



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO SUMERGIDO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A

CESAR ALCOCCER ALEGRIA

DIRECTOR DE TESIS:

ING. JESUS HECTOR DIAZ ZERTUCHE



MEXICO, D. F.

SEPTIEMBRE DEL 2000

281852



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-007

SR. CESAR ALCOCER ALEGRIA
Presente

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

BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO SUMERGIDO

- I INTRODUCCION**
- I DESCRIPCION DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO SUMERGIDO**
- II DISEÑO DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO SUMERGIDO (ABE)**
- III EJEMPLOS DE APLICACIÓN**
- IV DETECCION Y DIAGNOSTICO DE FALLAS EN EL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO SUMERGIDO**
- APENDICES**
- NOMENCLATURA**
- BIBLIOGRAFIA**

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

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

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, a 15 de enero de 1999

EL DIRECTOR



ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN DEL PETRÓLEO

TÍTULO DE LA TESIS:

BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO

TESIS PRESENTADA POR:

CÉSAR ALCOCER ALEGRÍA

DIRECTOR DE TESIS:

ING. JESÚS HÉCTOR DÍAZ ZERTUCHE

JURADO DE EXAMEN PROFESIONAL

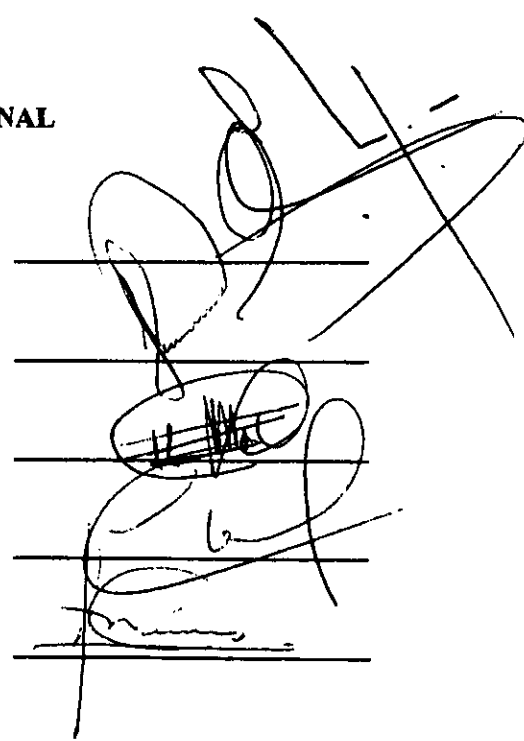
PRESIDENTE: M. I. JOSÉ ANGEL GÓMEZ CABRERA

VOCAL: ING. JESÚS HÉCTOR DÍAZ ZERTUCHE

SECRETARIO: M. I. MAXIMINO MEZA MEZA

1er. SUPLENTE: M. I. TEÓDULO GUTIÉRREZ ACOSTA

2do. SUPLENTE: M. I. NÉSTOR MARTÍNEZ ROMERO

The image shows five horizontal lines corresponding to the names in the 'JURADO DE EXAMEN PROFESIONAL' section. The lines for 'PRESIDENTE' and 'VOCAL' have large, loopy handwritten signatures written over them. The line for 'SECRETARIO' has a smaller, more compact signature. The lines for the two 'SUPLENTE' positions have some scribbles and light handwriting, but no clear signatures are visible.

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES

Con la mayor gratitud por los esfuerzos realizados para que yo lograra terminar mi carrera Profesional siendo para mí la mejor herencia.

A mi Madre, que es el ser más maravilloso del mundo, gracias por el apoyo moral, su cariño y comprensión que desde pequeño me ha brindado, por guiar mi camino y estar siempre junto a mí en los momentos más difíciles.

A mi Padre, por que desde pequeño ha sido para mí un hombre grande y maravilloso que siempre he admirado, gracias por guiar mi vida con energía, esto es lo que ha hecho de mí lo que soy.

A MI ESPOSA

Quien supo de esto más que nadie, por que siempre me animó para continuar, por que me hizo ver la vida de otra forma y aprender de mis errores, por todo su apoyo y su fé en mí y por el enorme cariño que me tiene.

A MIS HERMANOS

Por su apoyo incondicional para que lograrse llevar a cabo una más de mis metas.

A DIOS

Por permitirme llegar a este momento tan importante en mi vida, el cual marca el final de una etapa y el principio de otra, con más proyectos y ganas de ser mejor en la vida.

AGRADECIMIENTOS

A MI ALMA MATER

Con eterna gratitud a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Quien como madre noble y amorosa me albergó en su regazo para nutrirme de sus enseñanzas, sembrando en mí la semilla del conocimiento en la tierra fértil de mi entendimiento.

A MI DIRECTOR DE TESIS

Por la atención prestada para la realización de este trabajo, por su paciencia y dedicación y sobre todo por los conocimientos que de él adquirí y que me acompañaran por siempre.

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS

Por todo el apoyo que me brindaron durante la etapa más importante de nuestras vidas.

ÍNDICE

	Pagina
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO	3
1.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.	4
1.2 COMPONENTES SUBSUPERFICIALES.	4
1.2.1 Motor eléctrico.	4
1.2.2 Protector.	6
1.2.3 Separador de gas.	12
1.2.4 Bomba centrífuga sumergible.	12
1.2.4.1 Curvas características de la bomba.	16
1.2.4.2 Leyes de afinidad.	23
1.2.4.3 Ventana de operación.	25
1.2.4.4 Fenómeno de cavitación.	25
1.2.5 Cable conductor eléctrico.	27
1.3 COMPONENTES SUPERFICIALES.	29
1.3.1 Bola colgadora.	29
1.3.2 Caja de viento.	29
1.3.3 Tablero de control.	29
1.3.4 Transformador.	31
1.4 ACCESORIOS.	31
1.4.1 Válvula de contra presión.	31
1.4.2 Válvula de drene.	31
1.4.3 Controlador de velocidad variable.	31
1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA.	33
CAPÍTULO II.- DISEÑO DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO (ABE).	35
2.1 INFORMACIÓN REQUERIDA PARA EL DISEÑO DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIBLE.	35
2.1.1 Pruebas de producción.	35
2.1.2 Tipo de fluidos producidos.	37
2.1.3 Estado mecánico del pozo.	37
2.1.4 Datos complementarios.	37

2.2 FACTORES QUE AFECTAN EL DISEÑO DEL APAREJO BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO.	38
2.2.1 Capacidad de flujo del pozo.	38
2.2.2 Geometría de flujo.	38
2.2.3 Gas libre en la bomba.	38
2.2.4 Separación de gas.	40
2.2.5 Pozos desviados.	40
2.2.6 Empacadores.	40
2.2.7 Efectos viscosos.	41
2.2.8 Temperatura.	41
2.2.9 Operación vs. condiciones de descarga.	41
2.2.10 Selección del aparejo.	42
2.3 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE INSTALACIONES DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO.	43
2.3.1 Carga dinámica total.	43
2.3.2 Número de etapas.	46
2.3.3 Potencia requerida.	46
2.4 DETALLE DEL DISEÑO DE INSTALACIONES DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO.	49
2.4.1 Ejemplo para un pozo productor de agua.	50
2.4.2 Ejemplo para un pozo productor de aceite sin gas libre.	55
2.5 DISEÑO PARA POZOS CON PRODUCCIÓN DE GAS DE MEDIA A ALTA.	61
2.5.1 Procedimiento de cálculo para pozos que producen gas.	62
2.5.2 Ejemplo de diseño de aparejos de bombeo electrocentrífugo sumergido para pozos con baja producción de gas.	67
2.6 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PROGRAMADO.	73
2.7 APROXIMACIÓN DE CAMPO.	79
2.7.1 Procedimiento de siete pasos.	79
2.7.2 Ejemplo de aplicación práctico de campo.	80
2.8 PROCEDIMIENTO GRÁFICO.	88
2.8.1 Análisis del comportamiento del sistema de bombeo electrocentrífugo mediante el procedimiento gráfico.	88
2.8.2 Ejemplo de aplicación.	94

CAPITULO III. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.	107
3.1 Ejemplo para un pozo productor de agua.	107
3.2 Ejemplo para un pozo productor de aceite y agua sin gas libre. Solución empleando el método de Vogel.	111
3.3 Ejemplo para un pozo productor de aceite y agua sin gas libre. Solución empleando el índice de productividad constante.	114
3.4 Ejemplo para un pozo productor de aceite, gas y agua. Solución empleando una curva de gradiente de flujo vertical.	118
3.5 Ejemplo para un pozo productor de aceite, gas y agua. Solución mediante el procedimiento de campo.	138
3.6 Ejemplo para un pozo productor de aceite, gas y agua. Solución mediante el programa de cómputo <i>BECS</i> .	156
CAPITULO IV. DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN EL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO	169
4.1 FACTORES PRINCIPALES DE FALLA DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO.	169
4.1.1 Temperatura.	169
4.1.2 Gas libre.	169
4.1.3 Naturaleza de los fluidos.	169
4.1.4 Nivel dinámico.	170
4.2 TABLERO DE CONTROL Y AMPERÍMETRO.	170
4.3 CARTA DEL AMPERÍMETRO.	171
4.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN.	172
4.5 DETECCIÓN DE FALLAS EN EL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO.	174
4.5.1 Operación normal.	174
4.5.2 Pequeñas fluctuaciones de corriente.	174
4.5.3 Candado de gas.	176
4.5.4 Bombeo en vacío.	176
4.5.5 Fallas por posibles condiciones de vacío en el arranque.	178
4.5.6 Frecuentes ciclajes de bombeo.	178
4.5.7 Condiciones de gasificación.	180
4.5.8 Suministro de corriente insuficiente.	180
4.5.9 Carga reducida de corriente.	180
4.5.10 Efectos de controles de nivel de tanque.	182
4.5.11 Condiciones de sobrecarga de corriente.	182
4.5.12 Producción de arena o incrustaciones.	184
4.5.13 Excesivos intentos manuales de operación.	184
4.5.14 Variaciones de corriente impredecibles.	184
4.5.15 Registro raro o misterioso.	187

COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES	189
APÉNDICE A.- PÉRDIDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN.	191
APÉNDICE B.- CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS.	195
APÉNDICE C.- SELECCIÓN DEL MOTOR.	207
APÉNDICE D.- SELECCIÓN DEL CABLE Y TABLERO DE CONTROL.	209
APÉNDICE E.- TRANSFORMADORES.	219
APÉNDICE F.- COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA AL POZO (IPR), VOGEL.	221
NOMENCLATURA	223
REFERENCIAS	225

INTRODUCCION

Las actividades de exploración petrolera culminan con el descubrimiento de rocas almacenadoras de hidrocarburos; entonces se inician los trabajos de explotación mediante la perforación de pozos de desarrollo con el bien definido objetivo de producir petróleo. Para lograrlo en una forma eficiente, es necesario realizar estudios que permitan determinar las propiedades petrofísicas de la roca almacenadora, el tipo de energía propia del yacimiento y otros factores que por su efecto tienen influencia sobre la cantidad de hidrocarburos factible de recuperar.

Los pozos productores de petróleo durante su vida productiva pueden clasificarse como fluyentes o de bombeo. Los pozos fluyentes son aquéllos en el que el aceite es expulsado del yacimiento y llega a la superficie por su propia energía natural, que puede ser por empuje hidráulico, de gas disuelto, o algún otro mecanismo.

En el pasado, cuando la energía natural del yacimiento se agotaba, los pozos dejaban de fluir y se abandonaban. La causa de este fenómeno, se debe a que la presión original de los hidrocarburos confinados declina conforme aumenta el volumen extraído, hasta que llega el momento en que dicha presión no es suficiente para sostener a la columna de fluidos, desde su entrada al pozo hasta la superficie.

A fin de conservar esa presión original, se aplican sistemas de recuperación secundaria, que consisten en adicionar energía a los fluidos en el yacimiento mediante la inyección de agua o gas, permitiendo prolongar la vida productiva de los pozos y aumentar la recuperación de hidrocarburos.

En la actualidad, cuando los pozos dejan de fluir, se aplican los sistemas artificiales de producción como bombeo mecánico, neumático, electrocentrífugo, hidráulico u otros, consistentes en adicionar energía a los fluidos en el pozo para hacerlos llegar a la superficie con lo cual también se tiene un incremento en la recuperación de los hidrocarburos contenidos en el yacimiento.

El objetivo de estos apuntes es dar a conocer al lector los conocimientos sobre la explotación de pozos, mediante el sistema artificial de producción por bombeo electrocentrífugo sumergido, a través de la descripción de los componentes subsuperficiales y superficiales del aparejo, sus funciones, el diseño del mismo y el diagnóstico de fallas, para realizar las acciones preventivas o correctivas que permitan mantenerlos en buenas condiciones de operación.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO

El bombeo electrocentrífugo sumergido, también conocido como bombeo eléctrico, desde su primera aplicación para un pozo petrolero en 1929, ha probado ser un sistema artificial de producción eficiente y económico. En la actualidad ha cobrado mayor importancia debido a la variedad de casos industriales en los que es ampliamente aceptado.

En la industria petrolera, comparativamente con otros sistemas artificiales de producción tiene ventajas y desventajas, debido a que por diversas razones no siempre puede resultar el mejor. Es decir, un pozo candidato a producir artificialmente con bombeo electrocentrífugo sumergido, debe reunir características tales que no afecten su funcionamiento, como las altas relaciones gas-aceite, las altas temperaturas, la presencia de arena en los fluidos producidos y medio ambiente de operación agresivo, que son factores con influencias indeseables sobre la eficiencia del aparejo.

Entre las características únicas del sistema está su capacidad de producir volúmenes considerables de fluido desde grandes profundidades, bajo una amplia variedad de condiciones del pozo y particularmente se distingue porque, su unidad de impulso o motor está directamente acoplada con la bomba en el fondo del pozo.

El aparejo de bombeo electrocentrífugo trabaja sobre un amplio rango de profundidades y gastos. Su aplicación es particularmente exitosa cuando las condiciones son propicias para producir altos volúmenes de líquidos con bajas relaciones gas-aceite. El sistema opera sin empacador inferior de la tubería de producción, generalmente por arriba de los disparos.

Anteriormente, para el diseño del aparejo de bombeo eléctrico se consideraba como único requisito, que la bomba debía colocarse por debajo del nivel dinámico del fluido en el pozo, de tal manera que estuviera garantizada la alimentación continua de líquidos en la succión de la bomba, previniendo posibles variaciones en las condiciones del pozo. Además, se suponía la existencia del flujo de una sola fase líquida en la tubería de producción, determinando las pérdidas de presión por la fricción con la fórmula de Hazen.

Estas suposiciones, aún hoy son válidas para pozos productores de agua o para aquéllos con altas relaciones agua-aceite y volúmenes despreciables de gas.

Más adelante, el procedimiento de diseño evolucionó con la operación de métodos para determinar caídas de presión en tuberías verticales con flujo multifásico; entonces, también se utilizaron correlaciones para el cálculo de propiedades PVT de los fluidos. Lo anterior, permitió efectuar la selección del equipo de bombeo con mejor aproximación, para pozos en los que existe una cantidad importante de gas que se produce con los líquidos. En estos casos se tomaron en cuenta con los efectos del gas que se libera en la tubería de producción conforme se reduce la presión, durante el viaje ascendente de los hidrocarburos hacia la

superficie; de manera que, determinar la variación de la densidad de la mezcla a presiones inferiores a la de burbujeo, condujo a diseños en los que las dimensiones del motor y de la bomba fueron hasta 50% menores, respecto a las obtenidas con las suposiciones mencionadas anteriormente.

En la actualidad, el diseño ha mejorado, incorporando en los cálculos la consideración de que el volumen y propiedades físicas de la mezcla, varían constantemente en el interior de la bomba; lo cual se traduce en reducciones importantes de su capacidad volumétrica, desde la presión de succión hasta la de descarga. Consecuentemente las dimensiones del motor y de la bomba son aún menores, para lograr una operación más eficiente del sistema, para obtener en la superficie el gasto de líquidos deseado, manteniendo la presión necesaria en la cabeza del pozo.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO.

Una unidad típica de bombeo electrocentrífugo sumergido está constituida en el fondo del pozo por los componentes: motor eléctrico, protector, sección de entrada, bomba electrocentrífuga y cable conductor. Las partes superficiales son: cabezal, cable superficial, tablero de control, transformador.

Se incluyen todos los accesorios necesarios para asegurar una buena operación, como son: separador de gas, flejes de cable, extensión de la mufa, válvula de drene, válvula de contrapresión, centradores, sensor de presión y temperatura de fondo, dispositivos electrónicos para control del motor, caja de unión, y controlador de velocidad variable.

La integración de los componentes es indispensable, ya que cada uno ejecuta una función esencial en el sistema para obtener las condiciones de operación deseadas que permitan impulsar a la superficie el gasto requerido.

En la fig. 1, se muestra la distribución de los componentes del aparejo en la forma tradicional como quedan colocados en el pozo.

1.2 COMPONENTES SUBSUPERFICIALES.

1.2.1 Motor eléctrico:

El motor eléctrico colocado en la parte inferior del aparejo, recibe la energía desde una fuente superficial, a través de un cable; su diseño compacto es especial, ya que permite introducirlo en la tubería de revestimiento existente en el pozo y satisfacer requerimientos de potencia grandes, también soporta una alta torsión momentánea durante el arranque hasta que alcanza la velocidad de operación, que es aproximadamente constante para una misma frecuencia, por ejemplo: 3500 revoluciones por minuto (rpm) a 60 ciclos por segundo (Hz).

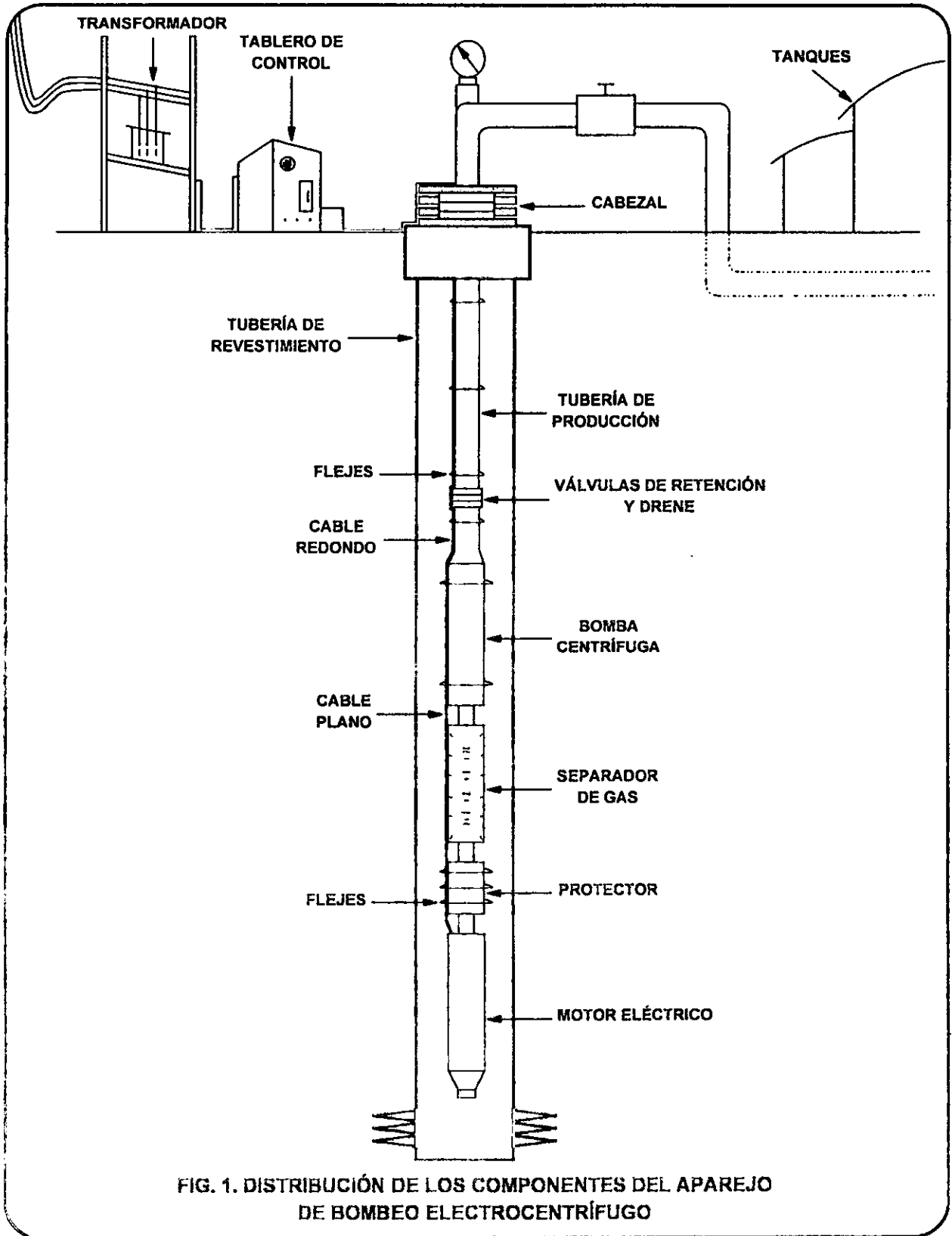


FIG. 1. DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO

Normalmente, consiste de una carcaza de acero al bajo carbón con láminas de acero y bronce fijas en su interior, alineadas con las secciones del rotor y del cojinete, respectivamente. En la fig. 2, se muestra el corte transversal de un motor, como los utilizados en aplicaciones de bombeo electrocentrífugo. Son bipolares, trifásicos, del tipo jaula de ardilla y de inducción; los rotores construidos con longitudes de 12 a 18 pg están montados sobre la flecha y los estatores sobre la carcaza; el cojinete de empuje soporta la carga de los rotores. El interior del motor se llena con aceite mineral caracterizado por su alta refinación, resistencia dieléctrica, buena conductividad térmica y capacidad para lubricar a los cojinetes. Dicho aceite permite que el calor generado en el motor, sea transferido a la carcaza y de ésta a los fluidos del pozo que pasan por la parte externa de la misma; razón por la que el aparejo no debe quedar abajo del intervalo disparado. Pruebas de laboratorio indican que la velocidad del fluido que circula por el exterior del motor, debe ser de 1 pie/seg para lograr un enfriamiento adecuado.

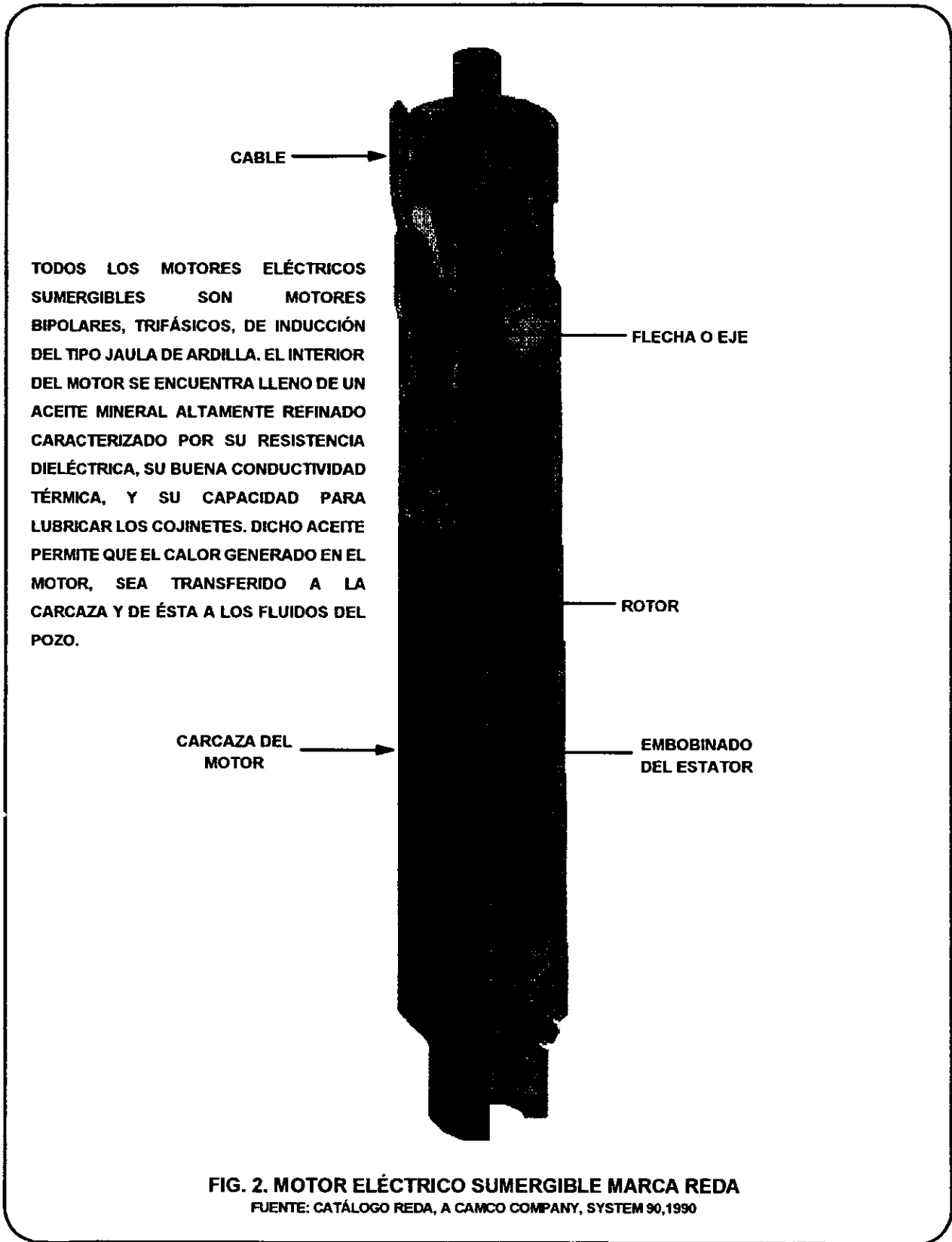
Los requerimientos del amperaje pueden variar desde 12 hasta 130 amperes (amps) y se logra mayor potencia, aumentando la longitud de la sección del motor; cuando éste es sencillo, pueden tener aproximadamente 30 pies de largo y desarrollar de 200 a 250 caballos de fuerza (Hp), mientras que otros integrados en tandem alcanzan hasta 100 pies de largo y desarrollan 1,000 Hp^{1,2}.

La profundidad de colocación del aparejo es un factor determinante en la selección del voltaje del motor debido al incremento de las pérdidas de voltaje en el cable y la reducción del amperaje requerido. En pozos muy profundos, la economía es un factor importante: con un motor de más alto voltaje es posible usar un cable más pequeño y más barato. Sin embargo, puede requerirse un tablero de control de más alto voltaje y más caro.

1.2.2 Protector:

Este componente también llamado sección sellante, se localiza entre el motor y la bomba; está diseñado principalmente para igualar la presión del fluido del motor y la presión externa del fluido del pozo a la profundidad de colocación del aparejo. Adicionalmente tiene las siguientes cuatro funciones básicas^{2,3}.

1. Conecta la carcaza de la bomba con la del motor y une rígidamente la flecha impulsora del motor con la flecha de la bomba.
2. Aloja un cojinete que absorbe el empuje axial desarrollado por la bomba.
3. Evita la contaminación del aceite lubricante del motor con el fluido del pozo.
4. Provee un receptáculo para compensar la expansión y contracción del aceite lubricante del motor, debidas al calentamiento o enfriamiento de éste, cuando la unidad está trabajando o cuando está sin operar. Esta función equivale a igualar la presión interna en el motor con la presión externa del pozo.



TODOS LOS MOTORES ELÉCTRICOS SUMERGIBLES SON MOTORES BIPOLARES, TRIFÁSICOS, DE INDUCCIÓN DEL TIPO JAULA DE ARDILLA. EL INTERIOR DEL MOTOR SE ENCUENTRA LLENO DE UN ACEITE MINERAL ALTAMENTE REFINADO CARACTERIZADO POR SU RESISTENCIA DIELECTRICA, SU BUENA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, Y SU CAPACIDAD PARA LUBRICAR LOS COJINETES. DICHO ACEITE PERMITE QUE EL CALOR GENERADO EN EL MOTOR, SEA TRANSFERIDO A LA CARCAZA Y DE ÉSTA A LOS FLUIDOS DEL POZO.

FIG. 2. MOTOR ELÉCTRICO SUMERGIBLE MARCA REDA
FUENTE: CATÁLOGO REDA, A CAMCO COMPANY, SYSTEM 90,1990

Existen dos tipos de protectores: El convencional y el de tres cámaras aislantes. El diseño mecánico y principio de operación de los protectores difiere de un fabricante a otro. La diferencia principal está en la forma como el aceite lubricante del motor es aislado del fluido del pozo.

El protector convencional, fig. 3, protege contra la entrada de fluido alrededor de la flecha. El contacto directo entre el fluido del pozo y del motor ha sido considerado el único medio de igualar presiones en el sistema de sellado. Se ha determinado que un mejoramiento real del funcionamiento del motor sumergible puede lograrse si el aceite del motor se aísla completamente de los fluidos del pozo evitando cualquier contaminación. Este enfoque llevó al desarrollo de la sección sellante tipo "D", fig. 4, en el cual se aísla el aceite del motor del fluido del pozo por medio de un líquido inerte bloqueante.

El protector de tres cámaras, fig. 5, constituye realmente tres sistemas de sellos en uno. Cada cámara consiste de un sello mecánico y de un recipiente de expansión-contracción. Aunque dos de los tres sellos mecánicos fallen por alguna razón, el motor sumergible queda protegido. Este tipo de sección sellante proporciona la mejor protección disponible contra el ácido sulfhídrico u otros fluidos contaminantes del pozo. Las características y beneficios de este tipo de protector, son⁵:

- Tres sellos mecánicos ampliamente espaciados.
- Una distribución amplia de los sellos que permite una mejor disipación de calor.
- Cada sello mecánico protege su propio recipiente creando tres secciones sellantes en una unidad.
- Un tubo permite que haya flujo de aceite lubricante entre los tres recipientes.
- La barrera elástica en la cámara superior permite la contracción-expansión del aceite del motor cuando la temperatura cambia desde la superficie hasta el fondo y a la de operación.
- La barrera elástica es resistente al ataque químico y a la penetración del gas, por lo que el aceite del motor se protege efectivamente contra contaminantes.
- Cada recipiente es lo suficientemente grande para absorber la expansión-contracción volumétrica de los motores más grandes existentes en el mercado.

LA FUNCIONES PRINCIPALES DEL PROTECTOR O SECCIÓN SELLANTE SON:

- PROTEGER AL MOTOR DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS FLUIDOS DEL POZO.
- ABSORBER EL EMPUJE AXIAL GENERADO POR LA BOMBA.
- IGUALAR LA PRESIÓN ENTRE EL POZO Y EL ACEITE DEL MOTOR.
- COMPENSAR LA EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN DEL ACEITE DEL MOTOR.

