

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO ARTIFICIAL
ELECTROSUMERGIBLE MEJORADO EN POZOS DE PETROLEO EN LA
SELVA PERUANA.**

Preparado por:
Edgardo Medina A.

81.1

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
LIMA - PERU
FEBRERO 1991

SUMARIO

- 1.0 Métodos de levantamiento artificial.
- 2.0 Bombeo Electrocentrífugo Sumergible - BES.
 - 2.1 Historia.
 - 2.2 Introducción.
 - 2.3 Conceptos básicos sobre una unidad BES.
 - 2.4 Equipo eléctrico de superficie.
 - 2.5 Diseño de una unidad BES.
 - 2.5.1 Factores que afectan el diseño de una unidad BES
 - 2.5.2 Carga Dinámica Total - TDH.
 - 2.5.3 Pasos para el diseño de una unidad BES.
 - 2.5.4 Datos para el diseño de una unidad BES.
 - 2.5.5 Diseño - Ecuaciones.
- 3.0 Evaluación de una bomba con pocos días de funcionamiento.
- 4.0 Nuevos conceptos en el diseño de unidades BES.
 - 4.1 Leyes de Afinidad aplicadas a diseños BES.
 - 4.2 Variadores de frecuencia VSD.

- 4.3 Efectos de las fuerzas axiales de empuje descendente sobre la bomba .
- 4.4 Resultados de la inspeccion de impulsores por empuje descendente
- 4.8 Fuentes internas de Empuje Axial
- 4.8.1 Determinación del Empuje Axial Descendente.
- 5.0 Resumen de Daños, Causas y Recomendaciones en el funcionamiento de unidades BES
- 6.0 Evaluación Económica de una unidad BES
- 7.0 Apéndice :
- Análisis de las cartas amperimétricas.
 - Gráficas de suministro eléctrico
 - Dibujo de un impulsor y sus partes
 - Gráficas para empuje descendente
- 8.0 Referencias Bibliográficas

1.0 METODOS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

1.1 BOMBEO MECÁNICO

Inicialmente se instalaron unidades de bombeo en aquellos campos de crudo pesado con tubería de producción de 4½". Debido al rápido incremento del corte de agua alrededor del 85%, la limitación en su capacidad de levantamiento, sus altos costos de mantenimiento, hicieron que éste método resulte no funcional y antieconómico.

1.2 BOMBEO NEUMÁTICO

Conocido también como **Gas Lift**, utiliza gas a alta presión, inyectado ya sea por los forros o por la tubería de producción, que abre válvulas espaciadas y el gas impulsa el petróleo hacia la superficie; la limitación principal es la escasez de gas, que no alcanza el volumen que se requiere para operar con éste método.

El bombeo neumático fué la mejor opción para crudos livianos y semipesados con bajos cortes de agua y altos GOR, la disminución de la producción de gas y el constante incremento del corte de agua, hacen que éste

método no sea recomendable. Un problema colateral de operar con inyección de gas es la formación de deposiciones asfálticas en los compresores, líneas de inyección y tuberías de producción causando períodos largos de cierre para la limpieza y mantenimiento.

1.3 BOMBEO HIDRÁULICO

Utilizado el tipo Jet "(Jet Pump)", el aceite motriz se inyecta de la superficie por la tubería de producción y pasa através de un estrangulador a tal velocidad que arrastre el fluido por el anular del pozo hasta la superficie.

1.4 BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

Utiliza energía eléctrica como medio de transmisión de potencia, que se transforma en energía mecánica (motor), que transmite a la bomba y lo entrega como energía hidráulica. Es utilizado principalmente para levantar grandes volúmenes, instalando unidades sumergidas en los pozos y tienen una capacidad de 200 a 50,000 barriles por día.

La corriente eléctrica es transportada por un cable trifásico hacia los motores de inducción bipolares

trifásicos, ensamblados con su protector y bomba, forman una unidad BES, la cual impulsa el crudo por la tubería de producción hasta la superficie, a una determinada presión de cabeza, suficiente para impulsarlo hasta la batería.

Por la experiencia se ha observado, que éste método no es recomendable para pozos con altos GOR y con considerable producción de arena.

2.0 BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO SUMERGIBLE.- BES

2.1 HISTORIA

El bombeo electrocentrífugo en nuestro país, se inició en el año 1967 con la adquisición de seis (6) unidades; pero para la evaluación del presente estudio, data de Junio de 1981 y al presente año ya pasan de 100 pozos con unidades BES y se continua la conversión o completación de nuevos pozos en los campos de este estudio.

La razón principal de este incremento de pozos con unidades BES, son los altos cortes de agua producidos en pozos de reservorios de empuje activo de agua "Water Drive Mechanism", y para contrarrestar los altos costos por operación en la Selva Peruana.

En condiciones muy adversas de operación, el bombeo electrocentrífugo es la mejor opción para hacer producir pozos en su capacidad óptima.

Cabe mencionar que la mayoría de los pozos de petróleo, motivo de esta presentación, inicialmente fueron fluyentes; pero su presión fluyente declinó y ahora sólo producen parte de su capacidad, razón por la cual se requiere instalar un método de levantamiento artificial para extraerlo hasta la superficie.

Muchos de los pozos del presente estudio, han producido por el método de bombeo mecánico, otros por bombeo neumático y algunos por bombeo hidráulico.

2.2 INTRODUCCIÓN

La optimización del período de vida útil de bombas electrocentrífugas, se puede resumir en:

- Aumento significativo en la producción.
- Bajar los costos de operación.
- Anticipar vida mas larga para unidades de bombeo electrocentrífugo sumergible-BES.

Para que el bombeo electrocentrífugo resulte la mejor opción, se ha construido una infraestructura para facilitar la operación, como: instalación de generadores y transformadores versátiles y

transportables a locaciones de pozos alejados de la planta principal de energía, se optó el uso de variadores de velocidad (VSD) en el control de cada unidad; siendo su más importante característica la producción de grandes volúmenes, por ejemplo: en un determinado pozo es posible obtener una producción de 7,500 BPD a una frecuencia de 90 ciclos por segundo y solo 5000 BPD a 60 ciclos/seg, todo esto, en base a la productividad del pozo y a la capacidad de almacenamiento en la superficie.

Se considerará un nuevo concepto para evaluar desgastes y una nueva teoría para los diseños y se conoce como "Efecto de la Fuerza de Empuje" y rango del PV (presión con velocidad) que son características de cada etapa y diferentes para cada bomba.

Se notará que dentro de ésta nueva visión, cada bomba tiene su propio rango de operación y en la mayoría de los casos se aleja del rango óptimo recomendado por el fabricante.

Adicionalmente se enumera una serie de problemas, sus causas, sus danos en los equipos sumergibles, así mismo diferentes soluciones adoptadas y sus resultados obtenidos.

2.3 CONCEPTOS BASICOS SOBRE UNA UNIDAD BES

Una unidad BES, opera sumergida en el fluido del pozo y es suspendida por la tubería de producción, generalmente arriba de la zona perforada; los componentes en el pozo son: bomba, sello, motor y cable; en algunos casos se requerirá separador de gas. Los componentes eléctricos de superficie son: caja de ventilación, Variador de Velocidad, transformadores y cables de superficie y en algunas locaciones generadores de corriente trifásica independientes.

2.3.1 BOMBA

La bomba electrocentrífuga sumergible esta hecha de un número determinado de etapas. Cada etapa consiste de un impulsor el cual está fijo al eje y un difusor que es elemento estacionario, que direcciona el flujo del fluido de una etapa a otra. El número de etapas determina el levantamiento requerido; por lo tanto a mayor número de etapas más lejos se levanta el fluido.

El diametro de la bomba varía desde 3½" a 10" lo que depende del volumen a levantar.

La forma del impulsor determina mayor o menor flujo, por su ángulo de salida del flujo, pueden ser mixtos o radiales (tipo panqueque). También,

los impulsores pueden ser: flotantes (con desplazamiento vertical sobre el eje), fijos al eje en bombas de compresión "C". Las etapas son hechas de un acero resistente a la corrosión "Ni - Resist".

La bomba desarrolla una carga llamada "head", que es el trabajo efectuado por un impulsor sobre el fluido, se expresa en ft/lb por libra de fluido o "feet" para fines prácticos de elevación. El difusor convierte la energía expresada en velocidad de elevación a energía expresada en elevación de presión y entrega a su vez al siguiente impulsor y así sucesivamente hasta la descarga de la bomba.

Cada bomba tiene una succión en su base y una cabeza de descarga en su parte superior.

2.3.2 MOTOR

Para las unidades BES, el motor se encuentra sumergido en el fluido del pozo. Características de un motor:

Trifásico, bipolar, embobinado tipo inducción, con alimentación de corriente alterna.

Partes principales: Estator, que contiene el

embobinado. Rotor, que es hecho de laminaciones de cobre y está fijo al eje. El estator y el rotor se encuentran dentro del alojamiento. Hay diferentes tamaños de motores desde 10 Hp a 750 Hp, cuyos diámetros varían de 3.75" a 7.38" :

<u>Diámetro</u>	<u>Hp por rotor</u>		<u>Exceso de temperatura</u>
3.75"	1.5	a	32°F
4.56"	5.0	a	44°F
5.40"	10.0	a	58°F
7.38"	20.0	a	72°F

De los datos anteriores se puede deducir que el número de HPs de un motor depende del número de rotores y del diámetro.

Ejemplo: Tenemos la descripción para un motor inferior: H-18-91 CT-FS, donde:

H - corresponde al diámetro 5.4"

18 - Número de rotores

91 - Año de fabricación

CT - Ubicación inferior o intermedia del motor

FS - Acero ferrítico

Observando el cuadro anterior los HPs del motor:

$$\text{HPs}_{\text{motor}} = (\text{No. de rotores}) \times (\text{HPs/rotor})$$

$$\text{HPs}_{\text{motor}} = 18 \times 10$$

$$\text{HPs}_{\text{motor}} = 180$$

Como lubricante utiliza un aceite dieléctrico de una constante mayor o igual a 25 KVA. Este aceite en las cámaras del protector, permite la expansión del aceite del motor, teniendo una de las cámaras comunicación con el anular haciendo que se igualen la presión de los fluidos del pozo con la del aceite dieléctrico. Además en este ambiente se disipa el calor generado en el motor hacia el anular del pozo.

Los motores de las unidades BES, son capaces de trabajar continuamente largos períodos de tiempo, dependiendo de las condiciones del pozo y de la temperatura. El calor generado es transportado por el fluido del pozo hacia la succión de la bomba a una velocidad mínima de 1 pie/seg, ver gráfico "Aumento de Temperatura vs. Velocidad del Fluido".

2.3.3 PROTECTOR O SELLO

Para que el motor funcione ininterrumpidamente, debe ser protegido de los fluidos del pozo, que contaminan su aceite dieléctrico, deteriorando el aislamiento lo que causa que el motor falle.

