

10
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SELECCION DEL SISTEMA ARTIFICIAL PARA
EL CAMPO KU DE ACEITE PESADO DE LA
REGION MARINA

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A:

MARCELA AMALIA GONZALEZ VAZQUEZ

DIRIGIDA POR:
ING. JESUS HECTOR DIAZ ZERTUCHE
ING. CARLOS BALDERAS JOERS



MEXICO, D. F.

TESIS CON
FALSA DE ORIGEN

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

SRITA. MARCELA AMALIA GONZALEZ VAZQUEZ
Presente.

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-038

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

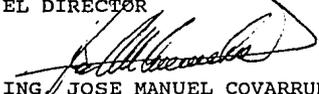
**SELECCION DEL SISTEMA ARTIFICIAL PARA EL CAMPO KU DE ACEITE PESADO
DE LA REGION MARINA**

- I COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO
 - II DISEÑO, SELECCION Y APLICACION DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO EN EL POZO KU-445
 - III COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO NEUMATICO
 - IV DISEÑO, SELECCION Y APLICACION DEL SISTEMA DE BOMBEO NEUMATICO EN EL POZO KU-445
 - V ANALISIS ECONOMICO DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO NEUMATICO Y BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO
- CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES

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.

A t e n t a m e n t e
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 27 de mayo de 1993.
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*ggg*





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS:

SELECCIÓN DEL SISTEMA ARTIFICIAL PARA EL CAMPO
KU DE ACEITE PESADO DE LA REGIÓN MARINA

REALIZADA POR:

MARCELA AMALIA GONZÁLEZ VÁZQUEZ

NUMERO DE CUENTA: 8409083-0

DIRECTOR: ING. HÉCTOR DÍAZ ZERTUCHE

DIRECTOR ADJUNTO: ING. CARLOS BALDERAS JOERS

FIRMAS DE CONFORMIDAD DEL JURADO:

PRESIDENTE: ING. SALVADOR MACÍAS HERRERA

VOCAL: ING. HÉCTOR DÍAZ ZERTUCHE

SECRETARIO: ING. JOSÉ ANGEL GÓMEZ CABRERA

PRIMER SUPLENTE: ING. RAFAEL RODRÍGUEZ NIETO

SEGUNDO SUPLENTE: ING. MANUEL VILLAMAR VIGUERAS

DIRECTOR ADJUNTO: ING. CARLOS BALDERAS JOERS

INVITADO : ING. JOSÉ LUIS MARTÍNEZ GALVÁN



MÉXICO, D.F. A 14 DE ABRIL DE 1994

INTRODUCCIÓN

En Junio de 1979 se inició la explotación de los hidrocarburos en la Región Marina, y desde 1987 se ha venido incorporando la aplicación del sistema artificial de bombeo neumático en campos de aceite pesado como Cantarrell con buenos resultados, siendo este sistema el de uso común en la Región Marina.

La explotación del campo Ku - Maloob se inició en abril de 1985 a través del pozo Ku - 415 de la plataforma Ku - H, él cual dejó de producir por un abatimiento de presión en junio del mismo año y no fue sino hasta 1988 que se incorporaron nuevos pozos a producción en esta plataforma.

Conforme la presión del yacimiento declinaba, se observó que los pozos de la plataforma Ku-H requerían de la aplicación de un sistema artificial de producción, por lo que en enero de 1991 se llevó a cabo un estudio de flujo multifásico, en donde se determinó que los pozos eran buenos candidatos para la aplicación del bombeo electrocentrífugo, ya que este sistema es confiable para producir aceite pesado y se emplea actualmente en todo el mundo con buenos resultados.

Por lo antes mencionado se determinó efectuar una prueba piloto con bombeo electrocentrífugo en los pozos Ku - 427 y Ku - 445 de la plataforma Ku - H, prueba que arrancó de manera exitosa el día 8 de octubre de 1992, suspendiéndose posteriormente, luego de presentar una falla en uno de los componentes del aparejo. La reparación del equipo se llevó a cabo en aproximadamente 30 días, período en el cual se decidió probar un segundo sistema artificial; siendo éste el de bombeo neumático, con el propósito de establecer de manera real, las bondades de ambos sistemas bajo las mismas condiciones de operación.

El presente trabajo presenta el análisis técnico y económico comparativo de la prueba piloto de aplicación de dos diferentes aparejos con sistema artificial de producción , el primero con bombeo electrocentrífugo y el segundo con bombeo neumático ambos para el pozo Ku - 445 de la plataforma Ku - H.

CONTENIDO

	Página
<i>TITULO</i>	i
<i>INTRODUCCIÓN</i>	ii
<i>CONTENIDO</i>	iii
<i>CAPITULO I</i>	
I.1 Generalidades de bombeo electrocentrífugo	1
I.2 Descripción del sistema de bombeo electrocentrífugo	
I.2.1 Bomba	2
I.2.2 Motor	7
I.2.3 Unidad de sello o protectora	12
I.2.4 Separador de gas	13
I.2.5 Sensor de presión y temperatura de fondo	14
I.2.6 Cable de suministro de energía eléctrica	
I.2.7 Transformador	16
I.2.8 Tablero de control	
I.2.9 Caja de venteo	
I.2.10 Variador de velocidad	17
I.2.11 Inductor	18
I.2.12 Empacador	
I.2.13 Cabezal del pozo	
<i>CAPITULO II</i>	
II.1 Criterios de diseño y selección de los componentes del equipo de bombeo electrocentrífugo	20
II.1.1 Componentes del equipo del pozo 445	31
II.2 Operaciones realizadas en el pozo	37
II.2.1 Resultados de la prueba	40

CAPITULO III

III.1 Generalidades de bombeo neumático	53
III.2 Descripción del sistema típico de bombeo neumático	54
III.3 Componentes del equipo de bombeo neumático del pozo 445	62

CAPITULO IV

IV.1 Criterios de diseño y selección de la profundidad de colocación de las válvulas de bombeo neumático, análisis con diferentes gastos de inyección	63
IV.1.1 Resultados de la simulación con BONEC para el pozo 445	72
IV.2 Operaciones realizadas en el pozo 445	76
IV.2.1 Descripción del arranque con el sistema de bombeo neumático y resultados de la prueba	78

CAPITULO V

V.1 Conceptos fundamentales para un análisis económico	81
V.2 Análisis económico para ambos sistemas artificiales de producción	83

<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	89
--	-----------

<i>ANEXO A</i>	91
-----------------------	-----------

<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	95
--	-----------

COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO

I.1 Generalidades de bombeo electrocentrífugo

El bombeo electrocentrífugo se probó por primera vez en el campo Russell en los Estados Unidos de Norteamérica, en el año de 1926⁸. Desde entonces a la fecha se han introducido muchas mejoras en el diseño de sus componentes tales como bombas, motores, sellos, cables y sistemas superficiales de control que han permitido incrementar la eficiencia de operación y vida útil del sistema de bombeo. Así mismo su aplicación se ha ampliado a pozos que presentan uno o más de las siguientes características: grandes profundidades, fluidos corrosivos, altas temperaturas y altas relaciones gas-líquido. El sistema de bombeo electrocentrífugo opera bajo un amplio rango de gastos y profundidades. Siendo la máxima profundidad de 3,660 m (12,000 pies) y el máximo gasto de 44,500 bpd.

Actualmente, el ingeniero debe entender las técnicas de diseño de cada componente del sistema, por lo que la selección más adecuada es la que busca siempre la optimización de las operaciones; lo anterior implica una mayor capacitación del personal que opera dicho equipo, cuyo objetivo será proporcionar la máxima vida del sistema.

I.2 Descripción del sistema de bombeo electrocentrífugo

Para facilitar el manejo de los conceptos básicos de bombeo electrocentrífugo, en el presente capítulo se revisará el arreglo estandarizado de los equipos subsuperficial y superficial.

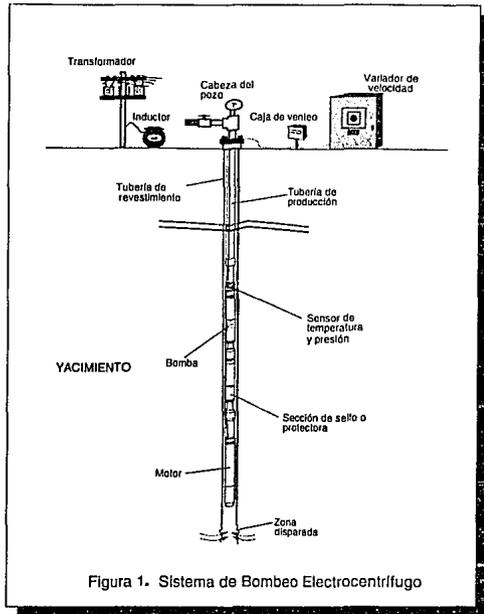
El equipo subsuperficial está compuesto por el motor eléctrico que se encuentra en la parte inferior del aparejo y recibe la energía eléctrica de la superficie mediante un cable; enseguida se encuentra el protector del motor también llamado sección sellante, su función primordial es aislar el aceite del motor de los fluidos del pozo, en algunos casos es necesario que se instale un equipo opcional de separación de gas en el fondo entre el protector y la bomba; posteriormente la bomba centrífuga que se coloca en el extremo inferior de la tubería de producción. Los componentes del equipo son movidos por la flecha del motor que se prolonga a todos los dispositivos antes mencionados, finalmente se coloca un empacador de características especiales.

En cuanto al equipo superficial se tiene: el cabezal del pozo, la caja de venteo, el tablero de control y en algunos casos el dispositivo llamado variador de velocidad seguido por un inductor, tablero de control y finalmente se encuentra el transformador.

El arreglo típico se presenta en la Figura 1.

I.2.1 Bomba

La bomba centrífuga se encuentra al final de la tubería de producción, la admisión de fluidos es por su parte inferior, está compuesta de una serie continua de impulsores y difusores colocados sobre su flecha dentro del tubo protector o carcaza, cuando se requieren más etapas de las que caben dentro de una carcaza, es posible unir una o más bombas a través de su flecha por medio de coples y bridas, formando lo que se conoce como arreglo en tandem. Este arreglo lo puede ser mayor de 21.95 m (72 pies).



Cada una de las etapas de la bomba centrífuga consiste de un impulsor rotatorio y un difusor estacionario. En la Figura 2 se muestran los componentes y la nomenclatura que generalmente se usa al hablar de estos dispositivos.

La selección de una bomba electrocentrífuga depende del diámetro de la tubería de revestimiento, el gasto total y la frecuencia de operación.

Comúnmente los diseños de bombas electrocentrífugas que se aplican en pozos de aceite, usan impulsores fabricados con aleaciones de acero y níquel (Ni-Resist) o Rytan y difusores moldeados en su totalidad de Ni-Resist. Sin embargo, en la actualidad existen bombas de aplicación especial que emplean estos dispositivos (impulsores y difusores), contruidos de materiales tan diversos como el plástico, hierro y bronce. La gran mayoría de las flechas de las bombas son construidas de k-monel mientras algunas se hacen de acero inoxidable y opcionalmente, para manejar alta tensión el material de la flecha es

Inconel y Hostelloy. El diámetro nominal externo de una bomba es del rango de 3.38 a 11.25 pg.

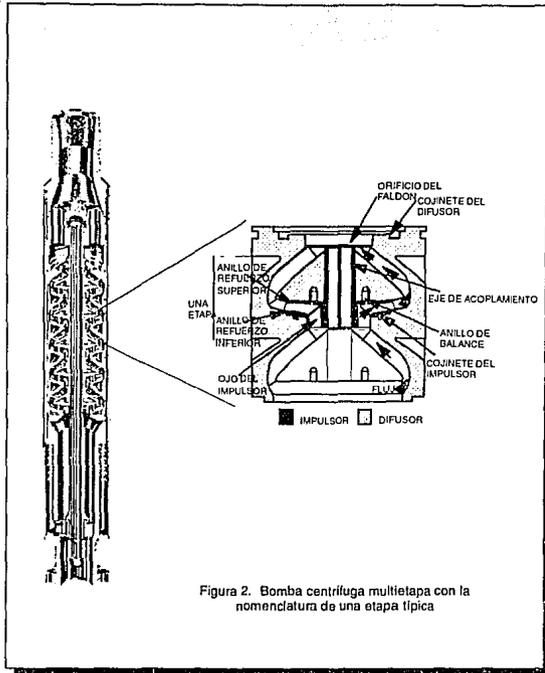


Figura 2. Bomba centrífuga multietapa con la nomenclatura de una etapa típica

El Instituto Hidráulico Americano define la velocidad específica adimensional de una bomba centrífuga como la velocidad requerida en rpm para levantar 1 pie (0.3048 m) de carga y entregar 34.72 bpd, donde la carga es la altura en pies que genera una etapa a una velocidad y gastos dados.

$$N_s = \frac{6.734 N \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

donde:

N_s , Velocidad específica adimensional

N , Velocidad de bombeo (rpm)

Q , Gasto máxima eficiencia, m^3/min (pies³/min)

H , Carga total por etapa para máxima eficiencia, m (pies)

El objetivo de los impulsores de flujo radial con baja velocidad específica es desarrollar carga usando principalmente fuerzas centrífugas. En cambio, los de alta velocidad específica desarrollan carga a través de fuerzas centrífugas y axiales; los impulsores que se muestran en Figura 2 son del tipo mixto (centrífugo y axial).

La capacidad de carga de una etapa está determinada por el espacio existente entre los impulsores superiores e inferiores, el diámetro externo, curvatura de los álabes y velocidad de giro del impulsor. Por lo tanto, a mayores velocidades, espaciamentos y diámetro externo, más grande es la capacidad. Cada impulsor que se agrega suma carga o altura sin incrementar el gasto.

La Figura 3 muestra la sección transversal de un impulsor, así como las vistas inferior y superior de sus áreas de empuje. La presión de descarga actúa sobre el área A en la vista superior y sobre el área D en la vista inferior.

Así mismo la presión de succión actúa sobre el área B en la vista superior y en el área C en la inferior. Cuando la suma de fuerzas hacia abajo y el peso de los impulsores es igual a la suma de fuerzas que actúan hacia arriba, se dice que el impulsor está en equilibrio o balanceado.

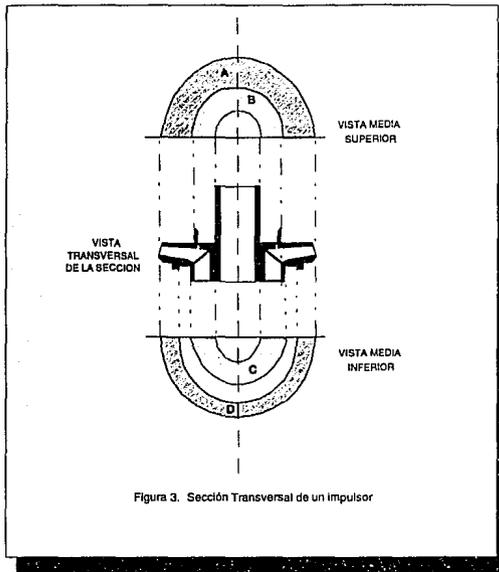
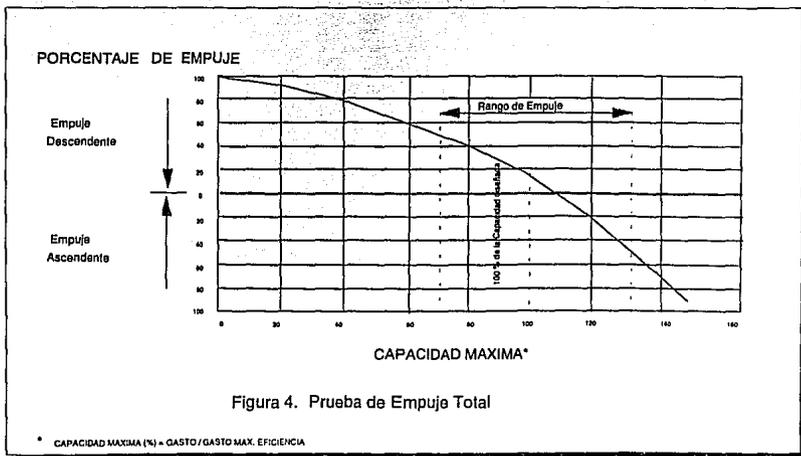


Figura 3. Sección Transversal de un impulsor

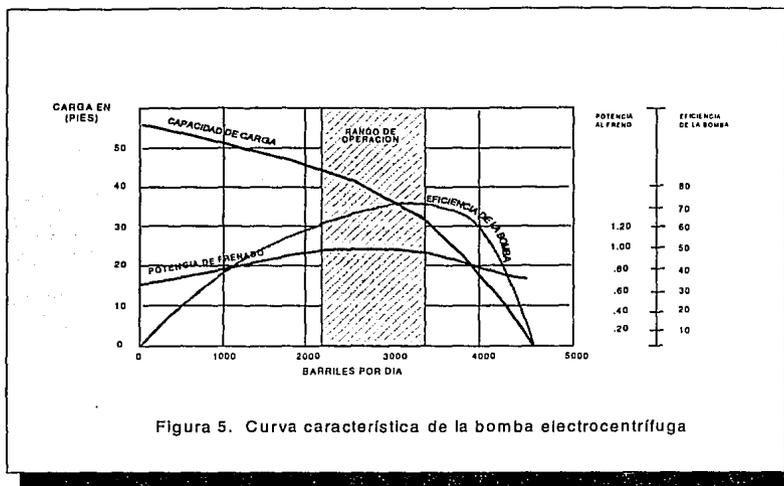
Cada uno de los impulsores está diseñado para estar balanceado en o muy cerca del punto de máxima eficiencia dentro de su curva de comportamiento, estas curvas son construidas usando los datos que arroja una prueba con agua y el rango de óptima eficiencia contra el gasto de diseño que se indique en la prueba.

Una curva de empuje total actuando sobre el impulsor se muestra en la Figura 4. El rango aceptable del empuje se muestra en relación al gasto de diseño para una etapa, en ella se

observa que si opera a un gasto superior al de diseño se obtendrá empuje ascendente excesivo, y por lo contrario si la operación es con un gasto inferior se produce empuje descendente.



Cada bomba tiene su propia curva característica y el diseño de los impulsores y difusores dependen del fabricante lo que hace diferentes las bombas de una marca a otra.



El rango de operación óptimo de la bomba se muestra en la parte superior de la curva característica Figura 5, la carga que desarrolla cada etapa y su potencia de frenado.

Se considera que la carga y capacidad de cada impulsor son los mismos para todos los fluidos no compresibles dado que las viscosidades son aproximadamente iguales. La potencia de frenado requerida para el impulsor, está en relación directa con la densidad relativa de los fluidos que son bombeados.

Todas las bombas electrocentrífugas sumergibles se diseñan para operar a una velocidad específica dada en rpm y cambios moderados en ésta no afectan su comportamiento. Se considera un cambio moderado de velocidad al $\pm 10\%$ de la velocidad nominal. De las fórmulas conocidas como leyes de afinidad se puede observar que la capacidad del impulsor está relacionada directamente con la velocidad.

$$Q_2 = Q_1 \times \frac{N_2}{N_1}$$

en donde:

Q_2 , Gasto a la velocidad de la bomba en m^3/d (pies³/d)

Q_1 , Gasto de diseño en m^3/d (pies³/d)

N_1 , Velocidad de diseño de la bomba (rpm)

N_2 , Velocidad de operación de la bomba (rpm).

Del mismo modo se observa que la carga o altura que levanta el impulsor está relacionada directamente con el cuadrado de la relación de velocidades de bombeo.

en donde:

$$H_2 = H_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

H_2 , Nueva Altura en m (pies)

H_1 , Altura diseñada en m (pies)

La potencia que se requiere para frenar un impulsor está directamente relacionada con el cubo de la relación de velocidades, según la siguiente fórmula.

$$P_{H_2} = P_{H_1} \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3$$

en donde:

P_{H_2} , Potencia de frenado requerida

Algunos impulsores presentan el fenómeno de cavitación, golpe de ariete, vibración y otros problemas, si se someten a cambios bruscos de velocidad cercanos al 40 % de la velocidad de diseño. Por lo tanto se concluye que cada impulsor debe ser probado a varias velocidades, para determinar sus verdaderas características y no depender de la extrapolación de la curva característica obtenida en pruebas controladas. También puede presentar rotación inversa de los impulsores, efecto causado cuando en el motor se invierten 2 fases eléctricas, por lo que debe revisarse antes de cada arranque el sentido de rotación de la bomba en el variador de velocidad.

No existe ninguna regla establecida por las compañías fabricantes de bombas electrocentrífugas para realizar una clasificación de éstas; en forma general se clasifican por su número de serie, que representa en la mayoría de los casos el diámetro externo de la bomba. Las bombas tienen diámetros que van de 3.38 pg hasta 11.25 pg; las compañías distinguen los distintos usos específicos de sus bombas anteponiendo una o dos letras a la serie, por ejemplo aquellas resistentes a abrasivos, ácido clorhídrico, etc.

1.2.2 Motor

El motor eléctrico sumergible se localiza en la parte inferior del sistema de bombeo, es trifásico, bipolar, de inducción tipo jaula de ardilla, recibe la energía desde una fuente colocada en la superficie, mediante un cable eléctrico y debe ser capaz de satisfacer los requerimientos de potencia demandados por el sistema. El rango de potencias en los motores existentes en el mercado es de 5 a 625 Hp variando en función del número de serie del motor e incluso del fabricante. La velocidad nominal del motor es de 3500 rpm a 60 Hz de frecuencia y 2900 rpm a 50 Hz.

El esquema de un motor típico se muestra en la Figura 6.

El interior del motor va lleno de aceite mineral refinado no conductivo para proveer una resistencia dieléctrica, tener conductividad térmica para transferir el calor hacia los fluidos del pozo que pasan por la parte externa de la carcasa o cubierta protectora del motor.

El enfriamiento del motor se logra cuando el aceite en el interior circula y toca la parte inferior de la cubierta, la circulación del aceite mantiene una temperatura uniforme a lo largo del motor y además cumple una segunda función igualmente importante, la de lubricar los cojinetes radiales y de empuje.

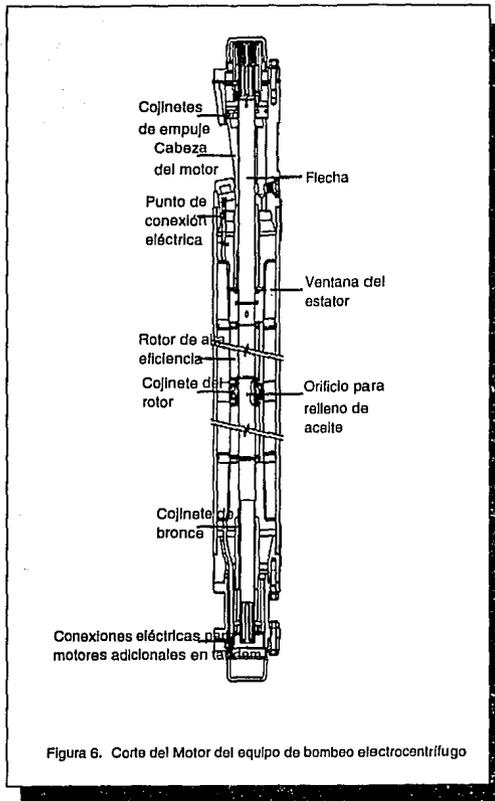


Figura 6. Corte del Motor del equipo de bombeo electrocentrífugo

Para obtener el máximo enfriamiento por circulación de los fluidos del pozo, se requiere que exista un flujo tipo turbulento en la parte externa de la cubierta del motor, que se logra generalmente con una velocidad de flujo de 0.3048 m/s [1 pies/s].

La velocidad de flujo se obtiene de la siguiente forma:

$$V = \left[\left(\frac{(0.14737 \times Q)}{d_i^2 - d_o^2} \right) \right]$$

donde:

Q, Gasto producido en m³/d [pies³/D]

d_i, Diámetro interior de la TR en cm [pg]

d_o, Diámetro exterior de el motor en cm [pg]

El motor puede estar construido en una sola carcasa o en varias en arreglo tándem, si lo que se requiere es obtener una potencia superior, tres motores pueden conectarse en serie, para sumar una longitud hasta de 21.38 m (70 pies), los estatores pueden conectarse en arreglo delta o en estrella sin conexión a tierra.

Los diámetros nominales más comunes de los motores en el mercado son 3.75 pg, 4.56 pg, 5.40 pg y 7.38 pg.

El motor va a ubicarse dentro del interior de la tubería de revestimiento, la relación longitud del motor - diámetro exterior del rotor (L/d) es grande, generalmente en equipos subsuperficial es cercano a cinco, mientras que en motores superficiales es de uno. Para obtener la potencia necesaria en el motor subsuperficial debido a que existe la restricción de diámetro interior de la tubería, es necesario agrupar un número mayor de rotores para obtener potencias más altas.

Para eliminar vibración en la flecha del motor, se emplean cojinetes radiales que se localizan generalmente entre cada juego de rotores de longitud hasta de 0.4 m [1.3 pies].