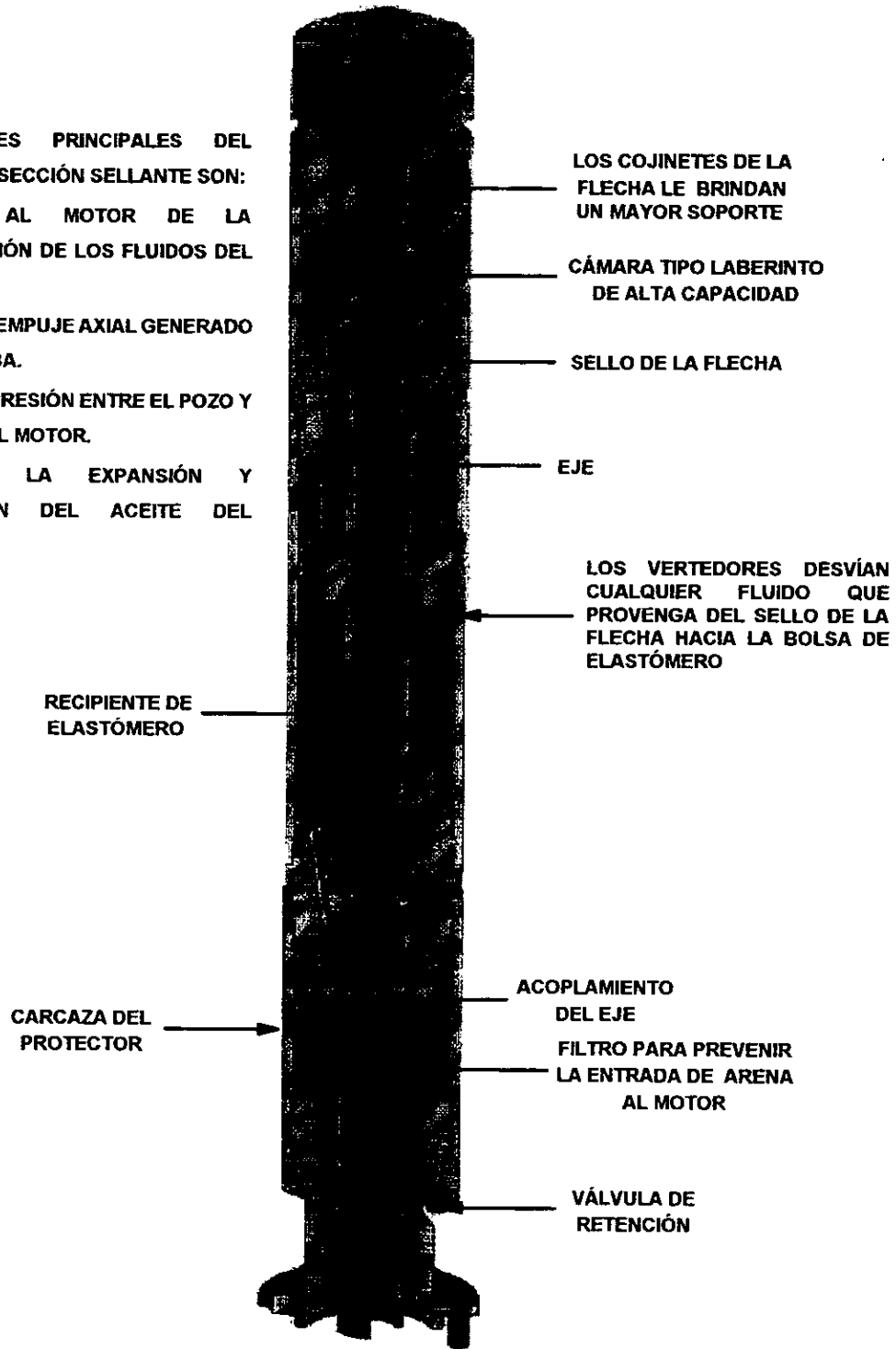
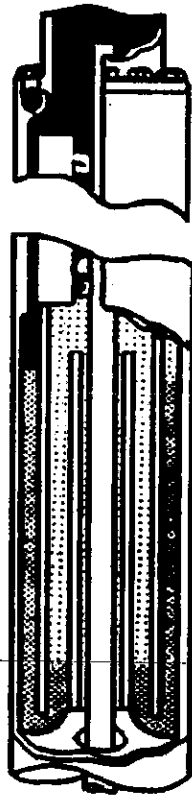
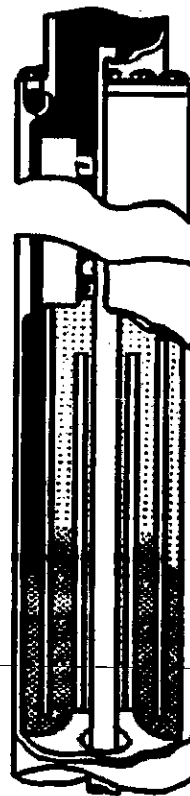


FIG. 3. PROTECTOR CONVENCIONAL MARCA REDA

FUENTE: CATÁLOGO REDA, A CAMCO COMPANY, SYSTEM 90, 1990



PROTECTOR OPERANDO



PROTECTOR SIN OPERAR



ACEITE DEL MOTOR



FLUIDO DE BLOQUEO



FLUIDO DEL POZO

FIG. 4. PROTECTOR TIPO "D"

FUENTE: CENTRILIFT, BORG-WARNER CO., SUBSUMERSIBLE PUMP HANDBOOK, 1978

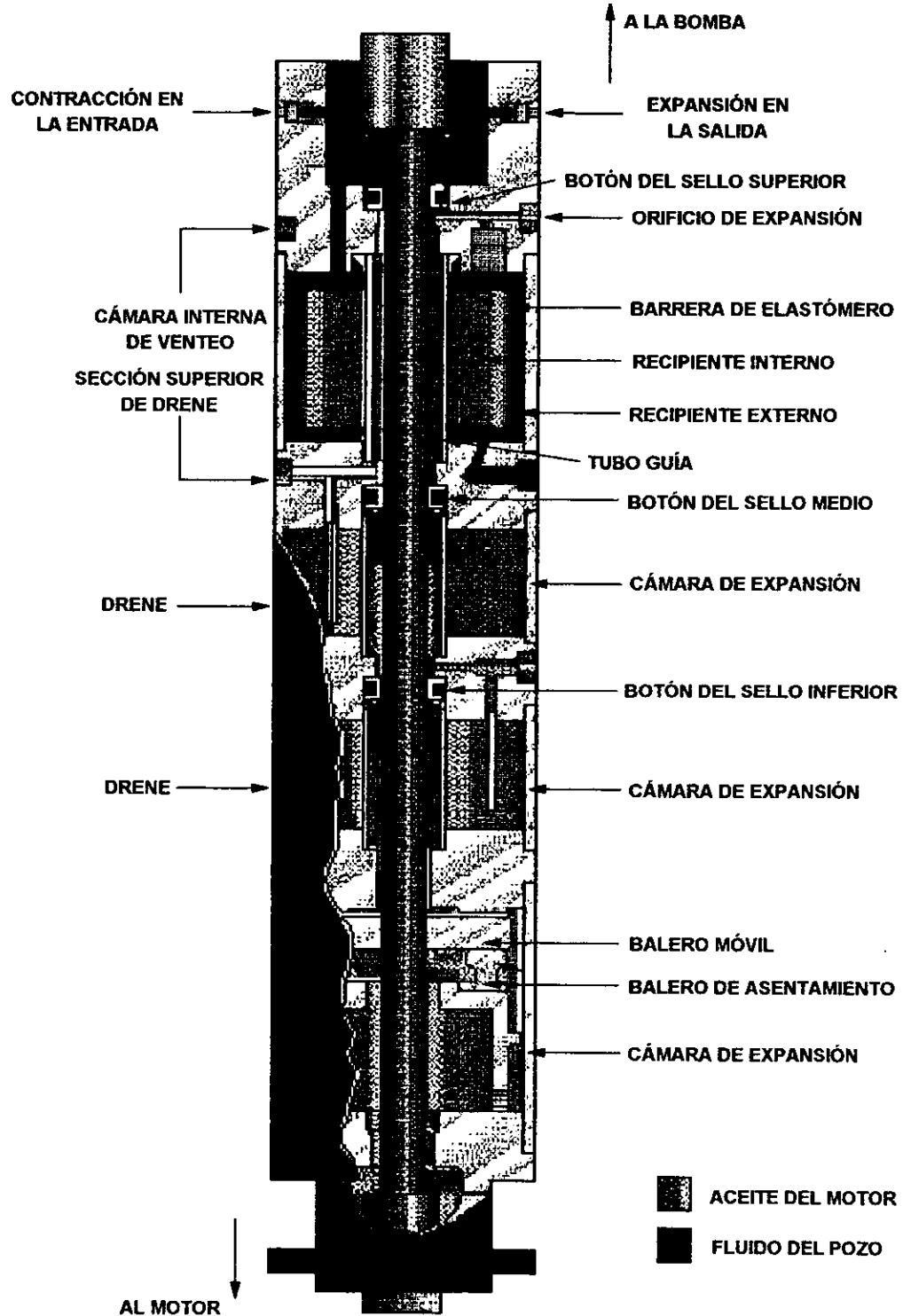


FIG. 5. PROTECTOR DE TRES CÁMARAS MARCA CENTRILIFT

FUENTE: CATÁLOGO CENTRILIFT, A BAKER HUGES COMPANY, 1991

1.2.3 Separador de gas:

El separador de gas es un componente opcional del aparato construido integralmente con la bomba, normalmente se coloca entre ésta y el protector. Sirve como succión o entrada de fluidos a la bomba y desvía el gas libre de la succión hacia el espacio anular. El uso del separador de gas permite una operación de bombeo más eficiente en pozos gasificados, ya que reduce los efectos de disminución de capacidad de carga en el motor producidas por la severa interferencia de gas.

Existen dos tipos de separadores: Convencional y Centrífugo. En las figs. 6 y 7, se muestra el primero, donde se aprecia que su operación consiste en invertir el sentido del flujo del líquido, lo que permite que el gas libre continúe su trayectoria ascendente hacia el espacio anular. Su aplicación es recomendable en pozos donde a la profundidad de colocación del aparato, las cantidades de gas libre no son muy grandes^{1,2}.

En la fig. 8, se muestra el separador centrífugo, que trabaja de la siguiente forma: en sus orificios de entrada recibe la mezcla de líquido y gas libre que pasa a través de una etapa de succión neta positiva, la cual imprime fuerza centrífuga a los fluidos; por la diferencia de densidades el líquido va hacia las paredes internas del separador y el gas permanece en el centro. Unas aletas guías convierten la dirección tangencial del flujo, en dirección axial; entonces el líquido y el gas se mueven hacia arriba, pasan a través de un difusor que conduce a los líquidos a la succión de la bomba y desvía el gas hacia los orificios de ventilación, donde el gas libre va al espacio anular por fuera de la tubería de producción.

Es necesario mencionar que la total eliminación del gas libre, no es necesariamente la mejor forma de bombear el pozo. Por una parte, el volumen de fluidos que entra a la bomba es menor, pero la presión que la bomba debe entregar en la descarga se incrementa, debido a la menor relación gas-aceite de la columna hidráulica en la tubería de producción.

Entre los efectos que causa la presencia de gas libre en el interior de la bomba, están: el comportamiento de la bomba se aparta del señalado en sus curvas características, reducción de eficiencia, fluctuación de carga en el motor, posible efecto de cavitación, y otros consecuentes.

1.2.4 Bomba centrífuga sumergible:

Su función básica es imprimir a los fluidos del pozo, el incremento de presión necesario para hacerlos llegar a la superficie con la presión suficiente en la cabeza del pozo.

Las bombas centrífugas sumergibles son de múltiples etapas, fig. 9, y cada etapa consiste de un impulsor giratorio y de un difusor estacionario, fig. 10. El tamaño de etapa que se use determina el volumen de fluido que va a producirse, la carga o presión que la bomba genera depende del número de etapas y de este número depende la potencia requerida^{2,3}. En una bomba de impulsores flotantes, éstos se mueven axialmente a lo largo de la flecha y pueden descansar en empuje ascendente o en empuje descendente en los cojinetes cuando están en operación. Estos empujes a su vez, los absorbe un cojinete en la sección sellante.

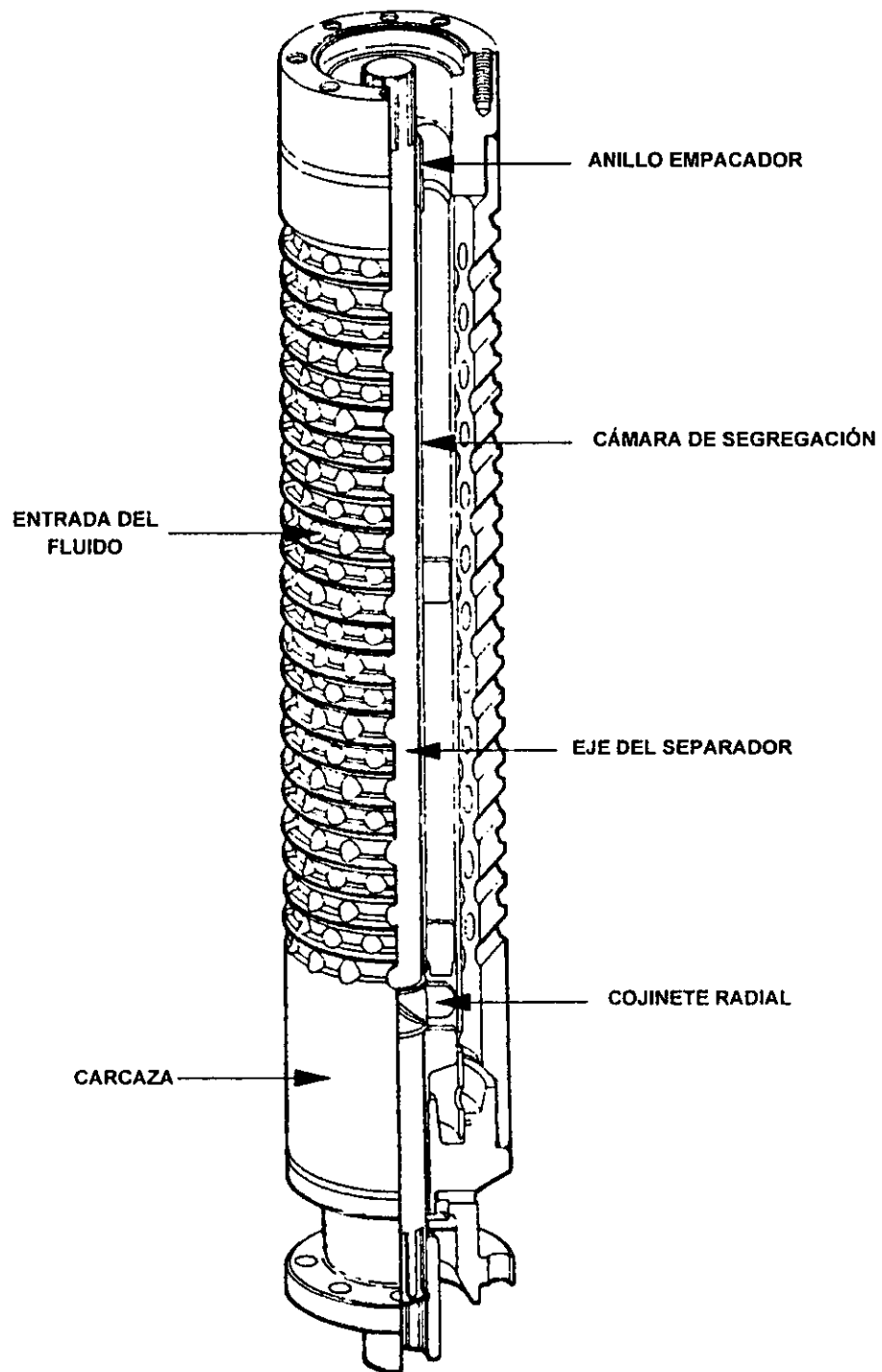


FIG. 6. SEPARADOR DE GAS CONVENCIONAL MARCA REDA

FUENTE: BROW, K. E., "THE TECHNOLOGY OF ARTIFICIAL LIFT METHODS", VOL 2b, PENNWELL PUBLISHING CO., 1980

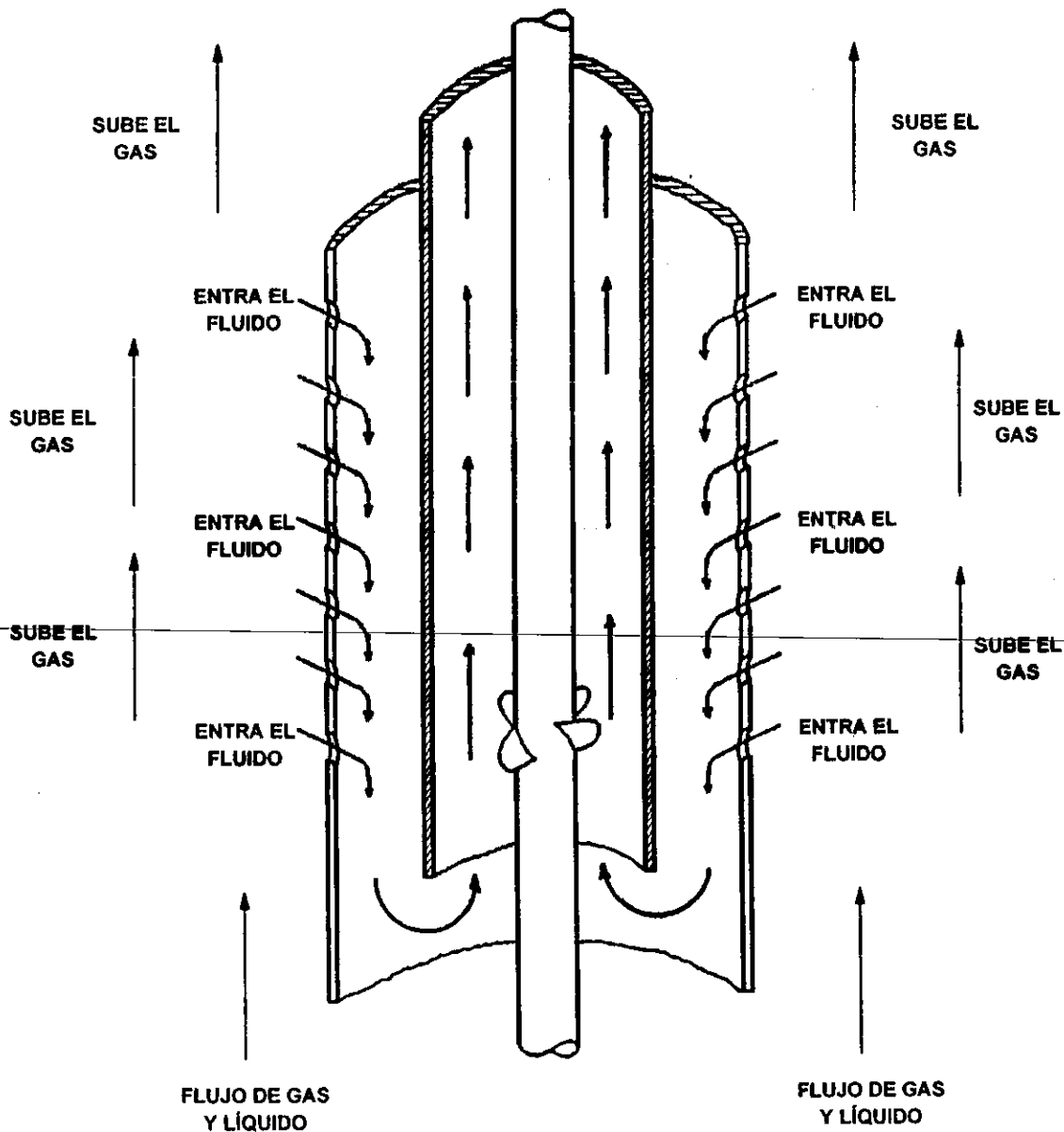


FIG. 7. SEPARADOR DE GAS CONVENCIONAL

SALIDA DEL FLUIDO
HACIA LA PRIMERA
ETAPA DE LA BOMBA

SALIDA DEL GAS
LIBRE HACIA LA T. R.

DIVISOR
DE FLUJO

CENTRÍFUGA

EL SEPARADOR ROTATORIO USA LA FUERZA CENTRÍFUGA PARA SEPARAR EL GAS LIBRE DE LA MEZCLA. EL ACEITE Y EL GAS ENTRAN EN LOS ORIFICIOS DE SUCCIÓN DIRIGIENDOSE HACIA LOS IMPULSORES. AQUI SE INCREMENTA LA PRESIÓN DE LOS FLUIDOS Y SE ENVIAN HACIA LA CENTRIFUGA DONDE TIENE LUGAR LA SEPARACIÓN. EL FLUIDO ES FORZADO A MOVERSE HACIA LA PARED DEL SEPARADOR Y HACIA LA PRIMERA ETAPA DE LA BOMBA. EL GAS MÁS LIGERO SALE A TRAVÉS DEL DIVISOR DE FLUJO PARA SER VENDEADO AL ESPACIO ANULAR.

IMPULSORES

ORIFICIOS DE
SUCCIÓN

FIG. 8. SEPARADOR DE GAS CENTRÍFUGO MARCA REDA

FUENTE: CATÁLOGO REDA, A CAMCO COMPANY, SYSTEM 90, 1990

En la bomba de impulsores fijos, éstos no pueden moverse y el empuje desarrollado por los impulsores lo amortigua un cojinete en la sección sellante.

Los empujes desarrollados por los impulsores dependen de su diseño hidráulico y mecánico, además del gasto de operación de la bomba. Una bomba operando a un gasto superior al de su diseño produce empuje ascendente excesivo y por el contrario operando a un gasto inferior produce empuje descendente. A fin de evitar dichos empujes la bomba debe de operar dentro de un rango de capacidad recomendado, el cual se indica en las curvas de comportamiento de las bombas y que generalmente es del 75 al 125% del gasto de mayor eficiencia de la bomba.

Un impulsor operando a una velocidad dada, genera la misma cantidad de carga independientemente de la densidad relativa del fluido que se bombea, ya que la carga se expresa en términos de altura de columna hidráulica de fluido. De esta característica se desprende el siguiente concepto:

La presión desarrollada por una bomba centrífuga sumergible, depende de la velocidad periférica del impulsor y es independiente del peso del líquido bombeado. La presión desarrollada convertida a la longitud de columna hidráulica que levanta la bomba, es la misma cuando la bomba maneja agua de densidad relativa 1.0, aceite de densidad relativa 0.85, salmuera de densidad relativa 1.35, o cualquier otro fluido de diferente densidad.

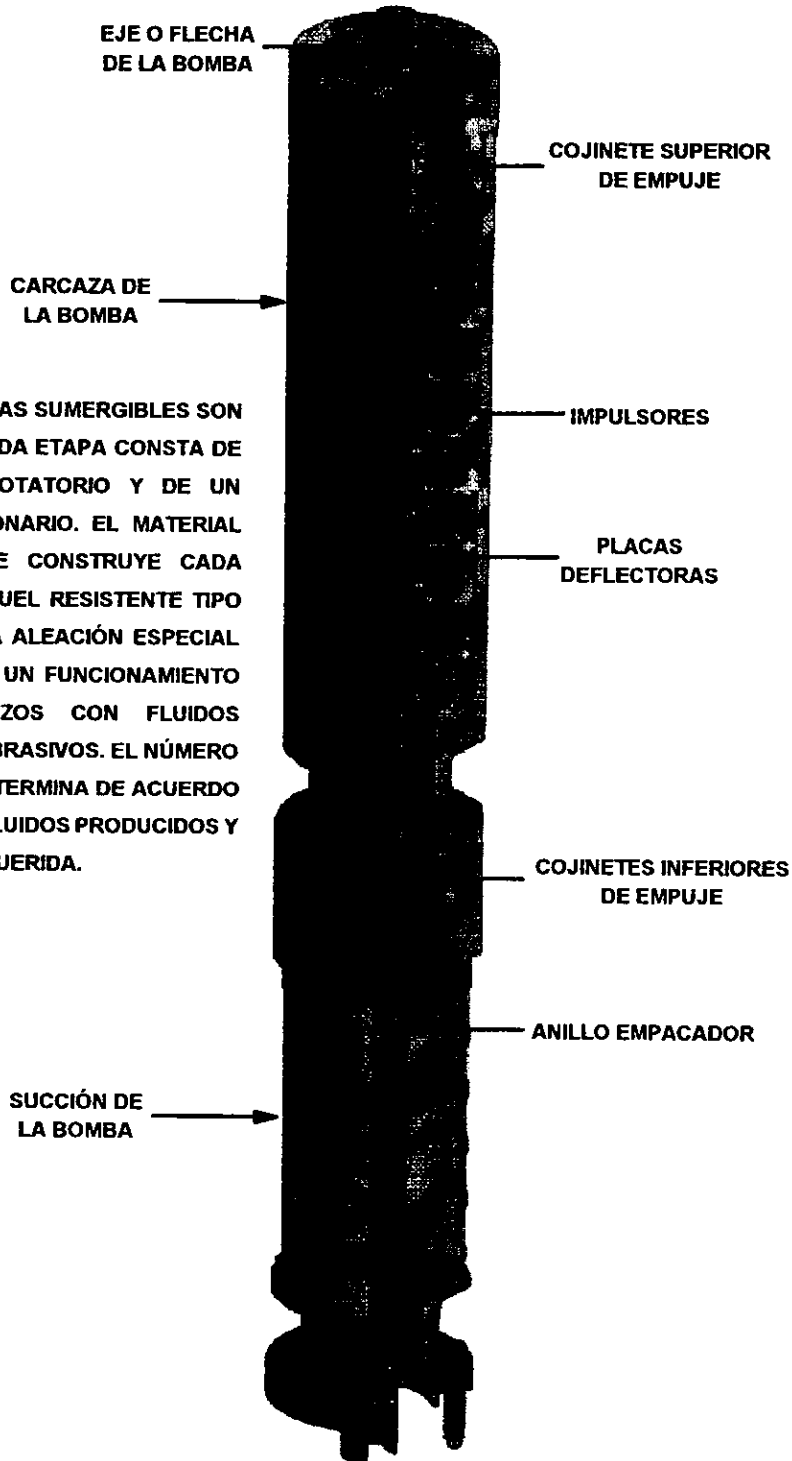
En estos casos la lectura de la presión en la descarga de la bomba es diferente, únicamente permanecen fijos el diámetro y la velocidad del impulsor. En la fig. 11, se muestran bombas idénticas, que producen columnas hidráulicas de igual longitud, manejando líquidos con diferentes densidades relativas.

Una interpretación diferente del concepto anterior, es que cada etapa de la bomba imprime a los fluidos un incremento de presión exactamente igual. En esta forma, si la primera etapa eleva la presión en 0.5 kg/cm^2 y la bomba tiene 20 etapas, el incremento total de presión que se obtiene es de 10 kg/cm^2 .

1.2.4.1 Curvas características de la bomba:

Para establecer las posibilidades de aplicación de una bomba ya construida, por lo que se refiere al gasto que puede manejar, es necesario determinar mediante pruebas prácticas, sus curvas características o de comportamiento; las cuales indican para diversos gastos, los valores de eficiencia y longitud de columna hidráulica que es capaz de desarrollar la bomba; así como la potencia al freno en cada caso.

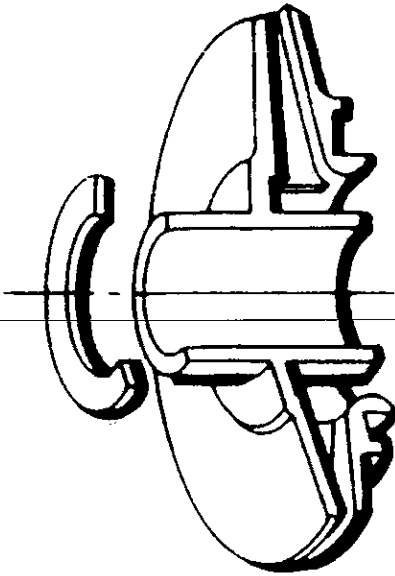
Las pruebas prácticas de la bomba se realizan utilizando agua dulce de densidad relativa 1.0 y viscosidad 1.0 cp haciéndola trabajar a velocidad constante y estrangulando la descarga. Durante la prueba se miden en varios puntos: el gasto, el incremento de presión a través de la bomba y la potencia al freno. El incremento de presión se convierte a carga de columna hidráulica y se calcula la eficiencia total de la bomba. Con base en esos datos se dibujan las curvas de carga, potencia al freno y eficiencia en función del gasto manejado.



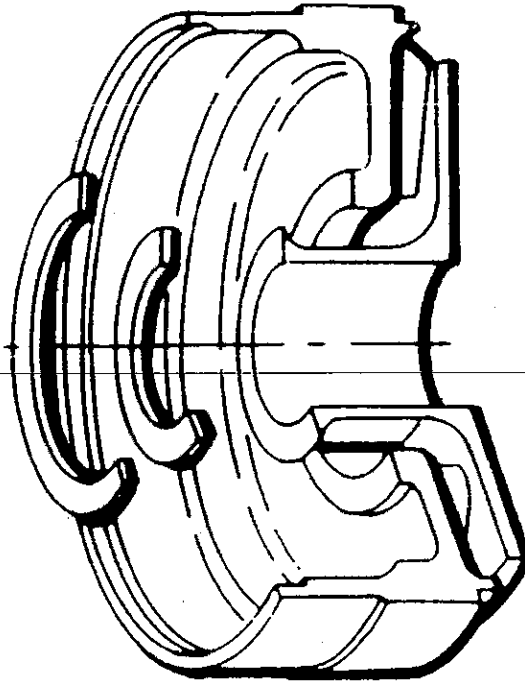
TODAS LAS BOMBAS SUMERGIBLES SON MULTIETAPAS. CADA ETAPA CONSTA DE UN IMPULSOR ROTATORIO Y DE UN DIFUSOR ESTACIONARIO. EL MATERIAL CON EL QUE SE CONSTRUYE CADA ETAPA ES DE NIQUEL RESISTENTE TIPO RYTON, O DE UNA ALEACIÓN ESPECIAL PARA ASEGURAR UN FUNCIONAMIENTO ÓPTIMO EN POZOS CON FLUIDOS CORROSIVOS O ABRASIVOS. EL NÚMERO DE ETAPAS SE DETERMINA DE ACUERDO AL VOLUMEN DE FLUIDOS PRODUCIDOS Y LA POTENCIA REQUERIDA.

FIG. 9. BOMBA CENTRÍFUGA SUMERGIBLE MARCA REDA
FUENTE: CATÁLOGO REDA, A CAMCO COMPANY, SYSTEM 90,1990

CADA ETAPA CONSTA DE UN IMPULSOR Y UN DIFUSOR. EL FLUIDO ENTRA AL IMPULSOR POR MEDIO DE UN ORIFICIO INTERNO CERCANO AL EJE Y SALE POR EL DIÁMETRO EXTERIOR DEL IMPULSOR. EL DIFUSOR DIRIGE EL FLUIDO HACIA EL SIGUIENTE IMPULSOR.