Funciones de un protector o sello :

- Une el motor a la bomba, conectando el eje del motor a la bomba.
- Provee el área necesaria para la expansión del aceite dieléctrico debido al calor generado en el arranque del motor.
- Contiene una reserva de aceite dieléctrico para el motor.
- Provee un elemento de soporte mecánico (zapata de soporte), debido al empuje descendente por el peso del eje de la bomba y por la presión de descarga. La zapata soportante está ubicada en la parte inferior de cada protector.

Las cámaras del protector son llenadas con aceite dieléctrico y se comunican con el motor

por un sistema laberíntico. Cuando el aceite del motor se calienta, se expande y desplaza el aceite a través del sistema laberíntico, que se desfoga por la cámara superior del protector hacia el anular del pozo través de un orificio ubicado en la parte superior del sello o en la base de la succión de la bomba.

2.3.4 CABLE ELECTRICO SUMERGIBLE

El cable eléctrico sumergible lleva la corriente hacia el motor para hacer funcionar la bomba, debe ser capaz de soportar altas temperaturas y el efecto erosivo-corrosivo de los fluidos del pozo y entregar la máxima corriente con mínima pérdida. Se baja conectado al motor, ensunchado a la tubería de producción y con protectores de caucho en aquellos pozos dirigidos. Durante la bajada, se verifica la continuidad eléctrica del cable y motores cada 1000 pies. Antes de sentar el colgador a la profundidad de succión deseada para la bomba, se hace pasar el cable a travez del colgador por dentro del mandril pequeño, que es sellado en su parte interior.

La parte final de la instalación consiste en unir las tres fases que vienen del pozo a las

tres fases del generador en una caja de ventilación o caja de empalme.

El cable eléctrico sumergible consta de 2 piezas:

2.3.4.1 Cable de extensión para el motor : "FCE", que consta de un conector tipo enchufe trifásico que se conecta a las tres fases del motor, unido a un tramo de cable de menor diámetro, con conductores sólidos de cobre que varían de tamaños nominales de 4 a 6, con una longitud de 50 a 90 pies, protegido con armadura anticorrosiva de un acero inoxidable tipo "Monel". El "FCE" es empalmado al cable principal.

controlador convencional de motor llamado "switchboard", que opera a una sola frecuencia de 60 hz.; por lo tanto la bomba produce a un régimen constante. El variador de frecuencia con una capacidad de 500 @ 750 KVA y su rango de operación de 30 a 90 Hz.

2.4.2 TRANSFORMADOR

Cambia el voltaje suministrado por la fuente principal a uno requerido por el sistema sumergible. Dicho voltaje es el del motor más el perdido en el cable. Referencia figura 5 (Gráfica de Pérdida de Voltaje).

Los transformadores pueden ser instalados dependiendo de la fuente de corriente y del equipo de control eléctrico de superficie para el motor, luego los transformadores pueden ser de elevación o disminución de voltaje, ver diagrama - "Variaciones de Suministro Eléctrico para unidad BES".

Adicionalmente, se utiliza un equipo eléctrico móvil de superficie, que consta un generador liviano de 400 KW, un variador de velocidad de 500 KVA, un transformador trifásico, todo este conjunto se encuentra montado en un trailer que

se traslada a aquellas locaciones donde se tiene que hacer reparaciones de equipo eléctrico de superficie, sin parar el pozo o eventualmente para operar nuevas unidades BES, con equipo eléctrico de superficie en reparación ver dibujo de "Trailer de Potencia para una Unidad BES".

2.5 DISEÑO CONVENCIONAL DE UNA UNIDAD BES

Una unidad BES se diseña para recuperar económicamente el fluido de un pozo, maximizando la vida de la bomba.

Para unidades que funcionan a 50 ciclos/seg. ó 60 ciclos/seg. debemos conocer:

- Productividad del pozo.
- Características de los fluidos a producirse, como: densidad, viscosidad, contenido de gas, factores de volumen de formación, acción abrasiva y corrosiva de los fluidos y sólidos en suspensión producidos y formación de carbonatos u otras sales.
- Diámetros, pesos, profundidades de los forros y lana de producción.
- Profundidad al punto medio de las perforaciones.
- Bombas disponibles y sus rangos óptimos de producción.

- Curvas de pérdidas de carga por fricción en la tubería de producción.
- Diámetro y potencia de los motores.

2.5.1 Factores que afectan el diseño de una unidad BES.

2.5.1.1 Geometría del Pozo.

Los forros de producción determinan el tamaño del motor y la bomba. A mayor tamaño en el motor se disminuye el costo por HP, como se observa en la tabla adjunta, además para motores más grandes se espera periodos de vida más largos.

El tamaño y peso de la Tubería de producción, depende de la capacidad de la bomba y del diámetro interno de los forros; pero principalmente depende de cuanto el pozo puede producir.

**Comparación de HP y Longitud para
Motores Electrosumergibles**

Forros OD	Bomba OD	Motor long.	Motor Tot.lg	Motor HPs	HPs/pie	Costo Relat
9 5/8"	5.4	27	27	180	6.67	0.7
	5.4	27	54	360	6.67	
7"	4.56	31	31	120	3.87	1.44
	4.56	31	62	240	3.78	

Costo relativo en forros de revestimiento de 9 5/8" con motores de 180 HP es 0.7 y mientras que para los de 7" con motores de 120 HP es 1.44.

2.5.1.2 Capacidad de flujo.

Capacidad de flujo es el primer eslabón de la cadena en nuestro sistema de producción y desafortunadamente es un eslabón muy débil. Esta característica nos permite seleccionar una bomba en un pozo con producción óptima.

A.- Cuando la presión del reservorio P_r , es menor o igual que la presión en el punto de burbuja P_b , el pozo produce un flujo de 2 fases, el índice de productividad PI , es variable y para evaluarlo, se utiliza la ecuación de Vogel, donde el Q_{max} es :

$$Q_{max} = Q / (1 - 0.2 \times (p_{wf}/p_b) - 0.8 \times (p_{wf}/p_b)^2)$$

donde: $p_r = p_b$ (ver fig. PI-1)

B.- Cuando la presión del reservorio P_r , es mayor que la presión en el punto de burbuja P_b , el índice de productividad PI , es constante para todas las presiones fluyentes de fondo P_{wf} , mayores que la presión en el punto de burbuja P_b , el flujo que se produce es de una sola fase.
 $P_r > P_b$ y $P_{wf} > P_b$, ver figura (PI-2).

$$PI = Q / (P_r - P_{wf})$$

C.- Cuando la presión fluyente de fondo P_{wf} , es menor que la presión en el punto de burbuja P_b , la producción es un flujo bifásico y el índice de productividad PI , declina de acuerdo a la ecuación de Vogel.

$P_{wf} < P_b$, ver figura (PI-2).

$$Q = 1 - 0.2x (P_{wf}/P_r) - 0.8x (P_{wf}/P_r)^2$$

Q_{max}

* La ecuación de Vogel, fué simulada para flujo de 2 fases, despues de evaluar 21 reservorios diferentes de empuje por gas disuelto, se encontró que las curvas de capacidad de flujo, mostraban similar forma, siempre que la presión fluyente de fondo P_{wf} , esté por debajo del punto de burbuja.

** La presión fluyente de fondo P_{wf} , es la presión equivalente a la contra presión ejercida por la columna fluyente de fluido, la cual se produce a la superficie.

*** Para las zonas productivas del presente trabajo, el índice de productividad PI, se asumirá lineal, es decir, PI constante, caso B.

Consideraciones respecto al Índice de Productividad

Se ha observado que existe algunas discrepancias con relación al PI, el índice de productividad obtenido de una prueba de formación de DST, no es 100% confiable y en muchos casos sus resultados no son precisos. El PI medido de los registradores de presión y temperatura (gauges) de un pozo fluyente o Bombeo Neumático Continuo, es el más exacto; finalmente el PI, obtenido de los datos de un pozo con una unidad BES, es calculado y muchas veces variable.

Consideraciones de "Capacidad de flujo", en unidades BES

Cuando se conoce la capacidad de flujo de un pozo, se diseña una bomba en su máximo flujo, para operar cerca de la máxima eficiencia.

Cada bomba se diseñará para no caer en la condición de bombeo de vacío, "pump-off".

La mayoría de las bombas sumergibles centrífugas, operan apropiadamente para valores mayores o iguales a 220 psi en la succión, lo que para el caso de una mezcla líquida representa aproximadamente una columna de 500' encima de la succión de la bomba.

2.5.1.3 Efectos de Viscosidad

La viscosidad afecta el rendimiento de la bomba centrífuga, disminuyendo su capacidad de carga, es necesario aumentar los HP requeridos por la bomba, reduce la eficiencia y causa que la bomba alcance su máximo rendimiento a bajo flujo, ver figura 1 "Sample Performance Chart".

Las bombas con impulsores de pasaje de flujo reducido serán las más afectadas por la viscosidad, si el agua está presente en la mezcla se forma una emulsión, su viscosidad es muchas veces mayor que la viscosidad del petróleo y la del agua por si solos.

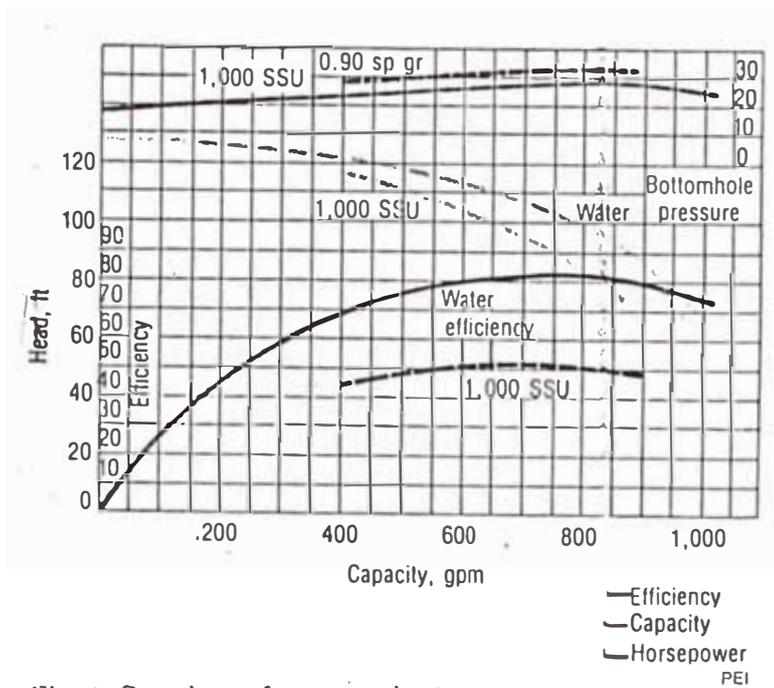


Fig. 1. Sample performance chart.