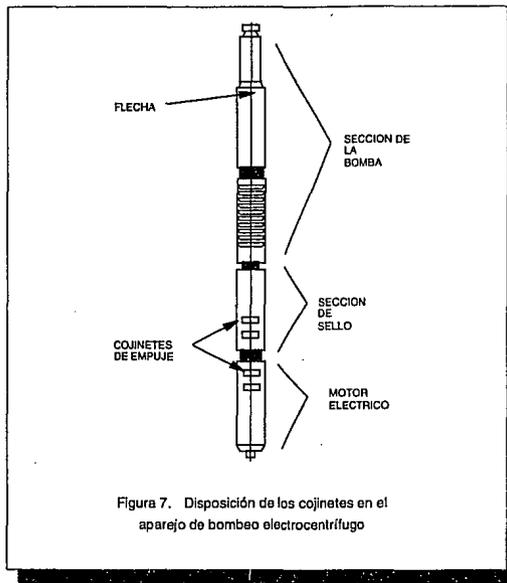
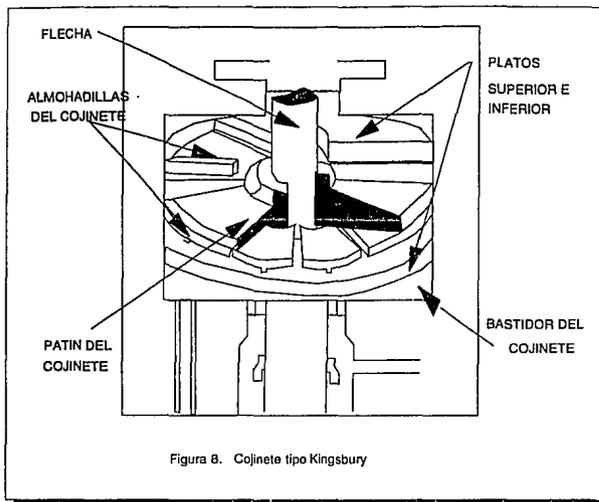


Figura 7. Disposición de los cojinetes en el aparato de bombeo electrocentrífugo

Los soportes y cojinetes del estator son diferentes, variando según el diseño de cada fabricante, en las Figuras 7 y 8 se muestran estos dispositivos.

En la Figura 9 se muestra un cojinete que tiene sus pedestales de soporte descentrados, lo que lo inclina ligeramente permitiendo que se desplace sobre la capa de aceite existente sobre el rotor. Por lo tanto, el empuje del patín del cojinete no provoca un contacto metal-metal con el rotor.

La capacidad de empuje del cojinete está en función de la habilidad del soporte de la capa de aceite, que varía inversamente con la temperatura, manteniendo descentrado el pedestal, el cojinete tendrá la habilidad de llevar la máxima carga si el movimiento únicamente se presenta en la dirección que muestra la flecha.



Un estator simple hasta de 8.5 m (28 pies) de largo, puede tener hasta 15 rotores espaciados a lo largo de toda su longitud. Los devanados y el estator son tales que los máximos amperajes y voltajes no deben exceder de 110 amperes y 2300 volts.

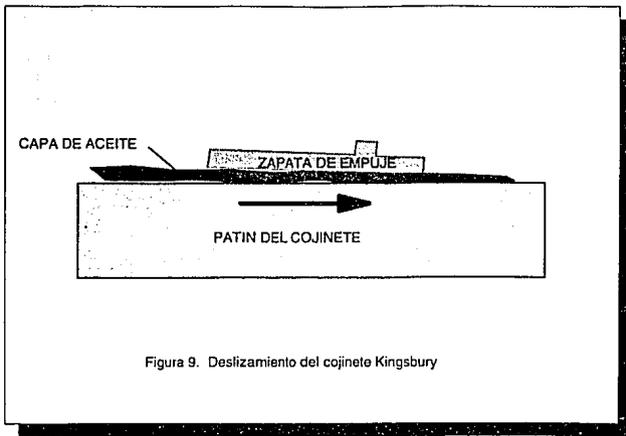


Figura 9. Deslizamiento del cojinete Kingsbury

El motor de mayor diámetro que pueda instalarse en un pozo, siempre que se deje un espacio anular para permitir un flujo turbulento, será el más económico para esa aplicación. Los diámetros exteriores de los motores comerciales se muestran en la tabla 1, como se puede observar los diámetros son ligeramente mayores a los manejados por las bombas, esto se debe a que es el único dispositivo por el cual no atraviesa el cable de potencia.

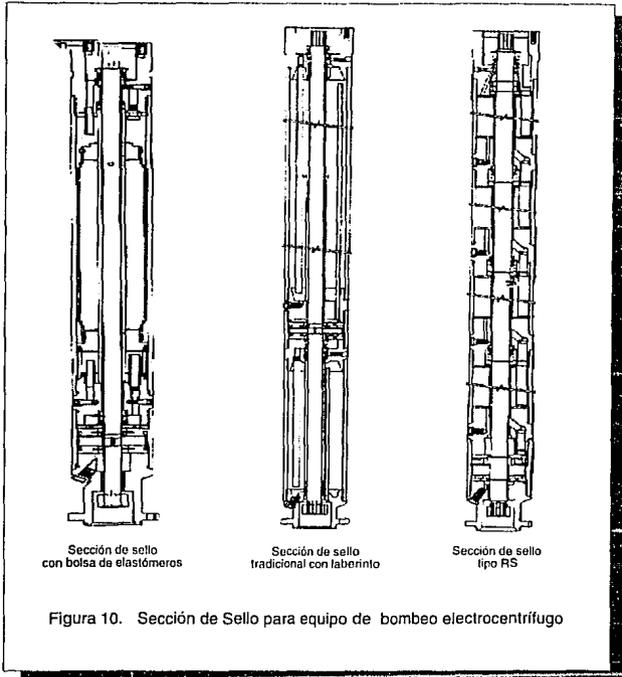
(cm)	(pg)
9.53	3 3/4
11.43	4 1/2
13.82	5 1/2
15.75	6 1/4

Tabla 1 Diámetros exteriores de los motores

Durante el diseño y selección de un equipo de bombeo electrocentrífugo, la profundidad de colocación del aparejo es un factor determinante al seleccionar el voltaje del motor, por lo tanto deben considerarse siempre las pérdidas de voltaje en el cable. Cuanto más grandes son las pérdidas, se requerirán de mayores voltajes y menores amperajes en el motor.

I.2.3 Unidad de sello o sección protectora

El objetivo del protector del motor es aislar el fluido del motor de los fluidos del pozo y absorber los cambios en presión y temperatura que se originen por el movimiento de fluidos. Este equipo es muy diverso dependiendo del fabricante. En la actualidad hay dos tipos de protectores. Uno de sello positivo y otro de laberinto o sinuoso, como se muestran en la Figura 10.



El diseño de sello positivo incorpora fluido de un barril a una bolsa permitiendo una expansión térmica del fluido del motor, mientras que un serpentín aísla los fluidos del motor de los fluidos del pozo, en la parte superior del sello se cuenta con un laberinto, de esta forma si la bolsa falla, no se provoca una contaminación de fluidos.

El de tipo laberinto se usa para diferenciar fluidos por gravedad específica. Esto se hace para tener rutas donde el fluido del motor pueda expandirse y desplazarse regularmente, al expandirse los fluidos del motor los del pozo se desplazan a través del laberinto, quedando la interfase de los fluidos cercana a la parte superior del protector.

Usualmente son varias las rutas del laberinto en un protector y más cuando se adicionan protectores en serie.

La sección de sello de la carcaza proporciona un área adicional de enfriamiento, para el aceite del motor, esto no es importante en pozos fríos donde los fluidos del espacio anular estan abajo de 52° C, pero llega a serlo cuando el fluido del espacio anular está próximo a 93° C. La clasificación de los protectores se hace a través de números de serie.

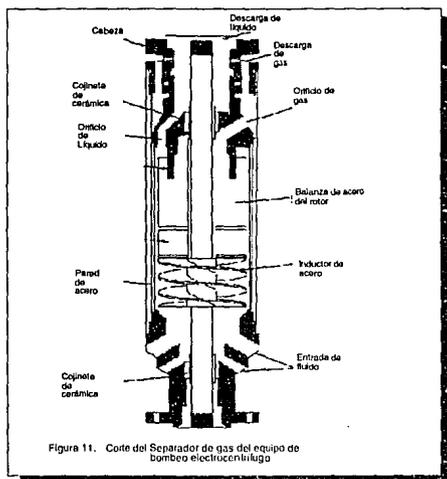
I.2.4 Separador de gas

El separador de gas es un equipo opcional, que se instala entre el protector y la bomba. Su objetivo es separar una porción significativa de gas libre de los fluidos producidos y proporcionar una fase líquida a la sección interna de la bomba.

Hay dos tipos de diseño de los separadores, convencional y centrífugo¹⁵. En el primer tipo, el flujo del fluido cambia de dirección dentro de la carcaza, en este punto se separa el gas. El gas sale por el espacio anular y el líquido por densidad fluye a la primera etapa de la bomba, este tipo de separación se recomienda para pozos con poca cantidad de gas libre (menos del 10 % del volumen total)

Un método más efectivo de separación de gas es el tipo centrífugo, el cuál remueve hasta un 90 % del gas libre dependiendo de las condiciones del pozo, empleando un inductor y una cámara de separación (difusor). La mezcla inicial gas-líquido es admitida al interior del separador y es movida por el inductor en forma centrífuga, desplazándola a la cámara de separación, las fuerzas centrífugas separan los fluidos pesados forzándolos a las paredes del separador y el gas libre se eleva alderedor del área de la flecha.

Observar Figura 11.



I.2.5 Sensor de presión y temperatura de fondo

Otro accesorio adicional es el sensor de presión y temperatura formado por dos componentes. Un instrumento superficial (monitor de lectura) y un instrumento subsuperficial (sensor de presión y temperatura de fondo). El sensor de fondo se fija a la tubería de producción y la unidad superficial recibe la señal enviada por éste. El instrumento de lectura o monitor, alterna las lecturas de presión y temperatura cada 20 segundos y es capaz de imprimir estos valores Figura 12.

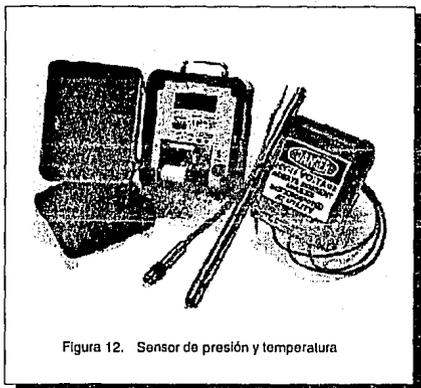


Figura 12. Sensor de presión y temperatura

Estas unidades son útiles cuando el Índice de Productividad del pozo es dudoso o prevalecen condiciones de gasificación, las cuales son los principales problemas para el equipo. El sensor de fondo puede monitorear la presión de admisión durante la operación, este valor podrá ser usado para rediseñar el equipo en caso necesario. Si se usa un controlador de velocidad, los problemas de gas, pueden ser indicados por las lecturas de la carta del amperímetro.

El índice de productividad del pozo puede ser determinado, al correr el equipo de bombeo electrocentrífugo para obtener diferentes gastos en la superficie y monitorear simultáneamente la presión de fondo fluyendo con el sensor de fondo, el índice de productividad es útil para proporcionar información actual del pozo y a futuro.

I.2.6 Cable de suministro de energía eléctrica

El cable de energía es el medio por el cual se le suministra la alimentación eléctrica superficial al motor. Los dos tipos de cable usados son el redondo y el cable plano que se muestran en la Figura 13.

Cable redondo

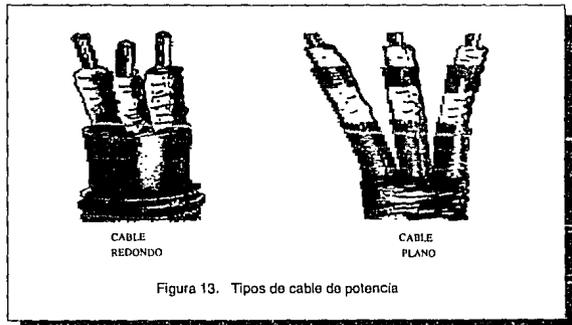
Consiste en tres conductores que pueden ser sencillos (un alambre) o múltiples (varios alambres trenzados), equidistantes uno del otro. Este arreglo proporciona igual capacitancia entre cada par de conductores y por lo tanto un voltaje balanceado se recibirá en el motor, el cable redondo es el más utilizado.

El aislante eléctrico alrededor del cable conductor usualmente es probado a 3000 V, y está diseñado para mantener al cable libre de fluido. Este aislamiento se encuentra cubierto por un material de relleno llamado "jacket" que mantiene a los conductores debidamente espaciados y protegidos de daños mecánicos. Una armadura de metal protege la cubierta para proporcionar protección adicional.

En la actualidad se dispone de tablas para anticipar las caídas de voltaje en el cable transportando un amperaje específico o se calculan mediante el gradiente de 0.3 V por cada 1000 pies, las tablas sirven también para verificar el efecto de la temperatura sobre el material aislante, el cual puede fallar debido a un flujo de baja temperatura.

El cable plano

Consiste de tres conductores lado a lado, de este modo la capacitancia entre cada par de conductores no es igual, existiendo en el motor al final del cable un voltaje desbalanceado. El cable plano se usa en espacios anulares muy restringidos entre los componentes del aparato de bombeo electrocentrífugo y la tubería de revestimiento, la longitud más corta del cable para proveer potencia eléctrica hacia el motor, es generalmente usada para mantener un voltaje con una variación menor de 2% del voltaje del motor.



El equipo eléctrico superficial consiste de transformadores, tablero de distribución o control, caja de venteo, variador de velocidad e inductor mostrados en la Figura 1. Para interconectar cada uno de los equipos mencionados, se usa un cable eléctrico de diámetro similar al más grande usado en el espacio anular, además un cable de cobre No. 4 AWG para aterrizar estos equipos a la tubería del pozo, una barra de aterrizaje separada 2 m (6 1/2 pies), se une al tablero de control y se recomienda una para la caja de venteo como una precaución de seguridad adicional.

I.2.7 Transformador

Existen transformadores de voltaje y de corriente. Los primeros se utilizan para adecuar el voltaje al valor requerido por el motor de fondo; los segundos para adecuar la corriente a los valores requeridos por los circuitos de control del variador de velocidad. Los transformadores de voltaje a su vez se dividen en monofásicos y trifásicos, generalmente los trifásicos son los más empleados por el bombeo electrocentrífugo.

Algunos fabricantes construyen conjuntos de tres transformadores monofásicos, las cuales están llenas de aceite para autoenfriamiento y dimensionadas para manejar el voltaje primario y convertirlo al especificado por el motor, además están equipados de dispositivos especiales llamados taps (mínimo 5) que permiten ampliar el voltaje en la salida del transformador.

I.2.8 Tablero de control

Los tableros de control estándar son a prueba de agua y pueden adecuarse a cualquier instalación de bombeo; varían desde los más simples, como los de encendido magnético para protegerse de sobrecargas de voltaje, hasta los más complejos, como los protegidos por un sistema de fusibles que responden a la carga por alto voltaje y/o con señalización de condición de bombeo intermitente, es decir, un periodo de tiempo funciona el motor y otro no, la literatura recomienda que un tablero nuevo de estado sólido, sea usado para proporcionar la máxima protección para el motor.

El tablero de control monitorea continuamente las tres fases de la corriente y detecta condiciones de sobrecarga y bajacarga en la línea con precisión, reaccionando más rápidamente que los relevadores convencionales. Si ocurre una condición de sobrecarga el tablero de control decide si el sistema sigue operando o si se dispara, ya que es capaz de distinguir entre efectos temporales nocivos o definitivos, si el efecto es temporal decidirá seguir operando sólo por un periodo de tiempo predeterminado por el fabricante sin que ocurra daño al demás equipo, otra característica importante es que puede ser accionado de forma manual por un operador.

I.2.9 Caja de venteo

La caja de venteo se localiza entre el tablero de control y el cabezal del pozo Figura 14, se usa para unir el cable del fondo del pozo y el cable de la superficie, su función es servir como barrera a la migración del gas, que puede penetrar el aislamiento o la protección metálica del cable eléctrico y liberarlo a la atmosfera antes de que llegue al tablero de control, pues el gas y el aire combinado a una chispa eléctrica podrían causar una explosión.

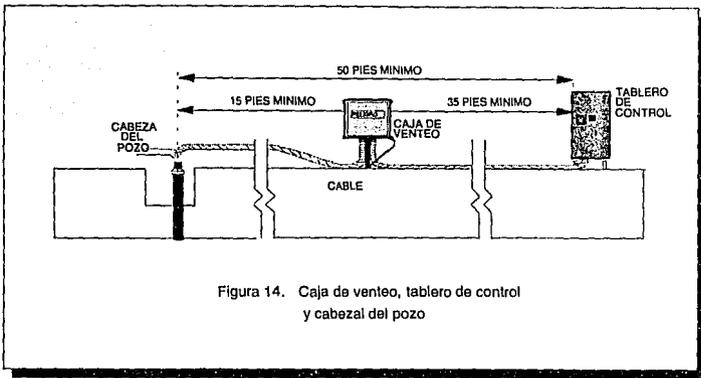


Figura 14. Caja de venteo, tablero de control y cabezal del pozo

En los Estados Unidos de Norteamérica no se permite el arranque de un sistema de bombeo electrocentrífugo, si éste no cuenta al menos con una caja de venteo Figura 15.

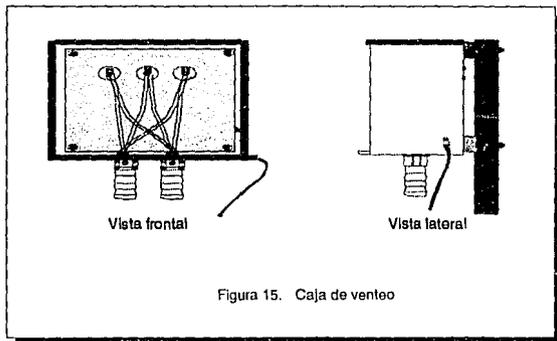
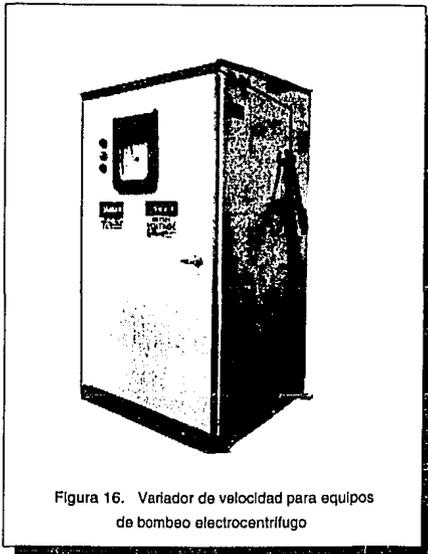


Figura 15. Caja de venteo

1.2.10 Variador de velocidad

El variador de velocidad¹ va colocado entre el tablero de control y el inductor, sus funciones más importantes son: proporcionar arranques suaves para evitar grandes esfuerzos de torsión para el motor y la bomba de fondo, permitir la variación de velocidad de operación del motor y consecuentemente la de la bomba con el objeto de regular el gasto y presión en la superficie, asegurar una corriente trifásica balanceada, proteger al sistema de corrientes eléctricas momentáneas lo que implica un menor requerimiento de potencia al arranque y finalmente, monitorear el comportamiento del equipo subsuperficial (véase Figura 16).

¹ Referencias al final



I.2.11 Inductor

El inductor es aquel dispositivo eléctrico que se ubica entre el variador de velocidad y el transformador de potencia, su función es depurar la señal de voltaje y corriente que se envía al motor de fondo, es decir funciona como un filtro de corrientes armónicas.

I.2.12 Empacador

El empacador es un dispositivo especial en el aparejo de bombeo electrocentrifugo, ya que cuenta con un mandril que permite pasar el cable que suministra potencia al motor a través de él, además de estar provisto de una válvula de venteo que deriva la producción de gas del espacio anular a la superficie, con el propósito de evitar un represionamiento en la tubería de revestimiento y cuidadosamente diseñado para evitar peso sobre la bomba o efectos de compresión debidos a su profundidad de colocación.

I.2.13 Cabezal del pozo

Por último el cabezal soporta el peso de la tubería, sella el espacio anular y la tubería de revestimiento, permite introducir el cable eléctrico en el claro de tuberías, teniendo válvulas y accesorios. Por seguridad todas las válvulas, estranguladores, manómetros y accesorios deben soportar la máxima presión de descarga de la bomba contra la válvula cerrada.

Una de las precauciones más importantes al operar el equipo de bombeo, es no aplicar por un periodo largo de tiempo una potencia eléctrica al motor, cuando se atasca en el fondo del pozo, ya que podría ser la causa de que éste se quemara, además de que podría dañarse cualquier otro de los componentes del aparejo de bombeo electrocentrífugo.

Los dispositivos más susceptibles al daño son: el cable, el tablero de control, el variador de velocidad y/o los fusibles de éste, también los sellos pueden ser fácilmente dañados, se recomienda que sea revisado cada uno de los dispositivos subsuperficiales y superficiales antes mencionados, durante la extracción del aparejo de bombeo electrocentrífugo por inspección de posibles fallas para los primeros y periódicamente para los segundos.

DISEÑO, SELECCIÓN Y APLICACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO EN EL POZO KU-445

II.1 Criterios de diseño y selección de los componentes del equipo de Bombeo electrocentrífugo

El sistema de bombeo electrocentrífugo como todo sistema artificial de producción, tiene sus limitaciones, lo que obliga a revisar los rangos de operación de cada uno de los componentes.

El sistema de bombeo electrocentrífugo opera bajo un rango amplio de gastos y profundidades. Siendo la máxima profundidad de 3,660 m (12,000 pies), y el máximo gasto de 44,500 bpd.

A continuación se discutirán, brevemente, algunos de los factores limitantes y su efecto sobre el sistema de bombeo electrocentrífugo.

Gas libre

La presencia de un volumen excesivo de gas libre en la succión de la bomba influye severamente en su operación, a tal grado que la curva de capacidad de carga vs presión sufre un desplazamiento en comparación a la curva con la densidad de la mezcla gas-líquido original. Este desplazamiento es causado por la alta compresibilidad del gas (Figura 17).

Además, la presencia excesiva de gas dentro de la bomba crea un área de carga inestable (elevación de presión) para capacidades iguales o menores al gasto óptimo de diseño para esa etapa en particular. Esta característica es más pronunciada en las etapas radiales que en etapas de flujo mixto.

También la presencia de altos volúmenes de gas provocan cavitación en la bomba. Una gran declinación de la presión o de la carga para un flujo dado, hará evidente este efecto.

La interferencia de gas moderada o de muy corto término también causa fluctuaciones en la operación del motor. Las fluctuaciones son indicadas por variaciones de corriente en la carta del amperímetro del motor. Interferencias severas de gas producen grandes variaciones que detienen momentáneamente la unidad, la resultante operación intermitente provoca una baja eficiencia de operación.

Cuando se diseña el bombeo electrocentrífugo, es importante conocer la cantidad de gas libre que la bomba puede tolerar y comparar ésta con la cantidad de gas en el fondo del pozo; los fluidos viscosos contienen pequeñas burbujas de gas que pueden actuar como un fluido homogéneo al ascender, si el volumen de gas presente en porcentaje es alto.

Aunque varía de fabricante a fabricante se puede decir que la cantidad de gas máxima admitida es un 15% del volumen total, para reducir al mínimo la interferencia por gas. La experiencia práctica en cada área local es el mejor indicador del volumen en porcentaje permitido.

En general, se puede decir que la presencia de altos volúmenes de gas libre dentro de la bomba se traduce en una disminución en la eficiencia de operación y por lo tanto se acorta la vida útil de la bomba.

Finalmente, consideremos el efecto del gas en el cable eléctrico sumergible. La absorción excesiva de gas por el aislamiento puede causar una ruptura cuando el aparejo de bombeo electrocentrífugo es extraño. El uso del cable apropiado puede disminuir este problema.

Influencia de la temperatura

El calor limita el rango de operación del sistema de bombeo electrocentrífugo. Cada componente del sistema tiene diferentes límites de temperatura que deben ser consideradas en el diseño del sistema.

Si hablamos más específicamente del motor y de sus componentes, su operación es confiable si trabajamos por debajo de las siguientes temperaturas de operación:

- Cojinete de impulso: 325 °F (163 °C)
- Epóxico (encapsulado del motor): 400 °F (204 °C).
- El aislamiento: 500 °F (260 °C).
- Elastómero usado en juntas "O" (empaques), arandela de impulso y conectores de los motores: 400 °F (204 °C).
- Sección sellante para sus diafragmas: 275 °F (135 °C), sellos mecánicos: 325 °F (163°C)

La temperatura de operación se define como la temperatura de fondo más el aumento ocasionado por la operación del motor menos la que se pierde por transferencia de calor hacia el fluido producido.

El cable eléctrico sumergible está limitado por restricciones de temperatura del material aislante. Los aislamientos estándares, como polinitrilo o polipropileno, soportan temperaturas de unos 200 °F (93 °C). Por encima de estas temperaturas, el polinitrilo se torna quebradizo y el polipropileno se ablanda. Los conductores tienden a juntarse y provocan un corto circuito.

Actualmente se dispone de cables especiales para aplicación en temperaturas hasta de 400 °F (204 °C). Sin embargo, en pozos con temperaturas mayores que 300 °F (149 °C) las fuerzas corrosivas y el gas pueden combinarse con la temperatura para provocar fallas prematuras.

Viscosidad del aceite

La viscosidad de los líquidos es otro parámetro que debe tomarse en cuenta en el diseño del sistema de bombeo electrocentrífugo. Los líquidos con más alta viscosidad incrementan la potencia al freno y disminuyen la carga y el gasto. La curva de la Figura 17 muestra como se ve afectado el comportamiento de una etapa de la bomba centrífuga. No hay límite establecido para la viscosidad de un fluido bombeable. Los factores limitantes son: el aumento en el número de etapas de la bomba y la potencia requerida del motor con el incremento de la viscosidad.