IMPULSOR GIRATORIO



DIFUSOR ESTACIONARIO

FIG. 10. CONJUNTO IMPULSOR-DIFUSOR DE UNA ETAPA DE LA BOMBA

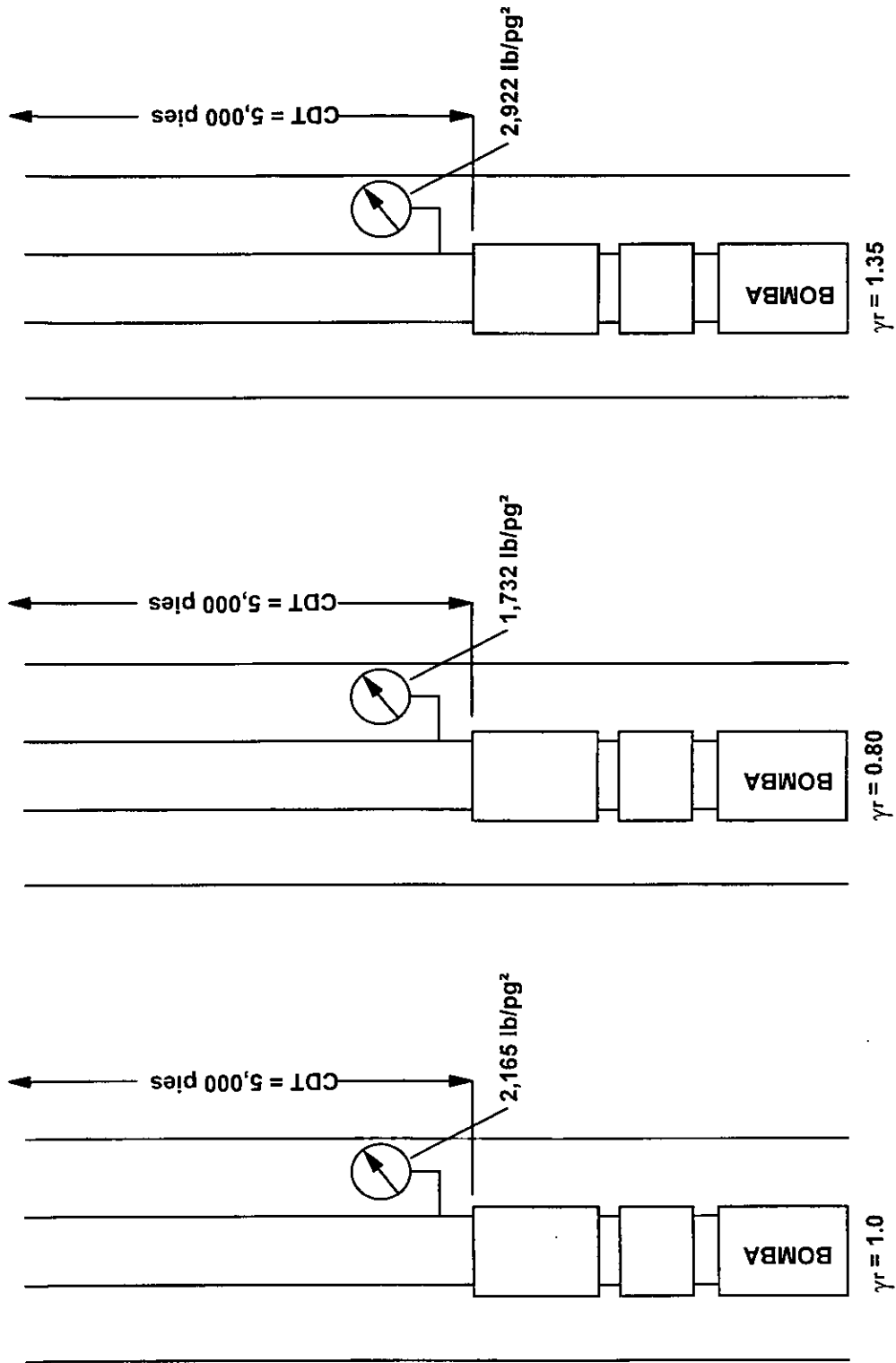


FIG. 11. SE MUESTRAN TRES BOMBAS IDÉNTICAS TRABAJANDO A LA MISMA VELOCIDAD Y MANEJANDO LÍQUIDOS CON DIFERENTES DENSIDADES ESPECÍFICAS. LA CARGA TOTAL (CDT) DESARROLLADA ES IGUAL EN LOS TRES CASOS, PERO LA PRESIÓN DE DESCARGA DE CADA BOMBA ES DIFERENTE.

La construcción de gráficas con curvas características para una bomba, se realiza de la siguiente manera⁷.

1. El gasto se mide por medio de recipientes aforados u orificios calibrados.
2. La altura total de elevación o carga hidráulica se determina fijando la altura de succión por medio de un vacuómetro y la altura de descarga por medio de un manómetro.
3. La potencia se determina por medio de un dinamómetro o por la potencia que alcance el motor eléctrico de acondicionamiento, tomando en consideración su rendimiento.
4. El número de revoluciones por minuto (rpm) se obtiene por medio de un tacómetro o por medio de un contador de revoluciones.
5. La eficiencia se obtiene al despejarla de la ecuación de potencia.

$$E = \frac{\Delta p * 144 * Q}{Hp * 7.48 * 60 * 550 * NE}$$

Donde:

ΔP : Incremento de presión.

Q : Gasto (gpm).

Hp : Potencia.

NE : Número de etapas.

Siguiendo las consideraciones anteriores y mediante pruebas sucesivas, se van construyendo las curvas características de la bomba, como las que se muestran en la fig. 12.

Cada curva representa el comportamiento de la bomba a una velocidad particular para alturas de elevación variables, lo que en la práctica se consigue generalmente de la siguiente manera: Se cierra la válvula de descarga y se hace funcionar la bomba a su número normal de revoluciones por minuto, por ejemplo 3500 rpm, en este caso el gasto es cero y en la bomba se establece una presión que alcanza aproximadamente unos 5,300 pies para lo cual se requiere una potencia de 40 Hp, todo lo anterior para 100 etapas. Se abre progresivamente la válvula de descarga y empieza el flujo; la curva de capacidad de carga, baja progresivamente, las curvas de potencia y eficiencia van aumentando a medida que aumenta el gasto. Continuando con la apertura de la válvula, se disminuye el valor de la carga y aumentan los valores del gasto, la eficiencia y la potencia. El valor máximo de eficiencia corresponde a los valores de gasto y carga para los cuales se construyó la bomba.

Sin embargo, las bombas en realidad se utilizan para bombear líquidos de diferentes densidades y viscosidades, operando a otras velocidades también constantes. En estos casos es necesario tomar en cuenta el efecto de algunos parámetros a fin de predecir el comportamiento de la bomba bajo condiciones reales de operación^{1,2,7}.

a) Efecto del cambio de velocidad:

El gasto varía en proporción directa a los cambios de velocidad de la bomba. La carga producida es proporcional al cuadrado de la velocidad y la potencia es proporcional al cubo de la velocidad. La eficiencia de la bomba permanece constante con los cambios de velocidad.

b) Efecto de la densidad relativa:

La carga producida por un impulsor no depende de la densidad relativa. Entonces la curva de capacidad de carga no depende de la densidad relativa. La potencia varía directamente con la densidad relativa y la eficiencia de la bomba permanece constante independientemente de la densidad relativa.

c) Efectos de cambio del diámetro del impulsor:

La capacidad o gasto varía directamente con el diámetro de los impulsores; la carga directamente con el cuadrado del diámetro y la potencia con el cubo del diámetro. La eficiencia de la bomba no cambia.

Las gráficas de curvas de comportamiento para cada bomba, las publica el fabricante^{3,4,5,6}. Con referencia a la fig. 12, se aprecia que además de las curvas de eficiencia, carga y potencia vs. gasto se incluye información respecto al diámetro de tubería de revestimiento en que puede introducirse la bomba, tipo y número de serie de la misma, ciclaje de la corriente para alimentar al motor y el número de etapas considerado en la elaboración de la gráfica, que generalmente es 1 ó 100.

En cuanto a la forma de utilizar las gráficas de curvas características, se tiene que de acuerdo al ciclaje (Hz) de la corriente disponible, se selecciona un grupo de gráficas verificando que su número de serie o diámetro externo, sea tal que puedan introducirse en la tubería de revestimiento existente en el pozo; de este grupo se selecciona una que maneje con mayor eficiencia el gasto deseado a las condiciones de profundidad de colocación de la bomba. Una vez seleccionada la gráfica, a partir de dicho gasto, se traza una línea vertical, hasta intersectar con las curvas de potencia, eficiencia y capacidad de carga de tal forma que se hagan las lecturas en las escalas correspondientes.

CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA
 100 ETAPAS - 1300 - 60 Hz
 SERIE 650 - 3500 RPM

Tamaño Mínimo de
 T. R. 8 1/2" D. E.

TRW REDA PUMP Co.
 Bartlesville, Oklahoma
 Abril 1977

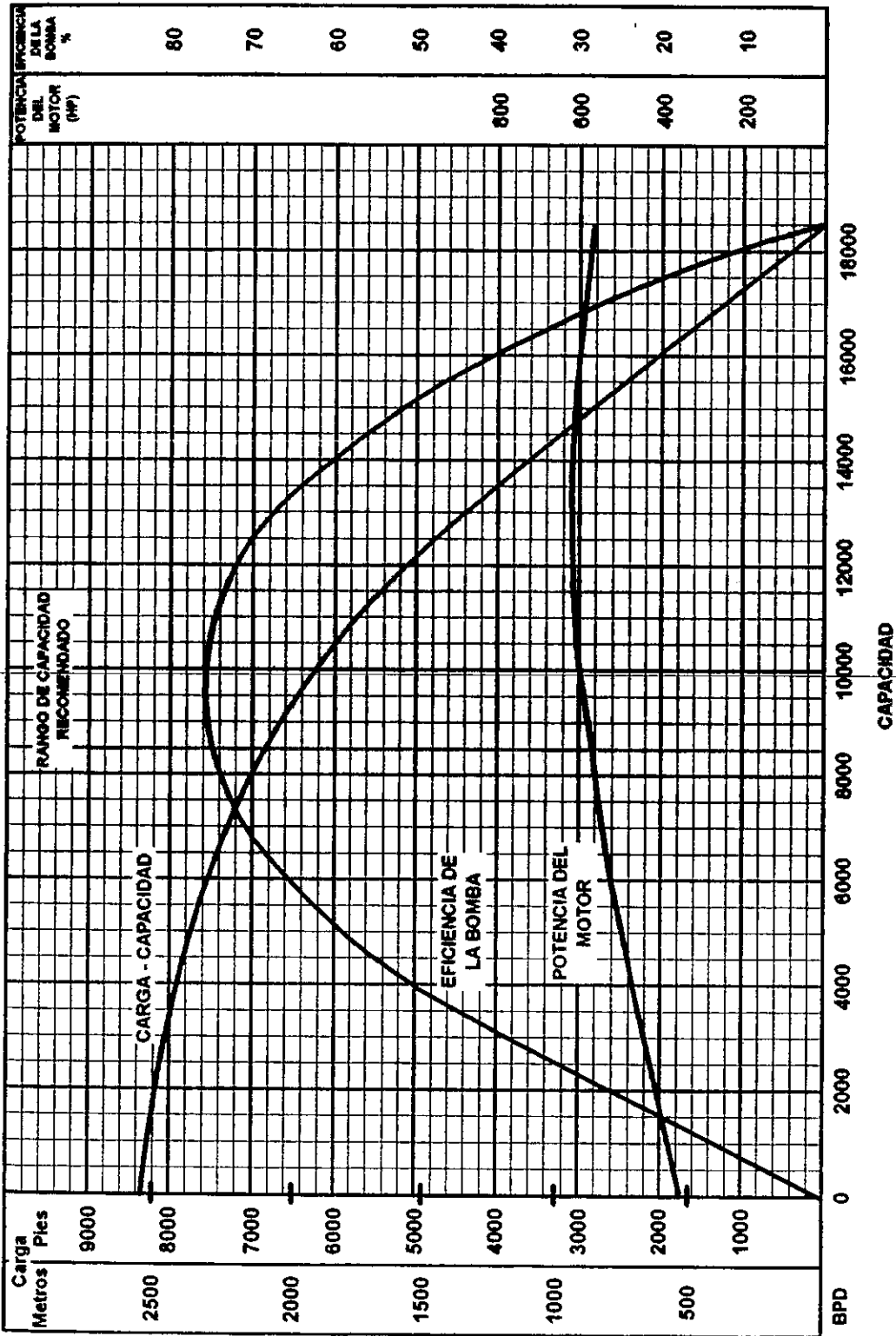


FIG. 12. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBEO

1.2.4.2 Leyes de afinidad de las bombas:

Considerando el efecto del cambio de diámetro del impulsor y el efecto del cambio de velocidad como los más importantes o trascendentes, se tienen las siguientes relaciones⁷.

Con diámetro de impulsor constante:

$$\begin{array}{ll} Q_1 = D_1 & Q_2 = D_2 \\ H_1 = (D_1)^2 & H_2 = (D_2)^2 \\ Hp_1 = (D_1)^3 & Hp_2 = (D_2)^3 \end{array}$$

Con velocidad constante:

$$\begin{array}{ll} Q_1 = N_1 & Q_2 = N_2 \\ H_1 = (N_1)^2 & H_2 = (N_2)^2 \\ Hp_1 = (N_1)^3 & Hp_2 = (N_2)^3 \end{array}$$

Donde:

Q_1, H_1, Hp_1, D_1, N_1 , son: Gasto, carga y potencia, diámetro y velocidad a la frecuencia en la cual opera, que es normalmente de 60 Hz.

Q_2, H_2, Hp_2, D_2, N_2 , son: Gasto, carga y potencia, diámetro y velocidad que se busca a la nueva frecuencia.

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

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

CAMBIO DE DIÁMETRO
(D)

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

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

$$Hp_2 = Hp_1 (D_2/D_1)^3$$

CAMBIO DE VELOCIDAD
(N)

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

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

$$Hp_2 = Hp_1 (N_2/N_1)^3$$

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

CAMBIO DE DIÁMETRO Y VELOCIDAD SIMULTÁNEOS

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

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

$$Hp_2 = Hp_1 [(D_2/D_1) * (N_2/N_1)]^3$$

Usando las relaciones se podrán desarrollar nuevas curvas características de las bombas a cualquier frecuencia, ello indica que para cualquier punto de una curva característica a 60 Hz se podrá obtener su respectiva proyección a otra nueva frecuencia utilizando las leyes de afinidad.

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

$$Q_{50Hz} = Q_{60Hz} * \left[\frac{N_{50Hz}}{N_{60Hz}} \right]$$

$$H_{50Hz} = H_{60Hz} * \left[\frac{N_{50Hz}}{N_{60Hz}} \right]^2$$

$$Hp_{50Hz} = Hp_{60Hz} * \left[\frac{N_{50Hz}}{N_{60Hz}} \right]^3$$

Datos: Diámetro de T.R. = 5 ½ pg.

Gasto = 1,600 bl/día

Bomba: D-40, Serie 400 con 100 etapas

A 60 Hz, corresponde una velocidad de 3,500 rpm. De gráfica a 50 Hz, se tiene una velocidad de 2915 rpm. Por lo tanto el gasto a la nueva velocidad, es:

$$Q_{50Hz} = 1,600 \left(\frac{2,915}{3,500} \right)$$

$$Q_{50Hz} = 1,332.6 \text{ bl/día}$$

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

$$H_{50Hz} = 1,750 \left(\frac{2,915}{3,500} \right)^2$$

$$H_{50Hz} = 1,214 \text{ pies}$$

Para la potencia; el valor obtenido en la curva de 60 Hz, con el gasto de 1,600, la potencia es de 34 Hp. Siendo la potencia a 50 Hz de:

$$Hp_{50\text{ Hz}} = 19.7\text{ Hp}$$

1.2.4.3 Ventana de operación:

Como se mencionó anteriormente, el rango de operación recomendado por los fabricantes, para la marcha eficiente de la bomba corresponde a 75% y 125% del punto de máxima eficiencia. La intersección de dicho rango con la curva de capacidad genera dos puntos. En una gráfica en la que se representen las diferentes curvas de capacidad de carga (para una misma bomba a diferentes frecuencias) contra gasto, se marcan los puntos de intersección obtenidos a su respectiva velocidad y gasto. La zona comprendida entre las líneas generadas por dichos puntos es llamada *rango de eficiencia general* o *ventana de operación*⁷, fig. 13, que representa la zona en la cual debe operar la bomba cuando se realicen cambios de velocidad y la que indica el comportamiento de la bomba a su más alta eficiencia. Cuando la bomba opera fuera de este rango, se producen empujes axiales sobre la flecha de la bomba, que a su vez generan desgaste y calor excesivo sobre las chumaceras. Los empujes pueden ser ascendentes o descendentes dependiendo de que la bomba trabaje por arriba o debajo del rango recomendado, respectivamente.

El uso de las leyes de afinidad se debe a que en el diseño de un aparejo de bombeo electrocentrífugo se puede utilizar un controlador de velocidad variable, el cual tiene la capacidad de cambiar la frecuencia suministrada al motor, lo cual influye directamente en la velocidad periférica de los impulsores.

1.2.4.4 Fenómeno de cavitación:

Si la presión absoluta de líquido en cualquier parte dentro de la bomba cae por debajo de la presión de saturación correspondiente a la temperatura de operación, entonces se forman pequeñas burbujas de vapor. Estas burbujas son arrastradas por el líquido fluyendo, hacia regiones de más altas presiones donde se condensan o colapsan. La condensación de las burbujas produce un tremendo incremento en la presión, lo que resulta similar a un golpe de martillo o choque. Este fenómeno se conoce como Cavitación.

Dependiendo de la magnitud de la cavitación, ésta puede resultar en una destrucción mecánica debida a la erosión, corrosión y la intensa vibración. La cavitación también tiene un efecto significativo en el comportamiento de la bomba. Su capacidad y su eficiencia se reducen.

Tamaño Mínimo de
T. R. 5 1/4" D. E.

TRW REDA PUMP Co.
Bartlesville, Oklahoma
Abril 1977

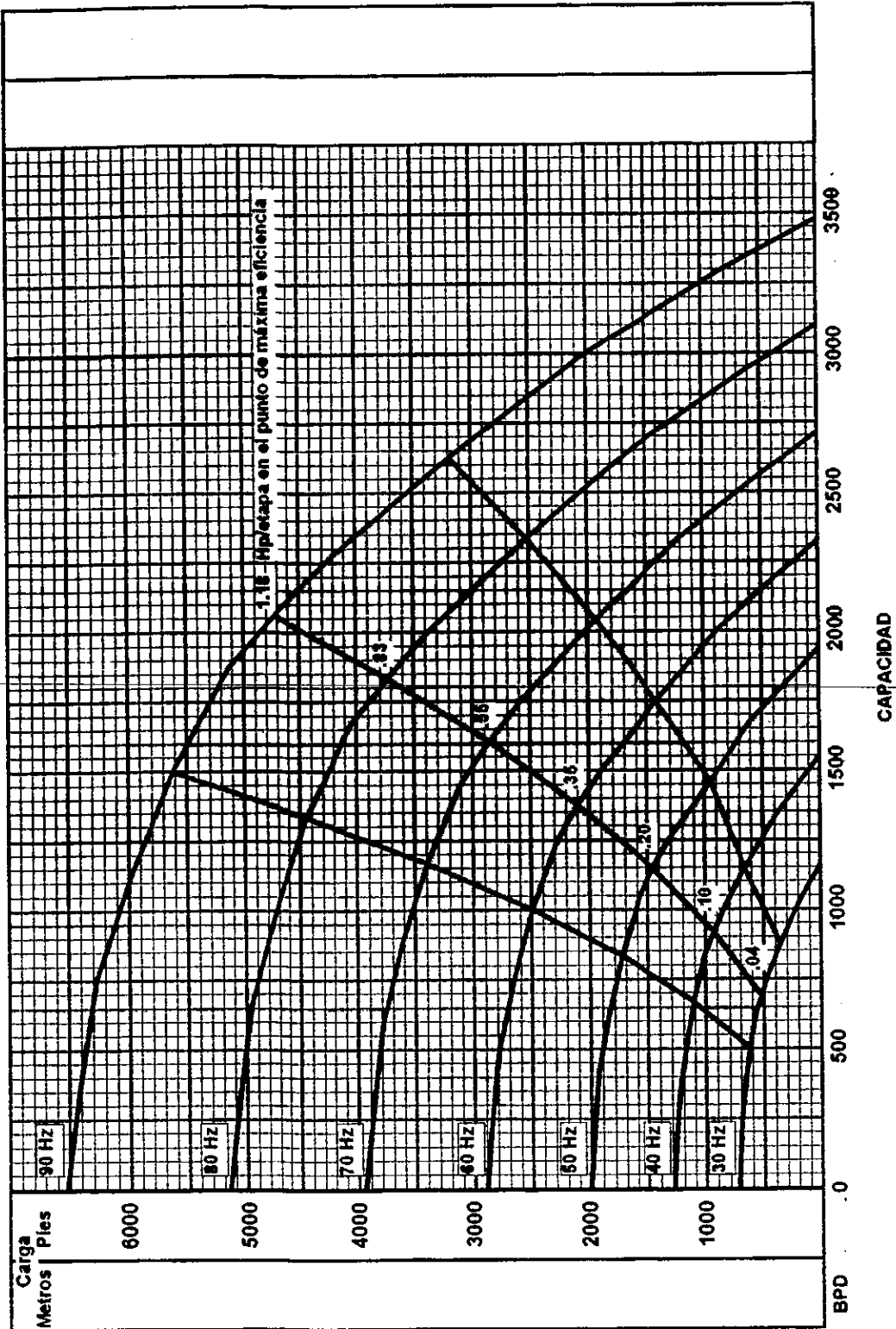


FIGURA No. 13. VENTANA DE OPERACIÓN DE LA BOMBA REDA D-40, 100 ETAPAS, SERIE 400

1.2.5 Cable conductor eléctrico:

La energía eléctrica necesaria para impulsar al motor, se lleva desde la superficie por medio de un cable conductor, el cual debe elegirse de manera que satisfaga los requisitos de voltaje y amperaje para el motor en el fondo del pozo, y que reúna las propiedades de aislamiento que impone el tipo de fluidos producidos.

Existe en el mercado un rango de tamaños de cable, de configuración plana y redonda, fig. 14, con conductores de cobre o aluminio, de tamaños 2 al 6. El tamaño queda determinado por el amperaje y voltaje del motor, así como por el espacio disponible entre las tuberías de producción y revestimiento.

Considerando la longitud de un conductor para la aplicación de un voltaje dado, los volts por pie disminuyen conforme el alambre es más largo, como consecuencia la velocidad del electrón disminuye, lo que resulta en una reducción de la corriente, en otras palabras, "La resistencia es directamente proporcional a la longitud del conductor"¹.

Cuando la selección transversal o diámetro de un alambre es mayor, tiene un efecto contrario sobre la resistencia, ya que el número de electrones libres por unidad de longitud se incrementa con el área. Bajo esta condición la corriente se incrementará para una fuerza electromotriz (fem) dada, ya que se mueven más electrones por unidad de tiempo, en otras palabras, "La resistencia es inversamente proporcional al área de la sección transversal del conductor".

Cuando se usan cables en sistemas de alto voltaje, cada uno de los conductores está rodeado por un considerable espesor de material aislante y algunas veces con una cubierta de plomo. Aunque la corriente normal fluye a lo largo del conductor, existe una pequeña corriente que pasa a través del aislamiento (fuga de corriente) de un conductor a otro, fig.14. Esta fuga se considera despreciable.

El aislamiento de los cables debe resistir las temperaturas y presiones de operación en el pozo. Sin embargo, para los cables utilizados normalmente existen limitaciones debidas a los materiales utilizados en su construcción. Los cables estándar tienen en general 10 años de vida a una temperatura máxima de 167 °F y se reduce a la mitad por cada 15 °F de exceso por arriba del máximo. El medio ambiente bajo el cual opera el cable también afecta directamente su vida. Sin embargo, hay cables que resisten temperaturas del orden de 350 °F.

La instalación del cable se realiza fijándolo en la parte externa de la tubería de producción con flejes, colocando de 3 a 4 flejes por cada lingada; en la sección correspondiente a los componentes del aparejo, es recomendable colocar flejes cada metro, debido a que esta sección es de mayor diámetro y puede dañarse durante las operaciones de introducción al pozo, por lo que comúnmente se instalan protecciones adicionales llamadas guarda cable. A lo largo de esta sección la configuración del cable es plana y se le llama extensión de la mufa, la cual constituye el contacto del motor.

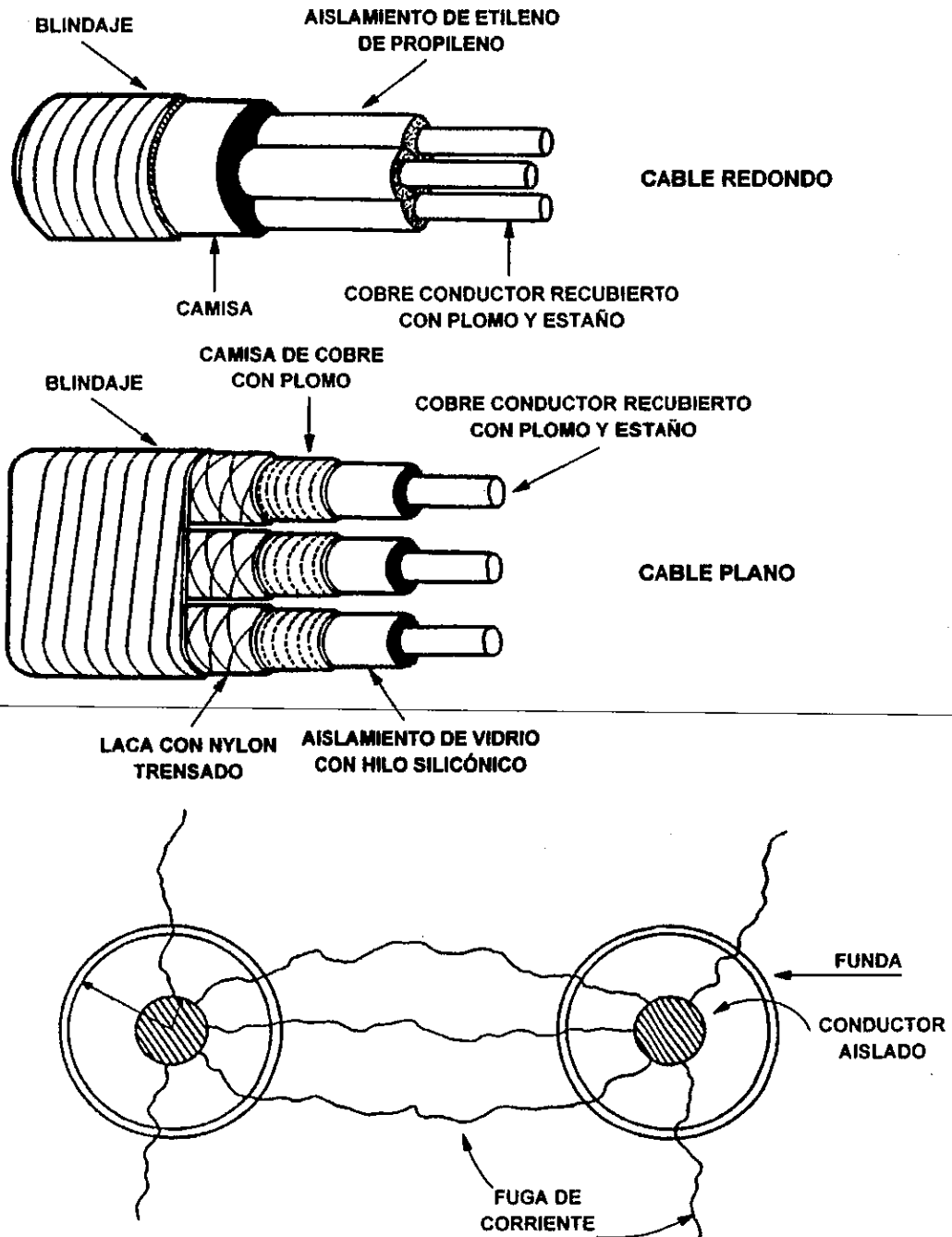


FIG. 14. CABLE CONDUCTOR ELÉCTRICO

FUENTE: BROW, K. E., "THE TECHNOLOGY OF ARTIFICIAL LIFT METHODS", VOL 2b, PENNWEILL PUBLISHING CO., 1980

La unión de la extensión de la mufa y el cable conductor se denomina empate; su elaboración se realiza cuidadosamente en la localización del pozo, ya que constituye una de las partes débiles de la instalación. Un empate también puede ser necesario en cualquier punto a lo largo del cable, donde se detecte una falla del mismo o donde la longitud del cable sea insuficiente para llegar a la superficie.

1.3 COMPONENTES SUPERFICIALES.

1.3.1 Bola colgadora:

Este dispositivo se coloca en un nido sobre el árbol de válvulas. Su función es sostener la tubería de producción, permitir su paso y el de los tres conductores del cable, proporcionando el sello necesario en el espacio anular entre la tubería de producción y de revestimiento para evitar la fuga de fluidos a la superficie. Está construida de acero, cubierta de neopreno. En el caso de instalaciones marinas el paso de los conductores del cable, lo tiene integrado y su contacto es como el de la mufa.

1.3.2 Caja de viento:

Se instala por razones de seguridad entre el cabezal del pozo y el tablero de control, debido a que el gas puede viajar a lo largo del cable superficial y alcanzar la instalación eléctrica en el tablero. En la caja de viento o de unión, los conductores del cable quedan expuestos a la atmósfera evitando esa posibilidad. En la fig. 15 se muestra la forma como queda instalada para su operación⁴.

1.3.3 Tablero de control:

Es el componente desde el que se gobierna la operación del aparejo de producción en el fondo del pozo. Dependiendo de la calidad del control que se desea tener, se seleccionan los dispositivos que sean necesarios para integrarlos al tablero. Este puede ser sumamente sencillo y contener únicamente un botón de arranque y un fusible de protección por sobrecarga; o bien contener fusibles de desconexión por sobrecarga y baja carga, mecanismos de relojería para restablecimiento automático y operación intermitente, protectores de represionamiento de líneas, luces indicadoras de la causa del paro, amperímetro, y otros dispositivos para control remoto. Los tipos de tablero existentes son electromecánicos o bien totalmente transistorizados y compactos.

