cumplir con el ciclaje manejado y potencia requerida.

El protector o sección de sello deberá ser de la misma serie que el motor.

La selección del cable es de acuerdo a la capacidad de conducción de corriente en el medio ambiente del pozo, y debe ser de un costo satisfactorio para el diseño.

El voltaje superficial requerido (voltaje del motor y caídas de voltaje en el cable), establece el tamaño del tablero de control.

La dimensión de los transformadores será en base al "poder" de la fuente primaria o bien del generador móvil que se disponga; pero esto a su vez depende de la potencia requerida por el motor y las pérdidas de voltaje en el cable, que viene a ser el voltaje requerido en superficie.

La selección del cabezal, válvulas de contrapresión y de drene, conexión de la bomba a la tubería de producción, etc.; deben ser adecuados al diámetro de la tubería de producción.

CONCLUSIONES:

1. El uso de las leyes de afinidad permiten conocer el comportamiento de las curvas características a diferentes frecuencias, sin tener que recurrir a las gráficas publicadas por los fabricantes.
2. Mediante las leyes de afinidad y el rango recomendado por los fabricantes, se genera la llamada "ventana de operación", que establece una zona general en la que la bomba trabaja a su más alta eficiencia al realizar cambios de velocidad.
3. La expansión de los rangos del sistema de bombeo electrocentrífugo, con el uso del Controlador de Velocidad Variable, permite el ajuste de la capacidad de operación del equipo a las condiciones del pozo, ya sea que se presenten: Fluidos abrasivos, fluidos viscosos, alta relación gas-aceite o lenta recuperación del yacimiento.
4. Deberá ponerse especial atención, cuando se realice un cambio de frecuencia, en lo referente a que debe considerarse que el volumen de líquidos que se obtiene a condiciones superficiales es diferente al volumen de fluidos que maneja la bomba a la profundidad de colocación, por lo que éste debe calcularse y obtener su equivalente al de la superficie y que éste a su vez se encuentre dentro del rango recomendado por los fabricantes, a fin de evitar empujes ascendentes o descendentes en la bomba.
5. La presencia de cantidades considerables de gas en el pozo, hace indispensable la consideración de flujo multifásico en la tubería de producción, y la aplicación de correlaciones para el cálculo del volumen de gas en el punto de colocación de la bomba.

También, el volumen de fluidos en la succión es diferente al de la descarga, debido al incremento de presión que se les imprime en el interior de la bomba, ocasionando un diseño telescopiado de dos o más secciones de bombas que manejan diferente capacidad volumétrica, con máxima eficiencia.

6. De las pruebas descritas en el Capítulo IV, se demuestra que el uso de impulsores para flujo mixto, comparados con impulsores para flujo radial, aproxima aún más el comportamiento de las bombas, al mostrado en sus curvas de capacidad de carga, cuando se opera en pozos con cantidades significativas de gas.

7. Para gastos mayores que el de diseño y bajas presiones de succión, la curva de capacidad de carga presenta un comportamiento con apariencia de cavitación. A gastos menores que el de diseño, se presenta una región inestable (presión de surgencia), cuando el volumen de gas excede el 15% del volumen total manejado por la bomba.

8. El desempeño y comportamiento de la bomba es función directa de la cantidad de gas libre que ingresa, así como, de la presión de succión. Esto indica que a mayor presión de succión se requerirá un menor incremento de presión en las etapas de la bomba.

9. La utilización del separador de gas centrífugo permite un diseño del sistema de bombeo electrocentrífugo en campos con altas relaciones gas-aceite, en las que un diseño normal es imposible. De igual forma el uso de separador centrífugo extiende la vida útil del equipo en un promedio de 60 a 70 %, reduciendo los costos de mantenimiento del aparejo.

10. El resultado de las pruebas, mencionadas en el Capítulo IV, enfatiza la necesidad del cálculo del volumen de gas a la profundidad de colocación de la bomba, para que de esta manera se realice un diseño óptimo, que redundará en beneficios del equipo y de la producción.

11. La información del pozo candidato al sistema de bombeo electrocentrífugo, deberá ser muy confiable, puesto que de ello depende el diseño y operación eficiente del sistema.

12. El diseño de un pozo aspirante a producir mediante el sistema de bombeo electrocentrífugo, que produce cantidades excesivas de gas, requiere de una evaluación muy precisa en las condiciones de presión y temperatura en el pozo, para que el volumen de gas sea considerado en el diseño. De esta manera el diseño del aparejo se verá beneficiado en cuanto a los costos de operación y se obtendrá una mayor eficiencia.