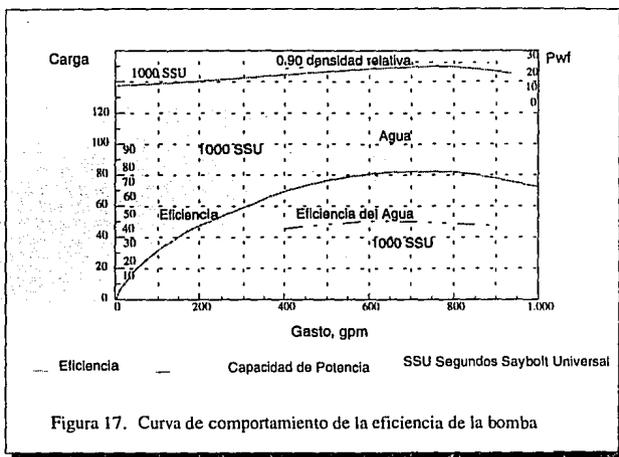
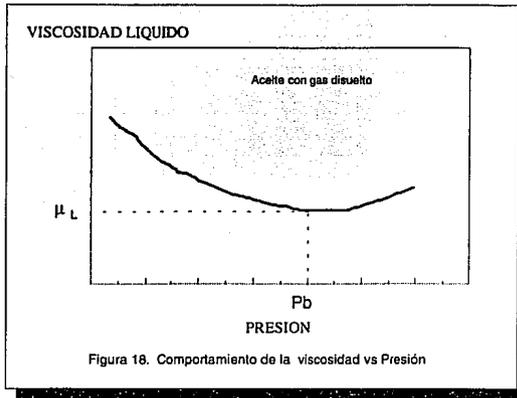


Figura 17. Curva de comportamiento de la eficiencia de la bomba

La profundidad del pozo y la cantidad de gas suspendido en el fluido también debe considerarse cuando se determina la máxima viscosidad permisible para cualquier instalación.

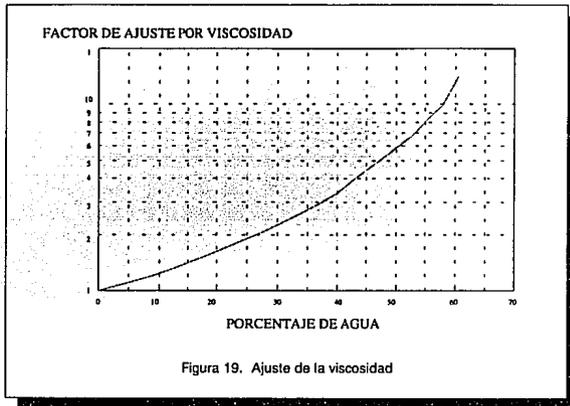
En la Figura 18 se observa el comportamiento de la viscosidad contra la presión si existe gas disuelto en el aceite.



Emulsiones

Otro factor limitante es el tipo de emulsión agua-aceite que será producido. Muy poco se conoce acerca de este tema y sus efectos son usualmente evaluados por métodos de ensaye y error. En algunos casos debe hacerse un ajuste para la cantidad o porcentaje de agua producida, debido a que afecta la viscosidad total del fluido.

La curva de la Figura 19 se ha usado en California con éxito. Mediante ésta se corrige la viscosidad del fluido y se emplea para cualquier valor de viscosidad, siempre que se conozca el porcentaje de agua.



Por ejemplo suponiendo que una bomba por etapa bombea fluido con una viscosidad de 200 SSU y un 40 % de agua, el factor de corrección de la viscosidad sería 3.3. El comportamiento de esta etapa sería evaluado para 660 SSU ($3.3 * 200$ SSU), así que la bomba requerirá más etapas y un motor más grande.

Problemas por arenas y parafinas

La arena y parafina, suspendidas en el fluido, pueden también limitar el rango de operación del bombeo electrocentrífugo, pero éste es independiente de la medición de sus efectos sobre su comportamiento.

El gasto y diámetro de las bombas, debe ser considerado cuando se determina la capacidad de manejo de arena o parafina. Las bombas de pequeñas dimensiones con pasos planos o achatados, tienden más fácilmente a taponarse que las de grandes dimensiones. Para minimizar los efectos en pozos arenados, el estrangulamiento es conveniente pues reduce el arrastre de la arena depositada en el fondo durante la puesta en marcha. Sin duda el mejor indicador que se tendrá para un área, será la experiencia particular de los operadores en la misma.

Es importante evaluar el impacto de cada uno de los factores en el diseño de los sistemas de bombeo electrocentrífugo. El desarrollo de los nuevos variadores de velocidad, cables de nuevos materiales y separadores de gas pueden ayudar a manejar algunos de estos factores más fácilmente.

Para realizar la selección más eficiente de los componentes del sistema de bombeo electrocentrífugo, se recomienda verificar el cumplimiento de los dos siguientes puntos, considerados como primordiales:

1.- Debe tenerse un conocimiento pleno de las dimensiones físicas del espacio anular, incluyendo la localización de los disparos en la tubería de revestimiento, así como las restricciones de diámetro interno del pozo.

2.- Es necesario un gasto estable durante la vida útil de la bomba. La producción de aceite, agua y gas debe calcularse a las condiciones de succión de la bomba.

La buena operación de la bomba se garantiza, si se mantiene la cantidad libre de gas en la admisión por debajo del 15 %. La carga de la bomba se calcula; si es dato la presión de admisión de la bomba a un gasto específico, el gasto producido con su gas disuelto en el aceite es el factor usado para seleccionarla.

Cada tipo de bomba cuenta con una juego de curvas características; la curva de comportamiento seleccionada según diámetro y rango de frecuencias a la que operará la bomba se consulta para determinar la carga y potencia por etapa a la eficiencia máxima. La carga dinámica total (descarga menos succión) se divide entre la carga por etapa para

obtener el número requerido de etapas. La Carga Dinámica Total (*CDT*) de una bomba se usa para calcular el número de etapas requerido o uno ligeramente mayor.

El número total de etapas es multiplicado por la potencia de cada etapa y por la densidad relativa del fluido más pesado dentro del pozo, para obtener la potencia requerida del motor .

Se seleccionará el motor que será introducido al espacio anular, que tenga la suficiente potencia y sea compatible con el voltaje disponible para accionar la bomba al igual que su sección de sello para acoplar la bomba al motor.

El cable de extensión del motor (cable plano o redondo) se seleccionará para conectarse al motor y con longitud suficiente para extenderse arriba de la bomba hasta la superficie. El aislamiento del cable se selecciona con base en la máxima temperatura del fondo y a condiciones ambientales.

Cuando existen restricciones entre el diámetro interior de la tubería de revestimiento y el aparejo de bombeo electrocentrífugo es posible realizar empates de cables de diferentes diámetros; debiéndose seleccionar el mayor calibre del cable redondo que estará entre la tubería de producción y tubería de revestimiento y que no tenga más de un 2% de caída del voltaje.

El transformador de voltaje es seleccionado para manejar el voltaje requerido para operar el motor eléctrico de fondo a plena carga, mientras que el transformador de corriente adecúa ésta a los valores requeridos por los circuitos de control del variador de velocidad.

Otra unidad que debe ser seleccionada al diseñar el equipo de bombeo electrocentrífugo es el inductor, ya que es el dispositivo eléctrico que funciona como filtro de corrientes armónicas, al ser el que depura la señal de voltaje y corriente que se lleva a través del cable eléctrico al fondo del pozo.

Programas de cómputo se han diseñado para ser alimentados con todos los datos básicos de un pozo y así seleccionar el mejor arreglo del sistema de bombeo eléctrico subsuperficial, para ser colocado en el lugar más apropiado del pozo.

Después de que el aparejo instalado haya sido operado por varios días, se recabarán datos nuevos del pozo, datos que pueden ser alimentados a la computadora y que provean un análisis más confiable de la instalación con el propósito de revisar el diseño de la bomba, cambiando el número de etapas requerido si es necesario, aunque esto implique intervenir el pozo. Estos programas de cómputo pueden manejar fluidos de alta viscosidad y con alta relación gas-aceite.

Procedimiento de diseño del sistema de bombeo electrocentrífugo

Cuando seleccionamos un sistema de bombeo electrocentrífugo así como cualquier sistema artificial de producción, la información confiable acerca de la productividad de los pozos y características físicas es vital para su diseño ya que el objetivo es que éste proporcione la producción óptima mientras se alarga al máximo la vida de la bomba.

Diseñar un sistema eficiente de bombeo electrocentrífugo no es un procedimiento complicado cuando se usa una potencia estándar de 60 o 50 ciclos/seg (60 o 50 Hz).

1) El primer paso consiste en recolectar y validar los datos necesarios para asegurar una operación eficiente. Esto incluye características físicas del pozo, producción y posibles problemas.

Datos del pozo: diámetro y peso de las tuberías de revestimiento y producción, tipo de cuerda, tipo de terminación, intervalo productor.

Datos de producción: presión de descarga en la cabeza del pozo (Pwh), gasto de producción actual, nivel dinámico, presión de fondo estática, temperatura de fondo, Relación gas-aceite, porcentaje de agua producido, presión en la línea de descarga también conocida como presión de salida.

Tipo de fluido en el pozo: densidad relativa de los fluidos producidos, viscosidad del aceite.

Equipo de generación eléctrica: voltaje disponible, frecuencia y capacidades de la fuente de poder.

Posibles problemas: depositación de arena, corrosión, parafinas, emulsiones, gas libre e impurezas y temperaturas.

2) A continuación se selecciona el gasto de aceite Q_0 que se desea obtener en la superficie, partiendo del índice de productividad del pozo y/o de datos de una prueba de producción, se determina la presión de fondo fluyendo (Figura 20), haciendo uso de la correlación propuesta por Vogel para pozos con presión de fondo estática abajo de la presión de saturación o la curva generalizada para presiones estáticas mayores a la de saturación.

Ecuación de Vogel:

$$\frac{q_p}{q_{m\acute{a}x}} = 1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_{wr}} \right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_{wr}} \right)^2$$

donde:

q_0 , Gasto total en $m^3/d\acute{a}a$
 $q_{m\acute{a}x}$, Gasto máximo $m^3/d\acute{a}a$

P_{wf} , Presión de fondo fluyendo Kg/cm²

P_{ws} , Presión estática de fondo Kg/cm²

La curva generalizada a diferencia de la de Vogel permite calcular curvas de índice de productividad para presiones de fondo fluyendo arriba y abajo de la presión de saturación, P_b (Figura 20).

Si los datos de la prueba de producción fueron tomados arriba de la presión de saturación, deberá calcularse primero el índice de productividad (J).

$$a) \quad J = \frac{q_o}{(P_{ws} - P_o)}$$

Calcule q_b y q_c utilizando las siguientes ecuaciones:

$$b) \quad q_b = J(P_{ws} - P_b) .$$

$$c) \quad q_c = \frac{q_b}{1.8 \left(\frac{P_{ws} - P_b}{P_b} \right)}$$

Para cualquier valor de la presión de fondo fluyendo menor a la presión de saturación usar la siguiente ecuación:

$$d) \quad q = q_c \left[1.8 \left(\frac{P_{ws}}{P_b} \right) - 0.8 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_b} \right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_b} \right)^2 \right]$$

Si la prueba de producción fue tomada abajo de la presión de saturación , despeje q_c de la ecuación anterior y calcule para cualquier presión de fondo fluyendo menor a la presión de saturación.

Despeje q_b de la ecuación c) y determine el índice de productividad mediante la ecuación b).

Deberá emplearse la ecuación a), en la determinación del gasto (q_o) para cualquier valor de presión de fondo fluyendo mayor que la presión de saturación.

$$q^{o}_{ce} = q^{o}_{cs} B_o$$

$$q^{w}_{ce} = q^{w}_{cs} B_w$$

Gasto de gas libre entrando a la bomba $G_{l_{tb}}$ se define como

$$G_{l_{tb}} = G_{l_{ce}} (1 - E_{f_{sep}})$$

donde:

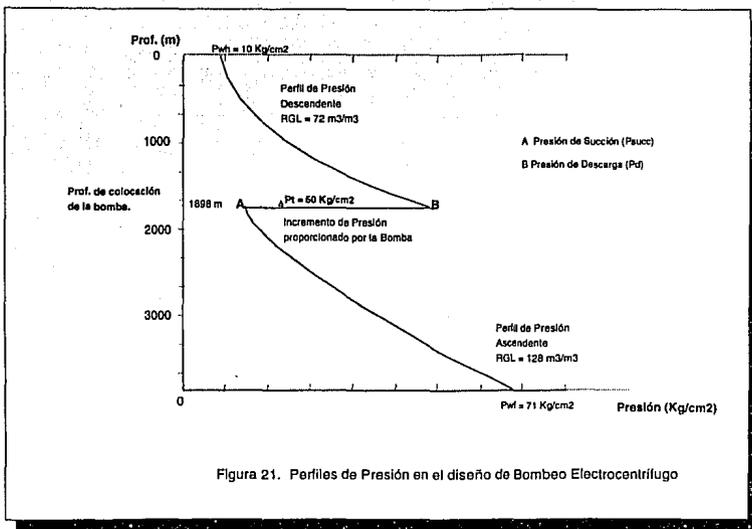
$E_{f_{sep}}$, Eficiencia del separador de gas

El porcentaje de gas libre a través de la bomba $PG_{l_{tb}}$ se determina

$$PG_{l_{tb}} = \frac{G_{l_{tb}}}{G_{l_{tb}} + q_{o.c.e.} + q_{w.c.e.}} \times 100$$

La presión en este punto es la presión de succión de la bomba y la profundidad es la de colocación de la misma.

Para determinar el perfil de presión descendente, deberá de partirse de la presión requerida en la boca del pozo y una relación gas líquido igual a la de la formación, menos la cantidad de gas libre enviado al espacio anular, hasta que sea alcanzada la profundidad de colocación de la bomba, marcada con la letra B en la Figura 21. La presión de este punto es la presión de descarga de la bomba.



Mediante el uso de métodos de flujo multifásico se calculan las caídas de presión en tuberías verticales como son los de Hagedorn-Brown y Baxendell-Thomas. En especial, para los pozos de la Región Marina, se recomienda el método de Orkiszewski, ya que en estudios recientes es el que mejor se ajustó al comparar los valores de presión calculados con valores de presión medidos directamente en las tuberías de producción de los pozos.

Ahora, deberá calcularse el incremento total de presión requerido para obtener en la superficie el gasto deseado, este valor está representado por la diferencia entre las presiones de descarga y succión de la bomba, incremento que se observa en la Figura 21.

$$\Delta P_t = P_d - P_s$$

donde:

P_d , Presión de descarga

P_s , Presión de succión

ΔP_t , Incremento total de presión

se procederá entonces, a dividir el incremento total de presión en "n" incrementos iguales, a desarrollarse en el interior de la bomba.

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

El mayor volumen de fluidos que la bomba debe manejar es el que llega a la succión, por lo que, las primeras etapas requieren tener mayor capacidad volumétrica, definida como el rango de gasto que una etapa de la bomba maneja con máxima eficiencia.

Debe señalarse que el gasto deseado en la superficie se establece a condiciones de tanque y no cuenta con presencia de gas es decir, sólo es líquido, por lo que existe una diferencia notable con el gasto real que se bombea.

Después debe determinarse la carga y potencia por etapa que desarrollará la bomba, empleando las curvas características de la bomba que cumpla con el rango de gastos a manejar y el diámetro de T.R. en donde será colocada.

$$\text{Carga} = \frac{Cte * \Delta P}{\gamma_f}$$

II.1.1 Componentes del equipo del pozo Ku-H 445

La prueba piloto del sistema artificial, tema de este trabajo, se llevó a cabo entre octubre del 92 y septiembre del 93, prueba que se realizó en dos pozos con aceite pesado de la Región Marina; la compañía de servicio realizó una serie de simulaciones con un programa de cómputo, empleando los datos básicos que se les suministró para el diseño de los aparejos de los pozos de la plataforma Ku - H.

Los datos suministrados indicaron que los pozos seleccionados (Ku 445 y 427) para el diseño de bombeo electrocentrífugo, eran buenos candidatos para este tipo de sistema artificial. Aunque las condiciones de los pozos eran difíciles, no representaban un medio imposible o inusual. Los retos principales para el buen funcionamiento del sistema provenían de tres áreas, compuestas por factores simples o la combinación de dos o más de ellos, siendo los más representativos:

a) Combinación de la temperatura de fondo y la producción de aceite

Debido a que la confiabilidad del motor es función de la temperatura de operación, se hizo necesario evaluar este parámetro.

Los pozos de la plataforma Ku - H tienen una temperatura de fondo, de aproximadamente 240 °F, que aunado a la baja capacidad de transferencia de calor del fluido producido, hacía esperar un aumento considerable de la temperatura de operación durante la prueba.

b) Combinación significativa de H₂S , CO₂ y alta relación gas-aceite

La severidad de la corrosión es función de la presión de succión de la bomba y el porcentaje de corrosividad presente.

En pozos donde coexisten una alta relación gas-aceite y cantidades significativas de CO₂ y H₂S se debe determinar si se desea lograr altas presiones de admisión para reducir el gas libre en la bomba o bajas presiones de admisión para reducir la corrosión. Con el propósito de prevenir algún daño por esta combinación de fluidos, debió revisarse el estado de la tubería de revestimiento, antes de instalar el aparejo de bombeo electrocentrífugo.

c) Costo relativamente alto de las operaciones marinas

Aunque no es un parámetro que incida sobre la eficiencia del sistema de bombeo electrocentrífugo, hubo necesidad de tomar en cuenta los gastos que se producirían, ya que el sistema es caro debido a la infraestructura que se requería y si a esto le aunamos su instalación en una plataforma marina, los costos se incrementarían notablemente.

Tomando en cuenta los parámetros antes mencionados, y que en esta área era la primera vez que se probaría este sistema, se consideró el siguiente diseño:

- 1) La carga de potencia sobre los motores fué de aproximadamente 70 % del rango de la potencia disponible para el rango inicial recomendado de operación. Esto mantendría una temperatura baja en el motor, resultando en una temperatura de operación más baja y un aumento en la confiabilidad durante el período inicial.
- 2) La potencia del motor Hp y KVA fué la necesaria para permitir que el equipo produzca aproximadamente 11,000 BPD.
- 3) La profundidad de colocación se seleccionó para mantener al gas libre presente a la presión de admisión por debajo del 15% para una operación eficiente de la bomba. Esto mantuvo un pequeño incremento de temperatura en el fluido producido, dando como resultado un menor esfuerzo termal sobre el cable flejado a la tubería de producción arriba de la bomba.

Como al seleccionar una profundidad de colocación de 7,000 pies, la presión de admisión aumenta a un punto en el que la corrosión puede ser un problema a largo plazo, se especifica un recubrimiento de 12 milésimas de acero monel en el equipo de bombeo y una armadura de acero inoxidable en el protector del cable gufa para compensar esa posibilidad.

- 4) Se seleccionó un sensor de presión-temperatura. Este dispositivo permite que se midan las condiciones de presión y temperatura del pozo continuamente.

- 5) Cada pozo se controla con un variador de velocidad de 518 KVA, ya que se requiere de un arranque suave para evitar una carga excesiva en los generadores de suministro.

Los variadores de velocidad también permiten la operación sobre un amplio rango de producción al poderse modificar las frecuencias de operación de 45 Hz hasta un poco más de los 60 Hz para la bomba especificada con lo que se podrían obtener gastos in situ de 6,400 a 15,000 BPD.

- 6) Se especificaron cojinetes de plástico en la bomba para compensar la posibilidad de producción de arena, aunque la arena no se ha mencionado como una posibilidad en estos pozos.

El gasto de líquido producido va acompañado de un 3.8 % de H₂S con un 4.9 % de CO₂. En el rango alto de producción el gas libre en la succión de la bomba es de 9.7 %. Por lo tanto la carga de fluido arriba de la bomba se esperaba de 5,596 pies, lo que representaba una presión de succión de 1,914 psi.

Lo anterior reafirmaba la posibilidad de que la carga del motor fuera el 70 % de su valor nominal de operación, lo que traía como consecuencia que para el máximo gasto se requieran 435 KVA.

En lo que respecta al diseño, se asumió que el motor requería de 100 m de longitud de cable conductor con recubrimiento de acero monel; los 2,100 m restantes de cable fueron de cable plano del número 2. Selección que en la superficie requirió de un voltaje de 3,111 Volts con una temperatura interna de 265 °F.

Para el pozo Ku 445 en la fase inicial la compañía recomendó producir gastos entre 5,000 y 9,750 BPD o 6,466 y 12,529 bpd in situ, lo que limita al variador a un rango de 37 a 63 Hz de frecuencia.

Los parámetros promedio de los pozos de la plataforma Ku - H, se muestran a continuación

PARÁMETROS

Tipo de aceite	Negro
Pws inicial (Kg/cm ²)	293.5
Pws actual (Kg/cm ²)	195.0
Presión de saturación (Kg/cm ²)	138.0
Temperatura de yacimiento (°C)	114.0
Relación gas-aceite (m ³ /m ³)	45.0
Indice de productividad (MBIs/Kg/cm ²)	2.5
Densidad del aceite en °API @ c.s.	15.7
Porosidad (%)	8.5
Factor de volumen del aceite inicial (m ³ /m ³)	1.22
Permeabilidad (Darcy)	1 - 5
Saturación de agua (%)	16.7
Espesor neto (m)	226.5
Litología	Brechas dolomitizadas
Tipo de porosidad	Secundaria

Se enlista la distribución del aparejo de bombeo electrocentrífugo del pozo Ku - 445 que se introdujo al pozo:

CANT	COMPONENTE	PROFUNDIDAD (m)
	Elevación mesa rotaria.	12.13
1	Bola colgadora 13 5/8 pg x 4 1/2 pg 8h.r.r.	12.39
1	Tramo de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 # , L-80, invertido	21.64
1	Doble piñon 4 1/2 pg HDCS	22.10
13	Tramos de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 #, L-80	144.97
1	Combinación P-3 1/2 pg HDCS x C - 4 1/2 pg HDCS	145.50

CANT.	COMPONENTE	PROFUNDIDAD (m)
1	Tramo de T.P. 3 1/2 pg RTS-8, 10.3 #, C-75	154.99
1	Valvula de Tormenta 3 1/2 pg S-10	157.44
1	Tramo de T.P. 3 1/2 pg RTS-8, 10.3 #, C-75	166.73
1	Combinación P-4 1/2 pg VAM-REG x C - 3 1/2 pg HDCS	166.94
1	Empacador 9 5/8 pg RDH, 40-47 #	169.38
1	Combinación P-4 1/2 pg HDCS x C - 4 1/2 pg VAM-REG	169.61
1	Combinación P-3 1/2 pg HDCS x C - 4 1/2 pg HDCS	170.14
1	Tramo de T.P. 3 1/2 pg RTS-8, 10.3 #, C-75	179.16
1	Niple de Asiento "X" 3 1/2 HDCS	179.49
1	Tramo de T.P. 3 1/2 pg RTS-8, 10.3 #, C-75	188.84
1	Combinación P-4 1/2 pg HDCS x C - 3 1/2 pg HDCS	189.07
157	Tramo de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 10.3 #, L-80, 12.75 #	1,660.14
1	Combinación P-3 1/2 pg HDCS x C - 4 1/2 pg HDCS	1,660.37
1	Tramo de T.P. 3 1/2 pg RTS-8, 10.3 #, C-75 (Sensor)	1,669.90
1	Combinación P-3 1/2 pg HDCS x P - 4 1/2 pg HDCS	1,670.14
9	Tramos de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 #, C-75	1,763.47
1	Combinación C-4 1/2 pg HDCS x P - 2 7/8 pg 8h.r.r.	1,763.70
1	Bomba centrífuga superior	1,766.99
1	Bomba centrífuga inferior	1,775.80
2	Protectores	1,778.89
1	Motor eléctrico superior	1,788.04
1	Motor eléctrico inferior	1,797.25
1	Centrador especial 8 1/16 de diámetro exterior	1,797.49

#, lb/pie

En el estado mecánico anexo se presenta cada uno de los componentes del aparato y su correspondiente profundidad de colocación.

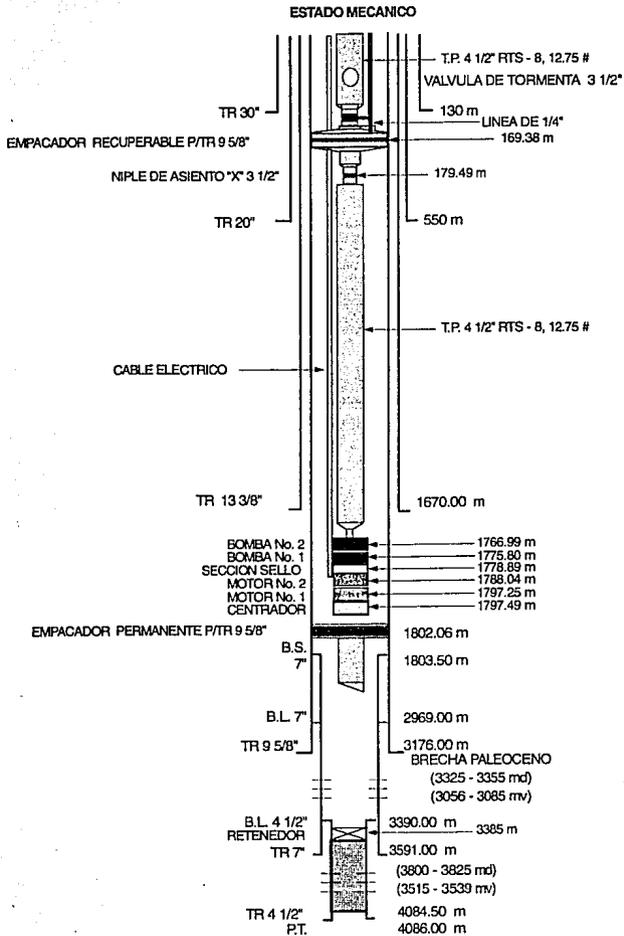


Figura 22. Distribución del aparato de bombeo electrocentrífugo pozo Ku - 445

II.2 Operaciones a realizarse en el pozo

Cuando todo el equipo necesario está disponible en el área del pozo, el primer paso es verificar el diámetro interno del espacio anular con un calibrador para asegurarse que el espacio anular está libre de escombros y obstrucciones. El sistema completo de bombeo electrocentrífugo subsuperficial debe ser acondicionado e introducido dentro del pozo de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

En seguida se detalla el procedimiento de conversión al sistema de bombeo electrocentrífugo con equipo Snubbing para pozos marinos:

1.- Control del pozo e instalación del equipo Snubbing

- Bombear a través de la tubería de producción fluido de control.
- Colocar válvula de contrapresión tipo "H". Proceder a recuperar el medio árbol de válvulas, y revisar el cabezal del pozo y la pista del anillo con la finalidad de evitar fugas en este punto.
- Deberá instalarse y probar el conjunto de preventores y líneas de control, por un mínimo de 15 min a 210 Kg/cm². Instalar el equipo snubbing probando componentes hidráulicos del equipo.
- Una vez controlado el pozo y colocado el equipo snubbing. Proceder a aflojar los yugos compresores de la bola colgadora, desenchufar los sellos Multi-V. del empacador y levantar la bola colgadora hasta la ventana del equipo, el espacio anular deberá llenarse con fluido de control, manteniendo el pozo en observación el tiempo necesario para corroborar que éste no fluya normalmente. Se recupera entonces el aparejo de producción al 100 %.
- Como procedimiento de seguridad se debe escariar la última tubería de revestimiento a +/- 1000 m, para verificar que no existan obstrucciones en ésta, colocando para ello lo que se conoce como tapón puente.
- Durante la instalación del cabezal, se toma la precaución de orientarlo con la salida del cable eléctrico para permitir la realización de los empates del cable.