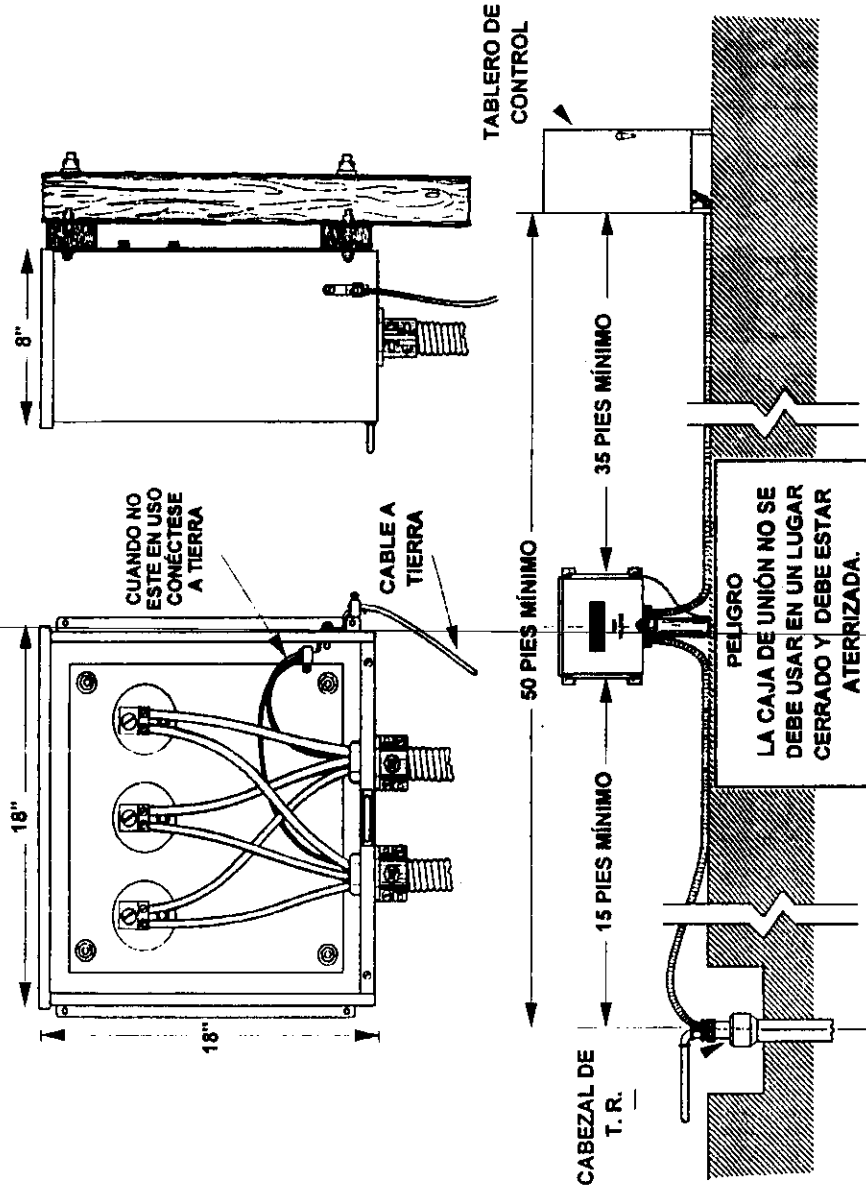


FIG. 15.- POSICIONAMIENTO APROPIADO DE LA CAJA DE VIENTO O DE UNIÓN EN EL SITIO DEL POZO
 FUENTE: CATÁLOGO REDA, A CAMCO COMPANY; INDUSTRIAL SUBMERSIBLE PUMPS.

1.3.4 Transformador:

Este componente se utiliza para elevar el voltaje de la línea doméstica al voltaje requerido en la superficie para alimentar al motor en el fondo del pozo; algunos están equipados con interruptores “taps”, que les dan mayor flexibilidad de operación. Se puede utilizar un solo transformador trifásico o un conjunto de tres transformadores monofásicos, fig. 16.

1.4 ACCESORIOS.

Con el propósito de asegurar una mejor operación del equipo es necesario contar con algunos accesorios como:

1.4.1 Válvula de contrapresión:

Se coloca de una a tres lingadas de tubería por arriba de la bomba, esta válvula permite el flujo en sentido ascendente, de manera que cuando el motor deja de trabajar, impide el regreso de la columna de fluidos y evita el giro de la flecha de la bomba en sentido contrario, lo cual la dañaría.

1.4.2 Válvula de drenaje:

Se coloca de una a tres lingadas por arriba de la válvula de contrapresión. Su función es establecer comunicación entre el espacio anular y la tubería de producción, con el propósito de que ésta se vacíe cuando se extrae el aparejo del pozo. Para operarla se deja caer una barra de acero desde la superficie por la tubería de producción; la barra rompe el perno y deja abierto un orificio de comunicación con el espacio anular.

1.4.3 Controlador de velocidad variable:

Este dispositivo puede ser considerado como equipo accesorio u opcional únicamente bajo ciertas circunstancias que impone el mismo pozo. Eventualmente la información disponible para efectuar un diseño no es del todo confiable y como consecuencia se obtiene una instalación que no opera adecuadamente; anteriormente la alternativa sería rediseñar e instalar un nuevo aparejo, debido a que el sistema de bombeo eléctrico trabaja a velocidad constante para un mismo ciclaje. En otros casos, algunos pozos son dinámicos en cuanto a parámetros de presión de fondo, producción, relación gas-aceite, y otros para los cuales no es recomendable la operación de un aparejo con velocidad constante. Lo anteriormente expuesto limita la aplicación del sistema a pozos estables donde el número de etapas de la bomba, sus dimensiones y velocidad podrían ser constantes.

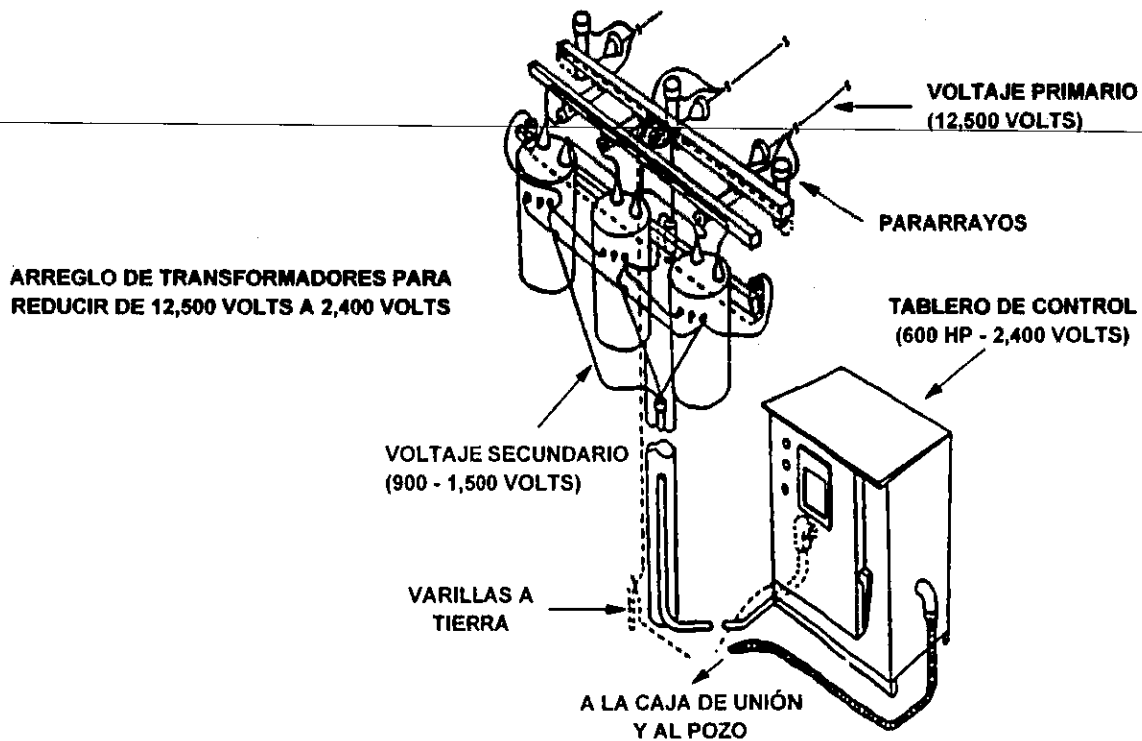
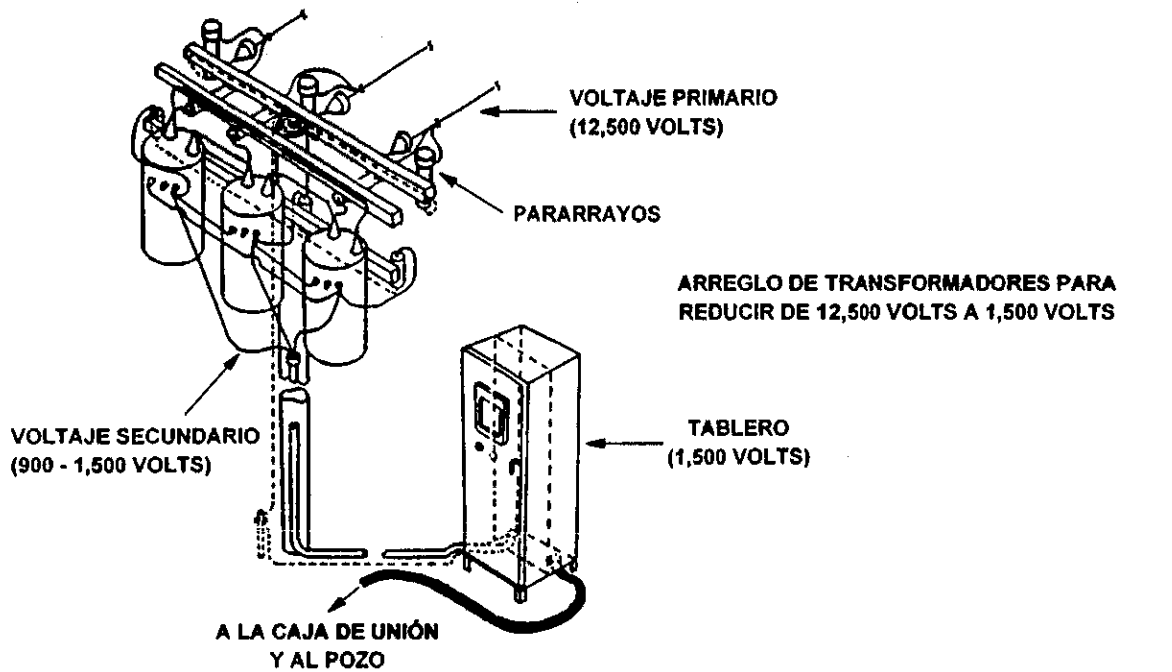


FIG. 16. ARREGLOS DE TRANSFORMADORES

FUENTE: BROW, K. E., "THE TECHNOLOGY OF ARTIFICIAL LIFT METHODS", VOL 2b, PENNWEILL PUBLISHING CO., 1980

El controlador de velocidad variable permite alterar la frecuencia del voltaje que alimenta al motor y por lo tanto modificar su velocidad. El rango de ajuste de la frecuencia es de 30 a 90 Hz, lo que implica su amplio rango de velocidades y por lo tanto de gasto que es posible manejar. Una alta frecuencia incrementa la velocidad y el gasto, una baja frecuencia, los disminuye.

Otros accesorios pueden ser los sensores de presión y de temperatura de fondo, centradores, carrete de cable, cajas protectoras para transporte del equipo, etc.

La integración de todos los componentes descritos es indispensable, ya que cada uno ejecuta una función esencial en el sistema, para obtener en la superficie el gasto de líquido deseado, manteniendo la presión necesaria en la boca del pozo. En la fig. 17 se muestra la forma en como quedan distribuidos en el pozo y en la superficie todas las partes del equipo anteriormente descritas.

1.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO.

Ventajas: Está considerado como un sistema efectivo y económico para producir grandes volúmenes de fluidos, a grandes profundidades y varias condiciones. Es capaz de manejar gastos desde 200 hasta 60,000 bl/día de fluidos, en profundidades aún superiores a los 15,000 pies, también se utiliza para producir fluidos con altas viscosidades y en el manejo simultáneo de aceite, gas y agua. El comportamiento del sistema es muy eficaz cuando se maneja únicamente líquidos; más no por esta razón, se deja de intentar su aplicación en pozos que produzcan cantidades considerables de gas libre, ya que la bomba centrífuga tolera cantidades determinadas de gas libre.

Desventajas: La profundidad de operación está limitada tanto por el rango de potencia del motor eléctrico, como por las altas temperaturas; éstas a su vez, limitan el tamaño del motor y las características del cable. El costo inicial puede ser alto, ya que las múltiples etapas en la bomba para un alto volumen y las elevadas potencias en el motor son costosas. El cable es también de alto costo, especialmente si se requieren recubrimientos para que opere en medio ambiente agresivo; las fallas en el cable son muy frecuentes debido a las altas temperaturas, por corrosión o por mal manejo; las fallas en el motor también son frecuentes y se deben a altas temperaturas, corrosión, abrasión, altas RGA (eficiencias bajas) y frecuentemente a la liberación de gas encerrado en la bomba.

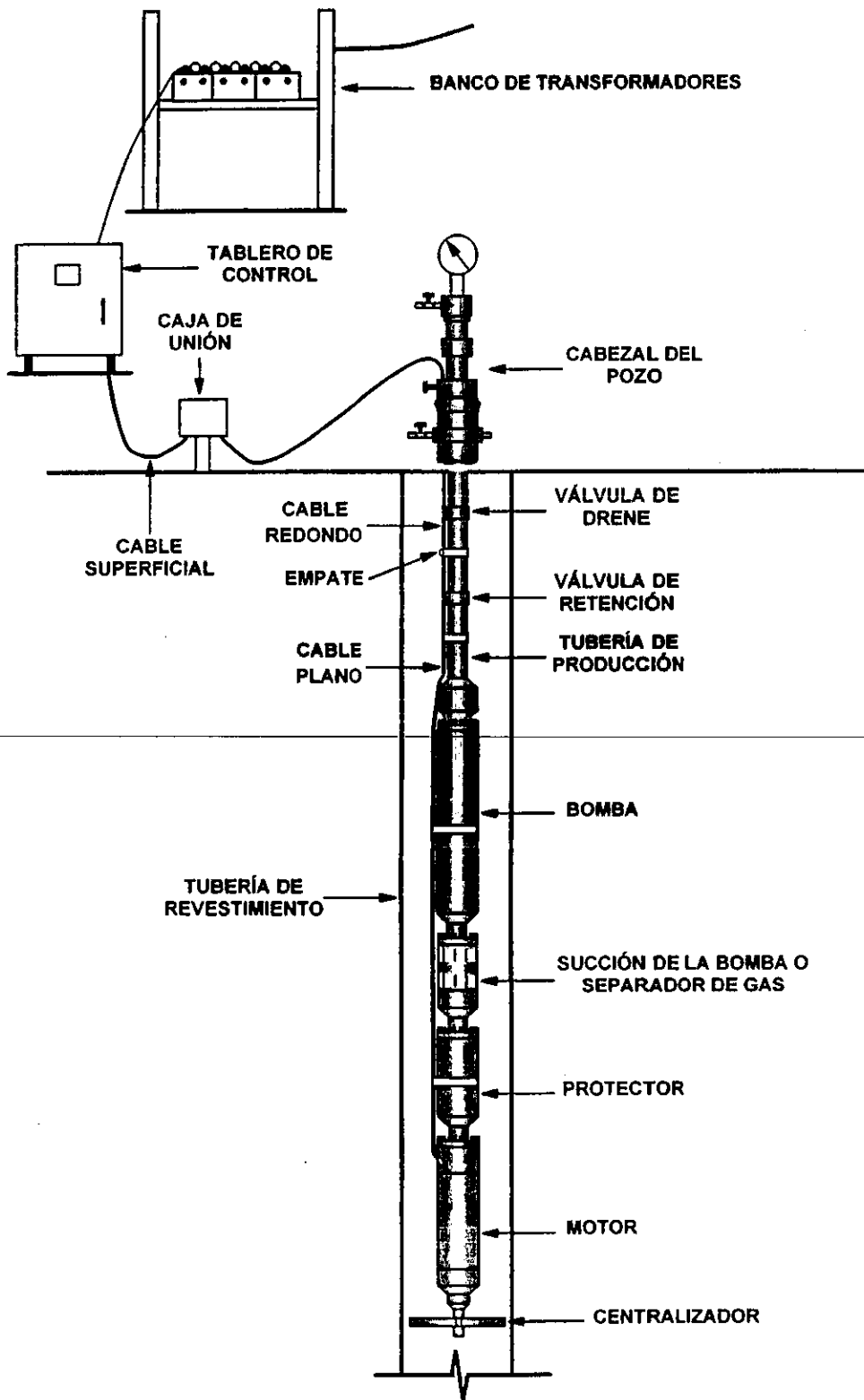


FIG. 17. APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO

CAPÍTULO II

DISEÑO DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO (ABE).

2.1. INFORMACIÓN REQUERIDA PARA EL DISEÑO DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO.

El éxito del diseño de un aparato de bombeo electrocentrífugo sumergido, ABE, también conocido como BEC, se basa en la buena calidad de la información utilizada que incluye: una prueba de producción, tipo de fluidos producidos, estado mecánico del pozo y datos complementarios que permitan asegurar el funcionamiento confiable del sistema. Por su importancia, a continuación se presentan comentarios referentes a dicha información^{1,2}.

2.1.1 Prueba de producción:

Los datos del comportamiento de flujo en el yacimiento y en la tubería vertical, establecen la capacidad máxima de producción del pozo y la presión de fondo fluyendo para cualquier gasto menor que el máximo. Este comportamiento se describe con las presiones estática y de fondo fluyendo, medidas a una profundidad conocida, y con el gasto correspondiente. Si no hay gas en el pozo, los niveles estático y dinámico del fluido son suficientes, en lugar de las presiones.

La presión de fondo fluyendo para cualquier otro gasto, se determina con los datos de la curva de comportamiento de flujo, calculada mediante alguna de las formas comúnmente aceptadas:

- a) Línea recta de índice de productividad, utilizada cuando no hay gas presente o cuando todo el gas se encuentra en solución a la profundidad del intervalo productor.
- b) Curva de comportamiento de flujo (IPR, fig. 18), utilizada cuando la presión de fondo fluyendo es inferior a la de saturación, lo que implica la presencia de gas libre en el yacimiento⁸.

La temperatura de flujo en el fondo y en la cabeza son datos necesarios particularmente si hay gas presente. La cantidad de gas en solución y el volumen de gas libre son sensibles a la variación de temperatura, y cambian continuamente durante su trayectoria por la tubería de producción. También la selección del material para el cable conductor, queda afectada por la temperatura del medio ambiente al que está expuesto.

COMPORTAMIENTO DE FLUJO AL POZO
CURVA DE VOGEL (J. P. T., ENERO DE 1968)

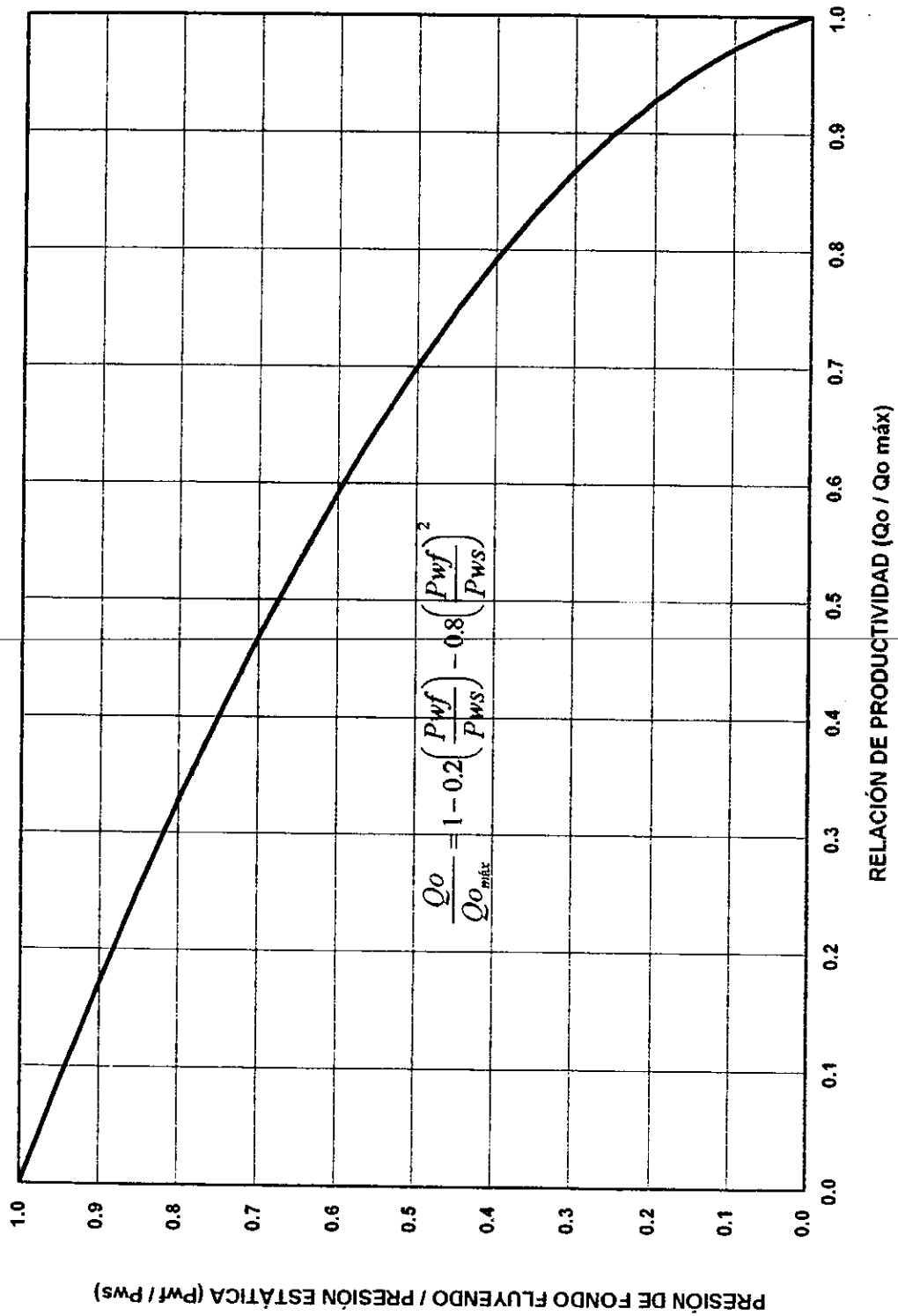


FIG. 18. CURVA GENERAL DE IPR

2.1.2 Tipo de fluidos producidos:

Los datos de un análisis PVT, también son necesarios cuando no hay gas presente. Si para un caso en particular no se tienen disponibles dichos datos, se pueden calcular mediante las correlaciones estándar; entonces, se requiere conocer las densidades relativas y porcentajes de líquidos y de gas que componen la mezcla que se va a bombear. Por lo tanto las densidades relativas del agua y gas, la densidad API del aceite, el porcentaje de agua producida y la relación gas-aceite, deben ser conocidos. Estos parámetros influyen directamente sobre la demanda de potencia al motor y la viscosidad, además, influye sobre las curvas de comportamiento de las bombas.

2.1.3 Estado mecánico del pozo:

Las dimensiones físicas del pozo son datos importantes que gobiernan la capacidad del aparejo posible de instalar. El tamaño y peso de la tubería de revestimiento, determinan el diámetro máximo de motor y bomba que pueden introducirse en el pozo. Su importancia está en que la instalación es más eficiente, conforme los diámetros de motor y bomba sean mayores.

La profundidad total del pozo es el límite máximo para la colocación del aparejo. Igualmente, la profundidad media del intervalo disparado, es el límite de colocación del aparejo en la forma tradicional. En caso de que la zona de disparos quede por arriba de la bomba, se requiere una instalación especial; consistente en una camisa de recubrimiento a lo largo del aparejo, para obligar a que los fluidos pasen por la parte externa del motor y lo enfríen.

2.1.4 Datos complementarios:

Otra información no perteneciente al yacimiento ni al pozo, pero necesaria para el diseño del aparejo, se refiere al voltaje disponible del suministro de energía que conduce a la selección de los transformadores y de otros componentes eléctricos. El ciclaje (Hz) de la corriente, que gobierna la velocidad del motor y el rendimiento de la bomba. El tamaño y tipo de rosca para elegir la válvula de contrapresión, la de drene, la extensión de la mufa y la bola colgadora.

Para cada aplicación se tiene una situación individual debido a las condiciones variantes del pozo y del fluido que se va a bombear.

2.2. FACTORES QUE AFECTAN EL DISEÑO DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO.

El diseño de instalaciones de bombeo electrocentrífugo sumergido, se ve invariablemente afectado por diversos factores que deben considerarse en forma metódica, debido a su influencia sobre la selección final de las dimensiones de la bomba y del motor que se requieren para cumplir con el objetivo de producción. Por su importancia, dichos factores se comentan a continuación^{1,2}.

2.2.1 Capacidad de flujo del pozo:

Este parámetro obtenido de la prueba de producción, permite diseñar la bomba asegurando que el rango de gasto en el que opere, esté cerca de su máxima eficiencia. De otra manera, si la capacidad de la bomba excede a la aportación del pozo, se puede alcanzar la condición de bombeo en vacío; en consecuencia, el motor se sobrecalienta hasta que su aislamiento falla y se quema.

Los fabricantes de bombas sumergibles señalan que éstas operan adecuadamente con 220 lb/pg² en la succión, si el fluido que se bombea es líquido. Cuando en las proximidades de la succión existe gas libre, es necesario considerar cuidadosamente qué cantidad de éste tolera la bomba, sin que su comportamiento se aparte del indicado en sus curvas características. La magnitud de esa cantidad puede ser variable de acuerdo con el fabricante, se expresa como un porcentaje del gasto total de fluidos que ingresa a la bomba y se recomienda un rango de 10 a 15%, como máximo.

2.2.2 Geometría de flujo:

El estado mecánico del pozo es parte de esta geometría que incluye el diámetro de la tubería de producción, mismo que está relacionado con el tamaño de la bomba. Dicho diámetro, se selecciona para manejar apropiadamente el gasto que se desea producir, ya que influye sobre las pérdidas de presión desde la bomba hasta la superficie.

2.2.3 Gas libre en la bomba:

La presencia de gas libre a la profundidad de colocación del aparejo, representa el mayor problema para dimensionar el equipo adecuado y producir efectivamente un pozo. La bomba se comporta a su más alta eficiencia cuando se bombean únicamente líquidos y aunque puede bombear gas libre, su presencia en exceso es causa de una operación ineficiente.

Si la producción del pozo tiene gas asociado, entonces, entre el nivel dinámico del fluido y el fondo, existe un rango de combinaciones de líquido y gas con diferentes densidades, mismas que influyen significativamente sobre la capacidad requerida para la bomba y su profundidad de colocación. Para el cálculo de estos dos parámetros, es imposible afirmar que cualquier criterio sea siempre el mejor, debido a que los datos de pozo no son siempre de la misma confiabilidad.

Como regla general, la mayoría de las instalaciones de bombeo electrocentrífugo impulsan a los fluidos por la tubería de producción, sin empacador en el pozo. Esto significa que el gas libre se puede desviar al espacio anular, o pasar a través de la bomba.

El funcionamiento de la bomba y del motor, se ven afectados por la cantidad de gas libre que pasa a través de la bomba, en este punto, una mayor cantidad total de gas libre y en solución tiene efectos benéficos debido a que disminuye el peso de la columna hidráulica en la tubería de producción y reduce la demanda de potencia al motor, pero la bomba necesita manejar un gasto mayor. Es decir, el requisito de capacidad volumétrica de la bomba se incrementa, conforme aumenta la relación gas libre-líquido que debe manejar. Cuanto más gas está en solución al entrar a la bomba, su comportamiento es más fiel al señalado en sus curvas características. Por el contrario, se aparta de dicho comportamiento mientras la relación gas libre-líquido se incrementa. Algunas formas prácticas para resolver el problema del gas libre a la profundidad de colocación de la bomba, son:

- a) Colocar la bomba de manera que la presión de succión sea superior a la presión de saturación. Entonces no existe gas libre en la entrada de la bomba y el gasto que se maneja es simplemente la producción de aceite a condiciones superficiales, multiplicado por su factor de volumen a condiciones de escurrimiento, más el gasto de agua si la hay. Esto puede hacerse únicamente si la profundidad a la que ocurre la presión de saturación, se presenta arriba del extremo inferior de la sarta de producción.
- b) Colocar la bomba de manera que la presión de succión sea inferior a la presión de saturación. Esto tiene la ventaja de acortar la longitud de la tubería de producción, la del cable conductor y en consecuencia un menor costo. Sin embargo, el gasto que la bomba maneja es igual al del aceite, más el del gas libre que pasa a través de la bomba, ambos medidos a condiciones de escurrimiento, más el gasto de agua si la hay. Conforme la bomba se coloca más arriba en el pozo, la cantidad de gas libre se incrementa y debe tenerse cuidado de que el flujo que llega a la succión no tenga una relación gas-líquido más alta de la que la bomba es capaz de tolerar.

2.2.4 Separación de gas:

El separador de gas desvía parte del gas libre de la succión de la bomba hacia el espacio anular. Una pregunta que actualmente se tiene sin responder en el bombeo electrocentrífugo sumergido, es: ¿Cómo determinar el volumen de gas libre posible de separar a la profundidad de colocación del aparato?. Esto se debe a que no existe un método analítico ni empírico para calcular la eficiencia con la que trabaja el separador. En su lugar sólo se tienen cifras que varían de un fabricante al otro y se considera que no pueden ser utilizados como fijas, ya que posiblemente dependen de las condiciones de bombeo específicas de cada pozo. Por esta razón, es recomendable proceder con reserva cuando se afirma que se puede separar hasta el 90% del gas libre y en cambio utilizar una cifra conservadora, que en el mejor de los casos no supere el 50%.

2.2.5 Pozos desviados:

Las bombas sumergibles están diseñadas para operar generalmente en una posición vertical, pero pueden trabajar en pozos desviados y aún en posición aproximada a la horizontal, cuando sea necesario, con el requisito de que la flecha no esté forzada o flexionada. El límite de desviación de la vertical, lo establece la capacidad de la unidad para mantener la separación entre el aceite lubricante del motor y el fluido del pozo, lo cual incumbe al fabricante y depende del tipo de protector utilizado. Para unidades diseñadas con una barrera flexible entre el aceite del motor y el del fluido del pozo, el límite de desviación cambia.

2.2.6 Empacadores:

La forma preferente de instalar un aparato de bombeo electrocentrífugo sumergido, es sin empacador, de manera que queda colgando de la tubería de producción. La colocación de un empacador significa una instalación especial, ya que éste debe permitir el paso del cable de potencia al motor. Si el empacador se requiere en el pozo, su selección se hace cuidadosamente, de modo que la bomba tenga sobre sí muy poco peso o nada de peso a compresión. Por ejemplo, teniendo en cuenta que cuando la bomba empieza a mover grandes volúmenes de líquidos calientes, la tubería de producción se alarga y ejerce compresión sobre la bomba si no se hacen los ajustes necesarios. En este caso un empacador permanente utilizando sellos de tipo largo, trabajaría satisfactoriamente. En resumen, si se requiere del uso de empacadores, úsese uno que pueda colocarse sin que la bomba o tubería de producción queden sujetas a compresión.

2.2.7 Efectos viscosos:

La viscosidad afecta el comportamiento de las bombas centrífugas, disminuyendo su capacidad de carga, reduciendo la eficiencia y haciendo que la más alta eficiencia ocurra a un gasto menor. Para cualquier bomba, el efecto de viscosidad sobre la carga que produce, es mayor a más altos gastos. Las curvas de comportamiento que publican los fabricantes para cada bomba se basan en pruebas realizadas con agua, de manera que es necesario ajustar las curvas para fluidos de más alta viscosidad. La cantidad de ajuste varía entre bombas. Aquéllas con pasajes de flujo más pequeños generalmente se afectan más por la viscosidad alta.

2.2.8 Temperatura:

La temperatura de fondo es importante para la instalación de aparejos de bombeo electrocentrífugo sumergido, porque es uno de los factores de control en la selección del cable conductor. Los cables disponibles en el mercado trabajan exitosamente a 350 °F o más, y son más costosos conforme su temperatura de operación sea mayor. La temperatura también afecta al motor aunque la bomba no se coloque en el fondo, debido a que un alto ritmo de producción mueve a los fluidos rápidamente hacia el aparejo, acarreado al motor una temperatura más alta que la existente bajo condiciones estáticas. Una temperatura más alta en el motor acorta su vida esperada. Por ejemplo, por cada 18 °F de exceso en la temperatura de operación, por arriba del rango del aislamiento del motor, la vida de éste se reduce en un 50%. La temperatura a la profundidad del aparejo operando, debe conocerse para determinar el volumen total de fluidos que entra a la bomba, especialmente para manejo de gas libre.