En algunos campos la gravedad del crudo pesado es de 10 @ 12 API y su viscosidad a temperatura de fondo es de 70 cps, requiriendo un adicional de 25% de sus HP disponible; en estos casos para aliviar el rendimiento de la bomba y la facilidad de bombeo por las tuberías se inyecta crudo liviano por el anular y en muchos casos se ha mejorado el rendimiento de la bomba, aumentando su volumen de producción.

Otra alternativa para contrarrestar la disminución de la capacidad de carga de la bomba, sería aumentar el número de etapas.

2.5.1.4 Efectos del Enfriamiento del Motor

La temperatura de fondo (BHT), es un factor importante en la selección de unidades de bombeo electrocentrífugo, incide básicamente en motores y en cable de energía.

La mayoría de campos de la selva, muestran temperaturas alrededor de 280 °F , mientras que los motores BES generan temperaturas de operación hasta de 360 °F, siendo el fluido de reservorio que actúa como refrigerante, produciéndose un intercambio de calor por el anular obteniéndose temperaturas resultantes en el ambiente del pozo de \pm 340 °F, que supera la máxima temperatura de aislamiento recomendada

para los motores por el fabricante alrededor de 315 °F a 60 hertz. En los últimos dos años se han desarrollado materiales de alta resistencia a la temperatura que se están utilizando en la fabricación de nuevos motores.

Se ha determinado que por cada incremento en 18 °F sobre la temperatura de aislamiento, se acorta la mitad de la vida del motor. Por consiguiente el régimen de enfriamiento del motor es un factor importante en la vida de la unidad BES, se recomienda una velocidad mínima de enfriamiento del motor en un pie/seg. Gráfico de "Velocidad vs temperatura del motor".

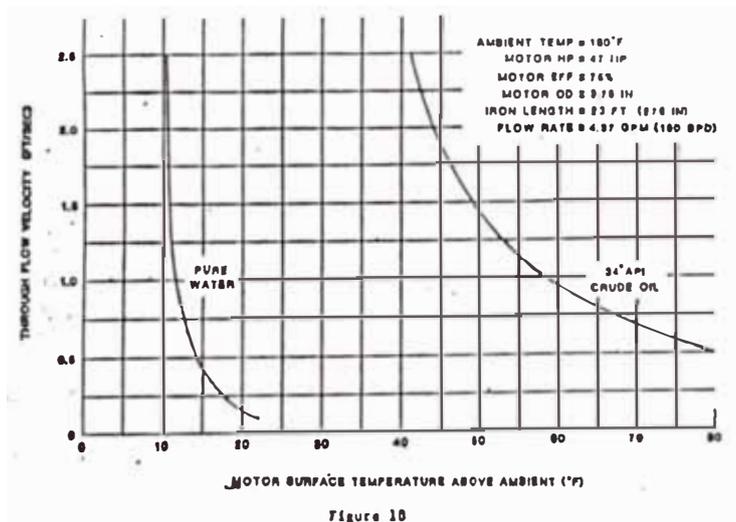


Figure 10
 MOTOR TEMPERATURE VS. VELOCITY

A continuación se muestra algunas velocidades anulares del fluido del pozo en diferentes tamaños de bombas y para forros de 9 5/8" y 7.00" de diámetro externo:

Para forros de 9 5/8"

Bomba (tipo)	Flujo STBPD	Forros (ID)	Motor (OD)	Velocidad (pies/seg)
Clase 2000	2977	8.835	5.40	0.74
Clase 4000	5463	8.835	5.40	1.24
Clase 5600	7328	8.835	5.40	1.90
Clase 7000	7283	8.835	5.40	1.90
Clase 127	4350	8.835	5.40	1.03
Clase 320	11488	8.835	5.40	2.79
Clase 10000	15526	8.835	5.40	3.70

Para forros de 7.00 Pulg.

Clase 2000	3000	6.184	5.40	3.9
------------	------	-------	------	-----

Se ha determinado que la transferencia de calor en flujo turbulento es muy eficiente, los fluidos producidos absorben y transportan mayor calor evitando sobrecalentamiento en los motores ya que su mecanismo es por transferencias de masas; a diferencia del flujo laminar, con transferencia de

calor por conducción; el aceite dieléctrico lubricante y de baja compresibilidad, es el medio que transmite el calor generado por la rotación del eje en el motor que se transmite en forma radial al alojamiento del motor, luego es asimilado por el fluido del pozo e impulsado a la superficie por la tubería de producción; repitiéndose éste ciclo.

- De otro lado hay una diferencia en el aumento de temperatura para el agua y para el crudo, como se puede observar en el gráfico "Velocidad Vs temperatura del motor".
- Se ha observado que los pozos que tienen altos cortes de agua con grandes caudales de producción y con temperaturas moderadas, el promedio de vida de las unidades es más alta, especialmente cuando la frecuencia de trabajo para el motor es de 60 Hz.. Esto confirma que a mayor enfriamiento, hay más protección para las partes internas del motor.
- Los motores y cables se tuvieron que diseñar para altas temperaturas. Asimismo los sellos de los protectores están hechos de un material que resiste altas temperaturas y contra el efecto corrosivo del dióxido de carbono CO_2 , como son los sellos de HSN (high saturation nitrilo) y en los

ensambles entre motores, protectores y bombas se utilizan sellos fabricados de materiales especiales.

Los componentes de una unidad BES, motores, protectores, bombas y cable de extensión son fabricados de acero inoxidable, asimismo, el cable principal más los accesorios de ensuchado son de un material resistente al efecto combinado de erosión - corrosión debido al dióxido de carbono.

* El aceite para el llenado de motores y sellos y protectores, es un aceite mineral, altamente refinado, extremadamente purificado y su resistencia dieléctrica debe exceder a 25 KVAC.

2.5.1.5 La relación de gas disuelto en petróleo, GOR varía entre 30 y 60 SCF/STB para los campos del presente estudio

* Cada aplicación es una situación individual, debido a la variación de las condiciones de cada pozo y de las características de los fluidos producidos.

2.5.2 CARGA DINAMICA TOTAL TDH

Hay dos tipos de pozos : los que producen gas y los que no producen gas; el cálculo es relativamente corto y simple para los pozos que no producen gas, considerando la gravedad específica constante para toda la mezcla.

La carga producida por la bomba TDH, es igual a:
Diferencia en elevación entre el punto final de flujo producido y la profundidad de la bomba + pérdida por fricción en la tubería de producción + pérdida en la descarga por válvulas - carga de la columna anular del fluido arriba de la succión.

2.5.3. PASOS PARA EL DISEÑO DE UNA UNIDAD BES

1.- Hallar : carga dinámica total TDH, para un determinado flujo de producción.

2.- Se escoge una bomba que se ubique dentro del rango de operación, en su punto de eficiencia. Dicha ventana de operación se obtuvo utilizando agua fresca en la prueba de simulación.

3.- Con el flujo en BPD y las curvas de rendimiento, hallar la carga por etapa (pies/etapa) y la potencia por etapa (HPs/etapa).

4.- El número de etapas se obtiene dividiendo la carga dinámica total entre la carga por etapa.

5.- La potencia requerida por el motor es el producto del número de etapas por la potencia de cada etapa.

6.- Se corrige la potencia requerida del paso No. 5 con la gravedad específica del fluido producido.

2.5.4 DATOS PARA DISEÑO DE UNA UNIDAD BES

I.-Datos del reservorios

Indice de productividad	PI	STBD/PSI
Presión estática de fondo	Ps	PSI
Factor de volúmen de formación FVF	Bo	BPD/STBD
FVF del petróleo en el nivel de Succión	Bo1	BPD/STBD
FVF del petróleo en medio de las perf.	Bo2	BPD/STBD
FVF del agua de form. en medio de perf.	Bw2	BPD/STBD
FVF del agua de formación	Bw	BPD/STBD
Temperatura del reservorio	Tr	°F
Gradiente del gas	Gr.g	PSI/PIES
FVF: Factor de volumen de formación		

II.- Datos de producción

Presión de forros o presión anular	PC	PSI
API del Crudo @ 60 °F	API	API°
Presión de cabeza de tubería de produc.	Pt	PSI
Nivel de fluido	Fl	PIES

III.-Datos de laboratorio de Química

Gravedad espec. del agua de formación	SGw	--
Corte de Agua de Formación	Wc	%
Viscosidad del crudo y mezcla a BHT	Uo	SSU

IV.-Datos de completación de pozo

Punto medio de las perforaciones	MP	PIES
Profundidad de la succión	INT	PIES
Diámetro de la tubería de producción	OD, ID	PULG
Diámetro de Laina y forros intermedios	OD, ID	PULG
Edad del pozo	--	AÑOS
Pozo vertical o direccional	--	--
Profundidad de obturadores	--	PIES

V.- Suministro Eléctrico y limitaciones de motores
y bombas

Potencia disponible de generadores	Pot.G	KW
Capacidad de variadores de velocidad	--	KVA
Frecuencias críticas para las bombas	--	Hz

VI.- Historia de las instalaciones BES

Fecha de instalación

Dias de operación de la bomba

Causa de la falla

Tipo de cable utilizado

Profundidad de la succión

Tipo de bomba instalada

Resultados del desmantelamiento

2.5.5 DISEÑO BES - ECUACIONES

1.- Barriles reservorio Bbl/día.

$$QrBPD = STBD [(1-Wc)Bo + Wc \times Bw]$$

2.- Gradiente de fluido en formación :

$$\text{Grad.f} = \text{Grad.aceite} + \text{Grad.agua}$$

$$\text{Gradf} = 0.433 (1-Wc)/Bo^2 \times 141.5/(131.5+API^\circ) + \\ SGw \times Wc \times 0.433/Bw^2$$

3.- Carga dinámica total: TDH.

$$\text{TDH} = \text{Nivel de fluido} + \text{Fricción} + \text{Descarga}$$
$$\text{TDH} = \text{FL} + \text{Ft} + \text{PD}$$

FT : Pérdida por fricción en el tbq. obtenido del gráfico.

FL : Expresados en profundidad vertical en ft.

PD : Presión de descarga en la tubería de producción expresado en pies.

$$\text{Descarga} = \text{Pt}/\text{Gradf}.$$

4.-Presión Fluyente de Fondo : Pwf.

$$\text{Pwf} = [\text{Perf}(\text{vd}) - \text{SUC}(\text{vd})] \times \text{Gradf} + [\text{Suc}(\text{vd}) - \\ \text{FL}(\text{vd})] \times \text{Grad}(\text{aceite}) + \text{Pc} + \text{Pg}$$

$$\text{Grad}(\text{oil}) = 141.5/(131.5 + \text{API}) \times 0.433/Bo^1$$

Presión de gas (fórmula empírica) :

$$\text{Pg} = \text{FL}(\text{vd}) \times (14 + \text{Pc}) / 30,000 \text{ aprox. igual a cero}$$

5.- Índice de productividad PI.

$$PI = STBD / (Ps - Pwf)$$

STBD : barriles a condiciones de superficie

CALCULOS

1.- Hallar la gradiente de fluido, Grad (o+w) y Grad. aceite.