2.- Preparativos para el armado e introducción del equipo de bombeo electrocentrífugo

Antes de empezar a introducir el equipo de bombeo electrocentrífugo es necesario realizar una serie de preparativos previos, los cuales se enumeran a continuación:

- Primeramente, medir y tomar los números de serie de cada uno de los componentes de la sarta (motores eléctricos, protectores y bombas centrífugas). El carrete que contiene el cable eléctrico debe ser alineado en dirección al pozo y la polea guía debe ser izada a la parte superior de la ventana del equipo snubbing, al mismo tiempo miembros de la cuadrilla se encargan de instalar el motor eléctrico y los accesorios para operar el carrete del cable.
- Colocar en la ventana del snubbing el motor eléctrico, bomba hidráulica y los accesorios que permiten la colocación de las grampas de aseguramiento y protección del cable eléctrico.
- Efectuar pruebas de hermeticidad, apertura y cierre de la válvula de tormenta, además deberá revisarse la válvula de seguridad superficial del espacio anular del (empacador recuperable) efectuando pruebas de apertura y cierre de válvulas de venteo, los sustitutos de enlace que serán utilizados, cuñas especiales (3 1/2 a 4 1/2 pg) para introducción del aparejo de bombeo electrocentrífugo con cable eléctrico flejado.
- El personal técnico especializado, deberá efectuar las pruebas eléctricas de megeo en la cabeza del pozo, transformador, caja de venteo y demás componentes superficiales del equipo.
- En la parte superior de los motores, protectores y bombas se colocan las grapas especiales para izaje para introducir al pozo el aparejo en el siguiente orden:
 1. Motor eléctrico inferior
 2. Motor eléctrico superior
 3. Tándem de protectores
 4. Bomba centrífuga inferior
 5. Bomba centrífuga superior
- Durante la introducción del aparejo se llenan los motores y protectores con aceite dieléctrico. Al introducir el motor eléctrico inferior se tiene el cuidado de que al llegar a la ventana de trabajo del equipo, en el extremo inferior de éste se coloca el centrador especial de 8 1/6" de diámetro exterior.
- Al llegar el conector eléctrico del segundo motor (mufa) a la altura de la ventana, se instala del conector del cable y se prueba la continuidad eléctrica por el personal especializado, instalando a 50 cm de éste el primer fleje del cable y probando una vez más eléctricamente, los flejes se colocan espaciados de 1.5 a 2 m a lo largo de los protectores y de las bombas.
- En el caso en donde se contemple la instalación de un sensor de presión y temperatura, debe afianzarse con abrazaderas en el tramo de la tubería de producción 3 1/2 pg.

- En este punto se realiza el primer empate del cable eléctrico, y se continuará introduciendo el aparejo de bombeo electrocentrífugo, colocando grampas protectoras de cable en la junta de la tubería y colocando 1 o 2 flejes por tramo de T.P.
- La válvula de seguridad del espacio anular colocada en el empacador recuperable se conecta y se realizan dos empates eléctricos, el primero en la parte inferior del empacador y el segundo en la superior, continuando con la introducción del aparejo hasta colocar la válvula de seguridad subsuperficial (válvula de tormenta) de 3 1/2".
- El personal técnico se encargará de realizar la interconexión de la válvula de venteo (empacador) con la válvula de tormenta y efectuará pruebas de apertura y cierre.
- A partir de este momento se continuará metiendo el aparejo de producción hasta la profundidad programada, colocando grapas por cada junta de tubería de producción y flejando el cable, teniendo especial cuidado de evitar el exceso de tensión del cable eléctrico.
- Al llegar al nido de la bola colgadora, el personal efectuará las pruebas eléctricas necesarias. En la ventana se instala la bola colgadora, y se efectúa el último empate del cable para posteriormente bajarla y sentarla en su nido, teniendo cuidado de alinear con el yugo guía y evitar que la sarta gire para no provocar un daño en el cable eléctrico si la sarta gira.
- Después de verificar el buen asentamiento de la bola, se aprietan los yugos opresores. Procediéndose a desmantelar el equipo snubbing y el conjunto de preventores; se instala el medio árbol de válvulas para bombeo electrocentrífugo y se prueba.
- Del cuarto de control al árbol de válvulas se hace la interconexión eléctrica y se está listo para operar el sistema de bombeo electrocentrífugo, desplazando fluido de control a las presas, hasta que se aprecie en las presas aceite limpio, alineándose entonces al separador de prueba o a la batería.

3.- Puesta en operación de pozos con aparejo de bombeo electrocentrífugo

- Verificar que el fluido del pozo se manifiesta en la superficie; no esperar esto más de 20 min; si no se manifiesta en este tiempo el pozo, parar el variador y revisar que todas las válvulas correspondientes del medio árbol estén abiertas.
- Después que el pozo entre en operación, monitorear parámetros en el variador, tablero de control y en el mismo pozo, hasta que se establezca el flujo, generalmente 4 horas.
- Para esta prueba en especial el fabricante del equipo de bombeo electrocentrífugo recomienda, hacer no más de 2 intentos de arranque en media hora, evitando así un envejecimiento prematuro del equipo subsuperficial y consecuentemente una posible falla.

II.2.1 Resultados de la prueba

El día 8 de octubre de 1992, se inició la prueba piloto de bombeo electrocentrífugo en la plataforma de producción Ku - H de la Región Marina, metiendo en operación con este sistema artificial el pozo 445; arrancando a una frecuencia de 45 Hz, mediante la operación de un variador de velocidad que amortigua la torsión sobre la flecha del motor eléctrico subsuperficial. Posteriormente, se incrementó la frecuencia a 50 Hz (2,915 rpm de velocidad de bombeo).

Después de tres horas de operación, de acuerdo a las cartas del amperímetro del variador de velocidad y de los gráficos de los registradores de flujo, se consideró estable el comportamiento del pozo.

A continuación en la tabla de la Figura 23 se presenta el resumen del comportamiento del pozo durante el funcionamiento del equipo de bombeo electrocentrífugo.

Fecha D/M/A	Presiones			Temp.	Gasto		RGA m3/m3	Diam. Estrang. pg
	Frec. Hz	T.P. Kg/cm2	T.R. Kg/cm2	Cabeza * C	Gas MPCD	Acelle BPD		
8-19/10/92	50	9.4	4.6	94.7	2.32	7778	53	2
19-Oct-92	Paro programado para realizar conexiones superficiales pendientes							
20/10/92	55	10.1	4.8	101	2.33	8071	52	2
20/Oct/92	Se incrementó la frecuencia de 50 a 55 Hz							
21-31/10/92	60	11.2	6.6	97	2.87	10017	51	2
31/Oct/92	Fuera de operación el equipo por problemas de generación eléctrica							
4-10/11/92	50	9.8	5.4	S/D	2.35	7800	51	2
8/Nov/92	Extracción del aparato para revisión de sus componentes							
23/01-25/02/93	50	13.0	6.8	S/D	2.30	7778	53	1 3/8
26-28/Jul/93	Se instalan filtros de armónicas 5ta y 11ava							
23/09-31/12/93	55	26.0	7.2	S/D	2.30	6657	61	1

Figura 23. Producción del pozo 445 con bombeo electrocentrífugo

Cabe mencionar que la prueba piloto consideró la aplicación del bombeo electrocentrífugo en dos pozos de la plataforma Ku - H, siendo el segundo pozo el 427 el cual fue puesto en operación casi simultáneamente con el pozo 445 que se está analizando.

El programa de cómputo denominado BEC¹⁸ fué alimentado con los datos promedio obtenidos en la primera fase de la prueba con el objeto de reproducir el comportamiento del pozo 445, teniéndose especial cuidado en respetar las dimensiones del aparejo instalado y los parámetros de operación leídos durante la prueba como lo son la frecuencia, temperatura y presión en la cabeza (Twh y Pwh respectivamente) así como el gasto en la superficie condiciones que se muestran el Tabla II; por lo que respecta a las posibles frecuencias, los resultados fueron vaciados en los gráficos de las curvas de comportamiento de la bomba, los cuales fueron proporcionadas por la compañía fabricante de las bombas.

CDT ft	No. ETAPAS	POT. Hp	FREC.		TWH ° C	RGA m3 / m3	PRESION KG/CM2				GASTO BPD		
			Hz				SUCC.	DESC.	ΔP.	TP.	SUCC.	DESC.	TP.
962	106	150	50	48.7	74.6	52	102	126	24	9.7	10260	9719	7869
1537	103	237	55	54.6	76.6	50	101.5	141.2	39.7	11.1	12196	11171	9190
1857	104	306	60	59.7	80	50	101.2	149.2	48	12.4	13416	12259	10113

DATOS MEDIDOS EN SUPERFICIE
 CDT, CARGA DINAMICA TOTAL CARGA HIDRAULICA CONTRA LA QUE TRABAJA LA BOMBA
 ΔP, INCREMENTO DE PRESION QUE LA BOMBA SUMINISTRA A LA MEZCLA

Tabla 2. Pozo Ku 445 resultados de la simulación con el programa BEC

En los gráficos antes mencionadas se aprecia el rango recomendado de operación y el rango en el que se operó la bomba durante cada una de las etapas de la prueba. El fabricante al recomendar el diseño del aparejo de bombeo electrocentrífugo, proporciona su propia tabla de datos, por lo que se efectuó una comparación entre ellas.

Si se observa la Figura I del anexo A para la frecuencia de 50 Hz, el rango de gastos a condiciones de bomba se encontraba en el límite superior del rango recomendado para una eficiencia aproximada de 66 %, condiciones que permiten estimar que el bombeo electrocentrífugo estaba operando de una manera adecuada, con empujes axiales de la bomba sobre sus propios baleros, sin embargo los empujes debidos al protector y el motor eran ligeramente ascendentes.

En la Figura II (Anexo A) para la frecuencia de 55 Hz, se aprecia que el rango de operación del aparejo de bombeo electrocentrífugo se encuentra por arriba del rango recomendado, lo cual provoca una reducción en la eficiencia de la bomba a 58 %. Esto implica un desgaste en los baleros debido a los empujes axiales que desarrolla la bomba, además de generar calor que posiblemente es difundido por los fluidos que pasan a alta velocidad a través de los impulsores.

La Figura III (Anexo A) corresponde a la frecuencia de 60 Hz, el rango de operación del aparejo de bombeo electrocentrífugo, se encuentra más arriba del rango recomendado por lo que la eficiencia se reduce a 45 %. En estas condiciones de operación, los empujes axiales generados por la bomba son importantes, ya que producen desgaste excesivo sobre los baleros y pueden generar calor adicional por fricción, a una velocidad mayor de la que éste puede ser difundido por el paso de los fluidos.

Para evaluar más objetivamente las condiciones de operación antes mencionadas, es necesario recordar cuáles fueron aquellos factores decisivos en la selección de los pozos más apropiados para la aplicación de este sistema artificial de producción en un campo de aceite pesado como Ku: la geometría de terminación de los pozos, el porcentaje de gas libre a la profundidad de la bomba, del cual se habló más ampliamente al principio de este capítulo y de su efecto en la operación del sistema, el gasto a obtener en superficie, así como la viscosidad y densidad del aceite a producir.

Por la profundidad de colocación de la bomba (1,790 m) ésta podría sufrir los efectos del gas libre que entra y provoca cavitación, causando la destrucción prematura de los impulsores, además de reducir la eficiencia y la capacidad de carga.

Otros efectos dañinos pueden presentarse durante la operación en estas condiciones: la generación de calor por fricción al incrementar la velocidad de bombeo sumado a mayores cantidades de gas libre en las primeras etapas, como éste es un mal conductor del calor, se generará finalmente un incremento excesivo de temperatura y el consiguiente ablandamiento en el aislamiento del cable en esa sección de la bomba, amén de transferir este calor al protector y dañarlo con la consecuente contaminación del aceite lubricante del motor. Uno de estos efectos, o la combinación de varios, conduce al corto circuito en el cable o en el aislamiento del motor.

Para reducir los efectos del gas libre, la acción más viable es colocar la bomba a mayor profundidad, o bien instalar un dispositivo separador de gas en el aparejo de bombeo electrocentrífugo, debiendo considerar si se requiere la instalación de empacador en el espacio anular entre la tubería de producción y la de revestimiento.

Estadísticamente, las fallas que se presentan en mayor porcentaje (70 %) son aquéllas debidas al corto circuito en el cable, empates, mufa y aislamiento del motor.

Adicionalmente, durante la realización de esta prueba piloto, un gran porcentaje de las fallas se debieron a problemas inherentes al variador de frecuencia y a la generación de ondas armónicas que afectan al equipo eléctrico tanto superficial (motores, generadores), como al subsuperficial.

Comportamiento de producción del pozo Ku 445

Al realizar un análisis cuantitativo del comportamiento de la producción del pozo con bombeo electrocentrífugo¹⁸, cuando varían los parámetros que lo influyen, se hace necesario que en un gráfico de curvas características de la bomba se incorporen variables como la presión estática del yacimiento y el índice de productividad del pozo.

Si se observa el diagrama de presión vs. profundidad y comportamiento de la bomba (Figura 24), donde el aparato de bombeo electrocentrífugo opera a una frecuencia constante, el gasto producido en la superficie q , genera un nivel dinámico de fluido en el espacio anular ND , dado que se conocen los gradientes de presión en la tubería de producción y en el espacio anular, representados por las líneas GP_{tp} y GP_{ea} , respectivamente. La diferencia de presión entre los gradientes a la profundidad de la bomba se define como la carga estática H_s . Generalmente, la presión en la cabeza del pozo por tubería de producción, es mayor que la existente en el espacio anular y representa una presión adicional, contra la que la bomba debe trabajar H_p .

En la Figura $H_p = P_{wh_{tp}} - P_{wh_{ea}}$, representado por línea H_p . En forma adicional, las pérdidas de presión por fricción H_f en la tubería de producción también se ilustran.

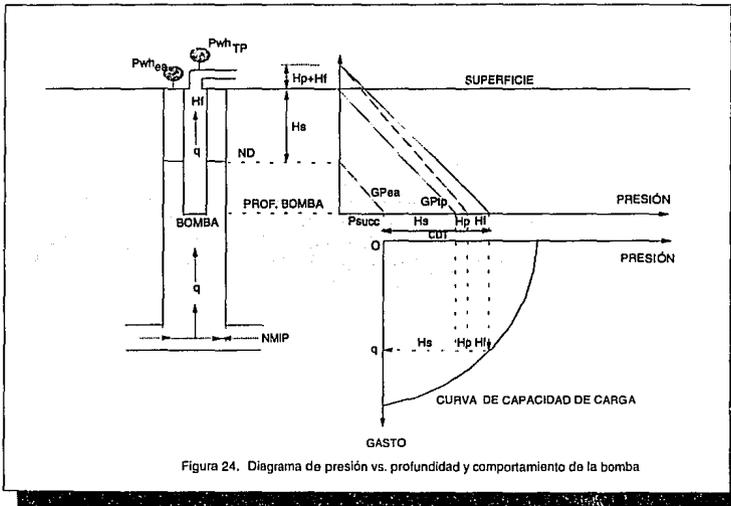


Figura 24. Diagrama de presión vs. profundidad y comportamiento de la bomba

Todos estos factores se explican al definir el concepto Carga Dinámica Total :

$$CDT = \text{Prof. de Colocación de la bomba} + \text{Pérdida de presión por fricción} + \text{Presión en la cabeza del pozo} - \text{Sumergencia}$$

Expresándolo matemáticamente se tiene:

$$CDT = H_s + H_f + P_{wh_{tp}} - P_{wh_{ea}}$$

donde todos los términos están expresados en su equivalente de longitud de columna hidráulica.

En la sección inferior derecha de la Figura 24, se incluye la curva de capacidad de carga de la bomba girada 90°, de tal forma que su eje de capacidad de carga expresado en unidades de presión, es paralelo al eje de presión del diagrama de presión-profundidad; el punto de intersección entre el G_{Pea} y la profundidad de la bomba es el origen y corresponde a la presión de succión P_{succ} . El gasto de equilibrio entre la capacidad del aparejo y la del pozo, se fija en el punto de intersección de la línea de CDT con la curva de capacidad de carga.

Para determinar el incremento o decremento de producción al modificar la frecuencia para cambiar la velocidad de bombeo, debemos analizar la Figura 24. Como la presión de succión señala la posición de la curva de capacidad de carga, en relación con el diagrama de presión-profundidad; el nivel dinámico cambia al variar el gasto y en consecuencia la presión de succión también es diferente, lo que implica un defasamiento de la curva de capacidad de carga en relación con el diagrama antes mencionado (P vs $Prof$).

En congruencia con este diagrama, se puede construir un gráfico de gasto vs presión Figura 25, en donde se incluya la presión estática P_{ws} , el índice de productividad y la curva de presión en la succión, para diferentes gastos considerando fija la profundidad de colocación de la bomba.

También se incluye la curva de capacidad de transporte de la tubería de producción, identificada como la curva de carga, ya que indica el incremento de presión que la bomba debe imprimir a los fluidos para hacerlos llegar a la superficie con la presión necesaria en la cabeza del pozo.

La carga dinámica total CDT expresada en unidades de presión, se determina por la distancia entre la curva de carga y la de presión en la succión. Solo para un gasto la CDT leída del gráfico, es igual a la CDT que la bomba puede desarrollar de acuerdo a su curva

de capacidad de carga, lo que representa el equilibrio del sistema compuesto por el pozo y el aparato de bombeo electrocentrífugo.

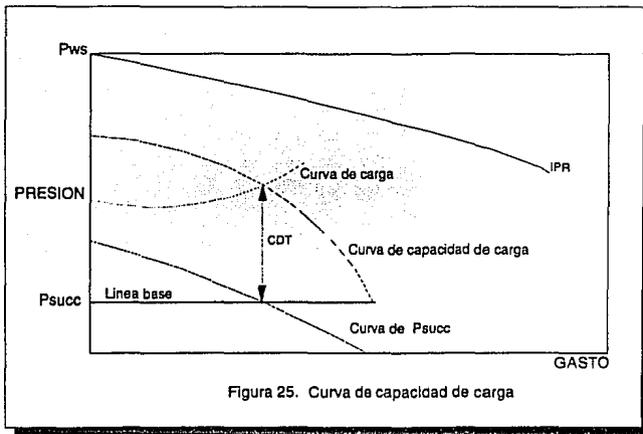


Figura 25. Curva de capacidad de carga

Para un pozo y bomba dados, la Figura 26 ilustra la forma de encontrar la condición de equilibrio. Al construir para una profundidad fija de colocación de la bomba, un gráfico de gasto vs presión que incluya las curvas de: carga, presión en la succión, capacidad de carga de la bomba y su línea base.

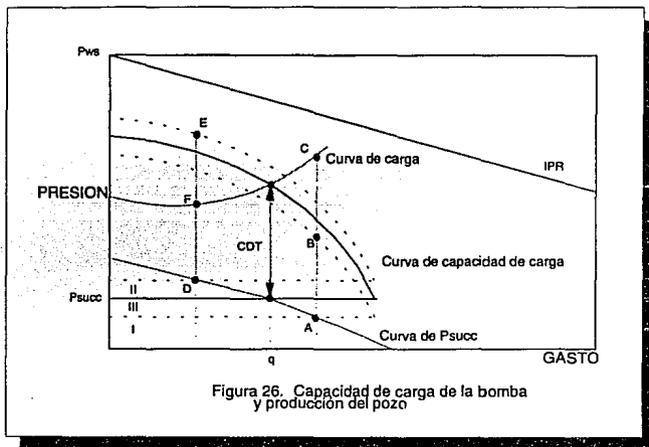


Figura 26. Capacidad de carga de la bomba y producción del pozo

En la Figura 26 se ilustran 3 casos:

Para el caso I, la presión en la succión es demasiado baja y la carga dinámica total requerida definida por la unión de los puntos A-C, es mayor a la que la bomba puede desarrollar línea A-B.

En el caso II, la presión en la succión es demasiado alta por lo que la bomba puede desarrollar una carga dinámica total CDT igual a la distancia entre D-E, mientras que sólo se requiere la distancia definida por los puntos D-F, lo que implica un sobrediseño.

El caso que nos interesa es aquél en donde se logra el equilibrio, caso III, donde la intersección de la línea base y de la curva de $Psucc$, se encuentra en el mismo plano vertical de la intersección entre las curvas de carga y de capacidad de carga de la bomba.

La posición de equilibrio se encuentra al deslizar verticalmente el gráfico de capacidad de carga y línea base, sobre el gráfico de curva de $Psucc$ y carga, hasta que las dos intersecciones mencionadas queden alineadas. Por lo que la $Psucc$ y el gasto correspondientes a esta condición se leen del gráfico.

Para realizar el análisis del comportamiento de producción del pozo Ku 445, se construyeron las Figuras 26 a 30, utilizando la información registrada en plataforma durante la prueba.

Como se puede apreciar en la Figura 27, se incluyó la línea base de la bomba K-100, al considerar una profundidad de colocación de 1,790 m para una presión de succión de 101 Kg/cm²; mostrando también las curvas de capacidad de carga que la bomba debe desarrollar con 106 etapas, para frecuencias de operación de 50, 55 y 60 Hz.

En las Figuras 28, 29 y 30 siguientes se muestra la curva de capacidad de producción del pozo, conocida como IPR; la de presión en la succión de la bomba para diferentes gastos (curva de $Psucc$), y la de la carga que la bomba debe desarrollar para las presiones de 12.4, 11.1 y 9.7 Kg/cm², relación gas-aceite de 50 m³/m³, medidas respectivamente para las frecuencias de 60, 55 y 50 Hz (curva de carga).

Si se superponen las Figuras 27 y 28 (Figura 31), se observa que las intersecciones en un mismo plano vertical de la curva de capacidad de carga de 60 Hz con la de carga, y la de presión de succión con la línea base, se encuentran a 10,113 BPD, gasto que representa la condición de operación de la bomba durante la prueba; sin embargo, ese gasto implica que a la profundidad de 1,790 m, los gastos in situ de la succión y descarga son de 13,223 y 12,277 BPD respectivamente, ambos fuera del límite máximo recomendado de 12,000 BPD a 60 Hz, como puede observarse en la Figura III del anexo A.

Debido al caso particular del pozo 445, donde se tiene fija la profundidad de la bomba, mediante la aplicación de un procedimiento de ensaye y error, se busca el gasto

superficial de aceite que no exceda el límite recomendado de la bomba y se encuentra que con 9,400 BPD, se tienen gastos en la succión y descarga de 12,460 y 11,410 BPD, con un promedio aritmético de 11,935 BPD, mismo que se localiza dentro del rango de la bomba. Con las Figuras 27 y 28 superpuestas por interpolación se busca la línea de frecuencia que en el mismo plano vertical de 9,400 BPD @c.s. intersekte las curvas mencionadas anteriormente. En la Figura 31, se marca que dicha condición se encuentra a 57 Hz, por lo que ésta es la frecuencia recomendable para que la bomba K-100 de 106 etapas opere adecuadamente en el pozo 445.

Otro método de operación para lograr objetivos similares al procedimiento antes descrito, es elevar la presión de la cabeza del pozo mediante el estrangulamiento a 23 Kg/cm² sosteniendo en 60 Hz la frecuencia de operación como se observa en la Figura antes mencionada.

Un análisis similar debe realizarse con las Figuras 27 y 29 en donde las intersecciones de las curvas mencionadas anteriormente, ahora para el caso de 55 Hz, se encuentran a 9,190 BPD, condición de operación durante la prueba, que implica a su vez gastos de succión y descarga in situ de 12,040 y 11,231 BPD, respectivamente; ambos fuera del límite máximo recomendado de 11,050 BPD, como puede observarse en la Figura II. Nuevamente, por ensaye y error, se encuentra que el gasto de 8,200 BPD corresponde a 10,870 BPD y 10,208 BPD, en la succión y en la descarga, los cuales se encuentran dentro del rango recomendado. Al superponer las Figuras 27 y 29, se puede determinar que la frecuencia que permite cumplir estos gastos para la bomba K - 100 de 106 etapas es de 50 Hz. Alternativamente, si se estrangula el pozo hasta alcanzar 20 Kg/cm² en la cabeza y se sostiene la frecuencia en 55 Hz, se obtienen resultados similares.

Si se aplica un procedimiento similar a los dos casos pasados con las Figuras 27 y 30, la etapa inicial de la prueba indica que a una frecuencia de 50 Hz la condición de equilibrio está aproximadamente en 8,400 BPD, lo cual se cumple en las primeras horas de la prueba. Sin embargo, al tomar en cuenta el efecto de transición en el arranque del aparejo y que su estabilización se logró horas después a un gasto promedio de 7,737 BPD y una relación gas-aceite de 52 m³/m³, de acuerdo al comportamiento señalado en las dos Figuras, se pudo estimar que durante la realización de la prueba se mantuvo la frecuencia real de operación en 48.5 Hz. Para la presión en la cabeza de 9.7 Kg/cm² y una producción de 7,600 BPD, la bomba K - 100 con 106 etapas, puede operar dentro de su rango recomendado a una frecuencia de 45.5 Hz.