2.2.9 Operación vs. condiciones de descarga:

En la selección final de la potencia para el motor, es necesario tomar en cuenta que la demanda en Hp para la operación de producción, puede ser menor que la requerida en Hp para la descarga del pozo. Por ejemplo, si el pozo tiene salmuera como fluido de control, la potencia requerida para condiciones estables de operación, puede ser mucho menor que la potencia inicial requerida para la descarga. En ocasiones puede ser válido promediar entre ambos requerimientos de Hp, teniendo en mente que el motor puede sobrecargarse cuando mucho un 20% por un período corto de tiempo, necesario para descargar el pozo. Esto siempre debe verificarse al finalizar el diseño para asegurar la descarga del pozo. Una alternativa para equilibrar esta situación de demanda de potencia inicial y de operación, es realizar la descarga a un gasto menor que el de operación.

2.2.10 Selección del aparejo:

Una vez considerados los factores mencionados, en forma complementaria para la selección de la bomba y del motor, se recomienda la observación cuidadosa de las siguientes acciones:

1. Es importante que la bomba se seleccione para manejar el gasto deseado, dentro de la capacidad de producción del pozo. Cada bomba tiene su propio rango de gasto dentro del que es más eficiente y está menos sujeto a desgaste mecánico. La información confiable del yacimiento y de una prueba de producción ayuda a evitar el dimensionamiento equivocado de la bomba, lo que resultaría en una instalación ineficiente.
2. Las dimensiones de la bomba deben ser tales que impriman a los fluidos, la energía necesaria para elevarlos del fondo a la superficie, manteniendo la presión requerida en la cabeza del pozo. Para lograrlo, siempre es importante que el número de etapas en la bomba sea el correcto. Nuevamente la información confiable es de utilidad.
3. El tamaño del motor se elige de manera que la potencia satisfaga los requerimientos para impulsar el número de etapas, considerando la eficiencia de éstas, su capacidad de carga y el gasto que la bomba maneje, a la profundidad de colocación del aparejo.

Por lo que se refiere al resto de los componentes del aparejo, éstos siempre quedan ajustados a las dimensiones de la bomba y del motor, seleccionados en la siguiente forma:

El número de serie del protector y del separador de gas debe ser el mismo que el de la bomba. El diámetro de la tubería de producción es función del gasto a manejar y a su vez, las dimensiones de los accesorios son función de dicho diámetro. El tamaño de cable se elige de acuerdo a los requisitos de voltaje del motor, como consecuencia se determina el voltaje necesario en la superficie y las características electro-mecánicas que deben tener los dispositivos que se instalen en el tablero de control. Así mismo, el voltaje superficial requerido, conduce a elegir el tamaño de transformador o transformadores que permitan cubrir la demanda de corriente, para asegurar la operación satisfactoria de la instalación de bombeo electrocentrífugo sumergido.

2.3 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE INSTALACIONES DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO.

El diseño de instalaciones de bombeo electrocentrífugo sumergido, es simple cuando se han entendido los fundamentos básicos del funcionamiento del equipo sumergible y la influencia de los factores que afectan su comportamiento.

Por su grado de complejidad desde el punto de vista de diseño, la instalación más simple es para pozos productores de agua, debido a que no pasa gas libre a través de la bomba. La siguiente más simple es para pozos con baja relación gas-aceite, donde el gas libre puede o no pasar a través de la bomba. La tercera, es para pozos que producen bastante gas, de manera que una porción o todo el gas libre debe bombearse. Finalmente están las aplicaciones especiales para bombeo de fluidos viscosos, medio ambiente agresivo y otros factores.

El procedimiento de cálculo es general para los cuatro tipos de instalaciones mencionadas, pero para cada una se requieren modificaciones en algunos pasos del proceso. Estos casos serán oportunamente señalados conforme se avance en el grado de complejidad.

2.3.1 Carga dinámica total:

Para introducir al lector en el detalle del diseño, se considera conveniente definir el concepto denominado:

“Carga dinámica total (CDT)”.- Es simplemente la carga total que la bomba genera cuando está bombeando el gasto deseado. Dicha carga, expresada como longitud de columna hidráulica, es la diferencia entre la presión que la bomba entrega en su salida y la presión existente en la succión³.

Más específicamente, cuando se bombea un líquido sin gas, la carga dinámica total es la suma de:

$$CDT = \left[\begin{array}{c} \textit{Profundidad de} \\ \textit{colocación de} \\ \textit{la bomba} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \textit{Presión en} \\ \textit{la cabeza} \\ \textit{del pozo} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \textit{Pérdidas de} \\ \textit{presión por} \\ \textit{fricción} \end{array} \right] - [\textit{Sumergencia}]$$

Es decir, la carga dinámica total se define como la profundidad de colocación de la bomba, más la presión requerida en la cabeza del pozo, más las pérdidas de presión por fricción en la tubería de producción, menos la sumergencia; todos los términos expresados en unidades de longitud de columna hidráulica. Estos cálculos pueden hacerse utilizando la carga de columna hidráulica como unidad de presión debido a que la densidad del fluido es la misma a través de todo el sistema de bombeo.

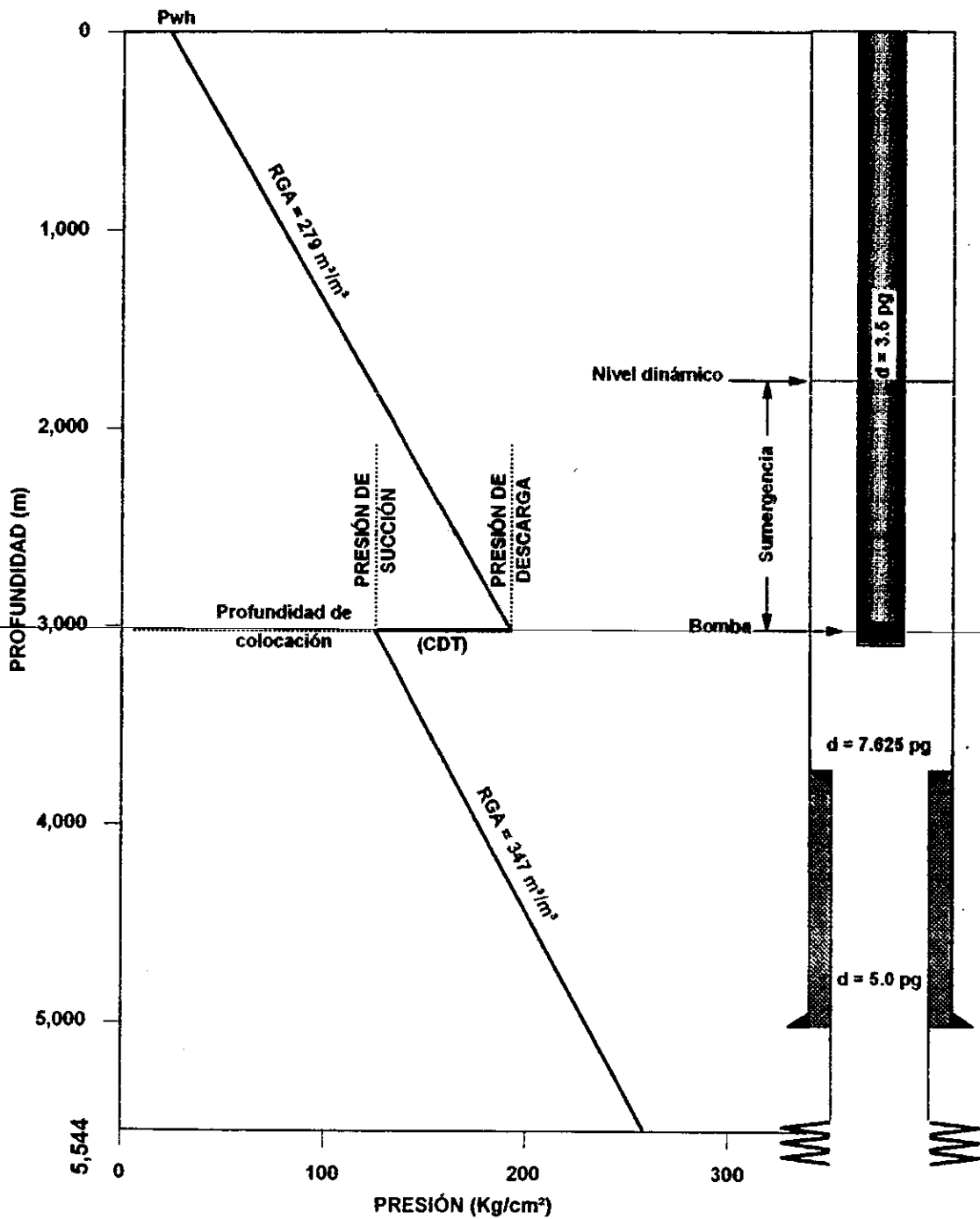


FIG. 19. GRADIENTES DE PRESIÓN FLUYENDO CON APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO

La sumergencia se define como la longitud de columna hidráulica existente en el espacio anular, desde el nivel dinámico del fluido hasta la profundidad de colocación de la bomba. Entonces al hacer referencia al término "Elevación neta", debe entenderse que es la diferencia entre la profundidad de colocación de la bomba y la sumergencia.

Con frecuencia para propósitos de diseño, la presión requerida en la cabeza del pozo para transportar el flujo a través de la línea superficial, es reemplazada con las pérdidas de presión por fricción y diferencias de elevación en dicha línea.

Ejemplo para el cálculo de CDT²:

Presión requerida en la boca del pozo	P _{wh} = 200 lb/pg ² .
Profundidad de colocación de la bomba	P _{cb} = 10,570 pies.
Tubería de producción	φ _{T.P.} = 2 ⁷ / ₈ pg.
Gasto	q = 1,600 bl/día.
Fluido bombeado	30% agua con ρ _{rw} = 1.05 70% aceite con ρ _{ro} = 0.804
	ρ _m = 54.79 lb _m /pie ³ .

Fluido por arriba de la bomba 650 pies.

Solución :

Presión en la cabeza del pozo expresada en columna hidráulica:

$$P_{wh} = 200 \frac{lb}{pg^2} * \frac{144 pg^2}{54.79 \frac{lb}{pie^3}} = 526 \text{ pies}$$

Pérdidas de presión por fricción en 10,570 pies de T.P.:

De la fig. 20, para el diámetro correspondiente, se tienen pérdidas de 20.5 pies por cada 1,000 pies de tubería.

$$\Delta P_f = 10,570 \text{ pies} * \frac{20.5 \text{ pies}}{1,000 \text{ pies}} = 217 \text{ pies}$$

Carga dinámica total (CDT):

$$CDT = 9,920 + 217 + 526 = 10,663 \text{ pies}$$

2.3.2 Número de etapas:

Con el valor de CDT determinado y utilizando el dato de capacidad de carga leído en la gráfica de curvas características de la bomba seleccionada, el número de etapas (NE) requerido para impulsar la producción hasta la superficie, se calcula con la fórmula:

$$NE = \frac{\text{Carga Dinámica Total (pies)}}{\left(\frac{\text{Carga}}{\text{etapa}}\right) (\text{pies})}$$

Como el ejemplo, con referencia a la fig. 21, si se supone que la carga dinámica total es de 5,000 pies y el gasto que se va a bombear es de 2,100 bl/día; la capacidad de carga se encuentra entrando a la gráfica de la bomba con 2,100 bl/día de gasto, moviéndose verticalmente a la curva de capacidad de carga y leyendo en la escala de la izquierda, la carga por etapa es de 19.7 pies. Por cada 100 etapas es de 1970 pies.

Entonces el número de etapas es:

$$NE = \frac{5,000 \text{ pies}}{19.7 \frac{\text{pies}}{\text{etapa}}} = 254 \text{ etapas}$$

2.3.3 Potencia requerida:

El cálculo de la potencia necesaria para impulsar el número de etapas calculado, se determina multiplicando NE, por el valor leído en la gráfica. El resultado de este producto, se aplica únicamente si el fluido bombeado es agua dulce con densidad relativa de 1.0. En caso contrario, dicho producto debe afectarse por la densidad relativa (ρ_r) o por la densidad relativa promedio (ρ_{rm}) del fluido que se trate. Entonces la demanda de potencia es:

$$Hp = \frac{Hp}{\text{etapa}} * \text{Total de etapas} * \rho_r$$

Nuevamente empleando la misma figura anterior y suponiendo que la densidad relativa del fluido bombeado es 1.0, la potencia se encuentra entrando a la gráfica con 2,100 bl/día de gasto, moviéndose verticalmente a la curva de potencia y leyendo en la escala derecha correspondiente, la potencia por etapa es de 0.435 Hp. Por cada 100 etapas de 43.5 Hp.

$$Hp = 0.435 \frac{Hp}{\text{etapa}} * 254 \text{ etapas} * 1.0 = 110 \text{ Hp}$$

Basada en la Fórmula de Williams y Hazen
 Tubería Nueva - Cédula 40
 Tubería Usada - Cédula 40 - 10 años de uso

LÍQUIDO = AGUA

$\rho_f = 1.0$

TEMPERATURA = 100 °F

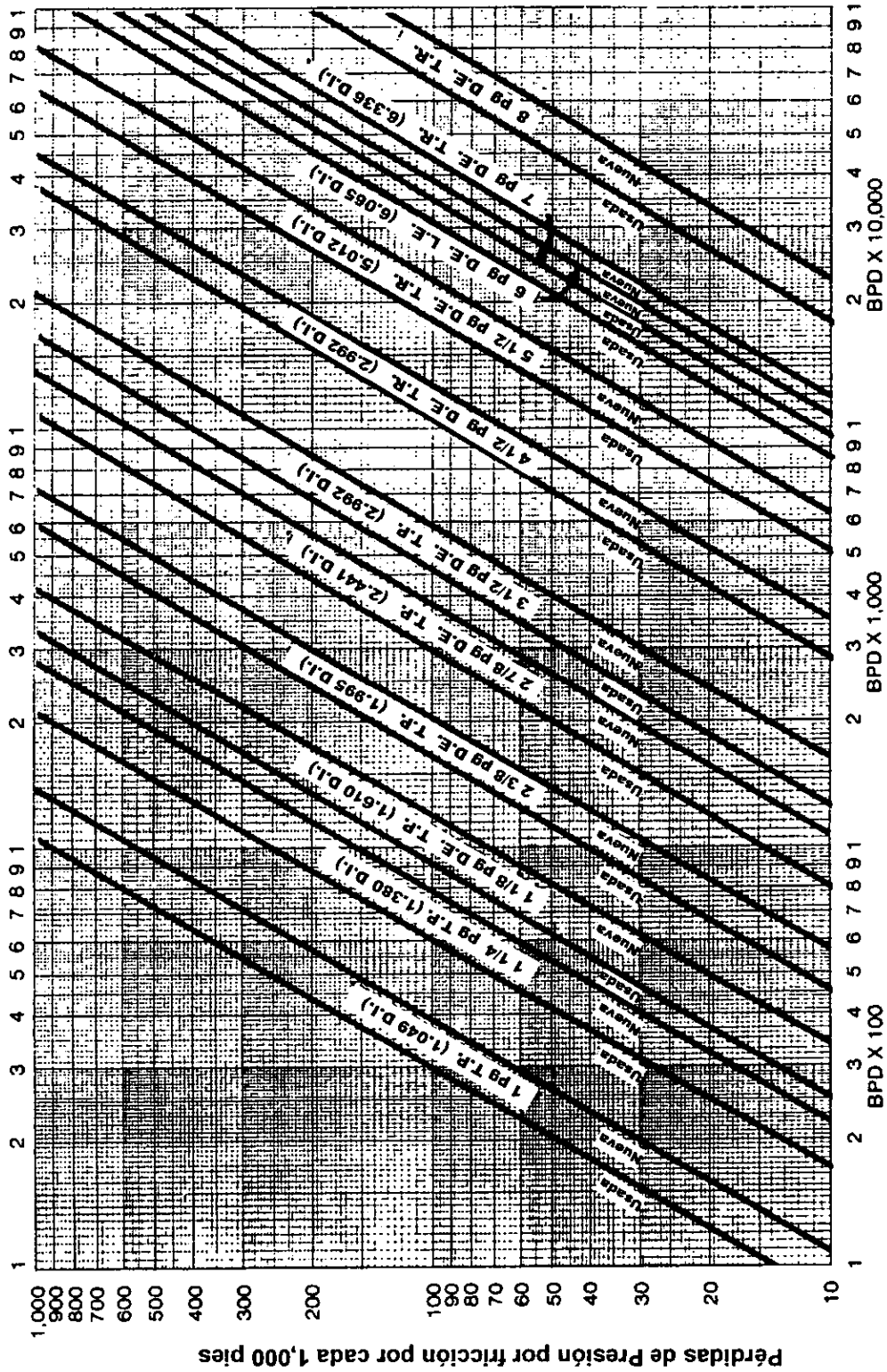


FIG. 20. PÉRDIDAS DE CARGA DEBIDA A FRICCIÓN EN TUBERÍAS A.P.I.

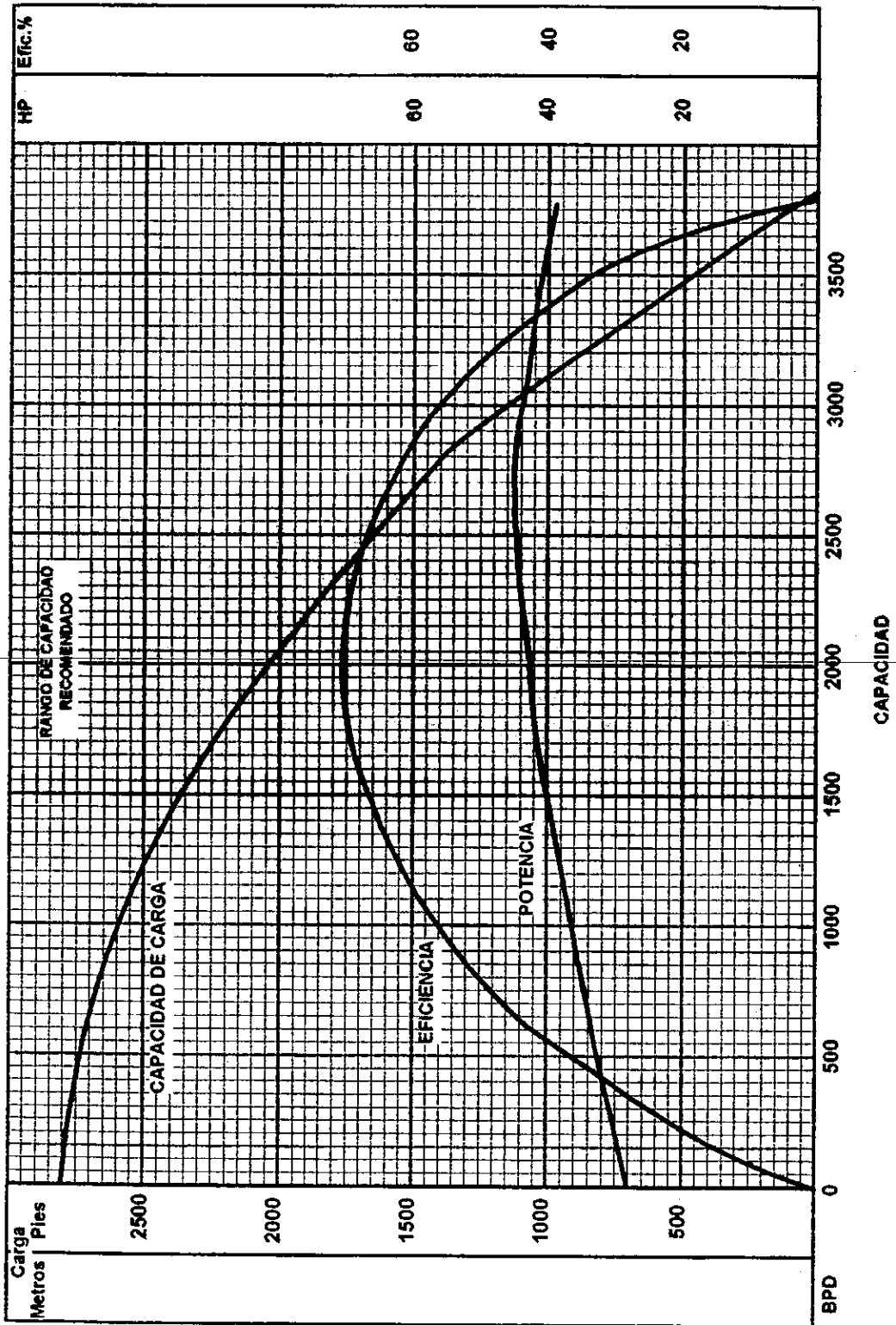
FUENTE: CATALOGO CENTRILIFT, A BAKER HUGES COMPANY, ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMPS & EQUIPMENT, ENGINEERING DATA, 1991

FIG. 21. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA

TRW REDA PUMP Co.
Bartlesville, Oklahoma
Abril 1977

100 ETAPAS - DXX - 60 Hz
SERIE 400 - 3500 RPM

Tamaño Mínimo de
T. R. 5 1/2" D. E.



2.4 DETALLE DEL DISEÑO DE INSTALACIONES DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO^{1,2}.

1. Recopilar y analizar la información del pozo: Prueba de producción, tipo de fluidos, estado mecánico y datos complementarios.
2. Determinar la capacidad de producción del pozo a la profundidad de colocación de la bomba, o determinar la profundidad de colocación de la bomba para el gasto deseado. Esto incluye el cálculo de la presión en la succión y en la descarga de la bomba, y del gasto de fluidos que se va a bombear, para obtener en la superficie el volumen de líquido deseado a condiciones de tanque.
3. Calcular la carga dinámica total.
4. De acuerdo con los datos de los pasos anteriores, elegir el grupo de gráficas de curvas características de las bombas (Apéndice B), que pueden introducirse en la T.R. del pozo y seleccionar la de la bomba que tenga la más alta eficiencia para el gasto que se va a bombear.
5. Para la bomba seleccionada, calcular el número de etapas requerido que permita desarrollar la carga dinámica total necesaria y producir el gasto deseado.
6. Determinar la demanda de potencia para el motor. De acuerdo con esta potencia, seleccionar del Apéndice C, un motor adecuado al ciclaje manejado y a la potencia requerida.
7. Seleccionar el tamaño y tipo de cable más económico a partir de los datos técnicos disponibles. En el Apéndice D, aparece la información necesaria y se ejemplifican algunas alternativas de selección.
8. Determinar la pérdida de voltaje a lo largo del cable y el voltaje superficial requerido. Este último valor establece el tamaño del tablero de control. Nuevamente se hace referencia a la información del Apéndice D; donde se ejemplifica este cálculo y la selección del tablero de control.
9. Calcular los requerimientos de Kva (kilovatios-amperes), a fin de dimensionar los transformadores. En el Apéndice D, se presenta un ejemplo.
10. Seleccionar los accesorios necesarios tales como:
 - Tamaño y tipo del cabezal para la tubería de producción
 - Equipo de servicio requerido para realizar la instalación.
 - Equipo opcional.

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

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

Aparte del procedimiento anterior, en los problemas resueltos se presentan algunos detalles importantes para el diseño, los cuales deben ser tomados en cuenta para la solución de algunos problemas en particular.

2.4.1 Ejemplo de diseño de aparejos de bombeo electrocentrífugo para un pozo productor de agua^{1,2}.

1) Recopilar y analizar información:

a) Prueba de producción:

Nivel estático del fluido	NEF = 500 pies.
Índice de productividad	IP = 10 bl/día/pie.
Gasto deseado	q = 10,000 bl/día.
Temperatura a 2,050 pies	T _{wf} = 120 °F.

b) Tipo de Fluidos:

Agua con densidad relativa	ρ_{rw} = 1.1
----------------------------	-------------------

c) Estado mecánico:

Tubería de revestimiento	$\phi_{T.R.}$ = 8 ⁵ / ₈ pg D. E.
Tubería de producción	$\phi_{T.P}$ = 5 ¹ / ₂ pg D. E. (nueva).
Profundidad total	PT = 2,200 pies.
Intervalo disparado	=1,900-2,200 pies.

d) Datos complementarios:

Fuente de potencia	= 12,500 volts.
Línea superficial	= 2,000 pies, 4 pg. 30 pies de elevación.

Seleccionar la bomba electrocentrífuga sumergible adecuada y el equipo relacionado con la misma.

2) Determinar la capacidad de producción del pozo:

En este caso particular, para obtener el gasto deseado, se calcula la longitud de columna hidráulica que es necesario abatir a partir del nivel estático y se determina el nivel dinámico. Éste debe ser menor que la profundidad de los disparos:

$$Col.Hidr. = \frac{q}{J} = \frac{10,000}{10} = 1,000 \text{ pies}$$

$$ND = NEF + Col. Hidr. = 500 + 1,000 = 1,500 \text{ pies}$$

La profundidad del nivel dinámico, implica que para mantener a la bomba sumergida en el fluido bombeado, y con una presión en la succión de 200 lb/pg², debe colocarse más abajo, en este caso la sumergencia y la profundidad de colocación de la bomba, son:

$$Sumergencia = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{0.433 * 1.1} = 420 \text{ pies}$$

$$0.433 = \text{Gradiente del agua} \left(\frac{\text{lb/pg}^2}{\text{pie}} \right)$$

$$Prof. coloc. = 1,500 + 420 = 1,920 \text{ pies}$$

3) Calcular la carga dinámica total requerida para producir 10,000 bl/día.

Presión en la cabeza expresada en columna hidráulica:

$$P_{wh} = \left[\begin{array}{c} \text{Componente elevación} \\ \text{línea superficial} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Pérdidas por fricción en} \\ \text{línea horizontal} \\ \text{Apéndice A, fig. A1} \end{array} \right]$$

$$P_{wh} = 30 \text{ pies} + \frac{55 \text{ pies}}{1,000 \text{ pies}} * 2,000 \text{ pies} = 140 \text{ pies}$$

Pérdidas de presión por fricción en 1,920 pies de T.P.:

Del Apéndice A, fig. A1, para 10,000 pies en T.P. de 5 pg, se tienen 18.5 pies/1,000 pies.

$$\Delta P_f = (18.5) (1.92) = 35.52 \text{ pies}$$

Elevación neta:

$$1,920 - 420 = 1,500 \text{ pies}$$

Carga dinámica total:

$$CDT = 140 + 3552 + 1,500 = 1,675.52 \text{ pies}$$
$$\approx 1,676 \text{ pies}$$

4) Seleccionar la bomba adecuada:

Elección del grupo de gráficas para T. R. de $8^{5/8}$ pg y selección de la bomba con más alta eficiencia para 10,000 bl/día:

Selección de la bomba Reda I-300, con un rango de capacidad de 8,000 a 11,500 bl/día. Apéndice B.

5) Determinar el número de etapas requeridas:

De la gráfica seleccionada, para 10,000 bl/día, se leen 5,950 pies de columna hidráulica por cada 100 etapas de la bomba; entonces, el número de etapas requerido es:

$$NE = \frac{1,676 \text{ pies}}{\frac{5950 \text{ pies}}{100 \text{ etapas}}} = 28.17 \text{ etapas}$$
$$\approx 28 \text{ etapas}$$

6) Demanda de potencia para el motor:

De la gráfica seleccionada, para 10,000 bl/día, se leen 5.85 Hp para cada 100 etapas de la bomba, con base a la densidad relativa de 1.0; entonces, la potencia requerida es:

$$Hp = 5.85 * 28 * 1.1 = 180 \text{ Hp}$$

Esta potencia es para condiciones estables de producción y debe tenerse en cuenta la potencia adicional necesaria para propósitos de descarga. Del Apéndice C, se selecciona un motor de 60 Hz, serie 400, de 200 Hp, 1,160 volts y 105 amperes.

7) Seleccionar el tamaño y tipo de cable:

De acuerdo con la información del Apéndice D y considerando que el motor requiere de 105 amperes, el cable seleccionado es el # 1 con conductores de cobre y aislamiento de polietileno. Si se tiene suficiente espacio elija cable redondo.

- 8) Determinar las pérdidas de voltaje a lo largo del cable, el voltaje superficial requerido y seleccionar el tablero de control apropiado.

Del Apéndice D, fig. D1, la pérdida de voltaje en el cable de cobre # 1, es de 24.5 volts por cada 1,000 pies de longitud. Como la temperatura de fondo es diferente a 77 °F, se requiere del factor de corrección, para las pérdidas de voltaje a 120 °F, Apéndice D, fig. D2, que es de 1.09; entonces, la pérdida de voltaje es:

$$\frac{24.5 \text{ volts}}{1,000 \text{ pies}} * 1.09 = \frac{27 \text{ volts}}{1,000 \text{ pies}}$$

Para calcular la pérdida de voltaje total, se considera la longitud del cable, hasta la profundidad de colocación de la bomba, más 100 pies de cable para conexiones superficiales, entonces:

$$(1,920 + 100) \text{ pies} * \frac{27 \text{ volts}}{1,000 \text{ pies}} = 55 \text{ volts}$$

Por lo que, el voltaje superficial que se requiere para alimentar al motor en el fondo del pozo es:

$$1,160 \text{ volts} + 55 \text{ volts} = 1,215 \text{ volts}$$

Una buena regla aplicable en el concepto de pérdidas de voltaje es: “Las pérdidas en el transformador son el 2.5% del voltaje necesario”. Por lo tanto, el voltaje total requerido es:

$$V_s = 1,215 \text{ volts} + (1,215 \text{ volts} * 2.5\%) = 1,245 \text{ volts}$$

Finalmente, para este voltaje requerido y para el rango de potencia que maneja el motor (200 Hp), de acuerdo con las recomendaciones dadas en el Apéndice D, el tablero de control seleccionado es el de 1,500 volts.

- 9) Calcular los requerimientos de Kva para dimensionar los transformadores. De acuerdo con la información del Apéndice D, se tiene:

$$Kva = \frac{V_s (\text{Amp}) (\sqrt{3})}{1,000} = \frac{1,245 * 105 * 1.73}{1,000} = 226 \text{ Kva}$$

Considerando los requerimientos futuros del transformador, se recomienda utilizar uno trifásico de 300 Kva, o tres transformadores de 100 Kva cada uno.