2.- Calcular la presión fluyente de fondo Pwf; pero requerimos el nivel de fluido FL

$$a.- FL = FL \text{ estático} = Perf(vd) - \text{Columna estática}$$

$$\text{Columna estática} = Ps/Grad(o+w)$$

b.- FL - asumiendo la profundidad de la succión con el PI (cuando el pozo es nuevo):

Para :

PI de 1 @ a 4 Succión @ 5,000 Ft.

PI más de 4 Succión de 4,000 @ 5,000 Ft.

Tambien el fluido encima de la bomba (FLAP), considerar 2,000'

- 3.- Estimar QSTBD conociendo el PI
 - 4.- Convertimos QSTBD @ QBPD res.
 - 5.- Hallar la carga dinámica total TDH.
 - 6.- Con QBPD res y TDH graficamos en la curva de performance de la bomba.
 - 7.- Repetimos los cálculos para otro valor de FL y con el mismo PI hallamos otros valores QBPD res. y TDH.
 - 8.- Con los valores del paso 7 graficamos en la curva de performance teniendo en cuenta que estos puntos deben estar en la zona óptima de operación de la bomba, y decidimos a que profundidad debemos sentar la bomba, ésta debe ser ligeramente diferente a la última profundidad de succión, para evitar erosión por velocidad en los forros de producción.
 - 9.- Para unidades que operan con VSDs, debemos calcular la "Máxima Frecuencia de Operación", que es función de las características y eficiencia del motor, tipo y características de la bomba, tamaño nominal y longitud del cable, capacidad y máxima frecuencia de trabajo para el VSD.
- Finalmente hallamos el número de etapas y la potencia requerida.

PRESION FLUYENTE DE FONDO

$$= P_c + P_g + [141.5 / (131.5 + API)] \times (0.433 / B_{01}) \times (SUCC_{vd} - FL_{vd}) + \{ [141.5 / (131.5 + API)] \times (1 - W_c) \times (0.433 / B_{02}) + SG_w \times W_c \times (0.433 / B_{w2}) \} \times (MP_{vd} - SUCC_{vd})$$

$$P_{wf} = P_c + P_g + P_o + P_{(o+w)}$$

Para $P_g < 500$ psi

$$P_g = [14 + P_c] / 30000$$

$$P_{aceite} = \text{Grad.aceite} \times \text{Flap}$$

$$P_{aceite} = \text{Grad.aceite} \times (SUCC_{vd} - FL_{vd})$$

$$P_{(o+w)} = \text{Grad}_{(o+w)} \times (MP_{vd} - SUCC_{vd})$$

$$\text{GRAD}_{aceite} = 0.433 / B_{01} \times (141.5 / [131.5 + API])$$

$$\text{GRAD}_{(o+w)} = 0.433 / B_{02} \times (141.5 / [131.5 + API]) \times (1 - W_c) + SG_w \times W_c \times 0.433 / B_{w2}$$

$$B_{01} = FV_{faceite} \text{ (FL @ Succión)}$$

$$B_{02} = FV_{faceite} \text{ (MP @ Succión)}$$

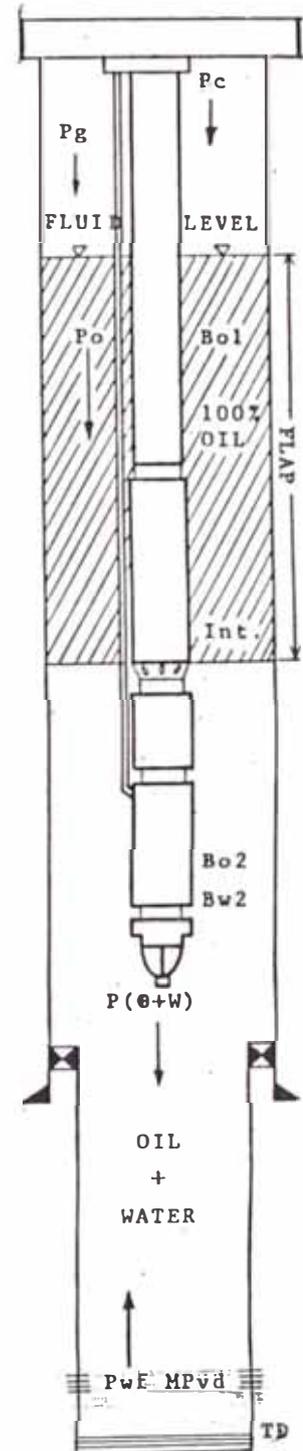
$$B_{w2} = FV_{fagua} \text{ (MP @ Succión)}$$

$$\text{GRAD}_{aceite} = \text{Gradiente aceite (FL @ Succión)}$$

$$\text{Grad}_{(o+w)} = \text{Gradiente del fluido debajo de la succión}$$

W_c = Corte de agua

I = Gravedad específica (°)



- Cuando se instale separador de gas, considerar un adicional de 2.5 Hp.
- Adicionalmente corregir los HPs requeridos por efecto de la viscosidad del fluido

3.0 EVALUACION DE UNA BOMBA CON POCOS DIAS DE FUNCIONAMIENTO

3.1 HISTORIA DE LA BOMBA

Después de 9 días de operación, la bomba fué reportada con eje trabado, aparentemente la carta registradora de consumo de amperios, indicaba bomba atascada. En su corto periodo de vida, trabajó en su rango óptimo (ver Curva de Performance pozo "Perla # 7").

3.1.1 Instalación

Pozo	Perla No 7
Fecha de Instalación	Febrero 06,90
Fecha de Falla	Febrero 15,90
Bombas	Clase 7000
Protectores	Clase 66
Motores	180 HP

3.1.2 Inspección de la Unidad en Locación

Efectuado en Febrero 22 con los sgtes.
resultados:

- Cable Principal con buen aislamiento y conductividad
- Cable de extensión en buena condición
- Bombas: Eje con rotación suave, succión y cabeza de descarga limpias
- Protectores: Buena condición
- Motores: Electricamente buenos y aceite dieléctrico limpio

En la inspección de la unidad no se encontró ninguna falla

3.1.3 Inspección de las bombas en los talleres del fabricante

- Juego axial y distancias de brida a eje, ambos dentro de los rangos recomendados. Eje con rotación suave despues de la vaporización con solvente.

Una vez montada la unidad en el banco de prueba, se circula agua fresca por unos minutos para remover el crudo remanente dentro de las etapas.

Se efectúa el llamado "Bench Test", o Prueba de Banco, para determinar sus curvas de rendimiento y decidir si se repara o reinstala en un determinado pozo. Si las características de la curva de

performance obtenida de la Prueba de Banco, están dentro de los límites recomendados, esta bomba puede ser reinstalada. Por tanto la Prueba de Banco, en muchos casos nos ahorrará, el costo de una bomba nueva, considerando que el costo de una prueba de Banco es mínimo.

Prueba de Banco:

Fluido	agua
Gravedad específica	1.00
RPM de prueba	3500
Tipo de bomba	Clase 7000

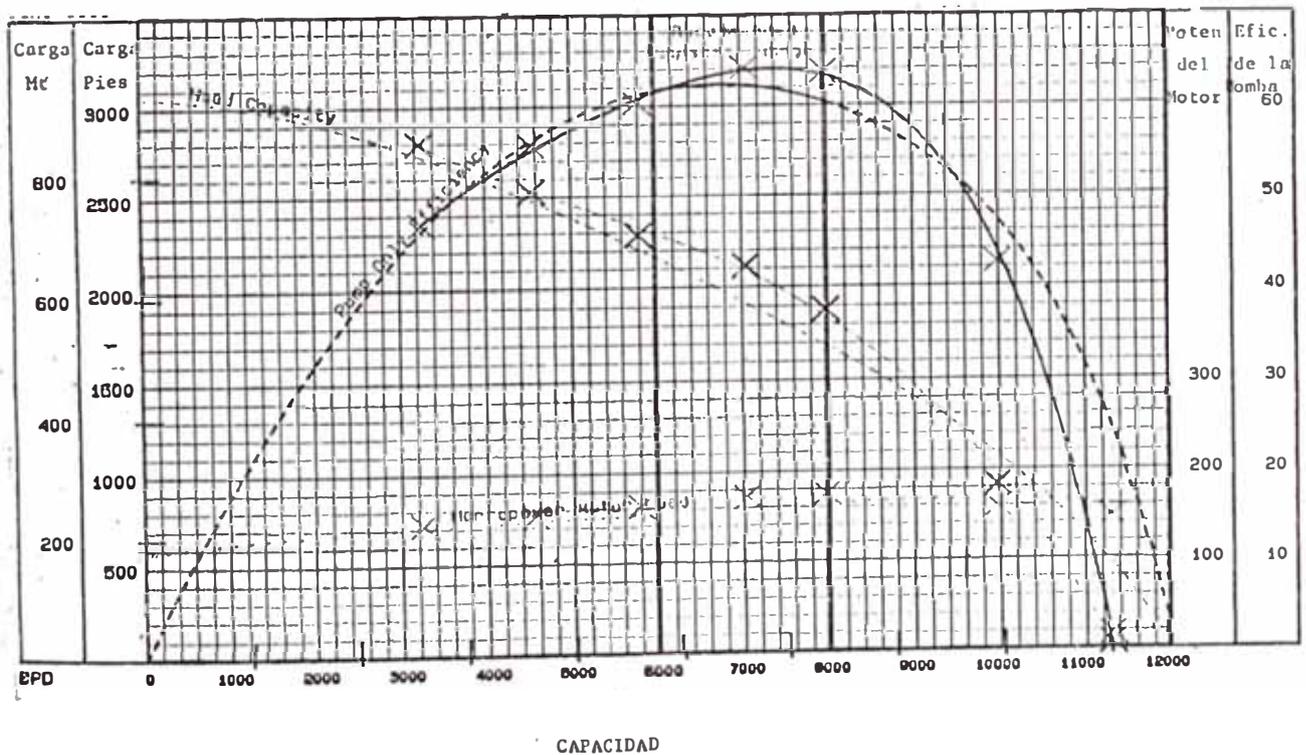
Valores obtenidos del simulador, datos de entrada para la computadora.