Con el objeto de facilitar estos análisis y de generalizar el procedimiento mencionado, en la Figura 32 se incluyen curvas de carga para 60, 55 y 50 Hz y curvas de capacidad de carga para 30, 25, 20, 15, 10 y 5 Kg/cm² de presión en la cabeza del pozo. En esta Figura se encuentran combinadas las curvas para diferentes frecuencias (Hz) y el gráfico de diferentes presiones de fondo fluyendo (Pwh), que corresponden a las Figuras 33 y 34, curvas que se presentan para efectuar las interpolaciones necesarias para establecer cual es la frecuencia y la presión en la cabeza, con las que se obtiene el gasto a condiciones de

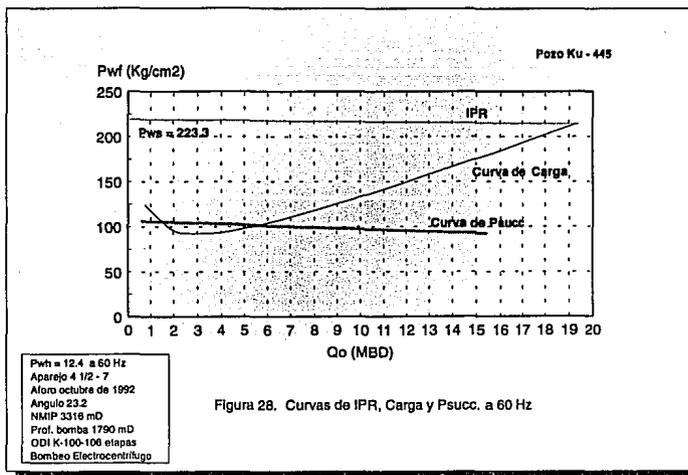
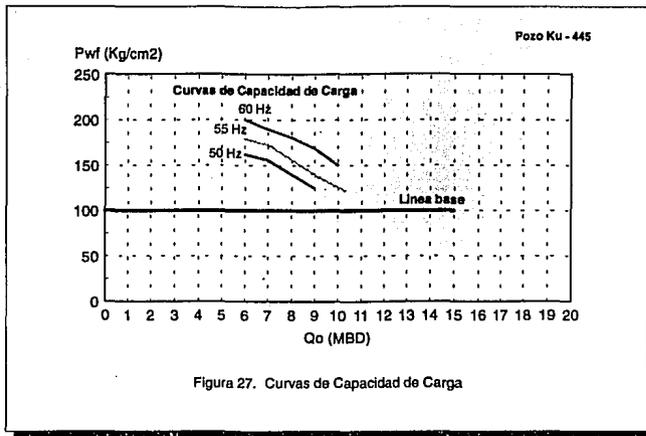
equilibrio, entre la capacidad de producción del pozo (IPR) y la capacidad de la bomba K - 100 con 106 etapas.

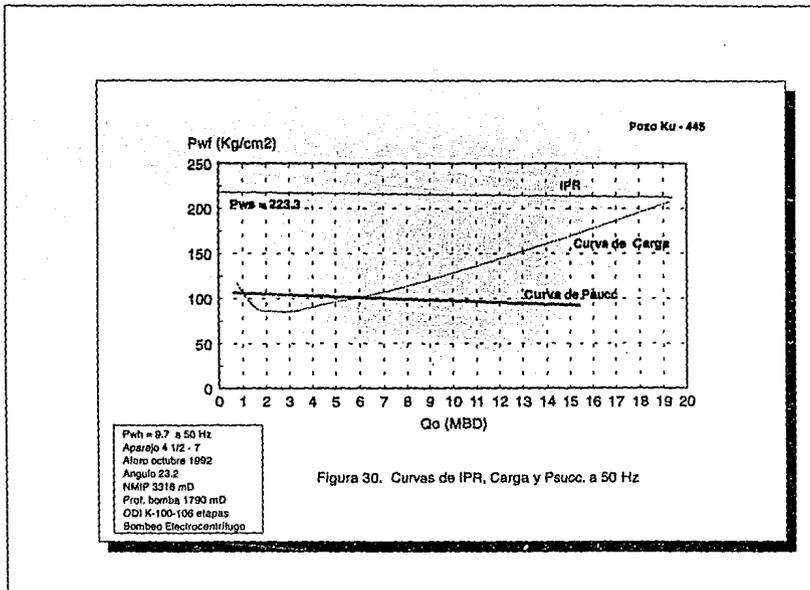
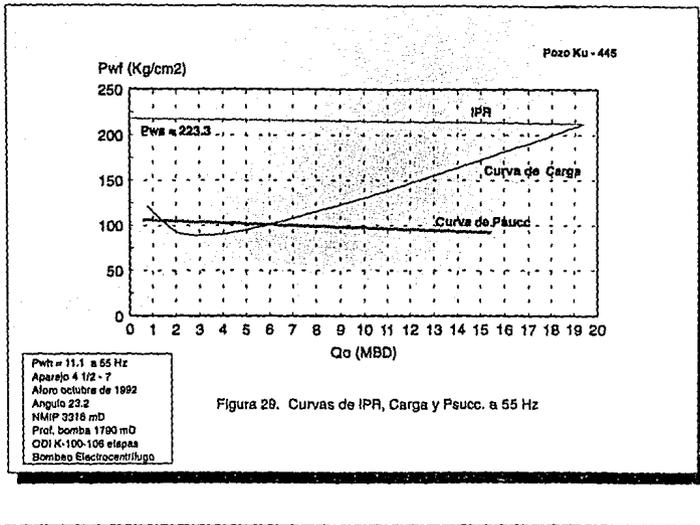
Si se analizan las dos últimas Figuras se puede observar:

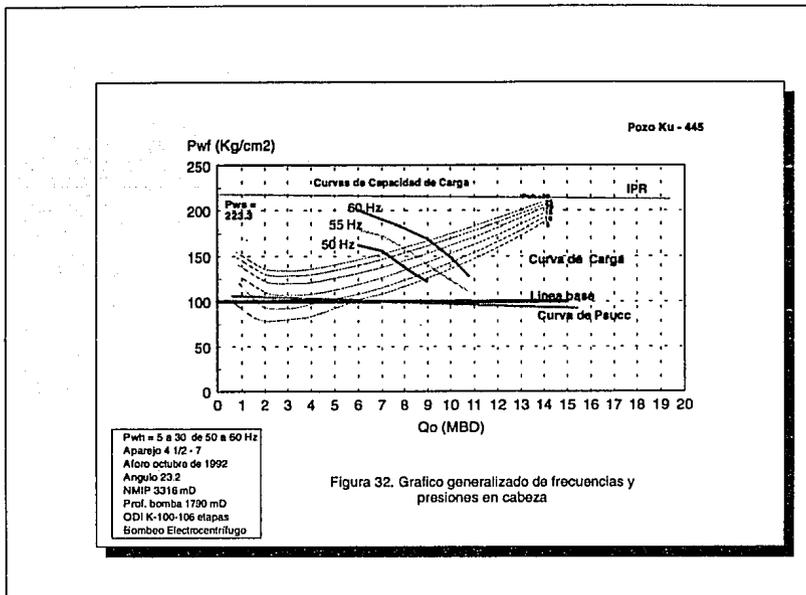
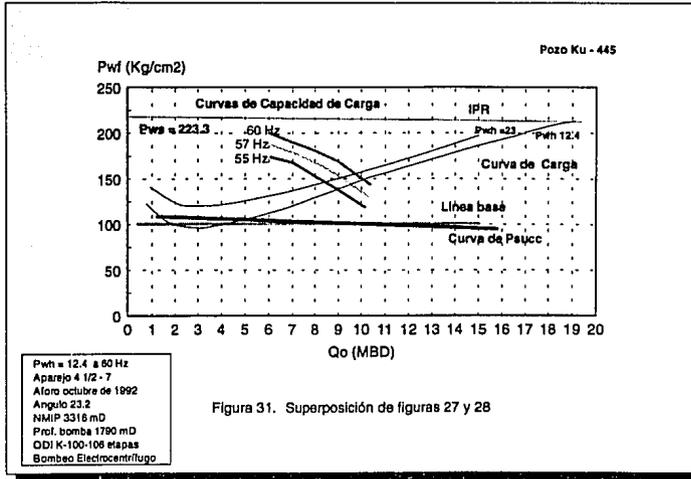
Que para producir gastos entre 6,600 y 7,800 BPD, es necesario mantener presiones en la cabeza de 20 a 5 Kg/cm² con una frecuencia de 45 Hz; de forma similar, para obtener gastos entre 7,200 y 8,700 BPD se requerirán presiones en la cabeza de 25 a 5 Kg/cm² para una frecuencia de 50 Hz. Para gastos entre 8,000 y 9,600 las presiones en la cabeza van de 30 a 5 Kg/cm² con 55 Hz y finalmente, si se opera con una frecuencia de 60 Hz se obtendrán gastos entre 9,200 y 10,400 BPD para las presiones en la cabeza de 30 a 5 Kg/cm².

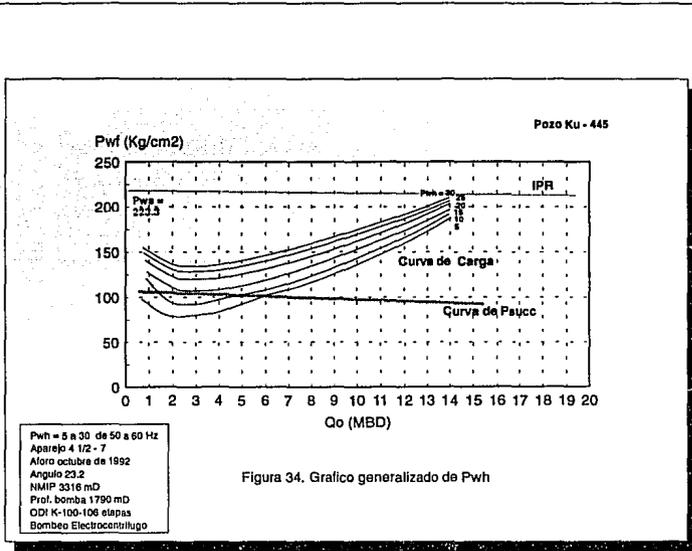
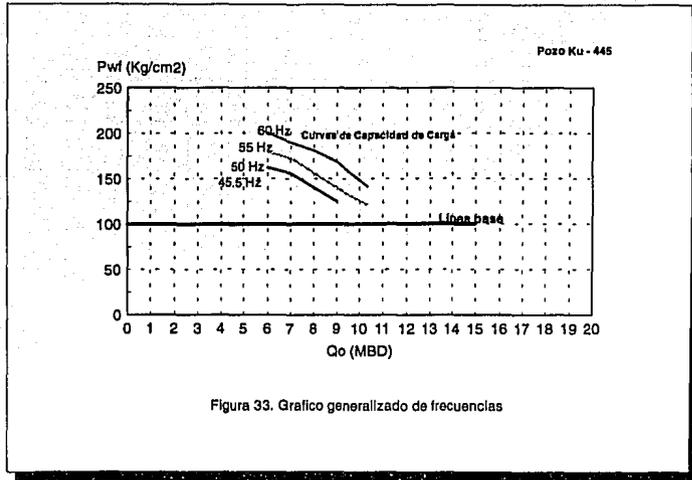
Sin embargo, hay que recordar que la bomba maneja un gasto límite que debe calcularse a las condiciones de la profundidad a la que está colocada; es decir, no necesariamente se cumplirán los gastos antes señalados pues dependen de la presión de fondo fluyendo (Pwf) y de la cantidad de gas libre presente a esa profundidad en la succión de la bomba.

Es por esto que los gastos y frecuencias que se señalaron en la superposición de las Figuras 27 con 28, 29 y 30, son válidos y en los casos de las Figuras 33 y 34, es recomendable vigilar que no se rebase el gasto límite de la bomba para así evitar cualquier problema de operación en el fondo.









COMPONENTES DEL SISTEMA DE BOMBEO NEUMÁTICO

III.1 Generalidades de bombeo neumático

Para determinar las condiciones de operación más redituables en una instalación de bombeo neumático específico, deberá tomarse en cuenta la presión de inyección del gas, ya que ésta tiene un efecto decisivo sobre la eficiencia de operación en pozos con bombeo neumático continuo. Debido a que las funciones del gas de inyección son: primero, aerear el fluido suficientemente para descargar la columna del pozo desde un punto de operación. Segundo, debe reducir la densidad de la columna de fluido suficientemente para permitir que la presión del yacimiento empuje el fluido producido hasta la superficie. La profundidad a la cual la válvula operante se localiza, depende de varios factores; pero principalmente es función de la presión disponible del gas de inyección.

Al revisar los anales de la historia, en la aplicación de este sistema artificial de producción nos encontramos que en los primeros años (1865 a 1925), se construyeron estaciones de aire muy grandes y el aire era comprimido y usado para proporcionar el gas de bombeo artificial.

En estos primeros años, se disponía de muy poco equipo de bombeo neumático para uso dentro del pozo⁶. Así, la profundidad de bombeo era de manera estricta dictada por la profundidad a la cual la columna de fluidos producidos podía ser balanceada por una columna de aire. Esto significaba que para presiones de gas de inyección de 600 lb/pg² en la superficie un pozo podía ser descargado, y el gas inyectado aproximadamente hasta 1,500 pies a 2,000 pies de profundidad. Esta situación no representaba demasiados problemas en aquellos tiempos, ya que muchos de los pozos productores eran más bien someros comparados con los actuales.

Durante la década de 1920, se comenzó aprovechar el gas asociado al aceite producido al recolectarlo y venderlo. Como la presión de operación para la mayoría de los sistemas de transmisión era frecuentemente de 800 lb/pg² o cercana a ésta, como un agregado natural a los sistemas de venta de gas, parte del gas natural comprimido se usaba para el bombeo neumático. Lo anterior condujo a emplear gas a una presión más alta y con mejores propiedades del que se disponía en los sistemas antiguos de bombeo neumático con aire.

En la mayoría de los casos, aún en la actualidad, las presiones de inyección de bombeo neumático están gobernadas por las presiones en los sistemas de ventas de gas. Durante los últimos 50 años, se ha desarrollado equipo de tipo superficial que permite inyectar el gas en los pozos a mayores profundidades con las presiones disponibles. Aún en donde se han descubierto grandes campos, con presiones más altas, la fuente de suministro de bombeo neumático ha sido casi siempre localizada corriente abajo de las instalaciones de procesamiento que conducen hacia los sistemas de venta de gas.

La baja eficiencia de tales sistemas de bombeo neumático a baja presión, en pozos más profundos, estuvo enmascarada en los primeros años de aplicación del sistema por el bajo valor del gas y el bajo costo de compresión del mismo. Además de que los ritmos de extracción de aceite eran menores, de tal forma que podían obtenerse con muy poca caída de presión en el yacimiento ($P_{ws} - P_{wf}$). En los años 70's, esta situación cambió y, repentinamente, muchos sistemas de bombeo neumático resultaron inadecuados para producir los altos gastos que se requerían.

En la actualidad, los adelantos en el sistema de bombeo neumático, no solo van más allá de diseños más innovadores en válvulas, mandriles etc. sino que además se aplican técnicas y procedimientos mejorados tendientes a obtener mayores producciones con menores inversiones, al mejorar los diseños de los aparejos de producción y al optimizar el gas de inyección.

III.2 Descripción del sistema típico de bombeo neumático

En el pasado cuando la energía natural del yacimiento se agotaba los pozos dejaban de fluir y se abandonaban. En la actualidad cuando algún pozo presenta signos de agotamiento en la energía del yacimiento, se convierte en un serio candidato para la aplicación de un sistema artificial de producción.

Los sistemas artificiales de producción imprimen energía a los fluidos en el pozo para hacerlos llegar a la superficie, si lo que se suministra es gas a alta presión con la finalidad de aerear o aligerar la columna de fluidos reduciendo la presión ejercida en el fondo, generando una diferencia de presión en la cara de la formación, y de ese modo se elevan los fluidos de la formación por la tubería de producción, entonces se está aplicando el sistema de bombeo neumático, la inyección se puede efectuar en forma continua llamándolo bombeo neumático continuo y discontinuamente recibe el nombre de bombeo neumático intermitente.

El bombeo neumático continuo es el único método artificial de levantamiento de fluidos que utiliza totalmente la energía de la formación productora de gas. Entre los sistemas artificiales de producción de mayor aplicación en campos marinos está el bombeo neumático. Solamente en aquellos campos en donde no se dispone de suficiente gas o las condiciones de los pozos no son propicias para su aplicación, otros sistemas se han empleado en su lugar.

La flexibilidad que ofrece el sistema para manejar un amplio rango de gastos, así como la simplicidad del equipo superficial y la facilidad de operación lo hacen sumamente atractivo para aplicarlo en campos marinos.

En el bombeo neumático continuo el gas se inyecta continuamente dentro de la tubería de producción a través de una válvula denominada válvula operante o válvula de inyección, la cual se coloca a la máxima profundidad que pueda alcanzarse con la presión de gas disponible. Adicionalmente, en la superficie se instala un dispositivo que permite variar

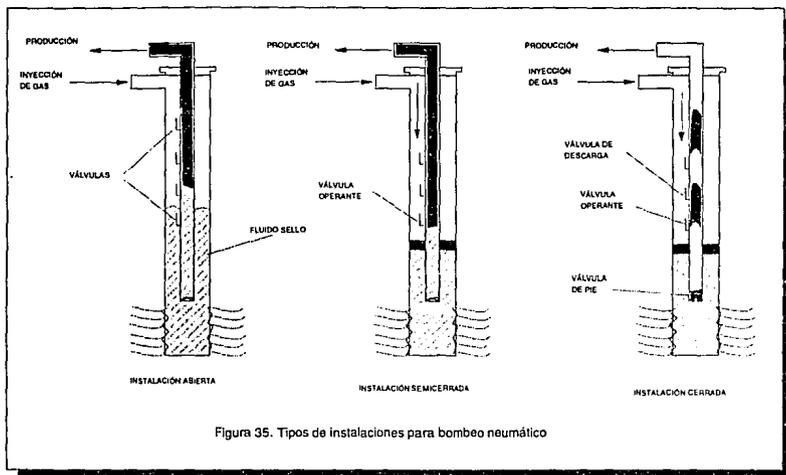
el volumen de gas que se inyecta al pozo. Este dispositivo puede ser un estrangulador, un regulador o simplemente una válvula de aguja.

El gas inyectado, a la profundidad del punto de inyección se mezcla con los fluidos producidos por el pozo, lo que provoca un decremento del gradiente de presión de flujo desde el punto de inyección hasta la superficie, la disminución del gradiente de presión fluyendo reduce la P_{wf} y estabiliza el abatimiento requerido para alcanzar el gasto de aceite diseñado para el pozo.

Cuando ya no es posible abatir más la presión en el fondo del pozo, entonces se impedirá el flujo, por lo que será necesario usar el bombeo neumático intermitente. El bombeo neumático intermitente exige altos volúmenes instantáneos de gas para desplazar tapones de líquido hacia la superficie, su gran desventaja consiste en requerir de un dispositivo superficial de encendido y apagado automático que efectúe tal inyección de gas.

El bombeo neumático es recomendado en pozos productores en arenas, pero tiene una limitante importante al no soportar el repentino represionamiento de la presión de fondo fluyendo, ya que causaría daños a la formación, esto se puede evitar si el pozo cuenta con empacador y funciona con una instalación cerrada de inyección de gas.

Las instalaciones de bombeo neumático se muestran en la Figura 35 y se clasifican en abierta, semicerrada y cerrada¹².



En la instalación abierta el aparato de producción queda suspendido dentro de la tubería de revestimiento sin empacador, el gas se inyecta en el espacio anular formado entre la

tubería de revestimiento y la de producción, siendo desplazados los fluidos de esta última; normalmente esta instalación se usa para bombeo neumático continuo.

Las principales desventajas que presenta esta instalación son: el cambio de nivel de fluido en el pozo, lo que provoca erosión en las válvulas, el no contar con empacador, ya que el pozo debe descargarse cada vez que sea cerrado y por último, que por la circulación de los fluidos las válvulas inferiores se erosionan cuando el pozo fluye.

El bombeo neumático intermitente puede usar una instalación abierta, pero no es recomendable si existe la posibilidad de liberar gas en el fondo del pozo

La instalación semicerrada es similar a la abierta, sólo que lleva un empacador que sirve de aislante entre las tuberías de revestimiento y la de producción, puede usarse en los sistemas de bombeo neumático continuo o intermitente; es seguro, ya que las válvulas cuentan con un dispositivo de retención que impide el desplazamiento del fluido hacia el al espacio anular después de descargar el pozo, y además esta el empacador que aísla cualquier fluido que provenga del fondo de la tubería de producción; otra característica de esta instalación es que la presión del gas actúa sobre la formación como en el bombeo intermitente.

La instalación cerrada es similar a la anterior sólo que se coloca una válvula de pie en la tubería de producción en el fondo del pozo generalmente abajo de la válvula operante, cuya función es evitar que la presión del gas de inyección actúe contra la formación.

La mayor parte de los sistemas de bombeo neumático a alta presión reciclan el gas de inyección. El gas de baja presión del separador de producción es comprimido y reinyectado en el pozo con el fin de elevar los fluidos del fondo del pozo.

Este ciclo cerrado del sistema de bombeo neumático se puede observar en la Figura 36.

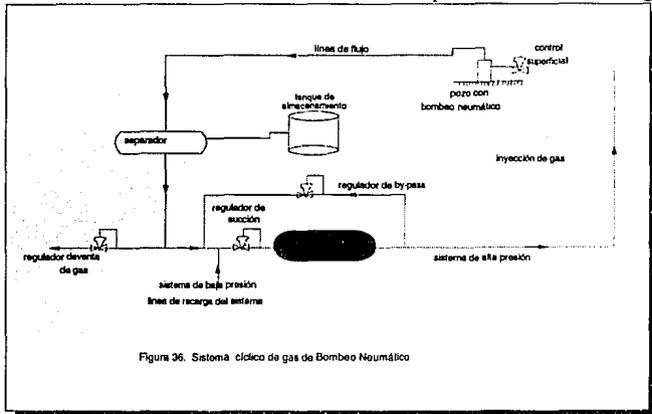


Figura 36. Sistema cíclico de gas de Bombeo Neumático

La operación del bombeo neumático continuo es preferible que se realice en un sistema de ciclo cerrado. Para los sistemas de bombeo neumático intermitente es particularmente difícil la regulación y operación del sistema cerrado cíclico con capacidad limitada de almacenamiento de gas en las líneas de alta y baja presión.

La tecnología de bombeo neumático continuo ha tenido un alto grado de desarrollo, debido principalmente a los estudios que sobre flujo multifásico se han realizado. No es posible comprender muchos de los fenómenos que presenta el sistema si no se tiene una concepción clara del fenómeno de flujo multifásico, que ocurre en las tuberías de producción de los pozos. La precisión con que actualmente se pueden calcular los gradientes de presión fluyendo en tuberías verticales e inclinadas, cuando fluyen simultáneamente petróleo, gas y agua, permite realizar diseños de bombeo neumático más precisos y a la vez mejorar la interpretación de los problemas operativos que presente el sistema artificial de producción.

Este método no sólo se aplica para poner en producción nuevamente pozos que han dejado de fluir, sino que también es aplicable a pozos fluyentes, para mantener una determinada cuota de producción, o bien para lograr incrementos significativos en su producción como fluyentes.

El bombeo neumático se puede aplicar en aquellos pozos que cuenten con alta presión de fondo estática y grandes gastos, así como en yacimientos con empuje hidráulico; pozos con alto índice de productividad; producción de arena, y pozos marinos. A comparación del bombeo electrocentrifugo maneja más altas relaciones gas-aceite.

Se recomienda el uso del bombeo neumático si se dispone de un volumen de gas o si se puede recurrir a pozos de gas a alta presión cercanos al que producirá con sistema de bombeo neumático.

Los pozos con alto grado de desviación que producen en arenas y cuentan con una alta relación gas líquido son serios candidatos para aplicárseles el bombeo neumático, así mismo es aplicable a pozos con cierto grado de viscosidad, muchas instalaciones de este tipo también se diseñan para incrementar la producción diaria de los pozos fluyentes, por último se aplica si es bajo el costo del gas disponible.

Un buen número de pozos puede agotarse por bombeo neumático después de establecer un programa para mantener la presión del yacimiento constante en un campo de aceite.

El bombeo neumático permite tener flexibilidad en términos de gastos de producción y profundidad del punto de inyección, si están disponibles adecuados volúmenes de gas y presión de inyección. El punto de operación final del gas de inyección para estabilizar el gasto de aceite producido a cierta profundidad de un pozo con alta presión de yacimiento P_{ws} puede ser próximo a la superficie si la presión de operación es baja. Es por esto que el bombeo neumático es uno de los métodos más socorridos, ya que aún después instalar un aparato diseñado con poca información normalmente se produce aceite.

La válvula de bombeo neumático es un dispositivo con pocas partes móviles, es el corazón de la instalación de bombeo neumático, existen además de las válvulas convencionales, las válvulas recuperables con mandril de bolsillo, que son instaladas con línea de acero y sin hacer uso de equipo de reparación.

La función primordial de una sarta de válvulas de gas de bombeo neumático es descargar el pozo con la presión del gas de inyección disponible a la máxima profundidad para que el gas use totalmente su energía de expansión.

El espaciamiento de las válvulas de bombeo neumático proporcionan la flexibilidad para permitir un cambio en la profundidad del punto de inyección, compensar una variación en la presión de fondo fluyendo P_{wf} , en el porcentaje de agua y/o el gasto de aceite permisible por día Q_o .

Otra función importante de las válvulas de inyección de bombeo neumático es su habilidad para mantener una caída en la P_{wf} , hasta que el pozo se limpia arriba de la profundidad del punto de inyección, operación que se lleva a cabo por la elevación de aceite debida al gas desde una profundidad cercana a la total del pozo.

Las válvulas de bombeo neumático²¹ se clasifican por la sensibilidad que tienen en su mecanismo de apertura a la presión existente en la tubería de producción o revestimiento, sensibilidad que se debe a la construcción del dispositivo que cierra o abre la entrada de gas, la presión a la que se expone la válvula la determina su área de asiento.