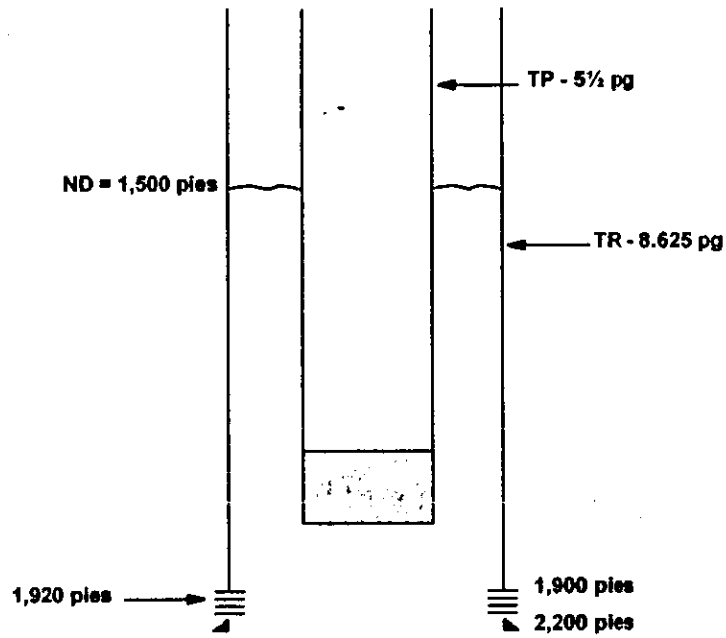


FIG. 22. DIAGRAMA DEL POZO DEL EJEMPLO 2.4.1

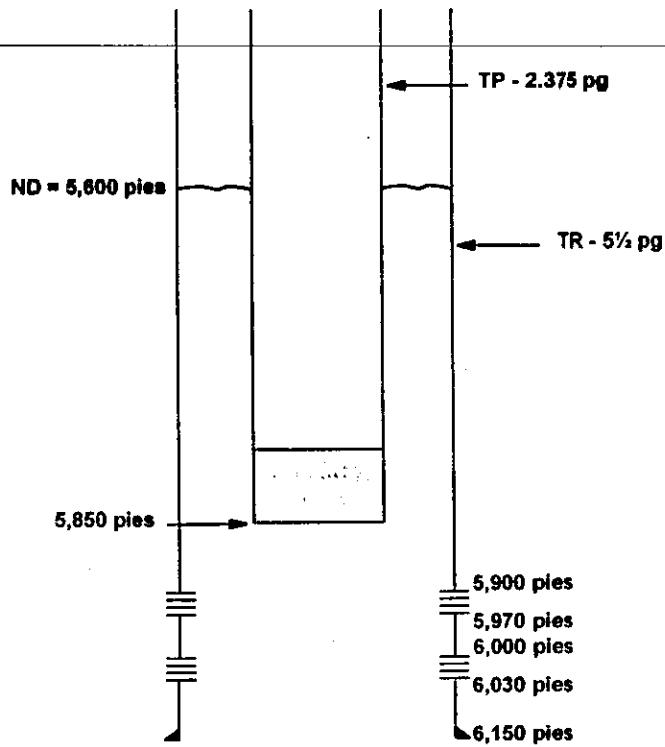


FIG. 23. DIAGRAMA DEL POZO DEL EJEMPLO 2.4.2

10) Selección de accesorios necesarios:

El tamaño del cabezal, válvulas de contrapresión y de drene, conexión de bomba a T.P., etc.; deben ser acordes al diámetro de la tubería de producción.

2.4.2. Ejemplo de diseño de aparjos de bombeo electrocentrífugo para un pozo productor de aceite sin gas libre^{1,2}.

El pozo produce con una baja relación gas-aceite y 15% de agua. Se supone que no pasa gas libre a través de la bomba o su cantidad es despreciable. El cálculo difiere del de pozos de agua, en que el volumen en la succión de la bomba es mayor al que se obtiene en la superficie, debido al factor de volumen de aceite.

1) Recopilar y analizar información:

a) Prueba de producción:

Presión de fondo estática	P_{ws}	= 2,000 lb/pg ² a 5,950 pies.
Presión de fondo fluyendo	P_{wf}	= 1,500 lb/pg ² .
Presión en la cabeza del pozo	P_{wh}	= 200 lb/pg ² .
Gasto	q	= 475 bl/día (85% aceite).
Relación gas-aceite	RGA	= 350 pie ³ /bl.
Temperatura de fondo	T_{wf}	= 170 °F.
Presión de burbujeo	P_b	= 2,000 lb/pg ² (empuje por gas en solución).

b) Tipo de fluidos:

Densidades: Aceite		= 30 °API.
relativa aceite	ρ_{ro}	= 0.876 (agua = 1.0).
relativa agua	ρ_{rw}	= 1.02
relativa gas	ρ_{rg}	= 0.75 (aire = 1.0).

Nota: El pozo produce fluidos corrosivos.

c) Estado mecánico:

Tubería de revestimiento	$\phi_{T.R.}$	= 5½ pg D. E.
Tubería de producción	$\phi_{T.P.}$	= 2¾ pg D. E. (nueva).
Intervalo disparado		= 5,900-5,970 pies. 6,000-6,030 pies.

d) Datos complementarios:

Sistema de potencia: Voltaje primario 7,200/12,470

Como requisito de diseño, se desea obtener el máximo gasto posible, manteniendo 300 lb/pg² de presión en la succión de la bomba, que equivale a colocarla a 5,850 pies; es decir, 50 pies arriba del intervalo disparado, lo que permite que el fluido del pozo pase por el exterior del motor y lo enfríe. Esto es muy razonable y se considera un diseño práctico, ya que para este tipo de aplicación, por experiencia se ha encontrado que con 300 lb/pg² en la succión, se desvía el gas libre al espacio anular y se tienen mejores condiciones de bombeo.

2) Capacidad de producción de pozo:

La presión estática se midió a 5,950 pies y la bomba se coloca a 100 pies más arriba, lo cual reduce ligeramente dicha presión medida. Para encontrar esta reducción es necesario conocer la densidad relativa promedio del fluido por abajo de la bomba:

El pozo produce 475 barriles de fluido en total, 15% de agua y 85% de aceite. La densidad relativa del aceite sin gas es de 0.876 y la del agua es de 1.02; entonces, la densidad relativa promedio, es:

$$\rho_{rm} = (0.876 * 0.85) + (1.02 * 0.15) = 0.89$$

Por lo que una columna hidráulica de 100 pies, en presión representa aproximadamente:

$$P_{100 \text{ pies}} = \frac{100 \text{ pies} * 0.89}{2.31 \text{ pies/lb/pg}^2} = 40 \text{ lb/pg}^2$$

Se desprecia el efecto del gas libre en la columna hidráulica y la presión estática a la profundidad de la bomba, se estima como:

$$P_{ws} \text{ a } 5,850 \text{ pies} = 2,000 - 40 = 1,960 \text{ lb/pg}^2$$

Ahora puede calcularse la capacidad de producción del pozo. Como se trata de un yacimiento con empuje por gas disuelto, se puede utilizar la curva de IPR de Vogel⁸ para determinar el volumen máximo disponible para bombear. A continuación se presenta un ejemplo para el uso de la curva IPR generalizada (fig. 18), y cómo calcular el volumen disponible para esta aplicación.

$$\frac{P_{wf}}{P_{ws}} = \frac{1,500}{2,000} = 0.75 \quad ; \quad \frac{475}{q_{o,mix}} = 0.40$$

$$q_{o,mix} = 1,188 \text{ bl/día}$$

$$\frac{P_{wf}}{P_{ws}} = \frac{340}{2,000} = 0.17 \quad ; \quad \frac{q_o}{1,188} = 0.94$$

$$q_o = 0.94 * 1,188 = 1,117 \text{ bl/día}$$

Es el gasto para $P_{wf} = 340 \text{ lb/pg}^2$ a la profundidad de medición (5,950 pies), la cual da 300 lb/pg^2 a la profundidad de succión de la bomba.

Como comparación entre el método de IPR y el de línea recta, en un yacimiento con empuje por gas disuelto, a continuación se calcula la capacidad de producción del pozo usando el método de línea recta.

$$IP = \frac{q}{P_{ws} - P_{wf}} = \frac{475}{2,000 - 1,500}$$

$$IP = 0.95 \text{ (bl / día / lb / pg}^2\text{)}$$

Para tener 300 lb/pg^2 en la succión de la bomba, la presión de fondo fluyendo a 5,950 pies, debe ser de 340 lb/pg^2 , por lo que:

$$\Delta P = P_{ws} - P_{wf} = 2,000 - 340 = 1,660 \text{ lb/pg}^2$$

El gasto correspondiente a P_{wf} es:

$$q = \Delta P * IP = 1,660 * 0.95 = 1,577 \text{ bl/día}$$

Como el empleo de este método, la capacidad de producción del pozo es optimista y posiblemente resulte una unidad sobrediseñada. La productividad del pozo se verifica después de que la unidad opere algún tiempo. Si la capacidad resulta mayor que la calculada, se puede instalar una unidad de más alto volumen o utilizar un controlador de velocidad variable para modificar las condiciones de bombeo.

Nótese que el volumen de $1,117 \approx 1,125 \text{ bl/día}$ está medido a condiciones de tanque y por lo tanto es necesario determinar el volumen que ingresa a la bomba, para obtener el volumen mencionado en la superficie. Existen datos suficientes para determinar el factor de volumen del aceite a la presión de 300 lb/pg^2 . (Correlación de Standing).

$$B_o = 1.075 \frac{m^3}{m^3}$$

El gasto de líquido a la profundidad de la bomba, es:

<i>Aceite</i>	$1,125 \text{ bl / día} * 0.85 * 1.075 = 1,028 \text{ bl / día}$
<i>Agua</i>	$1,125 \text{ bl / día} * 0.15 * 1.0 = 169 \text{ bl / día}$
<i>Total, gasto que ingresa a la bomba</i>	$= 1,197 \text{ bl / día}$

Supuestamente no pasa gas libre a través de la bomba.

3) Carga Dinámica Total:

- a) La presión en la boca del pozo es de 200 lb/pg², expresada como columna hidráulica con una densidad relativa promedio de 0.890 es:

$$Col. Hidr. = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{0.433 * 0.89} = 520 \text{ pies}$$

- b) Pérdidas de presión por fricción:

Datos: 5,850 pies de T.P.; 2³/₈ pg y 1,197 bl/día

Del Apéndice A, fig. A2, las pérdidas por fricción son de 37 pies/1,000 pies

$$\Delta P_f = 37 * 5.85 = 217 \text{ pies}$$

Use 235 pies de pérdidas de presión por fricción, para incluir la válvula de contrapresión y la de drene. NOTA: Las pérdidas en estos dispositivos son pequeñas comparadas con la carga dinámica total y pueden despreciarse, sin embargo considerar de 5 a 10 pies de pérdida en cada uno, es adecuado.

- c) Elevación neta:

Se requiere calcular el nivel dinámico del fluido cuando se tienen 300 lb/pg², en la succión de la bomba a 5,850 pies. Esta presión convertida a pies de columna hidráulica, es la sumergencia de la bomba:

Suponiendo que las 300 lb/pg², son de una columna de aceite y despreciando el gas

$$Sumergencia = \frac{300 \text{ lb/pg}^2}{0.433 * 0.89} = 780 \text{ pies}$$

$$Elevación neta = 5,850 - 780 = 5,070 \text{ pies}$$

Carga dinámica total:

$$CDT = 5,070 + 235 + 520 = 5,825 \text{ pies}$$

4) Tamaño y tipo de bomba:

La unidad debe instalarse en T.R. de 5½ pg D.E.; entonces, una bomba de la serie 400 con 4 pg D.E., es adecuada. Para el gasto de 1,227 bl/día, la gráfica de la bomba tipo D-40, Apéndice B, marca Reda, es la más eficiente y las M-34 y G-48, marca Centrífuga, también.

5) Número de etapas necesario:

La carga que desarrolla la bomba D-40 por cada etapa, es de aproximadamente 23 pies. Entonces:

$$NE = \frac{CDT}{\text{pies/etapa}} = \frac{5,825}{23} = 253 \text{ etapas}$$

6) Potencia del motor:

La potencia que se requiere para impulsar cada etapa de la bomba es de 0.35 Hp. Por lo tanto, la potencia total, es:

$$Hp = NE * \frac{Hp}{\text{etapa}} * \rho_{rm}$$

$$Hp = 253 * 0.35 * 0.89 = 79 \text{ Hp}$$

Un motor de la serie 456 (4.56 pg D.E.), se puede usar en el diámetro interior de la tubería de revestimiento. Del Apéndice C, se encuentra disponible un motor de 90 Hp, 1,250 volts y 45 amperes, el cual se considera una buena selección para esta aplicación.

NOTA: Este requerimiento de potencia es para el pozo en condiciones de operación. Si el pozo está controlado con salmuera o con fluido más pesado, el motor de 90 Hp estará sobrecargado aproximadamente un 10% mientras se expulsa el fluido de control. Esto debe tomarse en cuenta durante la descarga del pozo.

7) Cable:

Para seleccionar el cable se toma en cuenta la temperatura de fondo de 170 °F, el diámetro de T.R., la longitud de 5,850 pies de la T.P. y 100 pies más de conexiones superficiales, es decir 5,950 pies de cable.

Los 45 amperes del motor seleccionado, ajustan en el rango de la capacidad de conducción del cable # 4, conductor de cobre que es el tamaño más grande que puede usarse en la T.R. de 5½ pg. El cable 3 KV-Redalane-Estándar es la mejor elección para 170 °F. De acuerdo al voltaje, se puede usar el tablero de control de 1,500 volts, (Apéndice D).

Si se hubiera seleccionado el motor de 57 amperes, la capacidad de conducción del cable # 4 se aproxima a su límite. Si se seleccionara el motor de 1,500 volts, se requeriría un tablero de control de 2,400 volts y con un mayor costo.

El motor de 2,000 volts, podría seleccionarse usando el cable # 6 con el motor de 29 amperes, pero tendría que usarse el tablero de 2,400 volts y el cable # 6 necesitaría cambiarse posteriormente.

8) Pérdida de voltaje en el cable y voltaje superficial:

Considerando la longitud del cable y los requisitos del motor, se encuentra que la pérdida de voltaje para 45 amperes, con el cable # 4 a 170 °F, es de 24 volts por cada 1,000 pies de cable (Apéndice D), entonces el voltaje superficial requerido, es:

$$V_s = (24 * 5.95) + 1,250 = 1,393 \text{ volts} * 1.025 = 1,428 \text{ volts}$$

El 2.5% se considera pérdida en el transformador.

Un voltaje superficial de 1,425 a 1,450 volts, es apropiado para esta aplicación.

9) Cálculo de los requerimientos de Kva:

$$Kva = \frac{1,428 * 45 * 1.73}{1,000} = 111 \text{ Kva}$$

Utilizar tres transformadores de una sola fase, con 37 Kva cada uno, es apropiado.

NOTA: Los transformadores de 37.5 Kva son adecuados. Sin embargo, de acuerdo al Apéndice E y debido a la poca diferencia en el costo de los transformadores de 50 Kva, la recomendación es utilizar tres transformadores de 50 Kva.

10) Accesorios apropiados:

La tubería de producción es de 2³/₈ pg EUE 8RD y no se requiere extensión de la bomba (madrina), ya que ésta tiene cabezal de 2³/₈ pg EUE 8RD y se conecta directamente con T.P. La válvula de contrapresión y la de drene, se ordenan con las mismas especificaciones de diámetro y rosca. Así mismo, debe seleccionarse el cabezal de la tubería de producción (bola colgadora), para la presión de T.R. que se tenga anticipada.

11) Determinación de lo necesario para asegurar buena operación:

El pozo produce fluidos corrosivos, de manera que se toman precauciones para combatir este medio ambiente: 1) Cubiertas plásticas en el equipo, 2) Uso de guarcables o flejes de acero inoxidable o de monel para fijar el cable, 3) Cable plano con mufa resistente a la corrosión, 4) Tapones y pernos resistentes a la corrosión.

2.5 DISEÑO PARA POZOS CON PRODUCCIÓN DE GAS DE MEDIA A ALTA.

Los pozos candidatos a la instalación de un aparejo de bombeo electrocentrifugo sumergido, que representan mayor dificultad en el diseño, son los que producen con cantidades apreciables de gas, principalmente cuando éste se encuentra libre en las proximidades de la bomba. En estos casos, es necesario tomar en cuenta los efectos del fenómeno de flujo multifásico a través del sistema de bombeo^{1,2,9,10}.

La presión y temperatura de los fluidos varían continuamente durante su trayectoria desde el fondo del pozo hasta la superficie. Conforme la presión disminuye, la cantidad de gas que se libera aumenta progresivamente, a partir del punto en que se alcanza la presión de saturación. Por esta razón se debe poner especial atención en el cálculo de la profundidad a la que se coloca el aparejo. Si la cantidad de gas libre que ingresa a la bomba, es superior al 15% del volumen total, su funcionamiento se aparta del indicado en sus curvas características y se ve aún más afectado si se presenta el fenómeno de cavitación.

La densidad de la mezcla también varía con los cambios de presión y temperatura, lo que afecta sensiblemente a las caídas de presión en las tuberías y en consecuencia, influye sobre las dimensiones de la bomba y del motor.

El volumen de la mezcla de los fluidos que recibe la bomba, es invariablemente superior al que entrega, debido al incremento de presión que se le imprime desde la entrada hasta la salida. Tomar en cuenta este factor conduce a un diseño telescopiado, consistente en dos o más secciones de bombas con etapas de diferente capacidad volumétrica; donde cada sección, maneja con máxima eficiencia el volumen variable en el interior de la bomba. Esto se traduce en una reducción del número de etapas requerido.

Con el propósito de que dichos efectos sean debidamente considerados en el cálculo de: profundidad de colocación del aparejo, presiones en la succión y descarga de la bomba, y variación volumétrica en su interior; es recomendable la aplicación de alguna de las correlaciones para flujo multifásico siguientes: a) Orkiszewski¹¹, b) Hagerdorn & Brown¹², c) Poettman & Carpenter¹³, d) Beggs & Brill, e) Dun & Ros. Así mismo, para el cálculo de propiedades PVT se recomiendan las siguientes: para R_s , Lasater, Standing¹⁴, Vázquez & Beggs, o las desarrolladas para el Área Marina; para B_o , Standing, o Vázquez & Beggs; y para la viscosidad (μ), Beal-Chew & Conally, o en su caso, datos medidos.

La combinación de estas correlaciones que reproduzca con mejor aproximación los datos medidos de la prueba de producción, se elige para calcular los perfiles de presión fluyendo con aparejo de bombeo electrocentrifugo sumergido. En todos los casos se puede suponer que todo o un cierto porcentaje del gas libre se bombea.

En general, con referencia a la fig. 24, la solución consiste en calcular el perfil de presión ascendente a partir de la presión de fondo fluyendo correspondiente al gasto deseado, hasta encontrar un punto (A) donde la cantidad de gas libre no exceda el 15% del volumen total. Las coordenadas de dicho punto son la profundidad a la que se puede colocar el aparejo y la presión de succión en la bomba. Si se contempla instalar separador de gas, en los cálculos

se incluye su eficiencia; lo que resulta en una reducción de la profundidad y presión mencionadas. Este perfil se calcula con la relación gas-líquido (RGLN) que produce el pozo en forma natural.

A partir de la presión requerida en la cabeza del pozo, se calcula el perfil de presión descendente hasta intersectar la profundidad de colocación previamente determinada (B), a la que corresponde la presión en la descarga de la bomba. La diferencia de presiones entre los puntos B y A, es el incremento de presión que se requiere imprimir a los fluidos para hacerlos llegar hasta la superficie. Nuevamente, si se contempla instalar separador de gas, este perfil se calcula con la relación gas-líquido resultante de la cantidad de gas disuelto más gas libre que ingresa a la bomba.

Es importante hacer notar que el gasto deseado en la superficie está establecido a condiciones de tanque y es únicamente de líquidos, por lo que difiere considerablemente del gasto de fluidos que se bombea, fig. 25.

Con referencia a la fig. 26, iniciando con la presión en la succión, se suponen incrementos de presión iguales hasta la presión de descarga y se determina el gradiente de presión promedio en dichos incrementos, de los que puede determinarse la carga promedio correspondiente. A partir de estos incrementos de carga, para cada uno, se determina el número de etapas requerido para desarrollar dicha carga. El número total de etapas se obtiene sumando las etapas de cada incremento. Los requerimientos de Hp, se obtienen sumando las potencias calculadas para cada sección de la bomba; el diseño se termina con la selección de componentes y accesorios.

A continuación se presenta paso a paso el procedimiento de cálculo, considerando una mezcla homogénea en la bomba y que ésta puede desarrollar una carga concordante a cálculos de densidad sin resbalamiento. La temperatura a través de la bomba se supone constante debido a su corta longitud. Las propiedades de los fluidos se obtienen de análisis PVT, o se calculan mediante correlaciones.

2.5.1 Procedimiento de cálculo para pozos que producen gas^{1,2}.

1. Determinar la presión en la succión de la bomba.
2. Determinar la presión en la descarga de la bomba.

Los pasos 1 y 2 requieren del uso de una correlación de flujo multifásico.

3. Determinar el incremento de presión entre las presiones de succión y descarga, (ΔP_i).
4. Dividir dicho incremento en "n" partes iguales (P_i), tales que:

$$P_{succ} + P_i's = P_{desc}$$

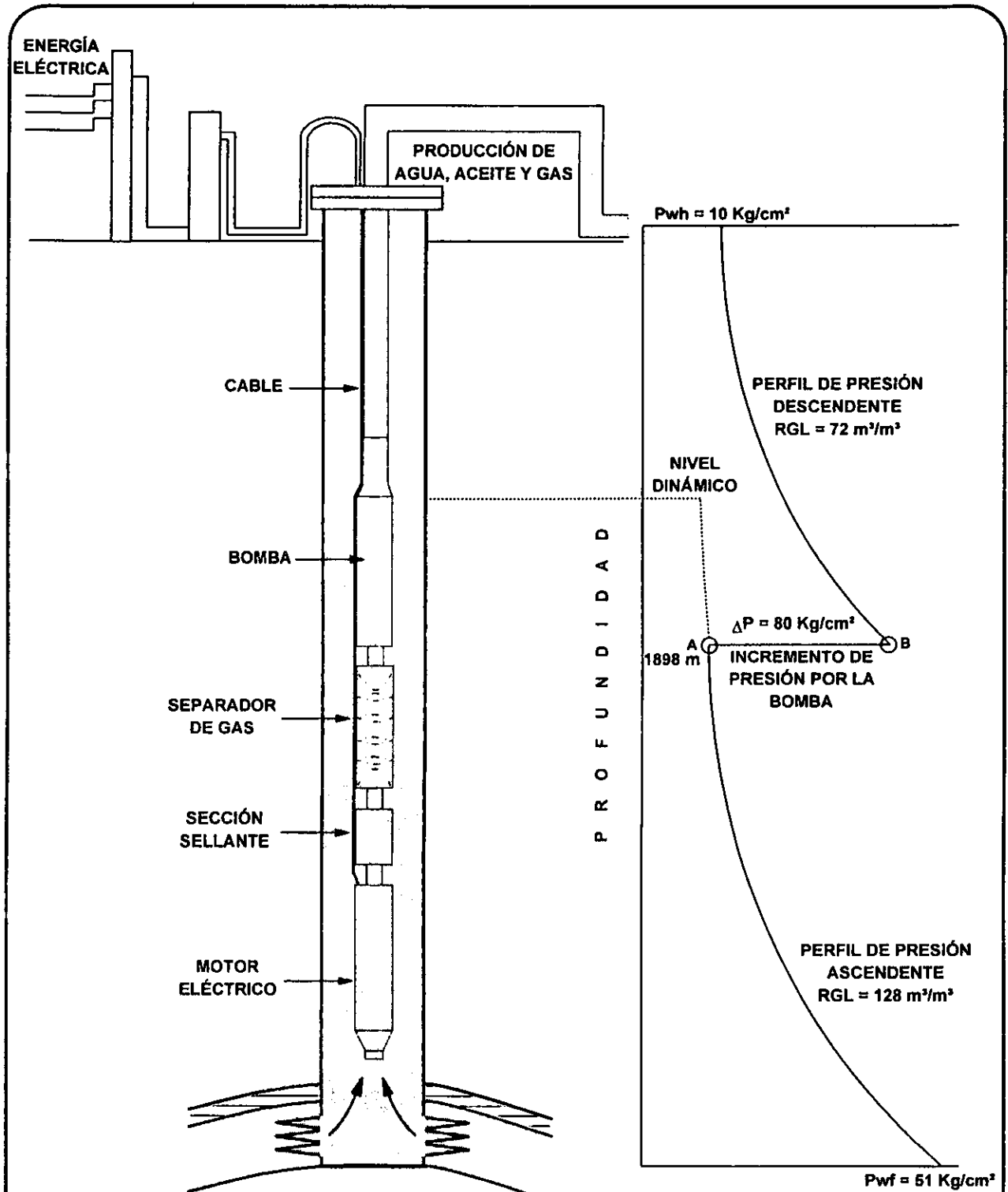


FIG. 24. DESARROLLO DE PROGRAMAS DE CÓMPUTO PARA DISEÑO DE INSTALACIONES DE APAREJOS DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO

5. Determinar la densidad de la mezcla en cada presión seleccionada, (ρ_m):
 - a) Encontrar el volumen de aceite, gas y agua en cada presión, (V_t).
 - b) Encontrar la masa del aceite, gas y agua en cada presión, (M).
 - c) Calcular la densidad:

$$\rho = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

6. Encontrar el gradiente de presión en cada presión señalada, (G_r).
7. Encontrar el gradiente de presión promedio entre las presiones señaladas, (G_{rp}).
8. Convertir los gradientes de presión promedio a pies de carga entre los incrementos de presión.
9. Encontrar el gasto total (q_t) en cada presión señalada.
10. Encontrar los gastos promedio entre las presiones señaladas (q_p).
11. Seleccionar la bomba para cada gasto promedio y obtener la carga (H_e) y Potencia (Hp_e) desarrolladas por etapa, en cada caso.
12. Determinar el incremento de presión desarrollado por etapa (ΔP_e):

$$\Delta P_e = (G_{rp} * H_e)$$

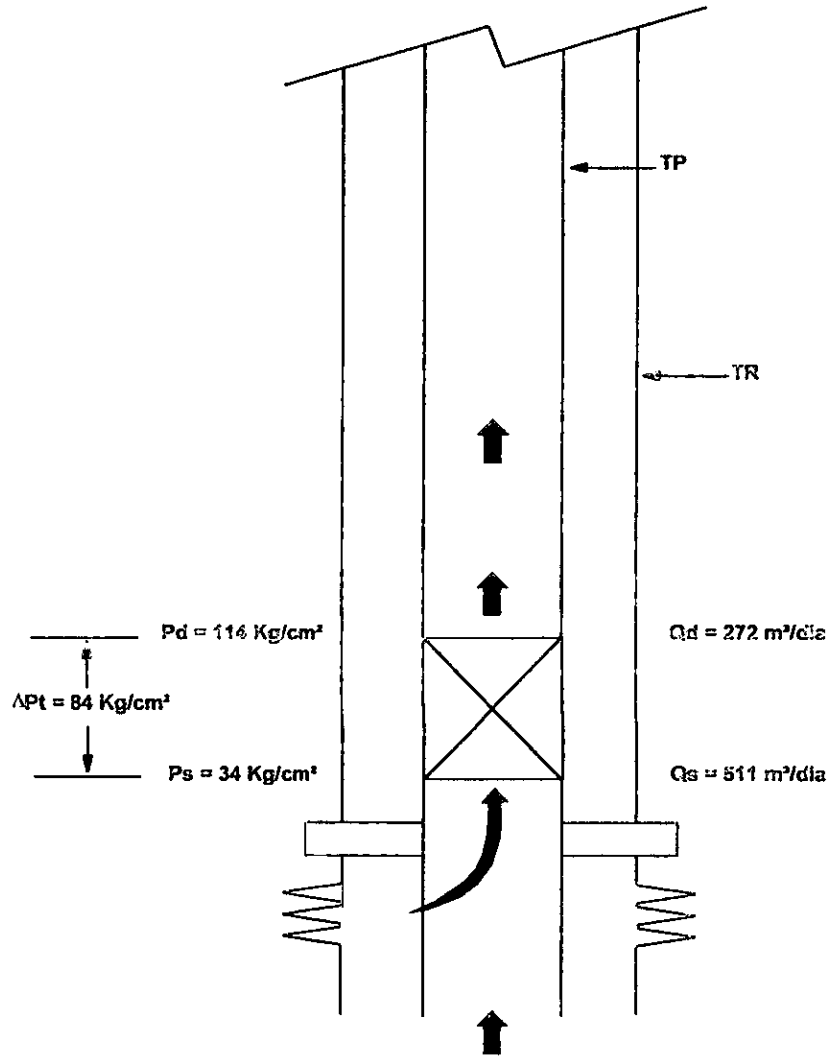
13. Determinar el número de etapas necesario para obtener cada incremento de presión:

$$NE_i = \frac{P_i}{\Delta P_e} \quad ; \quad i=1, 2, \dots, "n"$$

14. Determinar el número total de etapas (Σ paso 13) (ΣNE_i).
15. Determinar la potencia (Hp) necesaria para cada incremento de presión.
16. Determinar el total de Hp (Σ paso 15) (ΣHp_i).

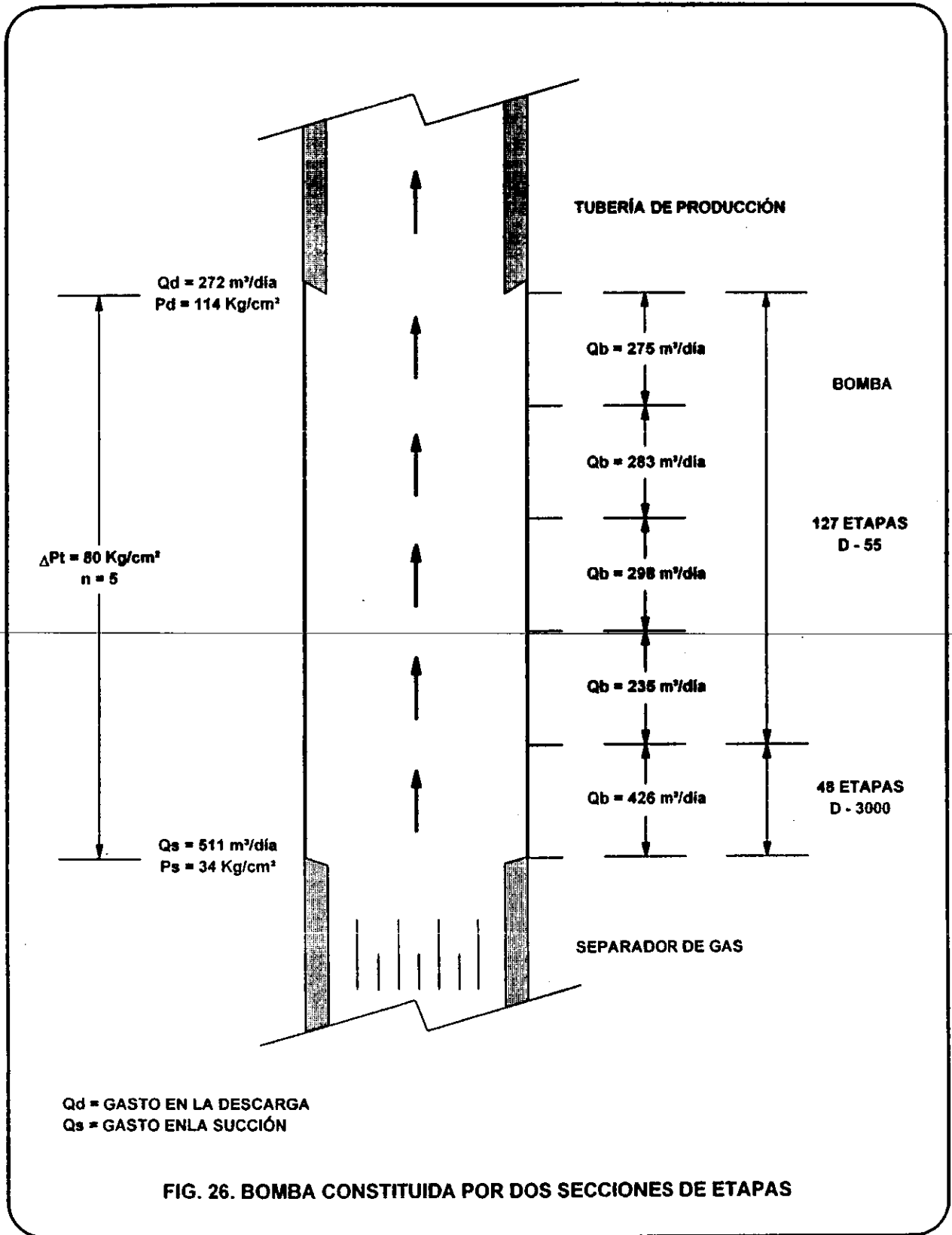
El resultado es una combinación de bombas, cada una con etapas de diferente capacidad volumétrica; por ejemplo: 120 etapas de una bomba X-50 y 60 etapas de otra bomba Z-60. En esta forma, se tiene la bomba requerida para las condiciones de operación estables del pozo y se debe tener en cuenta que se necesitan más etapas para descargar el pozo.