Prueba Nº	Flujo B P D	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	torque Pie/lb
1	3265.9	43.1	1256.0	215.00
2	4558.0	42.1	1136.0	228.00
3	5814.1	41.5	1030.0	243.00
4	7070.3	39.8	954.0	257.00
5	8883.4	38.7	852.0	261.00
6	10013.0	35.2	430.0	237.00
7	11341.0	32.1	44.0	220.00

Valores obtenidos de la prueba, evaluados por la computadora

Prueba	Flujo	Carga	Pot Motor	Pot Bmb	Efici.
Nº	B P D	Pies	HPs	HPs	
1	3265.9	2801.8	143.3	67.3	47.0
2	4558.0	2226.9	151.9	84.7	55.7
3	5814.1	2283.4	161.9	97.6	60.3
4	7070.3	2111.8	171.3	109.8	64.1
5	8883.4	1878.7	173.9	110.6	63.6
6	10013.0	912.0	157.9	67.1	42.5
7	11341.0	27.5	146.6	2.3	1.6

CURVA DE PERFORMANCE
 BOMBA " CLASE : 7000"
 SERIE: 540 - RPM :03500



Observaciones :

- Los flujos en BPD, son escogidos teniendo en cuenta el rango de producción de la bomba en prueba, ver curva de performance. (Los puntos de Prueba de Banco son notados con una aspa "x").
- La presión de succión es simulada, utilizando una pequeña bomba que toma el agua fresca de un tanque que bombea hacia la succión, para luego ser reciclado hacia otro tanque.

La presión de descarga, es lo que la bomba da o entrega a las condiciones del banco de prueba.

- El Torque en Lbs-Pie, también es obtenido a las condiciones de prueba.

Para los valores obtenidos en la simulación :

La carga en Pies producida por la bomba, en la curva, es "Head Capacity".

Carga (Presión de descarga - Presión de
 succión)x 2.31 ft.

BHP : Potencia que el motor le provee a la bomba.

$$\text{Potencia del Motor BHP} = \frac{\text{Torque (Ft - lbf) x RPM}}{1.90 \times 10^{-4}}$$

- Potencia Hidráulica de la Bomba "Hyd Hp" - Hps obtenidos al producir el fluido o HPs que el fluido de prueba (agua), recibe de la bomba.

$$\text{Pot.Hidr.Bomba} = \text{Flujo x Carga x } 1/C$$

Donde C - Constante de conversión

$$C = 135771.43 \text{ bblxpies/Hpxdia}$$

- Efici. - $100 \times \frac{\text{Potencia Hidra.Bomba}}{\text{Potencia del motor}}$

Con los valores obtenidos graficamos sobre una curva de performance del fabricante, la cual debe estar en las mismas condiciones de la prueba de banco.

Si las curvas obtenidas de la prueba de banco, estan dentro de la tolerancia de cada fabricante, la bomba será reinstalada.

Para aquellas bombas que han tenido una corta vida de trabajo y la decisión es hacerle una prueba de banco, a fin de determinar las condiciones reales en que se encuentra la bomba.

Antes de montarlo en el banco de prueba, vaporizamos con algún solvente para remover elementos extraños que puedan haber sido atrapados dentro de los impulsores que afectarían la prueba de banco. Antes de efectuar la prueba recirculamos para remover el petróleo remanente dentro de las etapas; de modo que, la prueba sea con agua fresca.

4.0 NUEVOS CONCEPTOS EN EL DISEÑO DE UNIDADES BES.

4.1 LEYES DE AFINIDAD APLICADAS A DISEÑOS DE BOMBAS ELECTROCENTRIFUGAS SUMERGIBLES.

El uso de los Variadores de Velocidad adiciona un nuevo factor en el diseño de Bombas Electrocentrífugas, debemos saber rendimientos de la bomba para rangos continuos de velocidad.

El rendimiento a cualquier frecuencia puede ser inferido de las curvas a 60 ciclos por segundo, con ayuda de las Leyes de Afinidad. Dado que los motores reciben corriente bipolar y tienen velocidades sincronizadas de frecuencia igual a la energía que los alimenta, así la velocidad del motor es casi proporcional a su frecuencia para rangos prácticos.

Las leyes de afinidad dicen que para todo punto de una curva de rendimiento, el Flujo varía linealmente con

la Velocidad, la Carga varía con el cuadrado de la Velocidad, y la Potencia varia con el cubo de la Velocidad, según las ecuaciones siguientes :

Flujo (frecuencia/60 Hz) x Flujo @ 60 Hz.

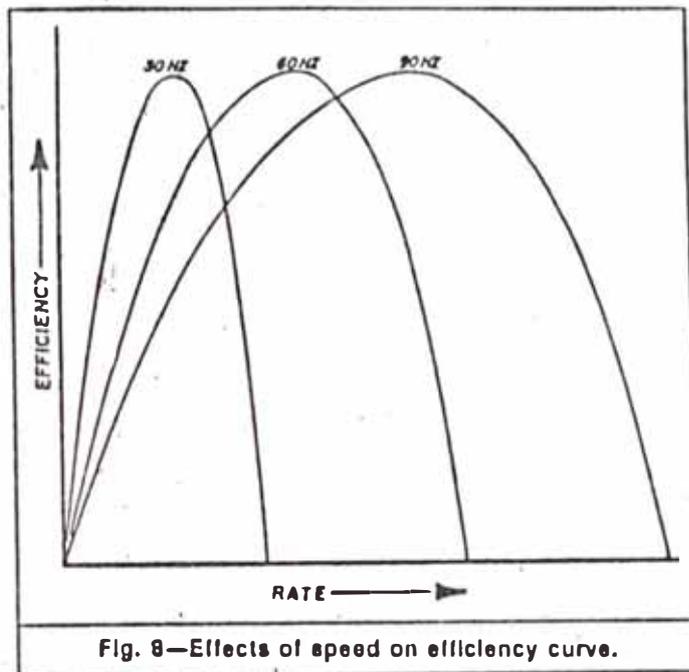
Carga - (frecuencia/60 Hz)² x Carga a 60 Hz.

Poten. - (frecuencia/60Hz)³ x Potencia @ 60 Hz.

Se puede concluir que la proyección de cualquier punto en la curva: Carga versus Flujo a Velocidad variable es una Parábola. La figura 6 muestra una proyección de la curva a 60 ciclos/segundo, a otras frecuencias usando las ecuaciones de afinidad.

La figura 8 ilustra la eficiencia para diferentes frecuencias en cualquier punto de sus curvas de rendimiento es aproximadamente constante.

Se conocen que las leyes de afinidad pierden precisión a medida que el tamaño de las bombas disminuye. Dado que las unidades BES, son en su mayoría pequeñas, se debe tener datos de pruebas a varias velocidades, especialmente para bombas pequeñas, que nos permitan mejorar sus diseños en casos de frecuencias variables.



4.2 VARIADORES DE FRECUENCIA VSDs.

La primera aplicación de Variadores de Frecuencia Variable "VSD" , en bombeo electrosumergible, data desde 1977 y desde entonces se ha ido mejorando y expandiendo su uso.

Ventajas de los variadores de velocidad

- Producción de grandes volúmenes.- permite producir el reservorio a condiciones óptimas, para lo cual necesitamos una buena infraestructura de producción en superficie.

- Minimiza el gasto de energía entregada por la línea de alto voltaje o del generador, permitiendo arranques suaves "soft starts", de modo que siempre

el arranque lo realiza a 10 Hz y va incrementandolo hasta el valor programado, reduciendo la potencia consumida en cada arranque, minimizando la fatiga inicial, tambien asegura un amperaje igual en cada una de las tres fases.

- Con los parámetros obtenidos de un VSD como la carta amperimétrica del pozo. Las curvas de rendimiento de las bombas, los datos de producción, las pruebas y niveles de fluido; podemos hallar los puntos reales donde está trabajando la bomba, para poder evaluar y controlar su funcionamiento.
- Posiblemente debido a la efectividad del VSD, el número de paradas y arranques no afectan a la bomba.
- Cada fabricante de las diferentes bombas, ha encontrado ciertas frecuencias críticas, las cuales afectan su rendimiento, un VSD nos permite operar la unidad en frecuencias distintas de las críticas.
- Permite la selección precisa de una bomba con relación a la productividad del pozo, permitiendo su óptima producción.
- Un VSD registra las presiones y temperaturas enviadas desde la base del motor por medio de un

accesorio conectado en su base, lo cual permite evaluar el comportamiento del reservorio y del motor.

- Los VSD son recomendables para aquellos pozos, en los cuales los ensambles son con motores de alto HPs, para evitar la fatiga en el arranque, debido a que sus frecuencias de arranque son bajas y se van aumentando gradualmente hasta alcanzar la frecuencia requerida.

4.3 EFFECTOS DE LAS FUERZAS AXIALES DE EMPUJE SOBRE LA BOMBA.

El desgaste asociado con el empuje axial, es determinante en la vida de una bomba, que quedará reducida a pocos días de operación, si se opera en condiciones adversas de empuje. El empuje está compuesto por tres fuerzas axiales:

- 1.- El peso del impulsor en el fluido.
- 2.- El impacto hidráulico sobre el impulsor del fluido entrante, el cual es función del cuadrado del flujo.
- 3.- La componente vertical hidrostática del fluido sobre el impulsor, siempre actúa hacia abajo.

Estas tres componentes de empuje son consideradas en las curvas típicas de rendimiento.

El fabricante proporciona un rango óptimo de operación y además nos dicen que es preferible operarlo cerca del límite superior, con un ligero desgaste en esa zona, puesto que las bombas de impulsores flotantes y las de impulsores fijos, tienen elementos de soporte que absorben mas al Empuje Descendente que al Empuje Ascendente.

Durante la operación de una bomba, a una determinada frecuencia, se producen desgastes internos, ya sea en los impulsores o difusores. Cuando éstos desgastes son severos, acortan la vida de la bomba. Se ha observado tambien desgastes en los elementos que centralizan el eje de la bomba al alojamiento, tanto en la descarga como en la succión. Esta bocinas al desgastarse permiten un juego radial del eje, afectando el rendimiento de la bomba.

La operación de la bomba, protectores y motores a frecuencia variable, nos permite optimizar la producción; pero por otro lado sacrifica la vida de la bomba, básicamente cuando existe desgaste por Empuje Axial Descendente.

4.4 RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN DE IMPULSORES POR EMPUJE DESCENDENTE

Después de desmantelar e inspeccionar algunas bombas de diferentes caudales, se encontró :

- Las bombas de bajo a moderado caudal, de 2000 a 5000 BPD, diseñadas y operadas en el límite de empuje superior, tuvieron buenas corridas, encontrándose los impulsores con pequeños desgastes por empuje axial descendente.
- Para las bombas de mayor caudal, de 5000 a 8000 BPD, se diseñaron y corrieron en la zona de desgastes por Empujes Ascendentes, a máximo caudal de bomba, obteniéndose corridas aceptables, donde los impulsores mostraron pequeños desgastes por Empuje Descendente.