Válvulas balanceadas: La diferencia de presión entre la de cierre y apertura es nula, la presión del domo actúa todo el tiempo en el área del fuelle. Existen válvulas balanceadas con una manga flexible que sella el domo, la manga impide el paso de gas si esta cerrada la válvula y se flexiona permitiéndolo cuando la presión sobre ésta es mayor a la del domo.

Válvulas desbalanceadas: Estas válvulas se abren a una presión determinada y se cierran con una presión menor, siempre en función de las presiones del pozo.

Las válvulas balanceadas y desbalanceadas se clasifican en:

a) Operadas por presión del gas de inyección: Su sensibilidad a la presión en la tubería de revestimiento se encuentra entre el 50 y 100 % en la posición cerrada y 100 % si esta abierta. Abren con un incremento de presión en el espacio anular y una reducción en él las cierra; la Figura 37 muestra una válvula desbalanceada con domo cargado a presión como elemento de carga y la Figura 38 muestra una válvula desbalanceada con doble elemento de carga (carga en el domo y resorte)

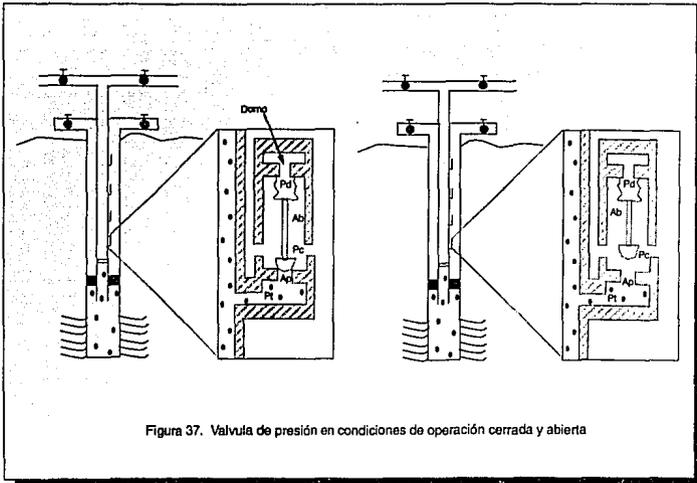


Figura 37. Válvula de presión en condiciones de operación cerrada y abierta

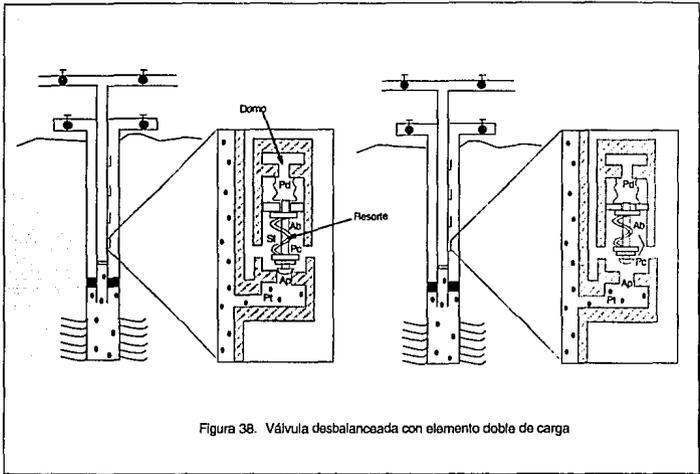


Figura 38. Válvula desbalanceada con elemento doble de carga

b) Reguladoras de presión (o de flujo continuo): operan a las mismas condiciones que las válvulas de presión en posición cerrada, una vez abierta es sensible a la presión en la tubería de producción, abre al incrementarse la presión en el espacio anular, y cierra al disminuir la presión en la tubería de producción o revestimiento.

c) Operadas por fluidos de la formación: su sensibilidad a la presión en la tubería de producción se encuentra entre el 50 y 100 % en la posición cerrada y 100 % si está abierta. Abren con un incremento de presión en la tubería de producción y una reducción la cierra. La Figura 39 muestra una válvula de este tipo.

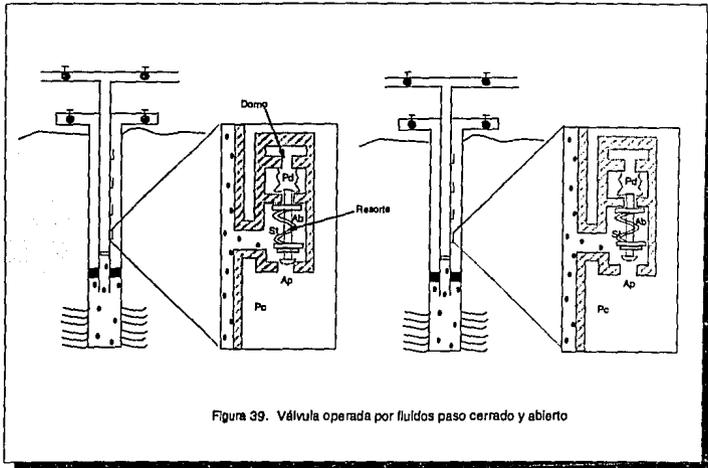


Figura 39. Válvula operada por fluidos paso cerrado y abierto

d) Combinadas: se abre si se incrementa la presión en el fluido y se cierra al disminuir la presión en el espacio anular o en la tubería de producción, recibe también los nombres de válvula operada por presión de fluidos o del gas de inyección.

Válvulas de bombeo neumático continuo:

Las válvulas de bombeo neumático continuo deben ser sensibles a la presión de la tubería de producción en la posición de apertura, de tal modo que al decrecer la presión la válvula debe empezar a regular el cierre disminuyendo el volumen de gas y viceversa al abrir. La respuesta de la válvula mantiene estabilizada (constante) la presión en la tubería de producción, si la válvula es reguladora de presión u operada por presión de fluidos las condiciones de operación prevalecen.

El costo del equipo subsuperficial de un pozo de bombeo neumático es barato a comparación con el de un equipo de bombeo electrocentrífugo.

Por lo anterior se deduce que las ventajas del bombeo neumático continuo son:

- El equipo superficial no sufre cambios sustanciales a comparación al de los pozos fluyentes, sólo se requiere de agregar un registrador de flujo y un regulador de gas

- Maneja un amplio rango de gastos y alcanza grandes profundidades, ya que el sistema cuenta con una gran flexibilidad para ajustarse a condiciones variantes del pozo, condiciones tales como la presión del yacimiento, índice de productividad, relación gas aceite, porcentaje de agua, viscosidad, etc.
- Opera eficientemente en pozos direccionales, por lo que es aplicable en pozos marinos; Además, permite utilizar una central de compresión de gas para dar servicio a un pozo o a todo un campo, esta práctica reduce generalmente los costos de operación y mantenimiento permitiendo un mayor control del sistema.
- Es el mejor de los métodos artificiales para manejar arena y sólidos .
- Alta confiabilidad del sistema si se emplea gas dulce deshidratado y libre de partículas sólidas.
- No es necesario una intervención con equipo de reparación de pozos por falla del aparejo no es necesario extraerlo, ya que mediante el empleo de las válvulas recuperables es posible extraerlas e introducir las al pozo con la ayuda del equipo de línea de acero, ahorrando tiempo y dinero.
- La sustitución y reparación del equipo se puede llevar a cabo en el país, ya que se cuenta con técnicos y operarios que tienen amplia experiencia con el manejo del sistema.
- Los pozos pueden ser terminados con el aparejo de bombeo neumático, lo que permite su operación en el momento que se juzgue conveniente.
- Es posible realizar tratamientos a la formación, sin necesidad de extraer el aparejo de bombeo.

Sus desventajas son la siguientes:

- El gas de inyección debe ser dulce, seco y libre de partículas sólidas.
- Se requiere de una gran inversión inicial, por la inversión que implica el cambio de aparejos, los altos consumos de energía y el incremento de costos de mantenimiento, ya que se requiere de planta endulzadora, planta deshidratadora, estaciones de compresión y red de distribución (gasoductos) para tratar, comprimir y distribuir el gas de inyección.
- Se requiere de grandes volúmenes iniciales de gas y el suministro de este a una presión constante, para alimentar la red de bombeo neumático.

El riesgo de incendio en plataforma es alto por el manejo de grandes volúmenes de gas a altas presiones.

Su eficiencia disminuye considerablemente si se cuenta con bajas presiones de fondo, en pozos con alta viscosidad ya que se incrementan las pérdidas de presión por fricción.

III.3 Componentes del equipo de bombeo neumático del pozo 445

A continuación se enumeran los componentes más importantes del aparejo de bombeo neumático para el pozo Ku - 445, que fueron empleados durante el mes de noviembre de 1992 en la prueba del aparejo en la plataforma Ku - H (productora de aceite pesado):

Bola colgadora de Cuello largo, seguido de tuberías de producción de 4 1/2 pg, a continuación se colocó la válvula de tormenta de 4 1/2 pg y los subsecuentes mandriles, seis (el número de válvulas en un aparejo típico de bombeo neumático en la región marina es de cinco a seis) en este caso aunque este número varía dependiendo del diseño, así como sus correspondientes tramos de tuberías de producción, la Superintendencia de Ingeniería de Diseño Distrito Carmen especificó para este aparejo una camisa deslizable de 4 1/2 pg con su tope localizador. Finalmente, se espació con tubería de producción y se colocaron dos unidades de sello multi-v de 4 1/2 pg, seguidos de otro juego de tubos espaciadores (dos) para 4 1/2 pg y cuatro unidades sello multi-v 4 1/2 pg, terminando con la zapata guía de 4 1/2 pg.

DISEÑO, SELECCIÓN Y APLICACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO NEUMÁTICO EN EL POZO KU-445

IV.1 Criterios de diseño y selección de la profundidad de colocación de las válvulas de bombeo neumático, análisis con diferentes gastos de inyección.

Entre los sistemas artificiales de producción de mayor aplicación en campos marinos se encuentra el bombeo neumático, la flexibilidad que ofrece el sistema para manejar un amplio rango de gastos, así como la simplicidad del equipo superficial y la facilidad de operación, lo hacen atractivo frente a otros sistemas.

Para llevar a cabo un diseño correcto de una instalación de bombeo neumático, es indispensable considerar la capacidad de aportación de fluidos de la formación al pozo y determinar con la mayor precisión posible los gradientes de presión fluyendo que se establecen en las tuberías instaladas en el pozo.

Para determinar los gradientes de presión fluyendo en tuberías verticales o inclinadas, existen diversos métodos en la literatura especializada, especialmente si fluyen en forma simultánea aceite, agua y gas en el sistema. En México se recomienda, entre otros métodos, la correlación de Orkiszewski, ya que es la que se ajusta mejor a los datos medidos en campo.

El diseño de la instalación de bombeo neumático es sencillo cuando la tubería de producción no sufre de cambios de diámetro. Esto, debido a que en la literatura técnica³ se encuentran publicadas curvas de gradientes que cubren un amplio rango de gastos y diámetros de tubería.

Sin embargo, cuando existen cambios de diámetro en el aparejo desde la profundidad del pozo hasta la superficie, el diseño se torna complicado, por lo que se hace indispensable un programa de cómputo, que permita efectuar un análisis completo del pozo en corto tiempo, antes de obtener un diseño del aparejo de bombeo neumático.

Cuando se aplica el programa de cómputo para diseñar aparejos de bombeo neumático, la presión de inyección más eficiente, y otros factores, incluyendo los económicos, se deben considerar para determinar el buen funcionamiento del sistema, siendo los más importantes los que se enlistan a continuación:

Punto de burbujeo y relación de solubilidad gas-aceite de los fluidos producidos. La presión de saturación (P_b), la relación gas - aceite producida (RGA) y la relación de solubilidad gas-aceite (R_s), determinan la cantidad de gas libre en la corriente de flujo a cualquier condición de presión y temperatura. Para una columna de fluidos vertical, estos factores son los de mayor importancia para determinar la densidad promedio del fluido en cualquier punto de la corriente de flujo, por lo que podemos concluir que la cantidad de

gas libre es generalmente el factor más importante en la determinación del gradiente de presión fluvente del fluido.

Para yacimientos de aceite crudo saturado, se espera que todo el gas inyectado permanezca en estado libre. En sistemas de crudo bajosaturados, la inyección de gas libre en la columna de fluido produce dos efectos importantes:

1) Un aumento en la presión de burbujeo de la mezcla, lo que implica, un aumento en la profundidad a la cual el gas libre está presente.

2) Parte del gas libre se disuelve en el aceite crudo, en el caso de que el crudo tenga un bajo punto de saturación, la inyección de gas podría causar que una gran parte del gas adicional se vuelva a disolver en el aceite, resultando que exista muy poca o ninguna reducción en el abatimiento de presión, frente al yacimiento, a profundidades mayores de inyección.

Productividad del pozo. Los pozos con alta productividad, tendrán un abatimiento de presión en el yacimiento muy pequeño durante las operaciones normales de producción. Por lo tanto requerirán de una inyección de gas a alta presión en la corriente de flujo a cualquier profundidad significativa del pozo. Sin embargo, en este caso, la posibilidad de inyectar el gas a la profundidad total proporciona la máxima eficiencia y economía, ya que sólo se requieren menores cantidades de gas para reducir el gradiente de presión fluvente a lo largo de todo el pozo.

Porcentaje de agua. Los pozos que producen altos porcentos de agua necesitarán cantidades mayores de gas para complementar la cantidad relativamente pequeña de gas que produce el pozo con el aceite de la formación. Mientras más profundamente sea inyectado este gas en la corriente de flujo, mayor será el abatimiento de presión frente a la formación.

Especificación por presión del equipo. El equipo superficial para el bombeo neumático estará normalmente disponible de acuerdo a las siguientes clasificaciones⁴: clase 600 del ANSI (1,440 lb/pg²), clase 900 del ANSI (2,160 lb/pg²), y clase 1,500 del ANSI (3,600 lb/pg²).

La especificación por presión de estos equipos a 100° F (38° C) se muestra para cada clase entre paréntesis. Los costos serán proporcionalmente mayores cuando se seleccione equipo para una presión mayor. Por lo tanto, se optará por presiones de diseño máximas del sistema de 1,440 o 2,160 lb/pg² cuando las presiones de operación más eficientes estén cerca de estos límites. Para visualizar estas restricciones más fácilmente, por ejemplo se usará un equipo de 1,440 lb/pg² cuando la presión de inyección en la superficie indicada varíe entre 1,500 y 1,550 lb/pg². En este caso, la selección de una presión de inyección ligeramente menor es la más económica.

Contrapresión en la cabeza del pozo. La contrapresión en la cabeza del pozo tiene un efecto importante en la presión de inyección del gas. El efecto negativo de las altas contrapresiones en la cabeza del pozo es grandemente amplificada cuando se usa una baja presión de inyección del gas. Los pozos con altas contrapresiones en la cabeza y con baja presión de inyección requieren un espaciamiento de válvulas más reducido, lo cual provoca una inyección de gas somera. El espaciamiento reducido entre las válvulas es debido a la limitada diferencia de presiones entre el gas inyectado y el fluido producido. Por otro lado, se pueden aceptar altas presiones en la cabeza del pozo que posea restricciones en el aparejo siempre y cuando se use gas a alta presión.

Características del gas inyectado. La determinación de las características de un gas de inyección apropiado requiere de un estudio más detallado, el cual no es objetivo de este trabajo. Con un análisis cuidadoso se puede determinar si un gas es rico, por ejemplo con una densidad relativa del orden de 0.90, será más económico para usarse en bombeo neumático que un gas pobre que tenga un densidad relativa de 0.65. La carga estática del gas más denso proporciona una mayor presión de inyección en el fondo del pozo, que la del gas más ligero, para una presión de inyección en la superficie idéntica. Aún otros factores, tales como el procesamiento del gas, deberán ser considerados también antes de la elección final de una fuente de gas para el bombeo neumático.

Otros parámetros a considerar en el diseño de este sistema artificial, será el aparejo óptimo y la línea de flujo horizontal, así como el diámetro de la válvula operante, ya que por ejemplo una de 1 pg necesita una presión de inyección más alta en el fondo del pozo para realizar el mismo efecto de bombeo que la de una válvula de 1 1/2 pg. Esto se debe al área reducida de fuelles, y a la resultante relación mayor de área de orificio a área de fuelles, la cual reduce la presión de operación efectiva de la válvula. Por lo tanto, la válvula de menor diámetro provocará el uso de más gas de inyección y más potencia en la compresión que la válvula de 1 1/2 pg, para bombear gastos equivalentes.

La selección y diseño del equipo de compresión y las instalaciones relacionadas con él, deben considerarse cuidadosamente en los sistemas de bombeo neumático, debido a los altos costos de la potencia de compresión como inversión inicial. Generalmente, la presión de gas de inyección requerida en la cabeza del pozo determina la presión de descarga del compresor. A mayores presiones de inyección mayores serán los requerimientos de compresión, es decir se incrementará el requerimiento de potencia del compresor. Sin embargo, entre mejor esté diseñado el sistema la eficiencia aumenta y los requerimientos de potencia disminuyen y se proporciona una mayor presión de inyección.

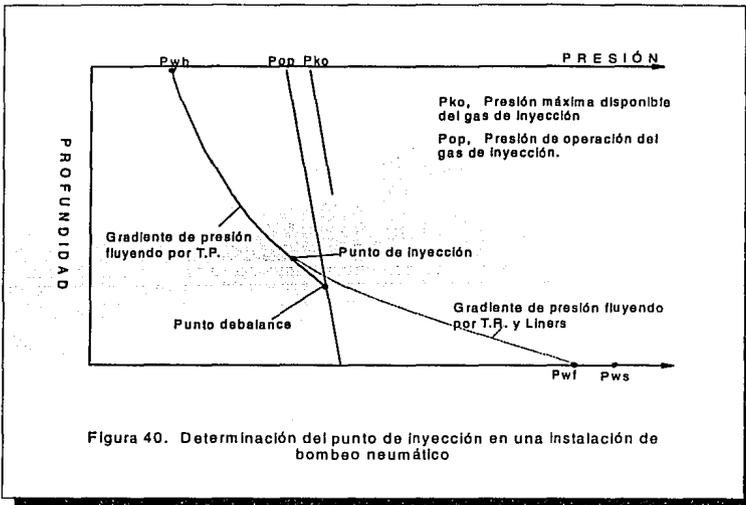
El programa de cómputo permite analizar y predecir el comportamiento de pozos fluyentes, o con bombeo neumático, así como obtener el diseño de la instalación con el tipo y marca de válvula deseada.

En el caso particular del pozo Ku 445 de la plataforma Ku-H , el programa de diseño de aparejos de bombeo neumático fue el Bonec¹⁴, programa que se integra en cinco secciones básicas.

- Determinación del punto de inyección
- Cálculo de la presión de fondo fluyendo
- Espaciamiento de válvulas
- Cálculo de diámetros de orificio de las válvulas
- Presiones de calibración de las válvulas

Establecer la profundidad del punto de inyección en una instalación de bombeo neumático es de vital importancia, ya que en este punto quedará ubicada la válvula operante o válvula de inyección y, una vez descargado el fluido de control del pozo, deberá ser la única válvula que inyecte gas a la tubería de producción.

Después se obtiene con un método de flujo multifásico, el gradiente de presión fluyendo por la tubería de producción, a partir de la presión fluyendo en la cabeza del pozo y considerando en la relación gas-líquido, el volumen de gas inyectado.



La línea de gradiente del gas de inyección, se obtiene considerando el peso de la columna de gas, a partir de la presión de operación del gas de inyección en la cabeza del pozo.

Para llegar a determinar el punto de inyección se requiere primero establecer el punto de balance o el punto definido por la intersección de la línea de gradiente de gas de

inyección y la línea de gradiente de presión fluyendo por la tubería de producción, para un gasto dado como se muestra en la Figura 40.

El punto de inyección se localiza arriba del punto de balance al dejar una diferencia de presión entre el espacio anular y la tubería de producción. Según la literatura técnica, este valor puede variar entre 100 y 250 lb/pg², diferencia que representa la caída de presión a través de la válvula de inyección en condiciones de operación.

Cuando existe alguna restricción física para colocar el punto de inyección a la profundidad de diseño, ya sea por un empacador permanente o una boca de liner, el programa fija la profundidad del punto de inyección, 20 m arriba de este límite.

Una vez determinada la profundidad del punto de inyección, se procede a calcular la presión de fondo fluyendo del pozo.

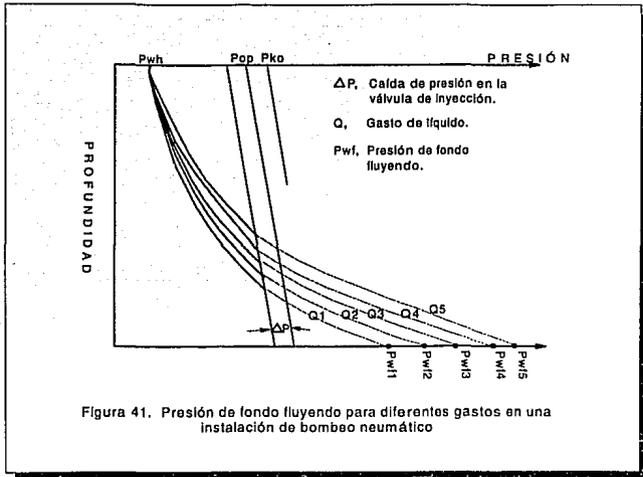
A partir del punto de inyección y considerando la relación gas líquido natural de la formación, se calcula con el método seleccionado de flujo multifásico el gradiente de presión fluyendo abajo de este punto, véase Figura 40.

Para ello, es necesario considerar todos los cambios de diámetro que se presentan desde el punto de inyección hasta la profundidad del intervalo productor. A esta profundidad se tendrá la presión de fondo fluyendo del pozo para un gasto dado.

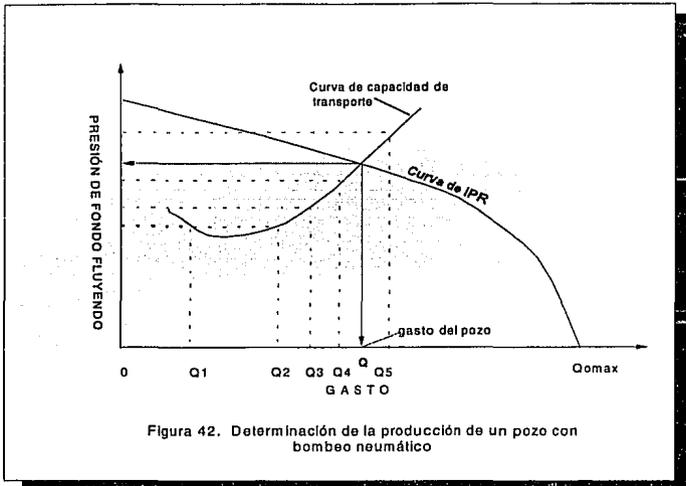
Para determinar el gasto que se producirá con el sistema de bombeo neumático, deberá recurrirse a los datos de una prueba de producción y al método de Vogel o de la Curva Generalizada, para generar la curva de comportamiento de flujo al pozo más conocida como IPR (Inflow Performance Relationship)

Se recalcula la presión de fondo fluyendo como se describió antes, empleando como primer gasto la décima parte del 70 % del potencial del pozo. Con incrementos constantes en el gasto se calculan las presiones de fondo fluyendo correspondientes. Véase la Figura 41.

En la Figura 42 se muestra un diagrama gasto-presión de fondo fluyendo, en donde se grafican los resultados anteriores, hasta intersectar la curva de comportamiento de flujo al pozo. Esta intersección representa la producción que aportará el pozo con el aparejo de bombeo neumático. Con este gasto se determina el punto de inyección definitivo, que será el que realmente se establece al operar dicho aparejo.



El paso a seguir será determinar el espaciamiento de válvulas, el programa de cómputo Bonec se basa en el método de espaciamiento universal propuesto por el Dr. Kermit E. Brown, el cual se ilustra en la Figura 43.



El método consiste en establecer tres líneas base:

1. Línea de gradiente del gas de inyección partiendo de la presión máxima disponible ($Gr1$)
2. Línea de gradiente del gas de inyección partiendo de la presión de operación ($Gr2$)
3. Línea de gradiente de diseño ($Gr3$)

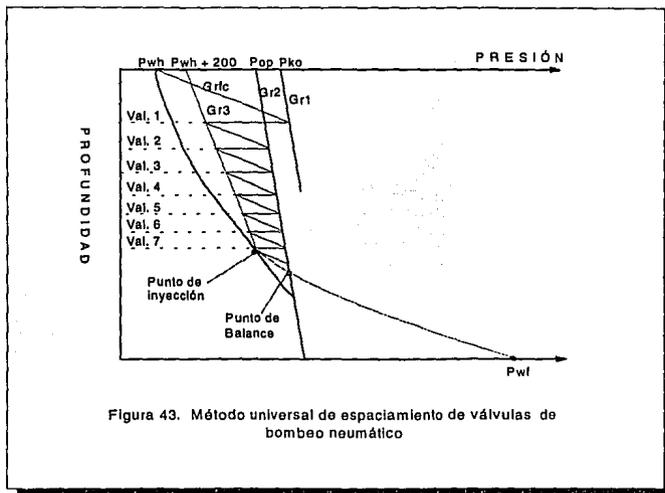


Figura 43. Método universal de espaciamiento de válvulas de bombeo neumático

Las dos primeras líneas se obtienen considerando el peso de la columna de gas. La línea de gradiente de diseño se obtiene al unir el punto que corresponde a la presión de descarga en la cabeza del pozo P_{wh} más 200 lb/pg² con el punto de inyección.

A partir de la P_{wh} y con el gradiente del fluido de control del pozo Gr_{fc} , se encuentra la intersección con $Gr1$; punto que corresponde a la profundidad de la primera válvula.

De esa profundidad, y a partir de esta línea de gradiente de diseño $Gr3$, con el gradiente de fluido de control se traza una línea hasta intersectar $Gr2$. Este punto corresponde a la profundidad de la segunda válvula.

Para determinar la profundidad de las demás válvulas, se repite el procedimiento descrito en el párrafo anterior hasta llegar al punto de inyección donde quedará ubicada la última válvula. El método universal de espaciamiento contempla que la distancia entre dos válvulas no sea menor de 250 pies, si esto sucede el programa hace un reespaciamiento de válvulas.