$Q_t = 233 \text{ m}^3/\text{día @ c. atm.}$



Q_t = GASTO TOTAL DE LÍQUIDOS
 P_d = PRESIÓN EN LA DESCARGA
 Q_d = GASTO EN LA DESCARGA
 P_s = PRESIÓN EN LA SUCCIÓN
 Q_s = GASTO EN LA SUCCIÓN

FIG. 25. EL GASTO DE LÍQUIDOS OBTENIDOS EN LA SUPERFICIE NO ES EL MISMO QUE SE BOMBEA



2.5.2 Ejemplo de diseño de para un pozo con baja producción de gas^{1,2}.

a) Prueba de producción:

Presión de fondo estática	P_{ws}	= 1,000 lb/pg ² .
Presión de fondo fluyendo	P_{wf}	= 500 lb/pg ² .
Presión en la cabeza del pozo	P_{wh}	= 200 lb/pg ² .
Gasto de líquido	ql	= 500 bl/día (50% agua).
Relación gas-aceite	RGA	= 500 pie ³ /bl.
Relación gas-líquido	RGL	= 250 pie ³ /bl.
Temperatura en la cabeza	T_{wh}	= 120 °F.
Temperatura de fondo	T_{wf}	= 160 °F.

b) Tipo de luidos:

Densidades: Aceite		= 35 °API.
relativa agua	ρ_{rw}	= 1.07
realtiva gas	ρ_{rg}	= 0.65

c) Estado mecánico:

Tubería de revestimiento	$\phi_{T.R.}$	= 5½ pg D. E.
Tubería de producción	$\phi_{T.P.}$	= 2¾ pg D. E.
Profundidad total	PT	= 7,000 pies.

d) Datos Complementarios

Se bombea el 100% del gas.

Se presenta el procedimiento detallado para determinar el número de etapas necesario entre las presiones inicial y final de un incremento considerado en el interior de la bomba. Es decir, ya se han calculado las presiones en la succión y en la descarga se calcularon con la correlación de Orkiszewski¹¹, el incremento de presión total requerido; el cual a su vez, está dividido en cuatro incrementos iguales; los datos PVT correspondientes se calcularon con la correlación de Standing¹⁴.

Encontrar el número de etapas necesario entre la presión de succión de la bomba a 500 lb/pg² y la presión de 700 lb/pg².

- 1) Presión en la succión: $P_{succ} = 500 \text{ lb/pg}^2$
- 2) Presión en la descarga: $P_{desc} = 1,300 \text{ lb/pg}^2$
- 3) Incremento total de presión: $\Delta P_t = P_{desc} - P_{succ}$
 $\Delta P_t = 800 \text{ lb/pg}^2$

4) Incrementos de presión en el interior de la bomba:

$$P_i = \frac{\Delta P_t}{n} \quad ; \quad n = 4$$

$$P_i = 200 \text{ lb/pg}^2$$

NOTA: Los cálculos se presentan únicamente para el primer incremento de 500 a 700 lb/pg².

Presión (lb/pg ²)	Barril	Gas (pies ³ /bl @ c. atm.)
500	1.080	80
700	1.094	120

5) Densidad de la mezcla en cada presión:

a) Volumen de aceite, gas y agua en la succión a 500 lb/pg²:

$$V_{i(500)} = (V_o + V_g + V_w) * q_i (1 - f_w)$$

Esta ecuación antes del producto por "q_i", se refiere al volumen de fluidos (B) a condiciones de escurrimiento, asociado a un barril de aceite a condiciones de tanque.

$$B = 1 \text{ bl @ c. tanque}$$

$$V_o = q_i * (1 - f_w) * B_o$$

$$V_g = q_i * (1 - f_w) * (RGA - R_s) * PGI * B_g$$

PGI = Porcentaje de gas que ingresa a la bomba

$$V_w = q * f_w$$

$$V_{o(500)} = (B) * (1.08) = 1.08 \text{ bl}_o \text{ @ c. esc.}$$

Por cada barril de aceite en tanque, se tienen 1.08 barriles de aceite a 500 lb/pg².

$$B_g = 0.00504 * \frac{T_{wf} * z}{P_{wf}} \left(\frac{\text{bl @ c. esc.}}{\text{pies}^3 \text{ @ c. atm.}} \right)$$

$$B_g = 0.00504 * \frac{620 * .95}{514.7} \left(\frac{\text{bl @ c. esc.}}{\text{pies}^3 \text{ @ c. atm.}} \right)$$

$$B_{g(500)} = 0.00577 \text{ bl/pies}^3$$

$$\text{Gas libre a } 500 \text{ lb/pg}^2 = 500 - 80 = 420 \text{ pies}^3/\text{bl}$$

$$V_{g(500)} = 420 * 0.00577 = 2.42$$

$$V_{g(500)} = (B) * 2.42 = 2.42 \text{ bl}_g @ c. \text{esc.}$$

Por cada barril de aceite en tanque, se tienen 2.42 barriles de gas a 500 lb/pg².

$$V_w = (B) * (B_w) = 1 \text{ bl}_w @ c. \text{esc.}$$

No hay cambio en el volumen del agua.

$$V_i = V_o + V_g + V_w$$

$$V_i = 1.08 + 2.42 + 1 = 4.50 \text{ bl}/B$$

Por cada barril de aceite en tanque, se tienen 4.50 barriles de líquido y gas a 500 lb/pg², en la succión de la bomba.

Conforme los fluidos avanzan sucesivamente por las etapas de la bomba, su presión se incrementa y su volumen se reduce; por lo que para la presión de 700 lb/pg² en el interior de la bomba se tiene:

$$V_{o(700)} = (B) * (1.094) = 1.094 \text{ bl}_o @ c. \text{esc.}$$

$$B_{K(700)} = 0.00404 \text{ bl}/\text{pies}^3$$

$$V_{g(700)} = (B) * 1.53 \text{ bl}_g @ c. \text{esc.}$$

$$V_{w(700)} = (B) * (B_w) = 1 \text{ bl}_w @ c. \text{esc.}$$

$$V_i = 1.094 + 1.53 + 1 = 3.63 \text{ bl}/B$$

b) Masa de aceite, gas y agua:

$$M = M_o + M_g + M_w$$

b1) Masa de aceite:

$$\rho_m = \frac{141.5}{131.5 + ^\circ API} = \frac{141.5}{131.5 + 35} = 0.8498$$

$$M_o = 62.4 \left(\frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \right) * 5.615 \left(\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}} \right) * \rho_m$$

$$M_o = 350 * 0.8498 = 297.4 \text{ lb}/\text{bl}$$

$$M_o = (B) * (0.8498) * 350 = 297.4 \text{ lbs}$$

b2) Masa de agua:

$$M_w = 62.4 \left(\frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \right) * 5.615 \left(\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}} \right) * \rho_{rw}$$

$$M_w = 350 * 1.07 = 374.5 \frac{\text{lb}}{\text{bl}}$$

$$M_w = (B) * (1.07) * (350) = 374.5 \text{ lbs}$$

b3) Masa de gas:

$$\rho_{\text{aire}} = 0.0764 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$$

$$\rho_x = \rho_{rx} * \rho_{\text{aire}} \left(\frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \right) * RGA \left(\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}} \right)$$

$$\rho_x = 0.65 * 0.0764 * 500 = 24.8 \left(\frac{\text{lb}}{\text{bl}} \right)$$

$$M_x = (B) * 24.8 = 24.8 \text{ lbs}$$

Masa (o, w, g) por cada barril (B) de aceite a condiciones de tanque:

$$M = 297.3 + 34.5 + 24.83 = 696.6 \frac{\text{lbs}}{\text{bl}}$$

$$M = (B) * 696.6 = 696.6 \text{ lbs}$$

Gasto másico total:

$$q_m = M \left(\frac{\text{lbs}}{\text{bl}} \right) * q_o \left(\frac{\text{bl}}{\text{día}} \right)$$

$$q_m = 696.6 * 250 = 174,157.5 \frac{\text{lb}_m}{\text{día}}$$

Es un valor constante sin resbalamiento en cada presión señalada.

c) Densidad de la mezcla (ρ_m):

Su valor se calcula para el V_1 , en cada presión señalada:

$$\rho_m = \frac{M}{V_1} = \frac{(\text{lb})}{(\text{bl}) * \left(\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}} \right)} = \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$$

$$\rho_{m(500)} = \frac{696.6}{4.5 * 5.615} = 27.56 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$$

$$\rho_{m(700)} = \frac{696.6}{3.63 * 5.615} = 34.17 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$$

6) Gradiente de presión a 500 y 700 lb/pg²:

$$G_r = \frac{\rho_m}{144} \frac{\text{lb}/\text{pie}^3}{\text{pg}^2/\text{pie}^2} = \text{lb}/\text{pg}^2 \text{ pie}$$

$$G_{r(500)} = \frac{27.55}{144} = 0.1913 \text{ lb}/\text{pg}^2 \text{ pie}$$

$$G_{r(700)} = \frac{34.17}{144} = 0.2372 \text{ lb}/\text{pg}^2 \text{ pie}$$

7) Gradiente de presión promedio:

$$G_{rp} = \frac{G_{r(500)} + G_{r(700)}}{2}$$

$$G_{rp} = \frac{0.1913 + 0.2372}{2} = 0.2143 \text{ lb}/\text{pg}^2 \text{ pie}$$

8) Gradiente de presión promedio expresado en carga (longitud de columna hidráulica):

$$\text{Carga} = \frac{200}{0.2143} = 933.27 \text{ pies}$$

9) Gasto total que ingresa a la bomba (q_t)

$$q_{t(500)} = (V_o + V_g + V_w) * q_i (1 - \%w)$$

Gasto total a 500 lb/pg²:

$$q_{t(500)} = 4.5034 * 500 * 0.5 = 1,125 \text{ bl}/\text{día}$$

Significa que por los 250 barriles de aceite producidos en la superficie, se manejan 1,125.85 barriles de fluidos en la succión de la bomba.

$$q_{t(700)} = (V_o + V_g + V_w) * q_i (1 - \%w)$$

Gasto total a 700 lb/pg²:

$$q_{t(700)} = 3.63 * 500 * 0.5 = 907.5 \text{ bl}/\text{día}$$

Significa que por los 250 barriles de aceite producidos en la superficie, se manejan 907.5 barriles de fluidos en el interior de la bomba a 700 lb/pg².

10) Gasto promedio (q_p):

$$q_p = \frac{q_{l(500)} + q_{l(700)}}{2}$$

$$q_p = \frac{1,125.85 + 907.3}{2} = 1,017 \text{ bl/día}$$

11) Seleccionar la bomba para este gasto promedio:

Con el gasto promedio y gráficas de bombas para T.R. de 5½ pg, se selecciona la bomba que maneje este gasto con mayor eficiencia. En los catálogos de los fabricantes se encuentran las bombas: Reda D-26 o D-40; Centrilift FC 1200; ODI R9; o Kobe modelo II SOF. En este caso, del Apéndice B, se elige la Reda D-26. Las lecturas de la gráfica indican que desarrolla 19.5 pies/etapa (H_e), y requiere 0.235 Hp/etapa (Hp_e).

12) Incremento de presión por etapa:

$$\Delta P_e = G_m * H / \text{etapa}$$

$$\Delta P_e = 0.2143 * 19.5 = 4.18 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}$$

13) Número de etapas necesario para obtener el incremento de presión de 200 lb/pg²:

$$NE_i = \frac{P_i}{\Delta P_e}$$

$$NE_i = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{4.18 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}} = 48 \text{ etapas}$$

14) El procedimiento se repite para cada incremento y la sumatoria de etapas de cada uno, es el número total de etapas.

15) Potencia necesaria para este número de etapas:

$$Hp_i = Hp_e * NE_i * \rho_m$$

$$\rho_m = \frac{\rho_{m(500)} + \rho_{m(700)}}{2}$$

$$\rho_m = \frac{27.56 + 34.17}{2 * 62.4} = 0.494$$

$$Hp_i = 0.235 * 48 * 0.494 = 5.58 \text{ Hp}$$

- 16) El procedimiento se repite para cada incremento y la sumatoria de potencia de cada uno, es la potencia total requerida.

2.6 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PROGRAMADO¹⁰.

En la solución del procedimiento descrito intervienen muchas variables, cuya evaluación consume tiempo y lo hacen relativamente complejo, por lo que se requiere de un programa de cómputo como herramienta auxiliar y práctica, que facilite la ejecución de los cálculos necesarios para seleccionar la bomba y el motor apropiados en la instalación del aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido, para cualquier pozo candidato a explotarse con este sistema artificial de producción.

El programa para el diseño de aparejos de bombeo electrocentrífugo sumergido, denominado *BECS*^{16, 17}, contiene el procedimiento de cálculo antes mencionado.

Este programa se encuentra disponible en el paquete denominado *SIAPP*, el cual además contiene los programas siguientes: *FLUPROD*, para la determinación de las propiedades de los fluidos producidos y perfiles de presión en tuberías; *BONEC*, para el diseño de bombeo neumático continuo; *JET*, para el diseño de bombeo hidráulico tipo jet, y *FMS_WIN*, para el diseño de líneas de transporte de hidrocarburos.

El programa *BECS* contempla la determinación de la profundidad de colocación y presión en la succión de la bomba, considerando que el aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido tiene integrado un separador de gas cuya eficiencia varía de 0 a 100%; toma en cuenta la relación gas libre-líquido que tolera la bomba, sin que se afecte el comportamiento indicado en sus curvas características y determina la presión requerida en la descarga de la bomba. Estos cálculos, involucran la determinación de pérdidas de presión en tuberías verticales y/o desviadas; por lo que se aplican métodos de flujo multifásico y correlaciones PVT^{11,12,13,14,15}.

Contempla también, que el volumen y propiedades físicas de la mezcla varían continuamente desde la entrada hasta la salida de la bomba. Es decir, el volumen de fluidos que llega a la succión, se reduce sucesivamente en el interior de la bomba y en consecuencia, la capacidad volumétrica que se requiere en las etapas es progresivamente menor, a fin de que se manejen con máxima eficiencia el volumen variable, desde la succión hasta la descarga. Entonces, nuevamente se aplican métodos de flujo multifásico y correlaciones PVT, considerando que la temperatura es constante a lo largo de la bomba.

Incluye el cálculo de la capacidad volumétrica y número de etapas requeridas para que la bomba maneje, con máxima eficiencia, el volumen variable en su interior. Además se calcula la potencia necesaria en el motor para impulsar a las etapas de la bomba.

Como resultado, el programa proporciona todos los parámetros necesarios para el diseño del aparato de bombeo electrocentrífugo sumergido: la impresión de los perfiles de presión, cambio de volumen en el interior de la bomba y propiedades PVT de los fluidos, es opcional. Invariablemente, se imprimen las presiones, gastos y densidades de la mezcla en la succión y en la descarga, carga dinámica total, incremento de presión, identificación de la bomba seleccionada, capacidad volumétrica y número de etapas. Si la bomba es telescopiada, imprime la descripción de cada sección de etapas con diferente capacidad volumétrica y la potencia del motor. En todos los casos, se puede considerar la influencia de variar la frecuencia (Hz), de la corriente que alimenta al motor y la posibilidad de ajustar la capacidad del aparato de bombeo electrocentrífugo sumergido, a la del pozo, ya sea vertical o desviado.

Una ventaja implícita para el usuario del programa, es la capacidad de analizar diversos diseños actuales o futuros y sus requerimientos, al variar la presión de fondo fluyendo, la relación gas-líquido, el porcentaje de agua producida, la geometría del aparato, o cualquier otro parámetro que influya sobre el comportamiento de producción del pozo.

La secuencia del procedimiento de cálculo programado, tomando en cuenta la influencia de las consideraciones mencionadas, para asegurar que se instale la unidad de bombeo más eficiente para cada caso particular, es la siguiente^{16,16,17}:

1. A partir de datos de una prueba de producción y el gasto de líquidos que se desea obtener en la superficie, se determina la presión de fondo fluyendo utilizando la correlación propuesta por Vogel.
2. Calcular el perfil de presión ascendente partiendo de la presión de fondo fluyendo y con la relación gas-líquido natural de la formación, hasta un punto en que la cantidad de gas libre a condiciones de escurrimiento, menos el porcentaje de ese gas que el separador envía a espacio anular, es igual a la cantidad de gas libre que tolera la bomba, (Gl_{th}). Punto A de la fig. 24.

$$Gl @ c. esc. = (RGA - R_s) * \frac{B_g}{B_o}$$

$Gl @ c. esc.$ = Relación gas libre-aceite @ c. escurrimiento.

RGA = Relación gas-aceite @ c. tanque.

B_g = Factor de volumen del gas @ c. escurrimiento.

B_o = Factor de volumen del aceite @ c. escurrimiento.

Si:

$$Gl * (1 - Ef_{sep}) = Gl_{th}$$

G_{lb} = Relación gas libre aceite que tolera la bomba @ c. escurrimiento.

$E_{f_{sep}}$ = Eficiencia del separador.

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

3. Calcular el perfil de presión descendente, partiendo de la presión requerida en la boca del pozo, con una relación gas-líquido igual a la natural de la formación, menos la cantidad de gas libre enviado al espacio anular; hasta alcanzar la profundidad de colocación de la bomba. Punto B de la fig. 24. La presión en este punto, es la presión de descarga de la bomba.

El cálculo de los perfiles de presión mencionados, se realiza utilizando métodos para determinar caídas de presión en tuberías verticales con flujo multifásico.

4. Calcular el incremento total de presión requerido: La diferencia entre las presiones en la descarga y succión de la bomba, es el incremento de presión necesario para obtener en la superficie el gasto deseado, Fig. 24.

(Presión de descarga - Presión de succión) = Incremento total de presión

$$P_{desc} - P_{succ} = \Delta P_t$$

5. Dividir el incremento total de presión en "n" incrementos iguales.

Incremento de presión igual en el interior de la bomba:

$$\frac{\Delta P_t}{n} = P_i \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

El mayor volumen de fluidos que debe manejar la bomba, es el que llega a la succión, donde la presión es más baja y la mezcla es más compresible; por lo que las primeras etapas requieren tener mayor capacidad volumétrica. Entendiéndose por capacidad volumétrica, como el rango de gasto que una etapa de la bomba maneja con máxima eficiencia. Dicho rango está señalado en las gráficas de curvas características de las bombas.

Es importante señalar que el gasto deseado en la superficie, está referido a condiciones de tanque y es únicamente de líquidos, por lo que difiere considerablemente del gasto que se bombea, fig. 25.

Esto se debe a que el gasto que ingresa a la bomba es una mezcla de aceite, agua, gas disuelto y gas libre que ocupa mayor volumen en la entrada y menor en la salida; porque cada etapa de la bomba incrementa sucesivamente la presión de la mezcla, reduciendo su volumen desde la succión hasta la descarga. Cuando dicho volumen se reduce considerablemente y cae fuera del rango de capacidad volumétrica de las primeras etapas,

las siguientes requieren tener menor capacidad volumétrica; entonces, debe elegirse otra gráfica de curvas características, Por lo tanto, la bomba puede quedar constituida por una, dos, o más secciones de etapas; de las cuales, cada una maneja con máxima eficiencia, el volumen de fluidos variable en el interior de la bomba.

A fin de determinar los cambios de volumen y establecer la necesidad de cambiar o no la capacidad volumétrica de las etapas, el incremento total de presión, se divide en "n" incrementos iguales. Dependiendo de las características de los fluidos, se ha encontrado que con los valores de "n" entre 10 y 20 se obtiene resultados satisfactorios, aunque esto no es una limitación del procedimiento ya que "n" puede tener cualquier otro valor a partir de n = 1.

6. Calcular el gasto, masa y densidad de la mezcla de aceite, gas y agua a las condiciones de presión inicial y final del incremento "n". La realización de estos cálculos requiere conocer los valores del factor de volumen del aceite y de la relación gas disuelto-aceite. Para este efecto, se utilizaron las correlaciones de Standing, considerando la temperatura constante a lo largo de la bomba.

$$V = B_o + \frac{q_t - q_o}{q_o} * B_w + (RGA - R_s) * B_r \left(\frac{m^3 \text{ o, g, w @ c. esc.}}{m^3 \text{ @ c. sup.}} \right)$$

V = Volumen de aceite, gas y agua @ c. escurrimiento por unidad de volumen de aceite @ c. tanque.

B_o = Factor de volumen del aceite.

q_t = Gasto total de líquidos. (m³/día) @ c. tanque.

q_o = Gasto de aceite. (m³/día) @ c. tanque.

B_w = Factor de volumen del agua.

RGA = Relación gas- aceite. (m_g³/m_o³) @ c. tanque.

R_s = Relación gas disuelto - aceite. (m_g³/m_o³) @ c. tanque.

$$q_b = V * q_o \left(\frac{m^3_{\text{o,g,w @ c. sup.}}}{\text{día}} \right)$$

q_b = gasto de aceite, gas y agua @ c. escurrimiento.

$$M = RGA * \rho_g + \rho_o + \rho_w * \left(\frac{F_w}{1 - F_w} \right) \left(\frac{kg_m}{m^3} \right)$$

M = Masa total.

ρ = Densidad (gas, aceite, agua) (kg/m^3).

F_w = Porcentaje de agua (Fracción).

$$\rho_m = \frac{M}{V} \left(\frac{kg_m}{m^3_{o,g,w}} \right)$$

ρ_m = Densidad de la mezcla.

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

$$\rho_{rm} = \frac{\rho_m}{\rho_w}$$

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

$$G_r = \frac{\rho_m}{10} \left(\frac{kg/cm^2}{m} \right)$$

9. Calcular el gasto promedio en el intervalo "n".
10. Elegir el grupo de curvas características de bombas que ajusten en el interior de la T.R. del pozo y de éstas seleccionar la que maneje el gasto promedio con máxima eficiencia. A medida que se avanza con los incrementos de presión en el interior de la bomba, la gráfica de curvas características seleccionada puede cambiar, lo cual significa que el volumen de la mezcla se ha reducido considerablemente y que la capacidad volumétrica de las primeras etapas cae fuera del rango de máxima eficiencia, por lo que se selecciona otra gráfica que cumpla con este requisito. Esto da lugar a que el diseño de la bomba sea de dos secciones de etapas. Si la situación descrita se repite la bomba puede quedar constituida por más de dos secciones.
11. Leer en las curvas características de la bomba seleccionada, la carga que desarrolla y la potencia que requiere por etapa cuando maneja el gasto promedio.

12. Determinar el incremento de presión desarrollado por etapa, ΔP_e , multiplicando la carga que desarrolla cada etapa, H_e , por el gradiente promedio:

$$\Delta P_e = \frac{H}{etapa} * G_r \left(\frac{kg/cm^2}{etapa} \right)$$

ΔP_e = Incremento de presión por etapa.

H = Carga de columna hidráulica desarrollada por etapa (m).

13. Calcular el número de etapas que se requiere para obtener el incremento de presión "n", dividiendo éste entre la presión por etapa.

$$NE = \frac{P_i}{\Delta P_e}$$

14. Calcular la potencia necesaria, multiplicando la potencia por etapa por el número de etapas y por la densidad relativa promedio del intervalo "n".

$$Hp = \frac{Hp}{etapa} * NE * \rho_{rm}$$

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

El número total de etapas y la potencia total requerida, se obtienen sumando los valores calculados en los puntos 11 y 12, respectivamente, para las "n" veces que se repitan los cálculos.

Con el propósito de ilustrar los resultados de la aplicación del programa *BECS*, en las figs. 24, 25, y 26, se presentan gráficas correspondientes a un caso real. El diseño del aparejo de bombeo electrocentrífugo realizado con el programa, fue comparativamente igual al propuesto y aplicado por una compañía fabricante. Ejemplos de aplicación como el mencionado, han sido comparados con los propuestos por cuatro compañías fabricantes para pozos del Área de Poza Rica^{18,19} y más recientemente para pozos del campo Ku-Malob, de la Región Marina^{20,21}.

En la fig. 24, se presenta la ilustración de los perfiles de presión ascendente y descendente, profundidad de colocación de la bomba y el incremento de presión requerido. Para efectos de este ejemplo se utilizó el método de Orkiszewski debido al ajuste entre valores de presión calculados y los medidos directamente en la tubería de producción del pozo.

En la fig. 25, se distinguen los diferentes valores de gasto de fluidos en la succión y en la descarga de la bomba. Así mismo el gasto de líquido en la superficie.

En la fig. 26, se muestra la variación del volumen de la mezcla de fluidos, desde la succión hasta la descarga de la bomba. Nótese que, iniciando en la sección inferior, el cambio de volumen de la mezcla es menos importante cuando avanza hacia las secciones superiores. Esto se debe a que cada etapa imprime un incremento de presión haciendo que la mezcla, sea menos compresible conforme es impulsada hacia la descarga, donde la presión es mayor.

Como consecuencia, la sección inferior de la bomba (1), contiene etapas con mayor capacidad volumétrica que las etapas de las secciones superiores (Bomba D-3000, fig. 26). El cambio de volumen en las secciones (2), (3), (4) y (5); sin dejar de ser importante, permanece dentro del rango de máxima eficiencia de una misma gráfica de curvas características (Bomba D-55, fig. 26).

Por lo que se refiere a la potencia, el resultado fue de 76 Hp requeridos para condiciones normales de operación; entonces, tomando en cuenta el requisito para descargar el pozo, debe seleccionarse un motor de mayor potencia.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

2.7 APROXIMACIÓN DE CAMPO.

El dimensionamiento del aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido en un pozo productor de aceite, agua y gas debe considerar el volumen total a la entrada de la bomba. Este incluye el volumen de gas libre, gas disuelto y líquidos. La exactitud de los datos PVT, permite calcular el volumen a condiciones superficiales.

2.7.1 Procedimiento de Siete Pasos.

En el dimensionamiento práctico de una unidad de bombeo sumergida, para aplicarse con una alta relación gas-aceite, se sigue el procedimiento²²:

- 1) Determinar la presión de operación en la succión de la bomba, que se considere permitirá que el volumen de gas pasando a través de la bomba, esté dentro de los límites del equipo.
- 2) Determinar la densidad relativa promedio del fluido que se va a bombear.
- 3) Determinar el factor de volumen del fluido, relación gas-líquido, densidad del gas, densidad del aceite y temperatura de fondo, a la presión de operación.
- 4) Determinar el incremento de presión (CDT) necesario entre la succión y la descarga de la bomba para la capacidad requerida, incluyendo la presión de la cabeza del pozo y las pérdidas de presión por fricción.
- 5) Seleccionar una o dos bombas de mayor capacidad volumétrica, sobre la bomba básica, conforme a un diseño en tandem o telescopiado.

- 6) Determinar la carga de presión que debe suministrar cada sección tandem. La bomba se diseña entonces, para manejar el volumen en la succión y producir la carga de presión adicional necesaria.
- 7) Determinar la potencia requerida, multiplicando por la densidad promedio del fluido en la descarga de la bomba base, y la potencia al freno máxima para cada sección de las bombas superiores.

2.7.2 Ejemplo de aplicación práctico de campo.

Una ilustración detallada del procedimiento a seguir en el diseño de la unidad de bombeo electrocentrífugo sumergido, para un pozo con alta relación gas-aceite, se presenta a continuación²²:

Nota: Se supone que usando los métodos apropiados, el gasto que va a ser bombeado, la densidad relativa promedio y el factor de volumen a la profundidad y presión de succión han sido determinados.

Prueba de producción:

Presión en la cabeza requerida	P_{wh}	= 200 lb/pg ² .
Gasto requerido	q	= 1,500 bl/día (1,300 aceite + 200 agua).
Relación gas-aceite producida	RGA	= 500 pie ³ /bl.
Relación gas-líquido	RGL	= 250 pie ³ /bl.
Temperatura de fondo	T_{wf}	= 160 °F.
Factor de volumen	B_o	= 1.35 @ c. succ. bomba.
Presión en la succión de la bomba	P_{succ}	= 300 lb/pg ² .

Tipo de fluidos:

Densidad API del aceite		= 31°
Densidad relativa líquido	ρ_{rw}	= 0.9007
Gradiente promedio líquido	G_{rp}	= 0.387

Estado Mecánico:

Diámetros y Profundidades:

Tubería de revestimiento	$\phi_{T.R.}$	= 7 pg; a 6,400 pies.
Tubería de producción	$\phi_{T.P.}$	= 2 ⁷ / ₈ pg; a 6,300 pies.
Intervalos disparados		= 6,500 - 6,520, 6,530 - 6,590 y 7,105 - 7,155 pies.
Profundidad Total	PT	= 7,500 pies.
Prof. de colocación de la bomba	P_{cb}	= 6,200 pies, 100 pies arriba del liner.

- a) Se determina el volumen de fluidos a manejar en la succión de la bomba, para producir 1,500 bl/día a condiciones de tanque:

$$(1,300 * 1.35) + 200 = 1,755 + 200$$

$$\text{Volumen corregido} = 1,955 \text{ bl/día}$$

- b) Se determina el incremento de presión (CDT):

$$CDT = \text{Elev. neta} + \Delta P_f + P_{wh}$$

Elevación neta, los 300 lb/pg² de presión en la succión representan:

$$\frac{300 \text{ lb/pg}^2 * 2.31 \text{ pie pg}^2/\text{lb}}{0.9007} = 770 \text{ pies}$$

Como se coloca a 6,200 pies, la elevación neta es:

$$\text{Elev. neta} = 6,200 - 770 = 5,430 \text{ pies}$$

ΔP_f = Pérdidas de presión por fricción (Apéndice A, fig. A2), se encuentra que es aproximadamente de 20 pies/1,000 pies en tubería de producción de 2⁷/₈ pg, a un gasto de 1,500 bl/día:

$$\Delta P_f = 6,200 * \left(\frac{20}{1,000} \right) = 124 \text{ pies}$$

P_{wh} = Presión en la cabeza del pozo:

$$P_{wh} = \frac{200 \text{ lb/pg}^2 * 2.31 \text{ pie/lb/pg}^2}{0.9007} = 513 \text{ pies}$$

$$CDT = 5,430 + 124 + 513 = 6,067 \text{ pies}$$

$$\approx 6,070 \text{ pies}$$

Esta carga convertida a presión, es:

$$CDT = \frac{6,070 * 0.9007}{2.31} = 2,365 \text{ lb/pg}^2$$

- c) Entonces, la bomba base es una que produzca 1,500 bl/día a condiciones superficiales y que ajuste en el interior de una T. R. de 7 pg. Se encuentra que el tamaño óptimo de bomba, es de la serie 513, modelo I42B, fig. 27, la cual tiene su máxima eficiencia a 1,500 bl/día.