Estos resultados obtenidos en los diseños y operación, nos indican que no se deben operar dichas bombas de 5000 a 8000 barriles/día, en la zona recomendada por el fabricante, ésto es lo que se llama "Diseño de un Sistema de Bombeo Artificial Electrosumergible mejorado en pozos de petróleo en la Selva Peruana".

4.5 VARIADORES DE VELOCIDAD VSDS VERSUS EMPUJE AXIAL DESCENDENTE.

Considerando que en la mayoría de los pozos con unidades electrosumergibles, funcionan con Variadores de Velocidad VSDs, debemos evaluar sus efectos en las unidades BES, a fin de extender la vida de las bombas.

El variador de velocidad VSD, es un instrumento muy útil para el sistema de bombeo electrocentrífugo, provee una gran flexibilidad que permite usar mejor la capacidad de una bomba, en base a la productividad del pozo. Sin embargo se debe considerar la variación de velocidad en cada una de las curvas características de una bomba, como son:

Carga, flujo, eficiencia y potencia del motor.

El rango de operación debe involucrar muchos factores; para algunas bombas sólo está basado en los desgastes de los materiales de soporte y empuje de la bomba.

Se debe considerar un flujo óptimo para evitar un sobrecalentamiento del motor.

La operación de una bomba, a extrema capacidad de flujo, induce a vibraciones cerca de la cabeza de

descarga, que reduzcan considerablemente la vida de la bomba.

El uso de variadores de velocidad, hace más difícil, determinar el rango adecuado de operación, ya que la bomba trabaja sobre un rango de velocidades y el empuje Axial Descendente se incrementa con la velocidad, causando desgastes en las arandelas de empuje, debido a ésto el empuje axial es un factor muy importante para fijar el rango óptimo de operación de cada bomba.

4.6 VSDS CON FRECUENCIAS CRÍTICAS DE LAS BOMBAS ELECTROCENTRÍFUGAS.

Cada fabricante de bombas manifiesta la existencia de frecuencias críticas, que de operarlas en éstas, causaría resonancia en el ensamble y por lo tanto puede inducir a fallas prematuras de las unidades BES.

Mediante pruebas de laboratorio y cálculos computarizados se ha obtenido los efectos de la resonancia en las instalaciones BES.

Ejemplo: para una determinada bomba, se tiene dos frecuencias críticas de operación igual a : 52.5 Hz y

62.9 Hz, escogemos valores diferentes a los valores críticos, alejados por lo menos en 0.5 Hz.

4.7 CURVAS NORMALIZADAS

Para poder generalizar, las curvas características del rendimiento de la bomba, usaremos las curvas normalizadas, para ser representativas de las bombas existentes en el mercado.

El flujo, capacidad de carga, empuje axial, la potencia y la eficiencia, son reducidos a números adimensionales, dividiendo los valores reales por los valores correspondientes a su máxima eficiencia. Los valores así obtenidos son usados para ilustrar características de las curvas de rendimiento a frecuencias variables y asimismo para profundizar el concepto de Empuje Descendente.

4.8 FUENTES INTERNAS DE EMPUJE AXIAL

A.- Desigual presión en ambos lados del impulsor, esto debido principalmente a la diferencia de la velocidad radial cerca del aro reforzado del impulsor.

B.- El cambio de momento resultante, debido al cambio de dirección del flujo del fluido, de axial a radial, la resultante es hacia arriba.

C.- En el tipo de impulsor de flujo mixto, la reacción del fluido sobre los pasajes de flujo del impulsor, con un ángulo diferente a 90° al plano de rotación. El efecto de cada componente a diferentes ángulos, hace que el cálculo sea muy complejo y no práctico; la forma más segura es mediante la prueba.

4.8.1 DETERMINACION DEL EMPUJE AXIAL DESCENDENTE

- Obtenemos curvas normalizadas, figura I Curva de rendimiento y figura II Comparación de empujes iguales y líneas de las Leyes de Afinidad.
- Mediante una prueba, se obtiene una curva de Empuje Axial Descendente versus Flujo Normalizado, fig 2.

Considerar una constante "K" que se define como la relación: Empuje Axial Descendente/Carga y es específica para cada tipo de bomba.

$$K = \text{Empuje Axial Descendente} / \text{Carga}$$

Esto implicaría que para una determinada bomba, el empuje axial puede ser hallado : multiplicando la carga producida (head), por la constante "k"; sin

embargo las pruebas han demostrado, que la constante varía a través del rango de flujo (figuras 3,4 y 5), esto hace más difícil evaluar el valor del empuje axial.

Lo cual indica, que para hallar el valor del empuje, no basta multiplicar el valor de "K" por la Carga producida.

4.8.2 Empuje Axial Descendente vs. Velocidad y Carga

Con las velocidades variables de la bomba, se han obtenido curvas de performance, donde el rango óptimo de operación depende del rango de velocidades. (Ver figura 6)

El efecto de la velocidad sobre el rendimiento de la bomba, está descrita por las Leyes de Afinidad de la bomba, que dicen : **El flujo de la bomba es proporcional a la velocidad, mientras que la carga producida es proporcional al cuadrado de la velocidad**, en las curvas de frecuencia variable se observa que el pico de la eficiencia también se desplaza en relación directa a las velocidades (Fig.8).

Observando la fig. 1 y la fig. 6 :

Se puede ver los puntos de operación máximo y mínimo de la fig. 1, se vuelven líneas en la fig. 6, éstas líneas se pueden obtener usando las Leyes de Afinidad, el rango óptimo así obtenido, limita simplemente **puntos de referencia** y en la mayoría de los casos son guías razonables para la selección de bombas.

El Empuje Axial Descendente producido en un punto de operación dado, variará con la carga producida, por lo tanto variará con el cuadro de la velocidad, esto quiere decir que el empuje producido a 5000 RPM es cuatro veces el empuje a 2500 RPM, a si mismo, el flujo se duplicará, como lo demuestra las Relaciones de Afinidad, donde relaciona un RPM dado con un RPM de prueba (valor conocido).

$$\text{a. FLUJO ajust por vel.} - (\text{RPM dado/RPM prueba}) \times \text{FLUJO prueba}$$

$$\text{b. CARGA ajust por vel.} - (\text{RPM dado/RPM prueba})^2 \times \text{CARGA prueba}$$

$$\text{c. POT ajust por vel.} - (\text{RPM dado/RPM prueba})^3 \times \text{POT prueba}$$

La figura 7 muestra la variación del empuje axial a frecuencias de 40, 60 y 80 hertz.

4.8.3 Capacidad de soporte de las arandelas debido al empuje axial.

La capacidad de soporte por el Empuje Axial Descendente, está expresado en términos de máximo valor de PV, que se define como el producto de la Presión en PSI, sobre la arandela de soporte de empuje por la Velocidad promedio, se expresa en $PSI * FT/MIN.$

El PV para cualquier material de soporte depende basicamente de factores como : lubricación, superficie acabada y combinación de materiales, que se consideran al momento de hallar la capacidad máxima de la arandela.

La fig. 8a, muestra un simulador para determinar el máximo límite aceptable de operación para las arandelas de empuje usadas en los impulsores de las bombas.

Las arandelas son colocadas en soportes y con cargas en forma similar a como se encuentran en un ensamble BES. Una etapa de la bomba se encarga de

circular fluido, éste simulador utiliza un variador de velocidad.

El peso puede ser controlado en forma independiente, se efectúan muchas pruebas para diferentes cargas y velocidades. Las arandelas son probadas para determinadas cargas y velocidades para ciertos periodos de tiempo, la cantidad de desgaste es medida y registrada. Se repitió la prueba con otras arandelas.

La fig 9, es un gráfico de desgaste de arandelas vs. PV, de las arandelas probadas, se puede observar que el desgaste de las arandelas, permanece a valores muy bajos hasta un valor crítico de PV, en el cual el valor de desgaste se incrementa drásticamente.

4.8.4 Rangos de operación considerando el empuje axial.

Conociendo el empuje axial producido por una bomba y las limitaciones de la arandela de empuje, podemos determinar límites más reales de operación de la bomba.

La figura 10 es una curva de performance para frecuencias variables similar a la fig. 6. En este gráfico se ha adicionado una zona segura de operación referido al empuje axial, la línea gruesa representa un límite significativo basado en pruebas actualizadas de la capacidad de soporte de las arandelas por empuje axial. Estos límites tienen un seguro de margen de seguridad para las condiciones adversas como: abrasión, corrosión, formación de carbonatos, alto GOR, etc.

Conclusiones relevantes sobre Empuje Axial

Descendente

El empuje axial de la bomba es una característica importante para fijar el rango seguro de operación.

El uso del variador de frecuencia, hace que ésta característica sea más importante, la relación es que mientras el empuje producido se incrementa con la velocidad, la capacidad de soporte de las arandelas disminuye debido al empuje axial" finalmente concluimos que los rangos de operación deben ser modificados e incluir los efectos de la velocidad en el empuje axial.

4.8.5 Evaluación del empuje axial - gráficos.

4.8.5.1 Consideraciones previas

Se obtuvo datos para las bombas "clase 5600", donde la fuerza de empuje axial, llega a su máximo en o cerca al rango de flujo correspondiente al punto de máxima eficiencia.

Los diseños que se realizaron en nuestras operaciones, hacían trabajar a las bombas en puntos de su curva de performance, pegados al límite derecho, sacrificando así la eficiencia y con la intención de disminuir el efecto de la fuerza del empuje axial; aceptando que todas las bombas tenían una relación de empuje axial como función de un flujo normalizado y que era la misma para todos los diseños de impulsores; sin embargo pruebas recientes indican que para cada impulsor hay un empuje axial con sus características de flujo.

El rango del PV (presión con velocidad), debe ser considerado para todas las unidades BES; pero principalmente para unidades que trabajan con variadores de frecuencia VSD.

La bomba "clase 7000", muestra una curva de empuje axial más plana y sin pico en el flujo de su máxima eficiencia.

La bomba "clase 2000", es la unidad más pequeña dentro del grupo que usamos, tiene un PV característico, lo cual parece impedir cualquier operación hacia la izquierda, evitando desgaste por empuje axial.

Las unidades BES, en éste nuevo concepto deben ser seleccionadas bajo 2 criterios : EMPUJE AXIAL y PV, y evitar los sobredimensionamientos de las bombas por querer hacer operarlas hacia el límite derecho en sus curvas de rendimiento.

Considerando las bombas corridas en nuestros campos se efectuó pruebas para medir los efectos de los agujeros de balance (Balance Holes), a diferentes frecuencias, en la fuerza de empuje axial.

Para ésta presentación, enfatizaremos más sobre impulsores flotantes, ya que existe mayores observaciones en bombas de tipo flotantes.