El diámetro de orificio que es necesario determinar, es el de la válvula de inyección, ya que este mismo diámetro se selecciona para el resto de las válvulas. Esto se hace con el propósito de evitar interferencia entre ellas, durante el proceso de descarga del fluido de control.

Para determinar el diámetro de orificio de la válvula de inyección se despeja la ecuación de Cook-Dotterweich, que se muestra a continuación:

$$q_g = \frac{155.5 C_d A_p \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \left(r^{2/k} - r^{(k+1)/k} \right)}}{\sqrt{\gamma_g T}}$$

donde:

k , C_p/C_v es la relación de calores específicos

r , $p_2/p_1 \geq r_o$

r_o , $(2/k + 1) k/k(k-1)$ es la relación de presiones para flujo crítico

T , temperatura en °F

A_p , área de la tubería en pie²

Cabe mencionar que el diámetro de orificio de la válvula de inyección es función entre otras variables del volumen de gas que se pretende inyectar, de la diferencia de presión que se establezca entre la tubería de revestimiento-producción y la temperatura a la profundidad del punto de inyección.

Por otra parte, debe señalarse que el diseño de una instalación de bombeo neumático, se hace para un determinado volumen de gas de inyección, por lo que si se inyectan volúmenes mayores de gas, puede provocarse la apertura de una o más válvulas superiores, en deterioro de la eficiencia de la instalación.

Una vez determinada la profundidad de colocación de las válvulas y el diámetro de orificio de éstas, se procede a calcular la presión de calibración correspondiente.

Debe pensarse en aprovechar al máximo, la presión de inyección y al mismo tiempo, asegurar la apertura de las válvulas en la condición más crítica, con la presión del gas disponible. Para esto se establecerá el siguiente procedimiento:

1. Determinación del peso de una columna estática de gas según Brown:

$$P_2 = P_1 \text{ EXP} \left(\frac{0.01877 \gamma_g L}{T Z} \right)$$

Como el factor de compresibilidad Z es función de presión y temperatura medias, la solución de la ecuación se convierte en un proceso iterativo.

Siendo una primera aproximación de P_2 la siguiente ecuación:

$$P_2 = P_1 \left(2.5x \frac{P_1}{100} x \frac{L}{1000} \right)$$

Considerando el peso de la columna de gas y la presión máxima disponible del gas de inyección, se calcula la presión a la profundidad de la primera válvula, tomando este valor como la presión de apertura de la válvula a condiciones de operación P_{vo1} es decir:

$$P_{vo_1} = P_{ko} + \text{Peso de la columna de gas}$$

2. Tomando en cuenta las características de la válvula, se determina la presión de cierre a condiciones de operación P_{vc1} , usando la siguiente expresión:

$$P_{vc_1} = P_{vo_1} \left(1 - \frac{Av}{Ab} \right)$$

3. Restando al valor anterior el peso de la columna de gas, se obtiene la presión superficial de cierre de la primera válvula P_{sc1} , lo que se representa como

$$P_{sc_1} = P_{vc_1} - \text{Peso de la columna de gas}$$

4. Restando 10 lb/pg² al valor anterior, se obtiene la presión superficial de cierre de la segunda válvula P_{sc2}

$$P_{sc_2} = P_{sc_1} - 10$$

5. Considerando el peso de columna de gas y el valor anterior, se calcula la presión de cierre de la segunda válvula a condiciones de operación P_{vc2}

$$P_{vc_2} = P_{sc_2} + \text{Peso de la columna de gas}$$

6. La presión superficial de cierre del resto de las válvulas se obtiene al restar 10 lb/pg² de la presión superficial de cierre de la válvula anterior.

$$P_{sc_n} = P_{sc(n-1)} - 10$$

donde: $n = 1, 2, 3, \dots$

7. La presión de cierre a condiciones de operación se calcula considerando el peso por columna de gas.

$$P_{vcn} = P_{scn} + \text{Peso de la columna de gas}$$

8. La presión de cierre de las válvulas a condiciones de taller P_{cn} se obtiene corrigiendo por temperatura la presión de cierre a condiciones de operación P_{vcn} . Esto se hace exclusivamente para las válvulas con domo de nitrógeno.

$$P_{cn} = P_{vcn} \times Ct$$

las válvulas con resorte no son afectadas por la temperatura, por lo tanto:

$$P_{cn} = P_{vcn}$$

9. Finalmente la presión de apertura de las válvulas a condiciones de taller se calcula con los valores obtenidos en el paso anterior, utilizando la siguiente expresión:

$$P_{cn} = \frac{P_{cn}}{1 - \frac{A_v}{A_b}}$$

Si se sigue este procedimiento, se puede tener la seguridad de que no exista interferencia entre válvulas, durante el proceso de descarga del pozo, teniendo la seguridad de que éstas abrirán con la presión del gas disponible, aún sin carga en la T.P., e independientemente del diámetro de orificio que se esté empleando.

Anteriormente se indicó que el método empleado por el programa Bonec, para el cálculo del perfil de presión es el de Orkiszewski, el cual requiere se le proporcionen las propiedades de los fluidos a condiciones de flujo; para tal objeto se cuenta con análisis PVT o en su defecto con correlaciones, tales como Standing, Vázquez, Oistein y Lásater para el cálculo de Bo y Rs; mientras que para μ_o están Beggs-Robinson y Beal-Chew.

IV.1.1 Resultados de la simulación con Bonec para el pozo 445

Durante 26 días se probó el equipo de bombeo electrocentrífugo, cerrandolo el día 8 de noviembre de 1992 por problemas subsuperficiales (falla por temperatura la mufa o clavija de conexión del cable de potencia al motor), como debían esperarse los accesorios para reparar el aparejo dañado, se decidió iniciar la prueba con el sistema de bombeo neumático para diferentes gastos de gas.

La información que se le suministró al programa de cómputo bonec, para el diseño del aparejo del pozo 445 con bombeo neumático es la siguiente:

Densidad relativa del aceite @ c.s.	0.9592
Densidad relativa del gas de formación @ c.s.	0.983
Densidad relativa del gas de inyección @ c.s.	0.69
Densidad relativa del agua @ c.s.	1
Diámetro de tubería de revestimiento (pg)	9 5/8, 7
Diámetro de tubería de producción (pg)	4 1/2"
Relación gas de formación-líquido @ c.s. (m ³ /m ³)	68
Temperatura de la cabeza (°C)	60
Temperatura de fondo (°C)	115
Profundidad media desarrollada de los disparos (m)	3,340
Profundidad desarrollada del empacador (m)	1,802

Porcentaje de agua (%)	0
Presión fluyendo en la cabeza (Kg/cm ²)	7
Presión de fondo estática (lb/pg ²)	2,850
Presión de fondo fluyendo (lb/pg ²)	2,464
Presión de operación del gas de inyección (lb/pg ²)	890
Presión máxima disponible del gas de inyección (lb/pg ²)	910
Ángulo de desviación del pozo	23.2

En la Tabla 3 se muestra un resumen de los resultados de la corrida del programa, análisis que se llevó a cabo para diferentes gastos de inyección, manteniendo fijos los siguientes parámetros durante la simulación:

Profundidad del empacador 1,802 m

Q_o = 6,000 BPD, RGA 68 m³/m³

P_{wf} = 2,465 lb/pg²

P_{ws} = 2,850 lb/pg².

Qg iny	0.2 MMPCD	Qg iny	0.5 MMPCD	Qg iny	0.7 MMPCD	Qg iny	1.0 MMPCD
Válvulas	Profundidad (m)						
1	613	1	613	1	613	1	613
2	899	2	900	2	900	2	901
3	1,128	3	1,129	3	1,130	3	1,132
4	1,308	4	1,311	4	1,312	4	1,315
5	1,388	5	1,394	5	1,399	5	1,405
6	1,474	6	1,480	6	1,485	6	1,491
Qcalc	4,831 BPD	Qcalc	5,278 BPD	Qcalc	5,477 BPD	Qcalc	5,683 BPD
Øorif	3/16 pg	Øorif	1/4 pg	Øorif	1/4 pg	Øorif	5/16 pg
Qg iny	1.2 MMPCD	Qg iny	1.5 MMPCD	Qg iny	1.7 MMPCD	Qg iny	2.0 MMPCD
Válvulas	Profundidad (m)						
1	613	1	613	1	613	1	613
2	901	2	901	2	902	2	902
3	1,132	3	1,133	3	1,133	3	1,133
4	1,316	4	1,316	4	1,317	4	1,317
5	1,407	5	1,409	5	1,410	5	1,411
6	1,493	6	1,495	6	1,496	6	1,497
Qcalc	5,792 BPD	Qcalc	5,922 BPD	Qcalc	5,985 BPD	Qcalc	6,063 BPD
Øorif	5/16 pg	Øorif	3/8 pg	Øorif	3/8 pg	Øorif	7/16 pg

Tabla 3

En la Tabla 3 se resalta con letras más oscuras, el aparejo que se introdujo al pozo para ser probado a un gasto de inyección de gas aproximado de 2.0 MMPCD, con el que se esperaba una producción promedio de 6000 BPD.

A continuación se enlista la distribución real del aparejo de bombeo neumático del pozo Ku-445 que se introdujo al pozo en noviembre de 1992 y se muestra el estado mecánico de éste en la Figura 44.

CANT	COMPONENTE	PROFUNDIDAD (m)
	Elevación mesa rotaria.	12.61
1	Bola colgadora CIW Cuello largo 12 pg x 4 1/2 pg HDCS	13.08
14	Tramos de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 #, L-80	137.75
1	Válvula de Tormenta 4 1/2 pg A-0125-CRB HDCS	139.95
51	Tramos de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 #, L-80	616.38
1	Primer mandril 4 1/2 pg HDCS	619.41
1	D. PIN 4 1/2 pg HDCS (ID=3 15/16")	619.65
30	Tramos de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 #, L-80	900.82
1	Segundo mandril 4 1/2 pg HDCS	903.85
1	D. PIN 4 1/2 pg HDCS (ID=3 15/16")	904.02
24	Tramos de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 #, L-80	1,129.40
1	Tercer mandril 4 1/2 pg HDCS	1,132.43
1	D. PIN 4 1/2 pg HDCS (ID=3 15/16")	1,132.60
20	Tramos de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 #, L-80	1,320.79
1	Cuarto mandril 4 1/2 pg HDCS	1,323.82
1	D. PIN 4 1/2 pg HDCS (ID=3 15/16")	1,323.99
9	Tramos de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 #, L-80	1,408.91
1	Quinto mandril 4 1/2 pg HDCS	1,411.94
1	D. PIN 4 1/2 pg HDCS (ID=3 15/16")	1,412.11
9	Tramos de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 #, L-80	1,496.39
1	Sexto mandril 4 1/2 pg HDCS	1,496.42
1	D. PIN 4 1/2 pg HDCS (ID=3 15/16")	1,499.59
31	Tramos de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 #, L-80	1,790.03
1	Camisa deslizable 4 1/2 pg "CF"	1,791.28
1	Tramo de T.P. 4 1/2 pg RTS-8, 12.75 #, L-80	1,800.73
1	Tope localizador 4 1/2 pg	1,801.08
2	Unidades sello multi-v 4 1/2 pg	1,802.02
2	Tubos espaciadores 4 1/2 pg	1,803.30
4	Unidades sello multi-v 4 1/2 pg	1,805.20
1	Zapata guía 4 1/2 pg	1,805.41

#, libras/pie

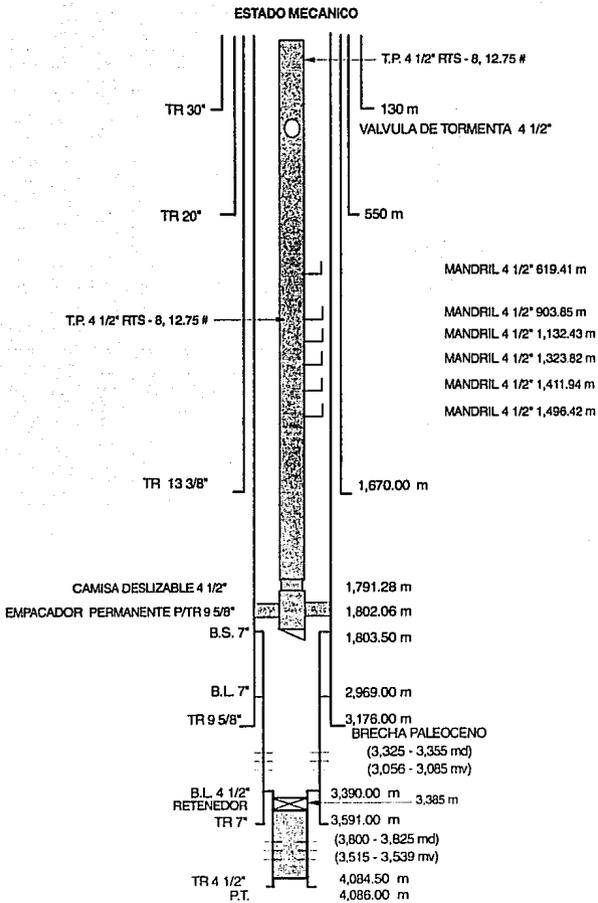


Figura 44. Distribución del aparato de bombeo neumático pozo Ku - 445

IV.2 Operaciones realizadas en el pozo 445

La conversión del aparejo de bombeo electrocentrífugo a bombeo neumático inició el 20 de noviembre de 1992, antes de realizar la instalación de las válvulas de bombeo neumático se probaron sus presiones de apertura en el taller. Para procurar que el pozo estuviera limpio se hizo circular el fluido de control (agua) varias veces para limpiar el pozo.

Durante la introducción del aparejo se instalaron las válvulas a la profundidad de diseño, evitando dañarlas con algún golpe.

Una vez instalado el aparejo en el pozo Ku - 445 para bombeo neumático continuo, se inició el desalojo del pozo, bombeando por la T.P. como la camisa de circulación entró abierta al pozo los fluidos de éste se evacuaron por la T.R, al comenzar el bombeo se observó un incremento en la presión.

La camisa de circulación se cerró y se abrió completamente la tubería de producción, luego se empezó a desalojar el lodo del pozo, a descargarlo con la inyección lenta de gas mediante el uso del estrangulador, siguiendo el programa de gastos de inyección predefinido por el departamento de Operación de Pozos.

La operación de válvulas de fuelle implica que el desalojo del pozo, debe ser más cuidadoso para evitar una presión diferencial excesiva en ellos y que no se abran oportunamente.

Una vez terminado el proceso de descarga, el pozo se puso en producción, regulando el volumen de gas inyectado y la producción del pozo en forma continua como se muestra en la Figura 45. En donde se observan los siguientes pasos:

1. El gas se inyecta lentamente en el espacio anular a través del estrangulador o de una válvula de aguja, en este momento el fluido de control debe manifestarse en la T.P, generalmente se descarga en una presa, hasta que salga gas a través de la primera válvula.

2. Conforme se aplica gas al espacio anular en forma continua, la presión en T.R. se incrementa gradualmente para que el fluido siga ascendiendo por la T.P. en forma de "U".

IV.2.1 Descripción del arranque con el sistema de bombeo neumático y resultados de la prueba

Este pozo entró en operación el 1° de diciembre del mismo año con una $P_{tp} = 4.5 \text{ Kg/cm}^2$ y un $Q_o = 2,731 \text{ BPD}$ para un $Q_{gi} = 0.735 \text{ MMPCD}$.

Durante este período se aforó para el rango de gastos de inyección que va de .200 MMPCD hasta 0.960 MMPCD.

En la Tabla 4 se pueden observar los resultados de la inyección de diferentes volúmenes de gas a este pozo.

V _{gi} MMPCD	Q _o BPD	Q _g Total m ³ /día	Q _g form. m ³ /día	RGA m ³ /m ³	RGIL m ³ /m ³	P _{tp} Kg/cm ²
0.203	2,364	30,934	25,180	67	15.31	3.0
0.412	3,908	54,213	42,547	68.48	18.78	4.0
0.645	4,433	65,350	47,078	66.8	25.93	4.4
0.807	4,674	68,438	45,597	61.36	30.74	4.8
0.962	4,943	78,664	51,434	65.45	34.65	4.9

Tabla 4

Como se puede observar durante, la prueba no se alcanzó el gasto de inyección diseñado, el gráfico de requerimiento de gas que se observa en la Figura 46 nos permite relacionar la producción de aceite con el gasto de inyección de gas. Esta relación, entre la producción de líquido y la inyección de gas, permite realizar un análisis económico⁷, cualquier punto de tangencia a la curva es único, por ejemplo si ocurre a la pendiente de 0° (paralela al eje x) nos indica la inyección de gas que proporcionaría la producción máxima, si la pendiente anterior coincidiera con la pendiente económica (definida por los gastos de gas inyectado y líquido producido además de los costos y las utilidades), se obtiene el óptimo económico al existir sólo un máximo.

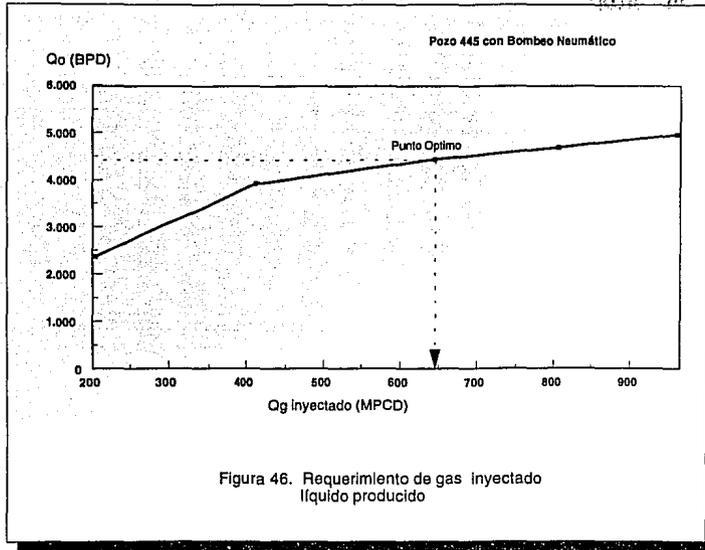


Figura 46. Requerimiento de gas inyectado líquido producido

Del análisis de este gráfico se determinó como gasto óptimo de inyección un gasto de 0.650 MPCD de gas obteniéndose 4,550 BPD promedio de aceite.

El pozo Ku - 445 operó con el sistema de bombeo neumático hasta el día 15 de enero de 1993, obteniendo una producción acumulada de 205,446 BPD y 2,980,226 PCD de gas para un volumen acumulado de gas de inyección de 30,803,654 MMPCD, ver Tabla 5.

Fecha d/m/a	Qo prod. BPD	Qg prod PCD	Qgi PCD
1/12/92	2,731	42,339	735,000
2/12/92	4,201	39,799	705,000
3/12/92	4,201	39,799	705,000
4/12/92	4,202	62,221	664,253
5/12/92	4,202	62,221	664,253
6/12/92	4,202	62,221	664,253
7/12/92	4,202	62,221	664,253
8/12/92	4,202	62,221	664,253
9/12/92	4,552	67,007	645,274
10/12/92	4,673	70,388	806,593

Tabla 5

Fecha d/m/a	Qo prod. BPD	Qg prod PCD	Qgi PCD
11/12/92	5,013	76,230	951,969
12/12/92	5,013	76,230	951,969
13/12/92	5,013	76,230	951,969
14/12/92	4,762	66,050	713,200
15/12/92	4,209	59,003	521,195
16/12/92	3,508	45,836	437,000
17/12/92	4,552	67,007	645,274
18/12/92	4,552	67,007	645,274
19/12/92	4,552	67,007	645,274
20/12/92	4,552	67,007	645,274
21/12/92	4,552	67,007	645,274
22/12/92	4,552	67,007	645,274
23/12/92	4,552	67,007	645,274
24/12/92	4,552	67,007	645,274
25/12/92	4,552	67,007	645,274
26/12/92	4,552	67,007	645,274
27/12/92	4,552	67,007	645,274
28/12/92	4,552	67,007	645,274
29/12/92	4,552	67,007	645,274
30/12/92	4,552	67,007	645,274
31/12/92	4,552	67,007	645,274
1/01/93	4,552	67,007	645,274
2/01/93	4,552	67,007	645,274
3/01/93	4,552	67,007	645,274
4/01/93	4,552	67,007	645,274
5/01/93	4,552	67,007	645,274
6/01/93	4,552	67,007	645,274
7/01/93	4,552	67,007	645,274
8/01/93	4,552	67,007	645,274
9/01/93	4,552	67,007	645,274
10/01/93	4,552	67,007	645,274
11/01/93	4,552	67,007	645,274
12/01/93	4,552	67,007	645,274
13/01/93	4,552	67,007	645,274
14/01/93	4,552	67,007	645,274
15/01/93	4,552	67,007	645,274
TOTAL	205,446	2,980,226	30,803,654

Tabla 5 Continuación

Posteriormente, una vez terminada la prueba de este sistema, inicio de nuevo su conversión al sistema de bombeo electrocentrífugo.

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS SISTEMA DE BOMBEO NEUMÁTICO Y BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO

V.1. Conceptos fundamentales para un análisis económico

En la actualidad toda prueba de nueva tecnología debe ser evaluada tanto técnica como económicamente, por tal motivo en esta tesis se incluyó el presente capítulo, con él se busca comparar y evaluar los resultados obtenidos por ambos sistemas artificiales de producción, mediante el uso de las herramientas y parámetros económicos más representativos: como el comportamiento del valor presente neto *VPN* para un período de estudio de 6, 12, 18 y 24 meses y la tasa interna de retorno *TIR* para los mismos períodos, la relación beneficio/costo y la relación ingreso/egreso a 24 meses.

A continuación se definen los conceptos básicos requeridos para realizar un análisis económico:

Interés (*I*): Es el costo que se genera al usar el dinero, representa la variación del valor del dinero en el tiempo. El interés puede ser simple o compuesto, el interés es simple cuando es proporcional al período de tiempo en el que se usara el dinero y se calcula:

$$I = Pn i$$

donde:

- I*, Interés
- P*, Cantidad principal
- i*, Tasa de interés periódica
- n*, Número de períodos

Cuando se habla de interés compuesto, nos referimos a la cantidad principal que es usada en más de un período de interés, lo que genera interés del interés.

Valor presente (*VP*): Se define como el valor actual equivalente a cualquier flujo de efectivo situado en algún punto del tiempo, el cual se trae al tiempo $t = 0$ aplicando una tasa de interés, expresado de la siguiente manera:

$$P = F_1 (1 + i)^{-1} + F_2 (1 + i)^{-2} + \dots + F_n (1 + i)^{-n}$$

donde:

- F_n , Valor futuro (Cantidad de dinero disponible dentro de n períodos de tiempo)
- P*, Cantidad principal
- i*, Tasa de interés periódica

n , Número de períodos

La cantidad principal en el tiempo $t = 0$ es llamada valor presente (VP) del flujo de efectivo en el futuro y se representa como:

$$VP = \frac{F_n}{(1+i)^n}$$

Valor Futuro (VF): Es el valor de una cantidad, calculado en un tiempo futuro a una tasa de interés.

$$F_1 = P + i_1 P = P(1 + i_1)$$

donde:

F_1 , Nueva cantidad principal

F_n , Monto en el período $t = n$

P , Cantidad principal a $t = 0$

iP , Interés al término del primer período

Valor Presente Neto (VPN): También conocido como *Ganancia*, ya que refleja la capacidad de producir beneficios de las diferentes alternativas de inversión, tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo.

$$VPN = \sum_{k=0}^n I_k (1+i)^{-k}$$

en donde:

I_0 , Inversión inicial (debe tener signo negativo)

I_k , Flujo de efectivo en el período k ésimo (Ingresos menos Egresos)

n , Horizonte de estudio

i , Tasa de interés

Relación Beneficio/Costo (RBC): Índice que establece la razón entre los beneficios obtenidos por cada peso invertido en un proyecto. De tal forma que:

$$RBC = \frac{VPN_B}{VPN_{CI}} = \frac{B}{CI}$$

donde:

VPN_B , Valor presente neto de los ingresos netos

VPN_{CI} , Valor presente neto de la inversión inicial

Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRMO): Se define como la tasa de interés a la cual la suma presente y la suma futura son equivalentes. Tasa de interés que hace que los ingresos generados durante la vida del proyecto, llevados al final de éste, sean equivalentes a los desembolsos llevados al $t = 0$.

$$TIRMO = \sqrt[n]{\frac{F_n}{VP}} - 1$$

F_n , Valor futuro de ingresos

VP , Valor presente de los costos

Tasa Interna de Retorno (TIR): También conocida como la rentabilidad de un proyecto, se define como el índice que representa la tasa de interés que debe generar el monto no recuperado de un proyecto en cada período. Lo ideal es que al final de la vida de la inversión el monto no recuperado sea nulo.

$$0 = \sum_{k=0}^n I_k (1+i)^{-t}$$

V.2. Análisis económico para ambos sistemas artificiales de producción

Con el fin de efectuar un análisis económico se determinó el beneficio obtenido por los sistemas artificiales de producción que se están analizando en un período de prueba de 32 días, la Tabla 6 muestra el gasto de aceite y gas que se produjo con los sistemas de bombeo electrocentrífugo y bombeo neumático respectivamente, como se puede observar los gastos del primer sistema artificial son mayores y aportan una ganancia también mayor con respecto a los de bombeo neumático.

Las premisas en la que se sustenta el análisis económico para obtener los beneficios por el aceite y el gas producidos son: el precio del barril de aceite es de 11.74 dólares, el precio del gas es de MNS\$ 6.0 por millón de pies³, la declinación anual de la producción considerada para el bombeo electrocentrífugo es de 11.4 % y para el bombeo neumático de 16.4 %.

El tipo de cambio al que se convirtieron los costos es de N\$ 3.15 por cada dólar de los Estados Unidos de Norteamérica (USD). Además todos los ingresos son referidos antes de impuestos.