REFERENCIAS

- 1.- Bortoni L. and Uzcategui E.: "NEW EXPERIENCE WITH ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMPS IN HEAVY OIL CRUDE". SPE-Paper 23707 Mar-1992.
- 2.- Rajesh Sachdeva, D.R.Doty and Zelimir Schmidt: "PERFORMANCE OF ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPS IN GASSY WELLS", SPE-Paper 22767 Oct-1991.
- 3.- W. Jeffrey Dittman, Anthony W. Marino, Keith L. Jones and D.E.Baker: "ESP'S ADD PRODUCTION CAPACITY TO DEEP, HOT AND GASSY CALIFORNIA WELLS", Oil and Gas Journal Ago-1992.
- 4.- Wilson B.L. & Liu J.C.: "ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP PERFORMANCE USING VARIABLE SPEED DRIVES", SPE-Paper 13805 Mar-1985.
- 5.- David L. Divine: "VARIABLE SPEED SUBMERSIBLE PUMPS FIND WIDER APPLICATION", Oil and Gas Journal Jun-1984.
- 6.- Watson A.J.: "APPLYING VARIABLE FREQUENCY DRIVE TO ESP'S", P.E.I. Nov-1983.
- 7.- Bailey Martin C. and Bearden John: " OPERATING RANGES AND LIMITS OF THE ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMPING SYSTEM", P.E.I. Sep-1982.

8.- Halstead Gary: "THE ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP: SYSTEM DESIG", P.E.I. Feb-1983.

9.- Martin C.B. and David Divine: "THE ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP: HOW THE SYSTEM IS PROTECTED", P.E.I. Nov-1982.

10.- Beavers John: "THE ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP: APPLICATION OF E.S.P. IN HOSTILE ENVIRONMENTS", P.E.I. Mar-1983

11.-Beck Lewis: "THE ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP: HOW THE E.S.P. IS HANDLED SERVICED AND INSTALLED", P.E.I. May-1983.

12.- Divine David L.: "A VARIABLE SPEED SUBMERSIBLE PUMPING SYSTEM", SPE-Paper 8241 Sep-1979.

13.- Bailey Martin C.: "WHAT IS AN ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMPING SYSTEM AND HOW DOES IT WORK", Petroleum Engineer International, Ago-1982.

14.- Brown Kermit E.: "THE TECHNOLOGY OF ARTIFICIAL METHODS". Petroleum Publishing Co., Tulsa OK, Vol. 2b. 1980.

15.- Lea James F. and Bearden John L. "GAS SEPARATOR PERFORMANCE FOR SUBMERSIBLE PUMP OPERATION", James F. Lea & John L. Bearden JPT Jun-1982.

-
- 16.-Kobylnski L.S., Taylor F.T. and Brienan J.W.: "DEVELOPMENT AND FIELD TEST RESULT OF AN EFFICIENT DOWNHOLE CENTRIFUGAL GAS SEPARATOR", JPT Jul-1985.
- 17.- Powers Maston L.: "EFFECTS OF SPEED VARIATION ON THE PERFORMANCE AND LONGEVITY OF ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPS", SPE-Paper 18236 Feb-1987.
- 18.- Collins L.C. and Autrey J.W.: "A GRAPHICAL METHOD TO SIZE SUBMERSIBLE PUMPS FOR VARIABLE SPEED APPLICATION", SPE-Paper 15429 Oct-1986.
- 19.- Val S. Lobanoff and Robert R. Ross: "CENTRIFUGAL PUMP: DESIG AND APPLICATIONS", Edit: Gulf 1992.
- 20.- TRW Reda Pump: "REDA SUBMERGIBLE PUMP CATALOG"
Bartlesville Oklahoma, 1983.
- 21.- Rajesh Sachdeva, D.R.Doty and Zelimir Schmidt: "PERFORMANCE OF AXIAL ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPS IN GASSY WELL", SPE-Paper 24328 Oct-1991.
- 22.- Ing. Hector J. Diaz Zertuche: NOTAS Y APUNTES
23. Lea James F. and Bearden J.L.: "EFFECTS OF GASEOUS FLUIDS ON SUBMERSIBLE PUMP PERFORMANCE", SPE-Paper 9218 Sep-1980.

-
- 24.- J. Héctor Díaz Z. y Raúl Poblano O.: "DISEÑO MEJORADO DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTRICO", Revista: Ingeniería Petrolera Jul-1984.
- 25.- Lea James F. and Bearden J.L.: "EFFECTS OF GASEOUS FLUIDS ON SUBMERSIBLE PUMP PERFORMANCE", JPT Dic-1982.
- 26.- Gruppig A. W.: "PRESSURE-PRODUCTION DIAGRAM MATCHES SUBMERSIBLE PUMP PERFORMANCE TO THAT OF WELL", Oil and Gas Journal Nov-1982.
- 27.- Ing. Francisco Garaicochea P.: APUNTES "TRASPORTE DE HIDROCARBUROS", Facultad de Ingeniería UNAM, 1983.