El cálculo de la fuerza de empuje axial, se calcula con la relación de las Leyes de Afinidad : "La

fuerza de empuje axial es directamente proporcional al cuadrado de la razón de frecuencias".

$$DT_{fi} = DT_{60 \text{ Hz}} \left(\frac{f_i \text{ (hz)}}{60 \text{ Hz}} \right)^2$$

4.8.5.2 Resultados Obtenidos

Los valores de las curvas se refieren a empujes descendentes en impulsores flotantes, exceptuando los casos de las bombas de "clase 10000" y "clase 21000", que pueden ser de compresión o de balance hidráulico.

A. Bomba : "Clase 5600" - Estandar

Curva	Frecuencia (Hz)	Empuje axial (lbs)	
		de la curva	calculado
1a	60	16	16
1b	80	32	28.4
1c	40	7.4	7.1

Ejemplo: $D T (80 \text{ Hz}) = 16 \times (80/60)^2$
 $D T (80 \text{ Hz}) = 28.4 \text{ Lbs.}$

*** Se puede observar que el impulsor de esta bomba alcanza un pico en su empuje axial en su rango normal de operación.

Bomba "Clase 5600" - Estandar - 2 tamanos de agujeros de balance hidráulico .

- Las curvas 2a y 2b, ilustran el efecto de los agujeros de balance, en la magnitud del empuje axial y el flujo para el máximo empuje axial (agujeros de balance: 7 por impulsor, que pueden ser de 5/32" y 7/32").

Máximo Empuje Descendente

Curva No.	Agujeros de balance	flujo (BFPD)	Curva(lbs)
2a	pequeño	5,000	15
2b	grande	6,000	21

- Para agujeros grandes de balance hidráulico, el máximo empuje axial se dá en el rango óptimo de operación; mientras que para agujeros pequeños, el máximo empuje axial se da al lado izquierdo del rango óptimo de operación.

B. Empuje axial descendente para varios tipos de bombas

Clasificaremos por su capacidad, en dos grupos :

- B.1 Bombas de bajo caudal - que estan ilustradas en las curvas: 4a, 4b y 4c.

Empuje descendente

<u>Curva</u> <u>(Nº)</u>	<u>Tipo de</u> <u>Bomba</u>	<u>Frec.</u> <u>(hz)</u>	<u>Flujo</u> <u>BFPD</u>	<u>Curva</u> <u>(lbs)</u>	<u>Calcul.</u> <u>(lbs)</u>
4a	Clase 1000	60	2000	15.0	-----
4b	Clase 3000	60	3000	-1.5	
4c	Clase 4000	--	----	----	-----

- Bomba Clase 2000 - Curva 4a, la pendiente de la curva de empuje descendente, se incrementa rapidamente hacia la izquierda, por lo tanto sus flujos de producción deben estar alejados de este rango.
- Bomba Clase 3000 - Curva 4b, se obtienen valores negativos para flujos a la derecha de 2700 BFPD.
- Bomba Clase 4000 - Curva 4c, se observan valores negativos para flujos a la derecha de 1000 BFPD.

B.2 Bombas de alto caudal - Curvas ilustrativas son:
4d, 4e, 4f, 4g y 4h.

Curva (Nº)	Tipo de Bomba	Frec. (hz)	Flujo BFPD	<u>Empuje descendente</u>	
				Curva (lbs)	Calcul. (lbs)
4d	Clase 7000	60	7000	2.5	-----
4e	Clase 7000	40	4700	1.5	-----
4f	Clase 7000	80	9300	0.0	4.4
4g	Clase 10000	60	10000	58.0	-----
4h	Clase 21000	60	18000	180.0	-----

- Bomba Clase 7000 - Curva 4d, se obtienen valores negativos a la derecha de 8000 BFPD, y una curva de empuje axial descendente con pendiente suave. Las curvas 4e y 4f se refieren a 40 y 80 hz.

- Bomba Clase 10000 - Curva 4g, corresponde a impulsores de compresión, los valores del empuje axial disminuyen rapidamente para flujos mayores a 10000 BFPD.

- Clase 21000 - Curva 4h, corresponde a impulsores de balance hidráulico, con agujeros de balance estandar.

4.8.5.3 Principales conclusiones de Empuje Descendente

Observando la forma de las curvas de empuje descendente, notamos:

Bomba Clase 5600 - Estandar - Curva 1a, tiene un pico aproximadamente en el punto correspondiente a su máxima eficiencia, por lo tanto es una severa limitación, para hacer producir la bomba en su punto óptimo de operación .

Bomba Clase 2000 Curva 4a, muestra altos valores de empuje descendente, a la izquierda del rango de operación, por consiguiente, se debe evitar que produzca flujos menores a 2000 BFPD.

Bomba Clase 10000 - Curva 4h, la fuerza de empuje descendente correspondiente a 10000 BFPD, es menor que su valor máximo; pero baja a cero a 17000 BFPD.

Bomba Clase 21000 - Curva 4h, muestra una curva de empuje descendente, similar a la curva de la bomba "clase 5600", en la ventana de operación. Para el diseño de la bomba "clase 21000", se tomó como modelo la bomba "clase 5600", es por eso que los valores de empuje descendente se mantienen altos.

4.8.5.4 Efectos de la ubicación y tamaño de los Agujeros de Balance

Un impulsor necesita Agujeros de Balance, para evitar altos empujes axiales descendentes. Para el caso de la bomba "clase 5600", los impulsores con pequeños agujeros de balance, muestran menor empuje descendente que los impulsores con agujeros de balance de mayor tamaño, como muestran las figs. 2a y 2b.

4.8.5.5 Uso de Frecuencia Variable y distribución de Empuje Descendente para determinar el límite PV.

Para que las curvas de frecuencia variable sean mas representativas, y permitan tomar decisiones con buenos resultados, debemos incluir la curva del límite PV (presión x velocidad), observamos:

- Para las bombas clase 5600, la ventana de operacion está limitada por la curva de presión x velocidad de modo que la bomba clase 5600, tiene que producir alrededor de 6000 BFPD, a una frecuencia de 60 Hertz, para no entrar en el límite de la curva PV, ver **Curva B2**.
- El otro caso crítico, es la bomba clase 2000, que muestra una severa limitación para producir

al margen izquierdo de su curva de performance, por los altos empujes descendentes, y por la limitación de factor PV (presión x velocidad). Considerando estas dos limitaciones se debe escoger una bomba de menor caudal, para reemplazar a la bomba "Clase 2000" (Ver curva B5)

- Las bombas clase 3000 y Clase 4000 no son afectadas ni por la fuerza de empuje descendente, ni por el factor presión x velocidad, PV.

5.0 RESUMEN DE DAÑOS, CAUSAS Y RECOMENDACIONES EN EL FUNCIONAMIENTO DE UNIDADES BES

5.1 POZOS DIRECCIONALES CON ANGULOS SEVEROS DE INCLINACION

Las Bombas Electrocentrífugas Sumergibles estan diseñadas para operar en posición vertical; pero pueden operar en pozos desviados y las bombas por sí solas pueden funcionar en posición horizontal.

Son los motores y protectores, los afectados en pozos direccionales debido a que se pegan a un lado dentro de los forros intermedios, causando que el enfriamiento no sea uniforme haciendo

fallar al motor por recalentamiento. Adicionalmente, el efecto erosivo-corrosivo en los forros y ensamble es más intenso.

Centralizadores de caucho para tubería de producción y protectores metálicos entre bomba-bomba y protector-motor son instalados a fin de evitar daños durante la bajada o sacada de la unidad, asimismo, estos cauchos evitaran daños en el cable principal

5.2 TAPONAMIENTOS EN CABEZA DE DESCARGA

Pueden ser debido a:

- Formación de escamas de dióxido de fierro en las paredes internas de la tubería de producción, por haber estado mucho tiempo expuesto a la humedad del medio ambiente, dichas escamas se depositan en la cabeza de descarga, causando que la bomba superior falle por eje trabado.
- Todas las tuberías de producción, son inspeccionadas cuidadosamente y en muchos casos es necesario hacer revestimientos plásticos en las paredes internas.

- Cuando hay producción de arena, puede depositarse en la cabeza de descarga de la bomba, al momento que se cierra el pozo para algún trabajo de mantenimiento de superficie, teniendo los mismos efectos de las hojuelas de óxido de fierro.

5.3 MATERIALES EXTRAÑOS POR LA SUCCION DE LA BOMBA

- La formación de carbonatos y hojuelas de dióxido de fierro proveniente de los forros, que pueden estar suspendidos en el fluido del pozo, que al momento de producir el pozo ingresan a la bomba y pueden quedar dentro de las etapas, causando muchas veces eje trabado con frecuentes ejes rotos cerca de la succión.
- También se ha observado, que los protectores de caucho por efecto de la temperatura se cristalizan y en algunos casos se rompen al momento de sacar la tubería para un reemplazo de la unidad, quedando pedazos en el pozo. En la sgte. instalación estos cauchos ingresan a la bomba haciendo que falle por eje trabado.
- Otro caso no muy frecuente, es el retorno de materiales de pérdida de circulación usado cuando se perforó el pozo que quedan

entrampados en la malla de la succión, es por eso que en cada instalación se debe remover la malla.

- Se lleva una historia para la limpieza de los pozos y en el caso que se conozca la presencia de materiales extraños, es obligatorio bajar un rascador de forros y circular el pozo con una pastilla viscosa.

5.4 EFFECTO COMBINADO EROSION - CORROSION

La presencia de gas de dióxido de carbono en los fluidos producidos, nos anticipa la corrosión que puede causar en el ensamble BES, así como en los accesorios instalados en la unidad; después de haber tenido hasta problemas de pesca debido a este daño, se optó por seleccionar materiales como aceros inoxidable, para motores, protectores, bombas y armadura del cable de extensión. Se está evaluando el uso de acero inoxidable en la armadura del cable principal.

Por otro lado, la mayoría de pozos tienen inyección de inhibidores de corrosión y formación de carbonatos a través del espacio anular.

5.5 CRISTALIZACION DE SELLOS DEL ENSAMBLE BES

La falla de un sello en un motor o protector, causa que la unidad BES deje de funcionar; por consiguiente, el material de los sellos debe ser tal que soporte el efecto combinado de altas temperaturas y el efecto del CO₂

5.6 DANOS ENCONTRADOS EN EL DESMANTELAMIENTO DE UNIDADES BES

- Cuando el conjunto de todas las etapas se traban al eje y giran dentro del alojamiento de modo que aumenta el consumo de amperaje del motor y las etapas causan desgaste por fricción en la pared interna del alojamiento, a ésto se le conoce como "Spinning Effect"

- Ejes y alojamientos torcidos - Los ejes tienen una tolerancia en su curvatura y desgaste. Cuando hay exceso de curvatura, causa que la bomba consuma más HPs, forzando a entregar más potencia a los motores. La torcedura de un eje puede ser producto de un pozo desviado con ángulos severos de inclinación o por una mala maniobra en el manejo de la unidad.

- Ejes fuera de tolerancia - Se han presentado casos críticos, donde el eje tenía excesivo

juego axial y este saltaba del acoplamiento, por tanto la bomba no producía.