Día	Bombeo electrocentrífugo \$ 11.74 dólar/barril			Bombeo neumático \$ 11.74 dólar/barril		
	Qo (BPD)	Qg (MMPCD)	Beneficio (MN\$ Pesos)	Qo (BPD)	Qg (MMPCD)	Beneficio (MN\$ Pesos)
0	0	0		0	0	
1	7,778	2.30	301.44	2,731	1.49	109.97
2	7,778	2.30	301.44	4,201	1.41	163.79
3	7,778	2.30	301.44	4,201	1.41	163.79
4	7,778	2.30	301.44	4,202	2.20	168.58
5	7,778	2.30	301.44	4,202	2.20	168.58
6	7,778	2.30	301.44	4,202	2.20	168.58
7	7,778	2.30	301.44	4,202	2.20	168.58
8	7,778	2.30	301.44	4,202	2.20	168.58
9	7,778	2.30	301.44	4,552	2.37	182.53
10	7,778	2.30	301.44	4,673	2.49	187.72
11	7,778	2.30	301.44	5,013	2.69	201.54
12	7,778	2.30	301.44	5,013	2.69	201.54
13	8,071	2.33	312.45	5,013	2.69	201.54
14	10,017	2.87	387.66	4,762	2.33	190.10
15	10,017	2.87	387.66	4,209	2.08	168.15
16	10,017	2.87	387.66	3,508	1.62	139.44
17	10,017	2.87	387.66	4,552	2.37	182.53
18	10,017	2.87	387.66	4,552	2.37	182.53
19	10,017	2.87	387.66	4,552	2.37	182.53
20	10,017	2.87	387.66	4,552	2.37	182.53
21	10,017	2.87	387.66	4,552	2.37	182.53
22	10,017	2.87	387.66	4,552	2.37	182.53
23	10,017	2.87	387.66	4,552	2.37	182.53
24	10,017	2.87	387.66	4,552	2.37	182.53
25	7,800	2.33	302.43	4,552	2.37	182.53
26	7,800	2.33	302.43	4,552	2.37	182.53
27	7,800	2.33	302.43	4,552	2.37	182.53
28	7,800	2.33	302.43	4,552	2.37	182.53
29	7,800	2.33	302.43	4,552	2.37	182.53
30	7,800	2.33	302.43	4,552	2.37	182.53
31	7,800	2.33	302.43	4,552	2.37	182.53
31	7,800	2.33	302.43	4,552	2.37	182.53
TOTAL			10,613.41			5,673.52

Tabla 6

Sin embargo, cabe hacer mención que el objetivo de la prueba comparativa entre ambos sistemas, para este periodo de tiempo no era solamente el factor económico, sino probar también la factibilidad técnica de la instalación del bombeo electrocentrífugo en el campo Ku-Maloob. Finalmente se determinó que esto era posible.

El equipo de bombeo electrocentrífugo instalado en el pozo Ku 445 sigue operando con este sistema, por lo que se hizo necesario determinar mediante un análisis económico su comportamiento en un horizonte de estudio de 24 meses. Se fijó un periodo de vida útil promedio de la bomba de 2 años, por lo que no se consideran costos por reparación.

En la Tabla 7 se presenta el resultado del análisis para el bombeo electrocentrífugo con producción constante de 8500 barriles de aceite por día, aplicando tasas de interés anual de 13.98 % e impositiva de 56.935 % sobre ingresos, considerando además la sensibilidad al precio de los hidrocarburos para un costo de 11.74 y 14.74 dólares por barril de aceite producido, en ambos casos la inversión se pagó al inicio de la prueba.

PARÁMETRO	BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO			
	\$ 11.74 dólar/barril	\$ 14.74 dólar/barril		
VALOR PRESENTE NETO (DÓLARES)	6 meses	9,634,601.00	6 meses	13,229,991.00
	12 meses	23,873,124.00	12 meses	31,309,090.00
	18 meses	36,404,413.00	18 meses	47,222,384.00
	24 meses	47,432,795.00	24 meses	61,228,954.00
PERIODO DE PAGO (DÍAS)	40		31	
TASA INTERNA DE RETORNO (%)	6 meses	840.381	6 meses	1,105.688
	12 meses	899.890	12 meses	1,147.247
	18 meses	901.577	18 meses	1,147.886
	24 meses	901.632	24 meses	1,147.897
RELACIÓN BENEFICIO/COSTO (USD UTILIDAD / USD DE GASTO)	4.800		6.230	
RELACIÓN INGRESO/EGRESO (USD/USD)	6.260		7.825	

Tabla 7

Con el objeto de comparar los beneficios que se obtendrían al implantar el sistema de bombeo electrocentrífugo en vez del bombeo neumático en Ku-Maloob, también se realizó un análisis de este último.

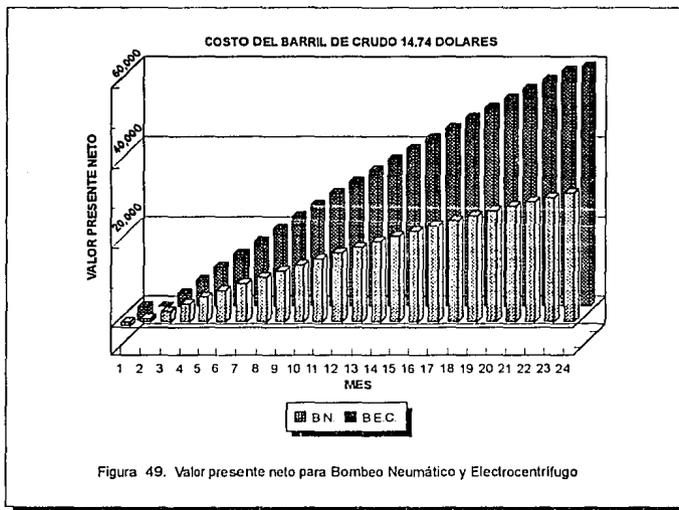
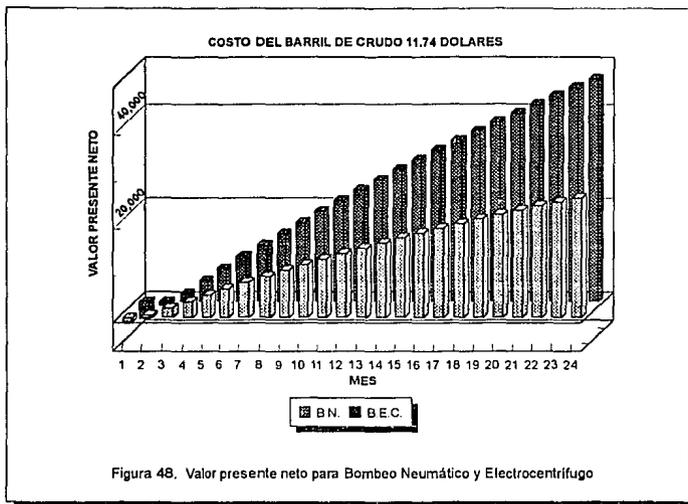
En la Tabla 8 se muestra el resultado del análisis para el bombeo neumático, aplicando las mismas premisas que en el caso de bombeo electrocentrífugo, excepto en la producción considerada fue de 4,500 barriles de aceite por día.

PARÁMETRO	BOMBEO NEUMÁTICO *		BOMBEO NEUMÁTICO *	
	S 11.74 dólar/barril		S 14.74 dólar/barril	
VALOR PRESENTE NETO (DÓLARES)	6 meses	6,172,862.00	6 meses	8,062,279.00
	12 meses	13,632,114.00	12 meses	17,492,505.00
	18 meses	20,031,740.00	18 meses	25,583,278.00
	24 meses	25,522,220.00	24 meses	32,524,806.00
PERIODO DE PAGO (DÍAS)	20		15	
TASA INTERNA DE RETORNO (%)	6 meses	1,833.045	6 meses	2,333.125
	12 meses	1,849.863	12 meses	2,343.060
	18 meses	1,849.920	18 meses	2,343.071
	24 meses	1,849.920	24 meses	2,343.071
RELACIÓN BENEFICIO/COSTO (USD UTILIDAD / USD DE GASTO)	6.599		8.485	
RELACIÓN INGRESO/EGRESO (USD/USD)	8.536		10.679	

Tabla 8

* En el estudio económico no se considero el costo de la línea de distribución del gas, ni el equipo de compresión por ya ser existente, esto provoca que sean mayores los parámetros económicos para este sistema.

A continuación se muestra el comportamiento gráfico del valor presente neto, para el horizonte de estudios de 24 meses y un costo del barril de crudo de 11.74 y 14.74 dólares Figuras 48 y 49.



Resultados

Comparando cada uno de los parámetros de las Tablas 7 y 8, en función del costo del barril de aceite, se observa que para 11.74 dólar/barril el valor presente neto (VPN) del bombeo electrocentrífugo con respecto al neumático para un período de 12 meses es 75 % mayor y para 24 meses de 86 %. Al incrementar el costo a 14.74 dólar/barril se obtuvo para 12 meses 78 % y para 24 meses 88 % más. Es evidente que las tasas internas de retorno (TIR), relación beneficio/costo y relación ingreso/egreso fueron mayores en el bombeo neumático por considerar una inversión inicial menor, por lo que aparentemente se obtiene una incertidumbre para afirmar cuál de los sistemas artificiales es más rentable económicamente.

Para esclarecer esta contradicción, se debe examinar lo que implica instalar equipo de bombeo electrocentrífugo en vez de bombeo neumático en el pozo.

Primero, debe calcularse la diferencia entre el flujo de efectivo (Ingresos - Egresos) del bombeo electrocentrífugo y el bombeo neumático, generando un nuevo proyecto que denominaremos "bec-bn", simplificando la solución del problema, pues sólo se determina el beneficio económico de bec-bn calculando su valor presente neto, la tasa interna de retorno y la relación beneficio/costo; en la Tabla 9 se muestra el resultado del análisis para un horizonte de estudio de 24 meses.

Al análisis que se llevó, a cabo para construir la Tabla 9, se le conoce como análisis incremental² y se recomienda se efectue cuando se quiere establecer el ordenamiento de dos alternativas que puedan excluirse mutuamente, ya sea empleando el método que calcula la relación beneficio/costo o bien el que determina la tasa interna de retorno.

PARÁMETRO	bec-bn 11.74 dólar/barril	bec-bn 14.74 dólar/barril
VALOR PRESENTE NETO (DLS)	22,201,320	29,083,650
TASA INTERNA DE RETORNO (%)	564.51	1,362.60
RELACIÓN BENEFICIO/COSTO (USD/USD)	9	12

Tabla 9

Finalmente, debido a que el valor presente neto es positivo, la relación beneficio/costo es mucho mayor a la unidad y la tasa interna de retorno es mayor a la tasa de oportunidad o de interés, se puede concluir que el proyecto bec-bn es aconsejable, lo cual implica que la implementación del sistema artificial de bombeo electrocentrífugo es la alternativa más adecuada para el campo de aceite pesado al que pertenece el pozo Ku - 445.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Desde el punto de vista económico, el bombeo electrocentrífugo resultó ser mejor que el bombeo neumático continuo basado en los aspectos siguientes, observados durante la prueba en el pozo Ku 445 y enriquecidos con los resultados de otros estudios comparativos entre ambos sistemas:

- Si se toman en cuenta los gastos de producción en el pozo Ku 445 para ambos sistemas artificiales, bombeo electrocentrífugo y bombeo neumático, se observa que el primero proporciona gastos de producción superiores que el segundo, siendo casi del doble.
- Se demostró durante la prueba que con el sistema de bombeo electrocentrífugo, puede obtenerse un amplio rango de gastos de producción que va de 7800 a 10200 BPD, sin necesidad de efectuar ningún cambio al equipo instalado tanto superficial como subsuperficial.
- La inversión inicial por pozo es menor en el bombeo electrocentrífugo que en el bombeo neumático, las bombas electrocentrífugas son más baratas que la línea de distribución del gas y los equipos de compresión requeridos por el segundo sistema.
- El bombeo neumático continuo requiere menos costos de operación y mantenimiento.
- En un análisis económico de bombeo electrocentrífugo la variable más importante es la frecuencia de reoaración de las bombas. Los costos de las reparaciones, incluyendo los costos del equipo en servicio, pueden ascender a más de la mitad del costo de una bomba nueva.
- Al aplicar un estudio económico denominado análisis incremental, se demostró con base en el valor presente neto (22,201,320 dólares), la tasa interna de retorno (564.61 %) y la relación beneficio-costo (9 dólar/dólar) que el bombeo electrocentrífugo resulta ser mejor que el bombeo neumático, al aplicarse a un sólo pozo y un costo por barril de crudo de 11.74 dólares.

Por otra parte, desde el punto de vista técnico, el bombeo electrocentrífugo ofrece ciertas ventajas en relación al bombeo neumático, las cuales se mencionan a continuación:

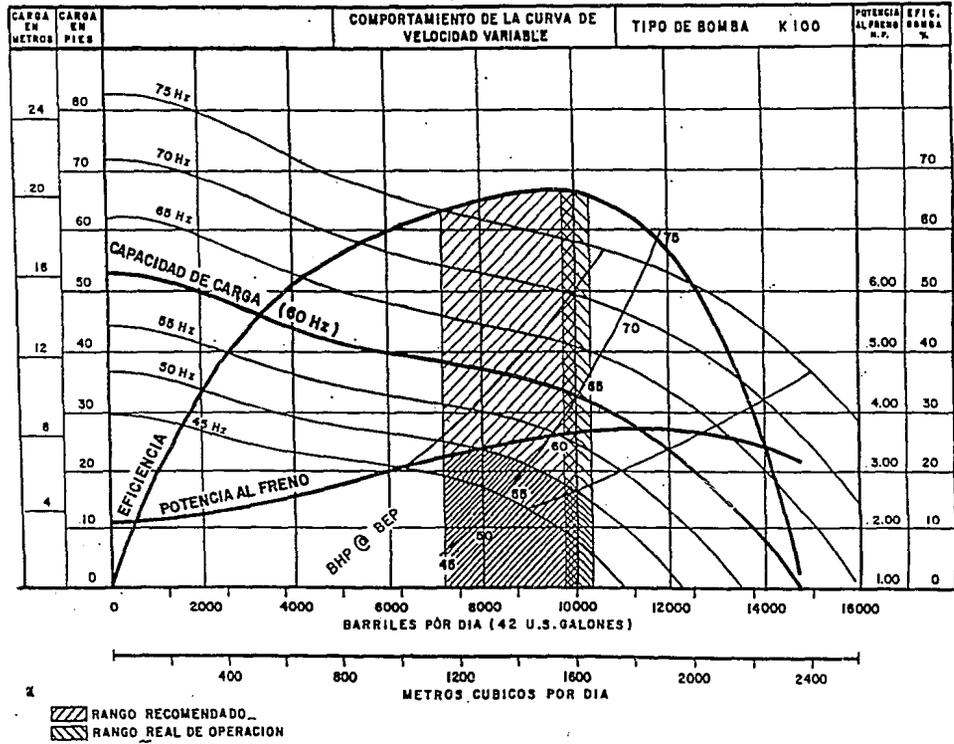
- El bombeo electrocentrífugo es un sistema susceptible de diseñarse para presiones en la cabeza de los pozos, más altas que en otros sistemas artificiales, lo que se traduce en distancias más grandes para la entrega de la mezcla aceite-gas producida, lo que reduce costos por no requerirse baterías de separación cercanas.
- Al aplicar bombeo neumático los pozos dejan de producir con presiones de fondo fluyendo relativamente altas (consecuencia de presiones estáticas altas), pues se necesitará de profundizar el punto de inyección usando una presión de operación mayor.

- En el bombeo neumático los pozos muestran un beneficio decreciente a partir de la inyección de gas adicional. El incremento en el volumen de gas inyectado causará eventualmente que la presión de fondo aumente, reduciendo la producción. Una presión alta en la boca del pozo incrementa los requerimientos de gas de inyección.
- El bombeo electrocentrífugo puede abatir la presión de fondo por abajo de la mínima obtenida por bombeo neumático. Para yacimientos en etapa de explotación avanzada, con alta producción de agua, el bombeo electrocentrífugo resulta ser un buen sistema de explotación.
- En pozos con alta relación gas-aceite, el bombeo electrocentrífugo es aplicable solo si se manejan gastos pequeños y se instala un separador de fondo.
- En términos generales el bombeo electrocentrífugo no es recomendable en pozos con arrastre de materiales sólidos, ya que produce daños por abrasión en los elementos internos de la bomba; sin embargo, no se traduce en una limitante para el sistema si se manejan gastos bajos que eviten el arrastre de finos.
- El arrastre de materiales sólidos no es un efecto significativo en pozos con bombeo neumático, ya que estos no pasan a través de las válvulas.

ANEXO A

TP 4 1/2" FLUJO MAXIMO

ETAPAS : 104



92

Figura 1. Pozo Ku-445

TP4 1/2" FLUJO MAXIMO

ETAPAS : 104

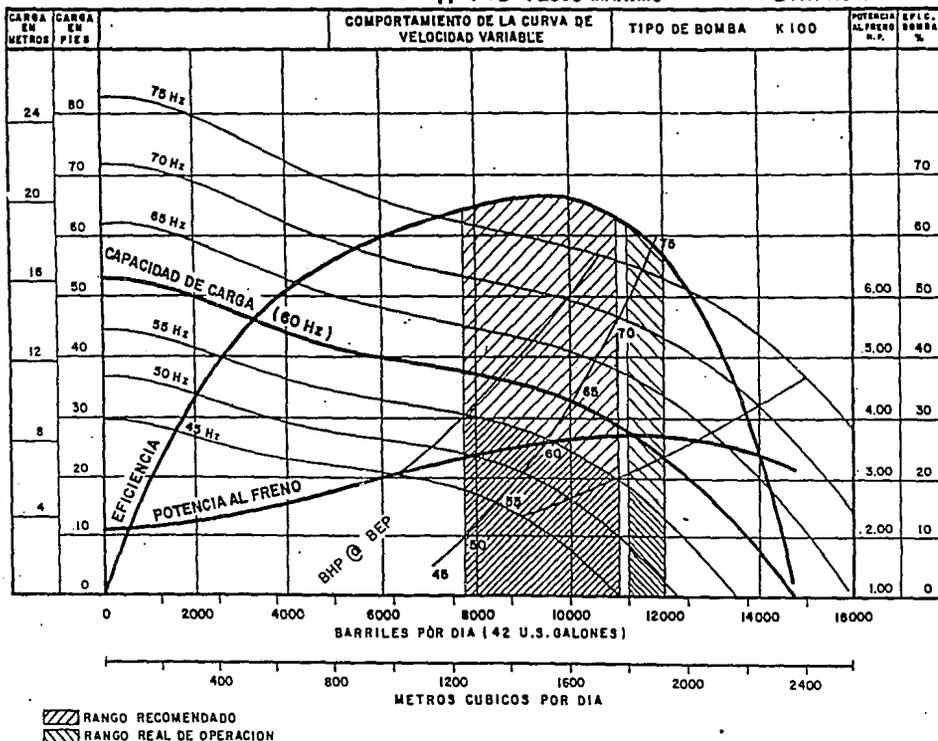
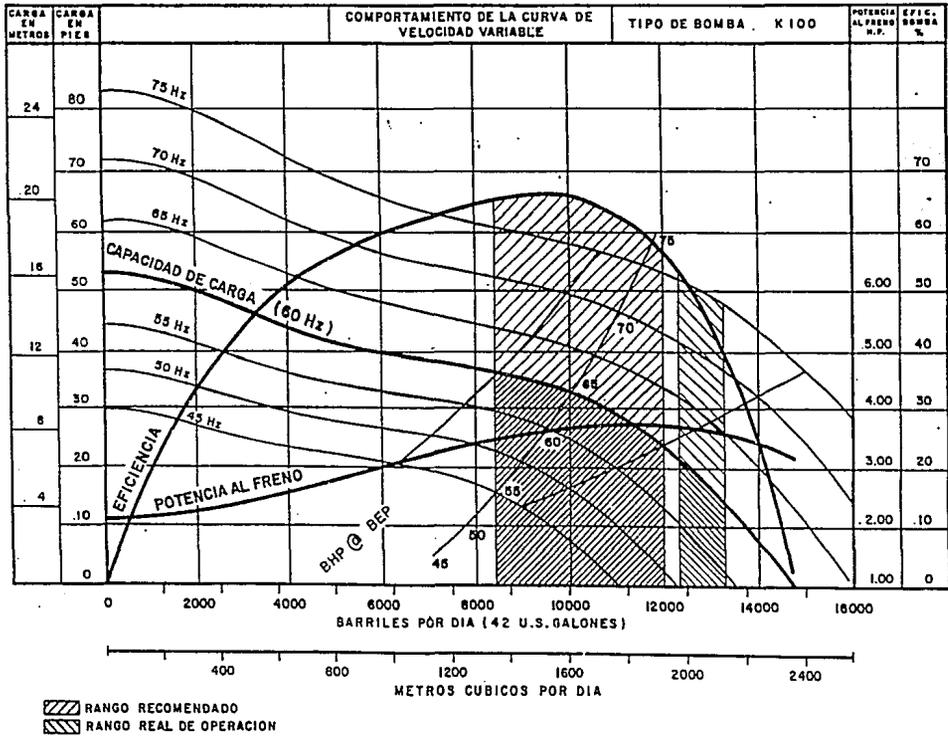


Figura 2. Pozo Ku-445

TP 4 1/2" FLUJO MAXIMO

ETAPAS : 104



94

Figura 3. Pozo Ku-445

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Watson, A. J.: "ESP The Electrical Submersible Pump," *Petroleum Engineer International* (Noviembre 1983) 25-32.
2. Villarreal, I. A.: "Evaluación Financiera de Proyectos de Inversión," Ed. Norma, (1988) 137-160.
3. Brown, K. E. *et al.*: "The Technology of Artificial Lift Methods", *Petroleum Publishing Co.* Volumen 2a: Capítulo 3.
4. Buford, N.: "Selection of Artificial Lift Method," s.l, s.f.
5. De Moss, E. E. *et al.*: "Gas lift Increases High-Volume Production From Claymore Field," *JPT* (Abril 1982).
6. Gordillo, M. D. "Selección del Sistema Artificial de Explotación para el Campo Ku Maloob," *Tesis F.I. UNAM* (1992) dirigida por el Ing. José Luis Martínez Galván.
7. Kanu, P. E. *et al.*: "Solución Económica para la Producción de Aceite y la Distribución de Gas en Bombeo Neumático Continuo," *JPT* (1981) traducción de Garaicochea, P. F. y Corona, A.
8. Coltharp, D. E.: "Subsurface Electrical Centrifugal Pumps," *JPT* (1984) 645-652.
9. Garaicochea, P. F.: Apuntes de Transporte de Hidrocarburos. *Fac. de Ingeniería, UNAM* (1983).
10. Gilbert, W. E.: "Flowing and Gas Lift Well Performance," *API Drill. Prod. Practice* (1954) 126.
11. *Handbook of Gas Lift*, Garret Oil Tools, Division of U.S. Industries, Inc., Nueva York, (1959).
12. Winkler, W. H.: "Gas Lift Capítulo 5," *Petroleum Engineer Handbook* 5-1 - 5-57.
13. Zuñiga, P. H.: "Selección del Sistema de Explotación Artificial al Campo Cantarell, de la Zona Marina de Campeche," *Ingeniería Petrolera* (Enero 1987) 31-41.
14. Zuñiga, P. H., Mata, I.G. y Loyo, F. J.: "Nuevo Programa de Cómputo para Diseñar Instalaciones de Bombeo Neumático," *Ingeniería Petrolera* (Marzo 1988) 11-22.
15. Lea, F. J. y Bearden, L. J.: "Gas Separator Performance for Submersible Pump Operation," *JPT* (Junio 1982) 1328-1333.

16. Lea, F. J. y Powers, J. W.: "Electrical Submersible Pump Teardown Inspection," (Abril 1984) 49-55.
17. Díaz, Z. H. y Poblano, O. R.: "Diseño Mejorado de Aparejos de Bombeo Eléctrico," *Ingeniería Petrolera* (Julio 1984).
18. Díaz, Z. H.: "Apoyo Técnico en la Evaluación, Selección y Prueba de Nuevas Tecnologías en las Instalaciones de Producción, Prueba de Bombeo Electrocentrifugo en los pozos Ku 427 y Ku 445 (H)," Proyecto CBD-3192, (Febrero 1993).
19. Firo, R.J.: "Bombeo Electrocentrifugo y Bombeo Mecánico," *Tesis F.I. UNAM* (1988) dirigida por el Ing. J. Héctor Díaz Zertuche.
20. Beavers, J.: "ESP The Electrical Submersible Pump," *Petroleum Engineer International* (Marzo 1983) 41-42.
21. Gómez, C. J.: "Pozos Fluyentes Bombeo Neumático y Bombeo Hidráulico," México, s.f.
22. Martínez, G. J.: "Selección de Aparejos de Producción para Pozos del Campo Cantarell con Bombeo Neumático," *División de Producción del Instituto Mexicano del Petróleo* (Julio 1991).
23. *The Power of Gas*, 2ad ed., Kirkpatrick, C. V.: , Camco, Inc., Houston, Tex. (1954)
24. Bailey, C. M. y Bearden, J.: "ESP The Electrical Submersible Pump," *Petroleum Engineer International* (Septiembre 1982) 128-132.
25. Villa, J. E. y Acuña, R. A.: "Bombeo Centrifugo en Pozos con Flujo Multifásico," *Revista IMP* (Abril 1971).

*El destino no es casualidad,
sino elección,
no es lo que se espera,
sino lo que se realiza,
por ayudarme a lograrlo,
¡gracias!*

*A mi madre Sra. Teresa Vázquez de González.
A mi padre Cor. de Cab. Francisco González Rodríguez.
A mis hermanos Emma Andrea y Francisco Cipriano.
Así como al Ing. Juan Ernesto Ladrón de Guevara Torres.*

Por su apoyo incondicional

*Agradezco los valiosos comentarios efectuados a este
trabajo por Ing. Héctor Díaz Zertuche, Ing. Carlos
Balderas Joers y muy especialmente al Ing. José Luis
Martínez Galván.*