- Cristalización y desgaste prematuro de sellos internos del protector - El efecto de la temperatura puede reseca los elementos de aislamiento (sellos y retenes), que permiten la contaminación del aceite del motor, causando que haga tierra y falle la unidad.

- Desgaste severo y destrucción de la Zapata de soporte. Esta zapata evita que el peso del eje de la bomba se transmita hacia el motor, haciendo un "punto muerto". Cuando la zapata falla para aquellas bombas de alto caudal, los impulsores caen en la zona de Empuje Descendente, desgastandose rapidamente, disminuyendo la eficiencia de la bomba por producir a la izquierda de la zona óptima.

6.0 Evaluación Económica de una unidad BES

Evaluar la rentabilidad del Bombeo Electrocentrífugo sumergible en pozos por petróleo de la Selva Peruana, es una taréa muy compleja, por la diversidad de factores que intervienen; sin embargo, de acuerdo a los resultados de unidades corridas, se puede hacer una "Evaluación Económica Representativa Promedio para una unidad BES".

6.1 Condiciones para mejorar la instalación y funcionamiento de una unidad BES.

- Limpieza del pozo con dos corridas de broca y rascador de forros, una con broca de 8½" y rascador de 9 5/8" hasta el tope de la lana, la otra con broca de 6" y rascador de 7", con circulación de una pastilla viscosa para levantar cualquier suciedad en el pozo.
- Reemplazo de la tubería de producción, es preferible que sea nueva, ya que en tuberías usadas hay formación de hojuelas por oxidación interna de la tubería de producción que se desprenden y causan atascamiento del eje de la bomba superior.
- Utilización de equipos y accesorios fabricados de aceros resistentes a la acción erosiva-corrosiva de los fluidos producidos, complementado con la inyección de inhibidores de corrosión. Todo el equipo BES y accesorios deben ser nuevos.
- Utilización de ejes de aceros altamente resistente a la torsión, a fin de evitar roturas prematuras de ejes, especialmente en las paradas y arranques.
- Inyección de inhibidores de formación de carbonatos, que se adhieren en las paredes externas de los motores, afectando el intercambio de calor a través

del fluido en el anular, haciendo que falle el motor por sobrecalentamiento.

- Uso de centralizadores en el ensamble BES y protectores de cable para pozos dirigidos con ángulos severos de inclinación.
- Manipuleo correcto de la Unidad BES, tanto en el transporte como en la instalación en el pozo
- Utilizar algún método para evitar la producción de arena, además de emplear materiales resistentes a la abrasión en la fabricación de bombas.

- Inyección de crudo liviano por el anular para bajar la viscosidad del crudo pesado y evitar un consumo mayor de potencia.

- Utilización de variadores de velocidad a fin de evitar fatiga mecánica y eléctrica de los motores y cable en la unidad BES.

- Evitar paradas innecesarias, a mayor número de paradas y arranques, mayor será la fatiga a la unidad.

- No operar la bomba en frecuencias críticas, que originan vibraciones y resonancias y por consiguiente fallas prematuras.
- Operar la bomba en rangos, que por experiencia se sabe, no hay daño por empuje descendente.

- Hacer pruebas periodicas de produccion para saber su comportamiento en su curva de rendimiento.

Resultados del diseño mejorado en unidades BES

- I. Operación de las bombas de flujos entre los rangos de 5000 a 8000 BPD en el límite de empuje ascendente (límite derecho del rango óptimo recomendado, se observó que los impulsores tenían desgastes mínimos en las arandelas por empuje descendente).

- II. Cambio en el ángulo de pasaje de flujo, para los impulsores de flujo mixto en las bombas clase 5600, de modo que el rango óptimo no coincida con el valor máximo de empuje descendente, siendo la nueva notación para la bomba: "Clase 5600 modificada".

- III. Implementación de dos tamaños de agujeros de balance en los impulsores, con esto se eliminó la componente vertical hidrostática del fluido sobre el impulsor, aliviando la resultante total de la fuerza de empuje axial descendente.

- IV. Uso de acero inoxidable resistente a la erosión-corrosión debido principalmente a la presencia de CO₂ en los fluidos producidos, en los componentes principales de la unidad; asimismo ejes de acero de alta resistencia a la torsión en las bombas y protectores, acero conocido como "Inconel".

V. Utilización de nuevos materiales en los elementos sellantes y de aislamiento, resistentes a altas temperaturas y al efecto de CO₂, evitando cristalizaciones y fallas de los motores por el ingreso de fluidos de formación hacia dentro de los motores.

6.2 Costos representativos de equipos y accesorios BES.

<u>Cantidad</u>	<u>Description</u>	<u>Unitario</u>	<u>Total</u>
2	Bombas clase 7000, 64 etapas	14,000	28,000
2	Protec. clase 66, serie 500	5,000	10,000
2	Motores de 180 HP serie 500	27,000	54,000
5000'	Cable trifasico, # 1, Galvan. 4.8/pie		21,500

Accesorios

1	Cable de extesion para el motor	1,600	1,600
4	Latas de aceite dielectrico de 5 gl.	75	300
1	Centralizar entre motor y protector	400	1,400
1	Centralizador entre bombas	780	780
1	Guia para el motor	360	360
100	Protectores de caucho en cable prin	60	6,000
400	Superbandas para fijar cable a tubos	1.8	720
400	Evillas, una por superbanda	0.8	320

Empalme y Minimandrel

	Materiales para empalme cable extension		140
	Minimandrel y materiales de aislamiento		300

Miselanios

Acoplamientos, adaptadores, sellos,
equipos de ensunchado, otros (apoyo
técnico) 2,800

6.3 Costos de Operación para el reemplazo de unidad BES
Durante 4 días que se requiere para el cambio de una
unidad BES, incluye:

- Transportar equipo y accesorios a la locación.
- Materiales gastados para matar el pozo.
- Limpieza del pozo con broca y rascador, en forros de 9 5/8" y lana de 7" respectivamente, circulando con una pastilla viscosa.
- Reemplazar la tubería de producción con tubería nueva o inspeccionada.
- Nipple de asiento, tubo de espaciamiento y conectores para la bomba.
- Alquiler diario de equipo y cuadrilla.

Costo total por día

\$ 50,000.00

Tiempo requerido por unidad BES

4 días

Costo total de operación

\$ 200,000.00

Costo de operación + Costo de equipo BES y accesorios:

\$ 200,000.00 + 128,220.00 = \$ 328,220.00

6.4 Ingreso por la entrega del crudo producido por la unidad BES

En el año 1986 de acuerdo al nuevo contrato se modificaron las condiciones sobre el precio por barril, teniendo 2 precios que dependían, si provenía de pozos nuevos o pozos antiguos, fluctuando el promedio del precio recibido entre 46 a 48% del precio fijado de acuerdo a parámetros económicos mensuales.

Producción promedia

500 BOPD

Precio promedio respectivo

14 \$/barril de crudo

Ingreso total por día

\$ 7,000.00

Costo de Producción + Transporte

8 \$/barril de crudo

Total gastos por día

\$ 4,000.00

Ingreso neto por día

\$ 3,000.00

6.5 Costos por producción diferida en 4 días

\$ 28,000.00

6.6 Tiempo para recuperar la inversión en la unidad BES

(T_R): Tiempo de recuperación

$$T_R = (\text{Costo de Equipo BES} + \text{Costo de operación} + \text{Costo por producción diferida}) / \text{Ingreso neto por día}$$

$$T_R = (128,220 + 200,00 + 28,000) / 3,000$$

$$T_R = 119 \text{ días}$$

T_R = Tiempo aproximado para que una unidad BES recupere la inversión, en un pozo que produce un promedio de 500 BOPD

6.7 Conclusiones de la Evaluación Económica

Cada unidad BES que falla antes de los 100 días de operación, es considerada de vida corta y se sigue procedimientos especiales para evaluar su falla.

- El promedio general de vida para nuestras unidades en la Selva Peruana es alrededor de 10 meses, variando en cada campo.
- En algunos casos se exige del fabricante un período de garantía para sus equipos de 6 meses.

7.0 APENDICE

ANALISIS DE CARTAS AMPERIMETRICAS

A.- Operación Normal - Curva obtenida con motores trifásicos, bipolares, con velocidad de inducción constante obtenida bajo las sgtes. condiciones: HPs de operación con una aproximación de 10 % de los HPs nominales, con un TDH y una rata de operación que no varie más del 5 % de lo diseñados. En las condiciones mencionadas, la curva Amperimétrica es suave y simétrica y con valores cerca del valor nominal del amperaje.

B.- Fluctuaciones de Potencia - Cuando el voltaje de la fuente de suministro fluctua, el amperaje tambien fluctua, tratando de mantener constante los HPs de salida. Estas fluctuaciones son registradas en la carta amperimétrica, si los picos no son severos, no afectará a la unidad. Los mismos picos se registraran por interferencia de una tormenta.

C.- Traba por Gas - Muestra que el consumo, por amperaje disminuye con las fluctuaciones severas y sucesivas, luego, la unidad se apaga en condicion de "Carga Baja", debido a la disminución del TDH por producción de gas. Para

GORs moderados la succión de la bomba es reemplazada por un separador de gas para aliviar dicho problema.

* Producir algo de gas puede ser beneficioso para el motor, reducirá los HPs necesarios para levantar la columna de fluidos por la tubería de producción y la bomba requerirá grandes volúmenes.

D.- Bombeo en Vacío - Similar al caso de interferencia de gas, la carta amperimétrica no muestra fluctuaciones sucesivas, la unidad se para por "Carga Baja".

E.- Condición de gasificación - Sucede cuando la unidad está operando cerca del rango de diseño pero produce fluidos gasificados.

8.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- The Technology of Artificial Lift Methods - Kermit e. Brown (Vol. 2b).
- Centrifugal Pump Basics - TRW Reda Pump Division.
- Electric Submersible Pump Installations - American Petroleum Institute API.
- Electric Submersible Pump - Centrilift Hughes Inc.
- Effects of Speed Variation on the Performance and Longevity of Electric Submersible Pumps Maston Powers (SPE, Conoco Inc.).
- Effects of Speed Variation on the Operating Range of Submersible Pumps - Lee Kobylinsky (TRW Reda Pump Division)
- Development of Revised Operating Philosophy for ESP Applications in Block 1AB - Steve Newton, Occidental Petroleum Inc.
- Motor Cooling Effects - C. L. Golike, Occidental Petroleum Inc.
- Electric Submersible Pump Teardown Inspection - J.F. Lea, Amoco Production Company and B. Powers, TRW Reda Pump Division.
- Careful Handling Extends ESP Life, Gene Rilings, Consultant Bartlesville Ok.
- Recommended Practice for Electric Submersible Pump Testing - Centrilift Hughes Inc.