- d) Para producir los 1,500 bl/día en la superficie, se deben manejar 1,955 bl/día y este volumen se reduce conforme avanza a través de bombas inferiores (en otro caso, a través de las primeras etapas de la bomba a partir de la succión). Regresando a las curvas de las bombas, se seleccionan dos inmediatas más grandes de la misma serie. Sin conocer el volumen exacto que manejará cada una, se puede estar suficientemente seguro de que dicho volumen caerá dentro del rango de esas bombas.

La primera bomba seleccionada para el diseño tandem que inicia con etapas de mayor tamaño en la succión y reducen su capacidad volumétrica hacia la descarga, es la bomba K-70, fig. 28.

El rango de esta bomba está entre 2,000 y 3,000 bl/día y se considera bueno. La segunda bomba seleccionada es la Y-26B, fig.29. El rango de esta bomba es bueno y puede operar de 2,000 bl/día hacia abajo hasta 1,500 bl/día.

Una gráfica compuesta del rango de volumen de cada bomba mostrará que se está cubriendo un rango volumétrico de aproximadamente 1,200 a 3,000 bl/día, con el arreglo de bomba telescopiada.

Para determinar el número de etapas de cada sección telescopiada inferior se determina el número de carcaza y la cantidad de etapas que lleva cada una, ver tabla pág. 88. De la tabla se selecciona la carcaza número 1 de cada tipo de bomba y se encuentra que la K-70 tiene 6 etapas y la Y-62B tiene 8 etapas.

- e) Se determina el total de carga que suministra cada sección telescopiada. De las curvas de comportamiento, se encuentra, que la bomba K-70 opera entre 2,000 y 3,000 bl/día, y más probablemente entre 2,000 y 2,500 bl/día, así se puede seleccionar una carga de 40 pies por etapa. La bomba Y-62B opera entre 1,500 y 2,000 bl/día, de manera que se selecciona una carga de 48 pies por etapa.

La contribución total de carga de las dos secciones se determina en la siguiente forma:

Para la bomba:

K-70	6 etapas * 40 pies/etapa = 240 pies
Y-62B	8 etapas * 48 pies/etapa = 384 pies
	<hr/>
	= 624 pies \approx 625 pies

La carga requerida para obtener en la superficie 1,500 bl/día, se determinó en 6,070 pies, entonces, la carga restante necesaria es:

$$6,070 - 625 = 5,445 \text{ pies}$$

La cual debe ser suministrada por la bomba base I-42B, misma que imprime una carga de 40.5 pies/etapa, para 1,500 bl/día con eficiencia máxima de 65%.

El número de etapas requerido es:

$$\frac{5,445 \text{ pies}}{40.5 \text{ pies/etapa}} = 134 \text{ etapas}$$

Entonces, el diseño telescopiado es:

Una bomba K-70 con 6 etapas
 Una bomba Y-62B con 8 etapas
 Una bomba I-42B con 134 etapas

- f) La potencia requerida se determina multiplicando la potencia al freno máxima de cada bomba, encontrada de las curvas para agua, por el número de etapas, por la densidad específica promedio del fluido y sumando las tres potencias:

Bomba K-70:

$$6 \text{ etapas} * 0.96 \frac{\text{Hp}}{\text{etapa}} * 0.9007 = 5.19 \text{ Hp}$$

Bomba Y-62B:

$$8 \text{ etapas} * 1.0 \frac{\text{Hp}}{\text{etapa}} * 0.9007 = 7.20 \text{ Hp}$$

Bomba I-42B:

$$134 \text{ etapas} * 0.72 \frac{\text{Hp}}{\text{etapa}} * 0.9007 = 86.96 \text{ Hp}$$

$$\text{Total} = 99.28 \text{ Hp}$$

Esta es la potencia que se requiere para condiciones estables de operación.

Un problema básico cuando se diseña una instalación de bomba telescopiada, es la selección del motor. Durante el arranque, la bomba maneja líquido sin gas libre y requiere mayor potencia que cuando el pozo se estabiliza a un ritmo de producción que tenga alta relación gas-líquido. Como ejemplo, si el fluido de control tiene densidad relativa de 1.05, la potencia requerida para descargar el pozo, es de 116 Hp.

Por lo tanto, la potencia del motor para una aplicación de la bomba telescopiada, debe considerar la mínima potencia para operación normal y la máxima potencia para efectuar la descarga.

CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA CENTRILIFT
1 ETAPA - I-42B - 60 Hz
SERIE 513 - 3500 RPM

Tamaño Mínimo de
 T. R. 6 3/8" D. E.

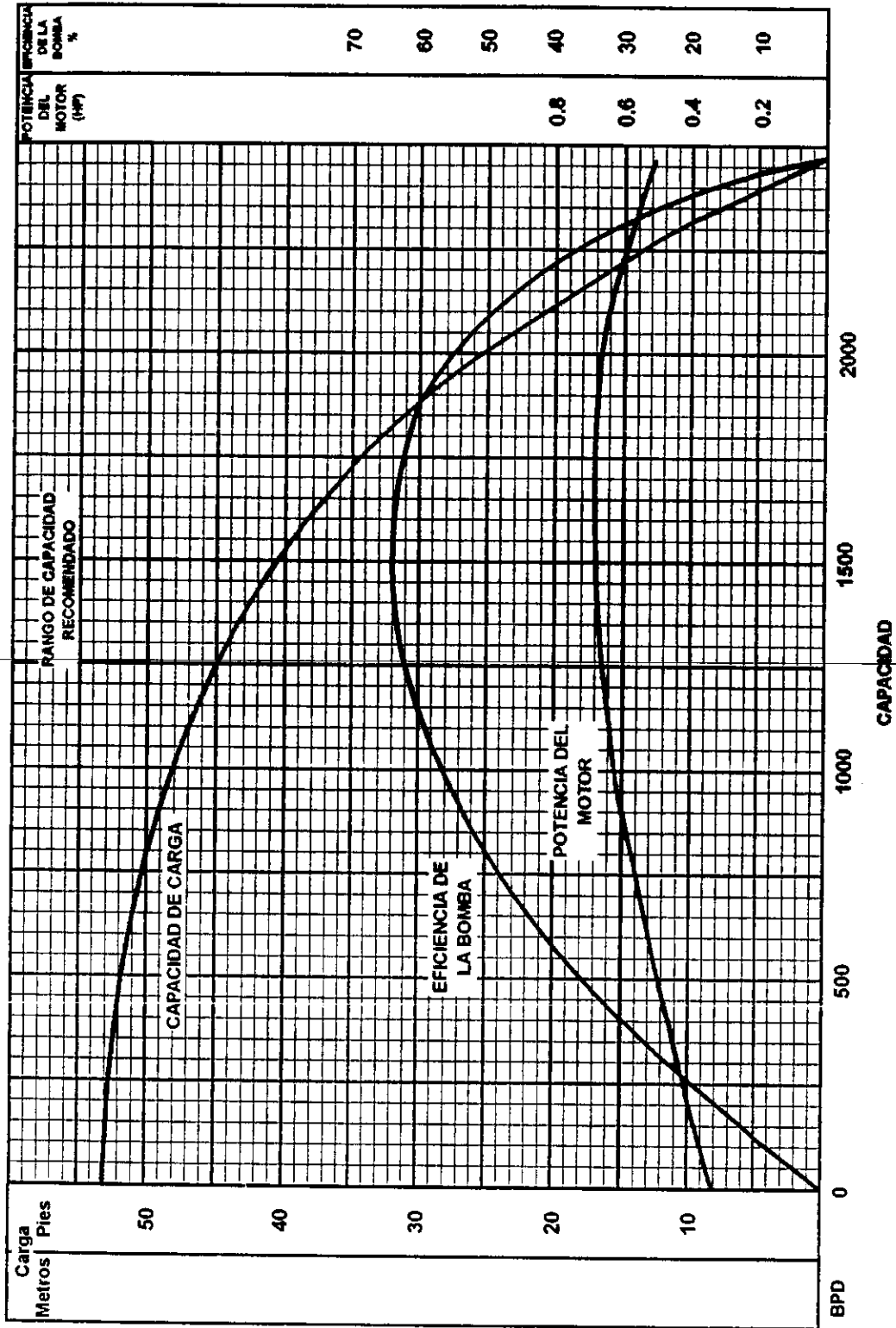


FIG. 27. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA I-42B
 FUENTE: CENTRILIFT, SUBMERSIBLE PUMP HANDBOOK, 1978

CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA CENTRILIFT

1 ETAPA - K-70 - 60 Hz
SERIE 513 - 3500 RPM

Tamaño Mínimo de
T. R. 6 5/8" D. E.

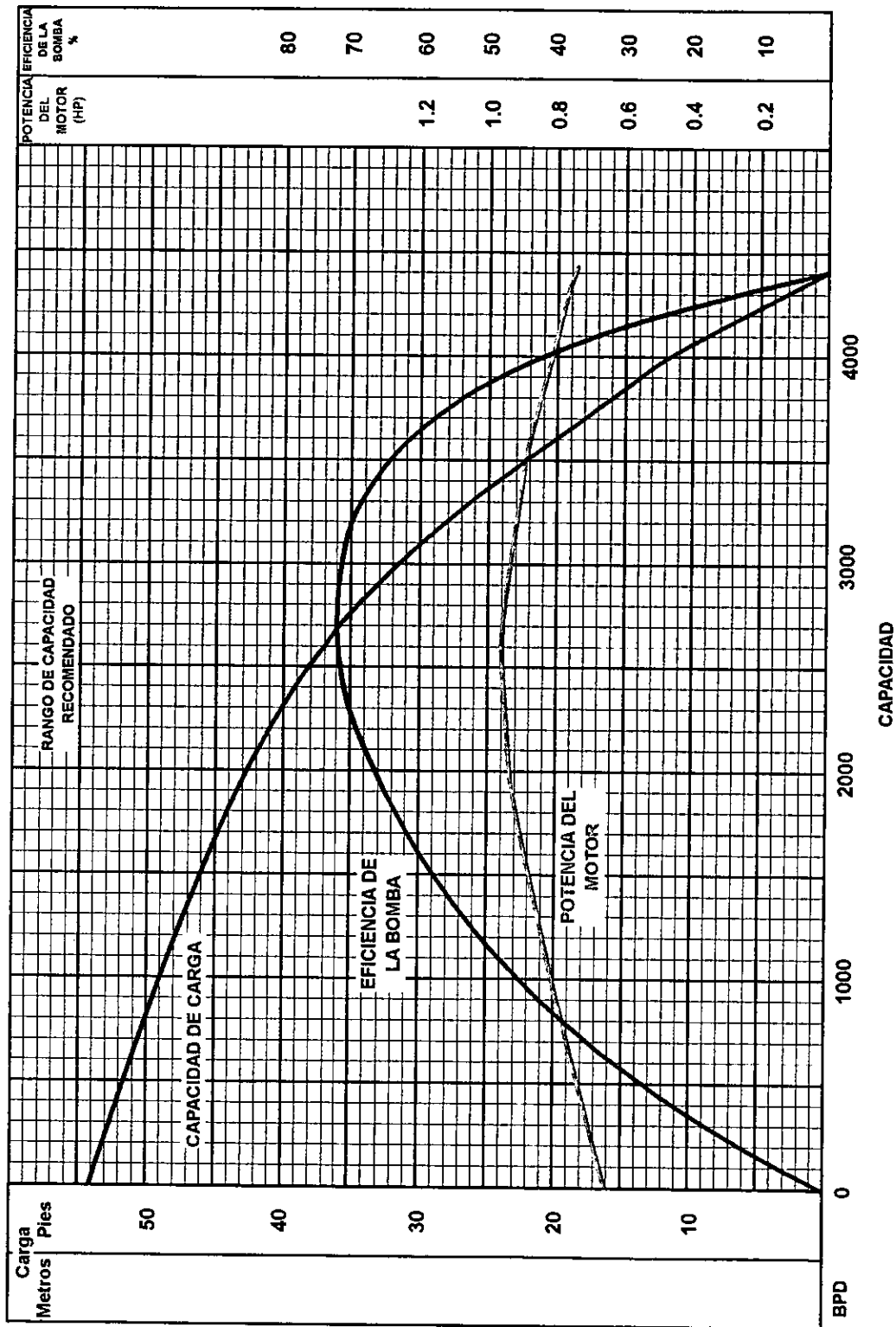


FIG. 28. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA K-70
FUENTE: CENTRILIFT, SUBMERSIBLE PUMP HANDBOOK, 1978

CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA CENTRILIFT

1 ETAPA - Y-62B - 60 Hz

SERIE 513 - 3500 RPM

Tamaño Mínimo de
T. R. 6 5/8" D. E.

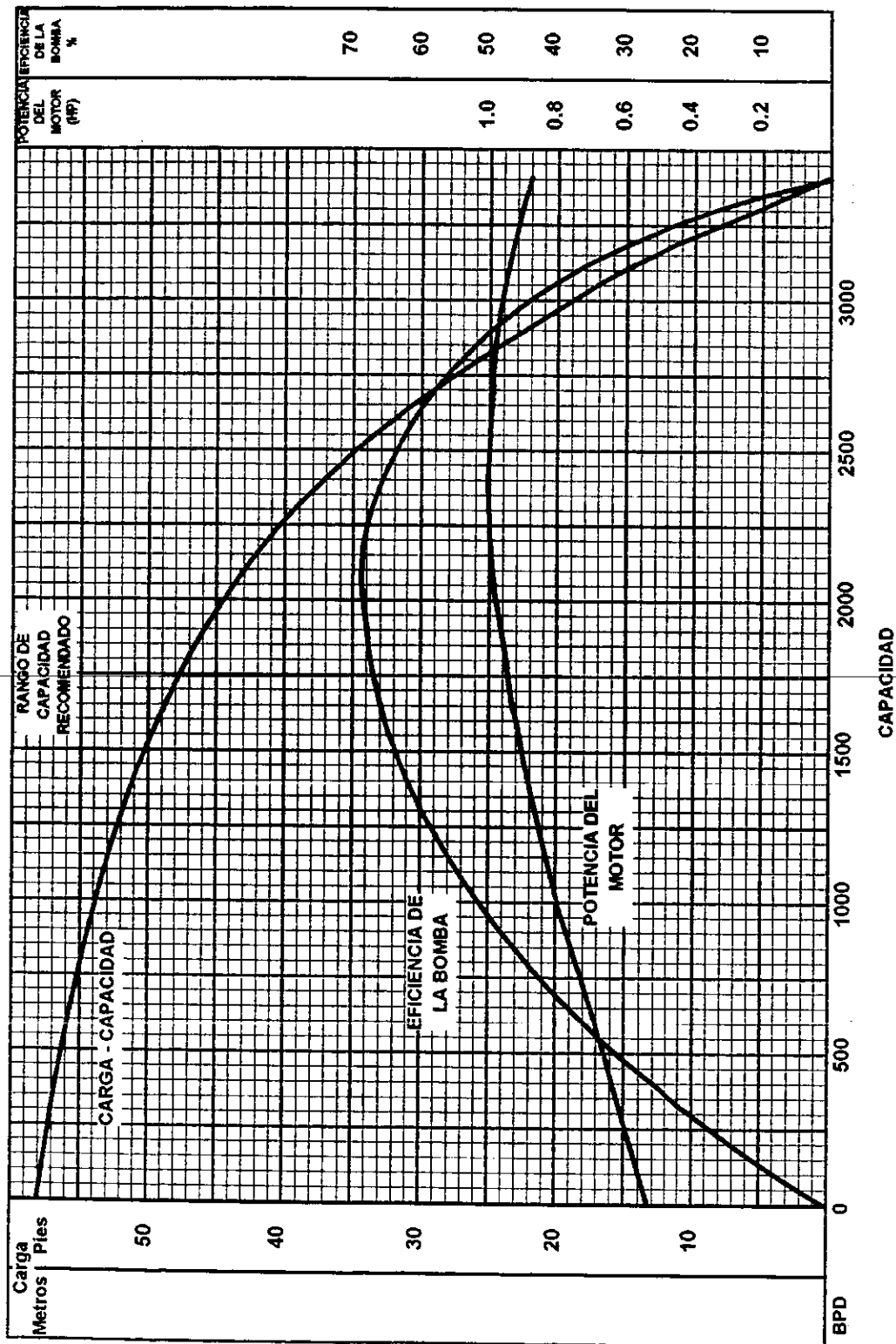


FIG. 29. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA Y-62B

FUENTE: CENTRILIFT, SUBMERSIBLE PUMP HANDBOOK, 1978

Carcaza			Bomba Tipo I-42B
No.	Longitud	Peso (lb)	No. máx de etapas
1	3' 8"	170	12
2	5' 2"	235	26
3	6' 8"	295	40
4	8' 2"	360	53
5	9' 8"	420	67
6	11' 2"	485	81
7	12' 8"	550	95
8	14' 2"	610	109
9	15' 8"	675	123
10	17' 2"	740	137

Carcaza			Bomba Tipo K-70
No.	Longitud	Peso (lb)	No. máx de etapas
1	3' 8"	170	6
2	5' 2"	235	14
3	6' 8"	295	21
4	8' 2"	360	29
5	9' 8"	420	36
6	11' 2"	485	44
7	12' 8"	550	52
8	14' 2"	610	59
9	15' 8"	675	67
10	17' 2"	740	74

Carcaza			Bomba Tipo Y-62B
No.	Longitud	Peso (lb)	No. máx de etapas
1	3' 8"	170	8
2	5' 2"	235	17
3	6' 8"	295	27
4	8' 2"	360	36
5	9' 8"	420	45
6	11' 2"	485	55
7	12' 8"	550	65
8	14' 2"	610	74
9	15' 8"	675	84
10	17' 2"	740	93

Tabla para determinar la carcaza y el número de etapas para cada tipo de bomba²².

2.8 PROCEDIMIENTO GRÁFICO^{20,21}.

A fin de analizar el comportamiento del sistema, se incluye un procedimiento gráfico que contempla el uso de los programas de cómputo "BECS", para el diseño de aparjos de bombeo electrocentrífugo y "FLUPROD", para el cálculo de perfiles de presión en tuberías. El procedimiento permite encontrar la condición de equilibrio entre la capacidad de producción del pozo y la del aparejo equipado con un controlador de velocidad variable, considerando las leyes de afinidad que establecen la relación entre los parámetros de comportamiento de la bomba y cualquier frecuencia en la corriente de operación.

Como complemento al procedimiento gráfico, se determinan los gastos que maneja la bomba en la succión y la descarga, con el propósito de asegurar que trabaja dentro del rango recomendado por el fabricante y en consecuencia, prolongar su vida útil.

2.8.1. Análisis del comportamiento del sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido mediante el procedimiento gráfico.

El análisis del comportamiento del sistema, para su interpretación adecuada en relación con la producción del pozo, requiere que en una gráfica de curvas características de la bomba, fig. 30, se incorporen los parámetros del pozo que influyen sobre dicho comportamiento.

Mediante una gráfica de presión contra gastos, es posible visualizar la influencia que tienen las variaciones de la presión estática y del índice de productividad, sobre el ritmo de producción y la presión en la succión de la bomba.

Con referencia a la fig. 31, cuando el aparejo de bombeo electrocentrífugo trabaja a una frecuencia constante, el gasto que produce (q), genera un nivel dinámico (ND) de fluido en el espacio anular; suponiendo que los gradientes de presión en tubería de producción y en el espacio anular se conocen y son iguales, quedan representados por las líneas I y II. La diferencia de presión entre los gradientes a la profundidad de la bomba, es igual a la carga estática (H_s). Generalmente, la presión en la cabeza del pozo por tubería de producción, es mayor que la presión adicional contra la que debe trabajar (H_p), donde: $H_p = P_{whp} - P_{whca}$, que es la línea III.

Adicionalmente, las pérdidas de presión por fricción (H_f), en la tubería de producción, se ilustran con la línea IV. Los términos de carga mencionados constituyen los factores que deben considerarse en la definición de carga dinámica total.

$$CDT = \left[\begin{array}{c} \text{Profundidad de} \\ \text{colocación de} \\ \text{la bomba} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Presión en} \\ \text{la cabeza} \\ \text{del pozo} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Pérdidas de} \\ \text{presión por} \\ \text{fricción} \end{array} \right] - [\text{Sumergencia}]$$

$$CDT = H_s + H_f + P_{whp} - P_{whca}$$

Donde los términos deben expresarse en su equivalente en longitud de columna hidráulica.

En la sección inferior derecha de la fig. 31, se incluye una gráfica de curva de capacidad de carga de la bomba girada 90° , de tal forma que su eje de capacidad de carga expresada en unidades de presión, es paralelo al eje de presión del diagrama presión-profundidad; además tiene su origen en el punto donde el gradiente de presión en el espacio anular, intersecta a la profundidad de la bomba y al que corresponde la presión en la succión (P_{succ}). La intersección de la línea de CDT con la curva de capacidad de carga, establece el gasto de equilibrio entre la capacidad del aparejo y la del pozo.

Dado que la presión en la succión señala la posición de la curva de capacidad de carga, en relación con el diagrama de presión-profundidad; si varía el gasto, el nivel dinámico también cambia y en consecuencia la presión en la succión varía, lo que resulta en un deslizamiento de la curva de capacidad de carga en relación con el diagrama presión-profundidad. Desde el punto de vista operativo, lo anterior sucede cada vez que se modifica la frecuencia para cambiar la velocidad de bombeo.

De acuerdo a los antecedentes mencionados, se construye una gráfica de gasto-presión, fig. 32, que incluya la presión estática, el índice de productividad y la curva de presión en la succión para diferentes gastos, considerando fija la profundidad de colocación de la bomba. Esta curva se obtiene calculando las caídas de presión desde el nivel medio del intervalo productor (NMIP) hasta la profundidad de la bomba a varios gastos. También se incluye la curva de carga, 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. De hecho, es la curva de capacidad de transporte de la tubería de producción.

La distancia entre la curva de carga y la de presión en la succión, es la carga dinámica total expresada en unidades de presión para diferentes gastos. Para un gasto en particular, la CDT leída de la gráfica, es igual a la CDT que la bomba puede desarrollar de acuerdo con su curva de capacidad de carga, lo que representa el equilibrio del sistema pozo-aparejo.

La fig. 33, ilustra la forma en que puede encontrarse la condición de equilibrio para un pozo y bomba dados.

Cuando se tiene establecida la profundidad de colocación de la bomba, se puede construir una gráfica de gasto-presión que incluya las curvas de carga y de presión en la succión. En otra gráfica, con escala idéntica se incluye la curva de capacidad de carga de la bomba y su línea base; estas gráficas se superponen. En el caso I, la presión en la succión es demasiado baja y la carga dinámica total requerida (A-C) es mayor a la que la bomba puede desarrollar (A-B). En el caso II, la presión en la succión es demasiado alta y la bomba puede desarrollar una CDT igual a (D-E), mientras que sólo se requiere (D-F). El equilibrio se logra en el caso III, donde la intersección de la línea base con la curva de P_{succ} , se encuentra en el mismo plano vertical de la intersección entre las curvas de carga requerida y de capacidad de carga de la bomba.

Para encontrar esta posición de equilibrio es necesario deslizar verticalmente la gráfica de capacidad de carga y línea base, sobre la gráfica de curva de P_{succ} y carga, hasta que las dos intersecciones mencionadas queden alineadas. La P_{succ} y gasto correspondientes se leen de la gráfica.

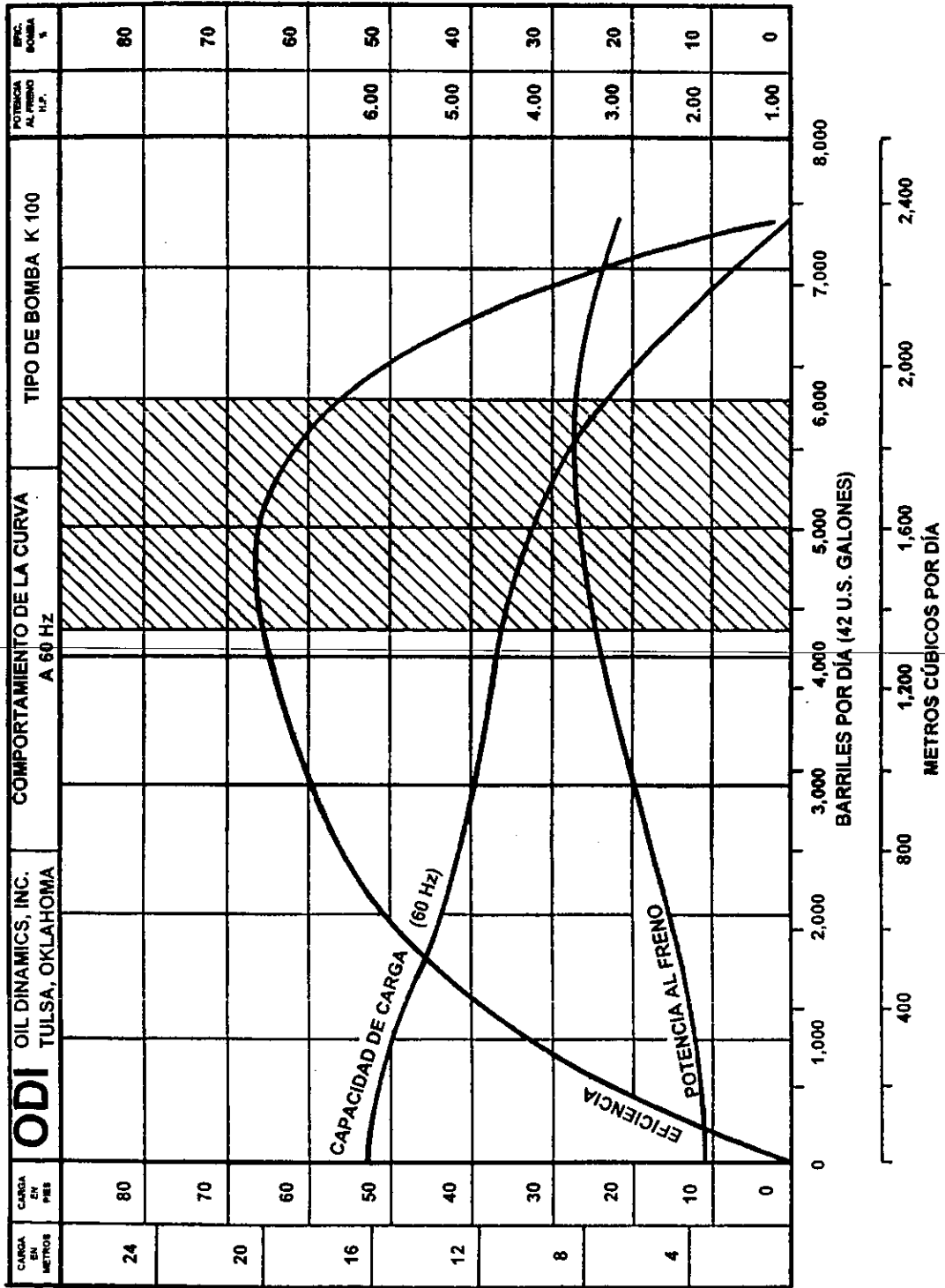


FIG. 30. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA ODI K-100

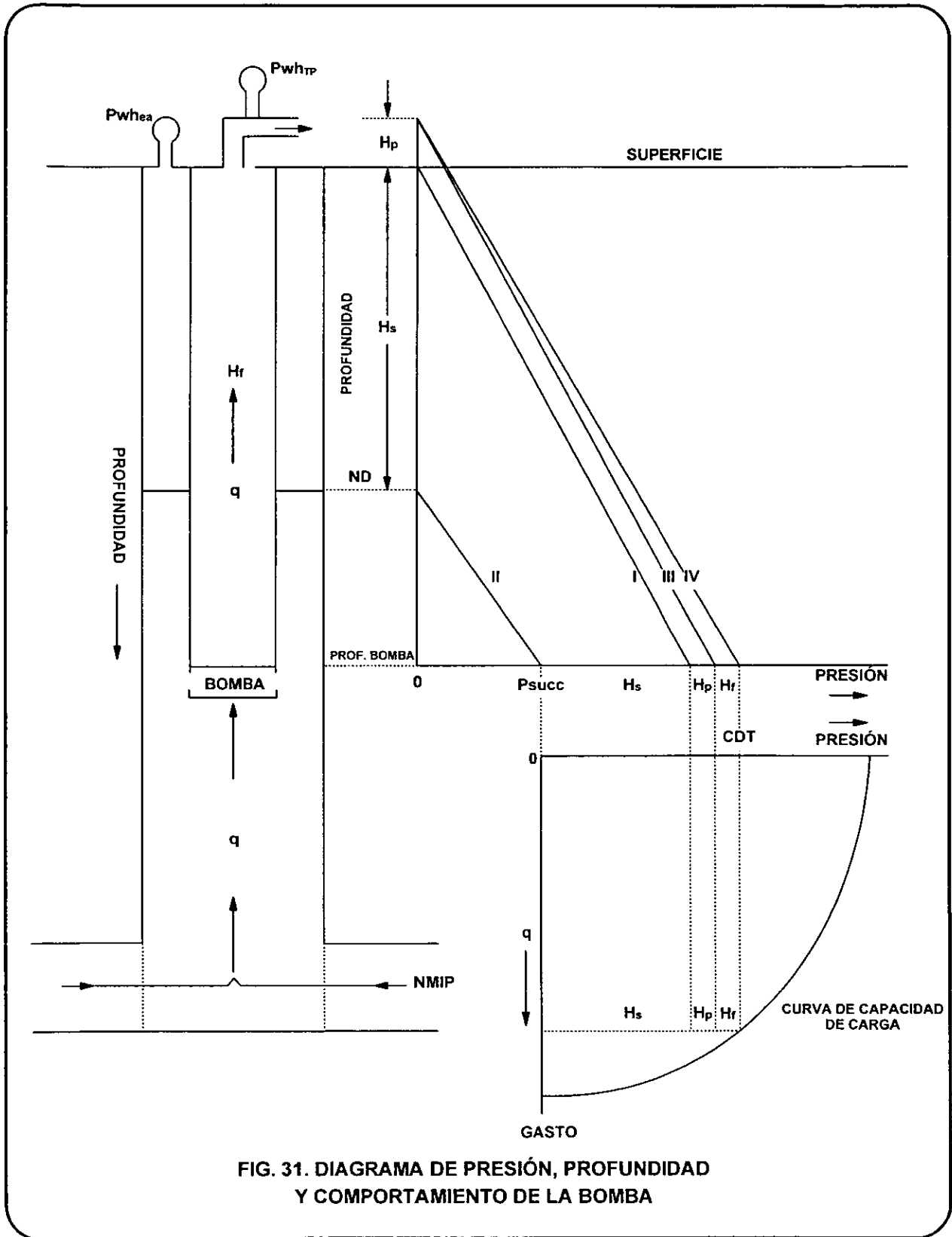


FIG. 31. DIAGRAMA DE PRESIÓN, PROFUNDIDAD Y COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA

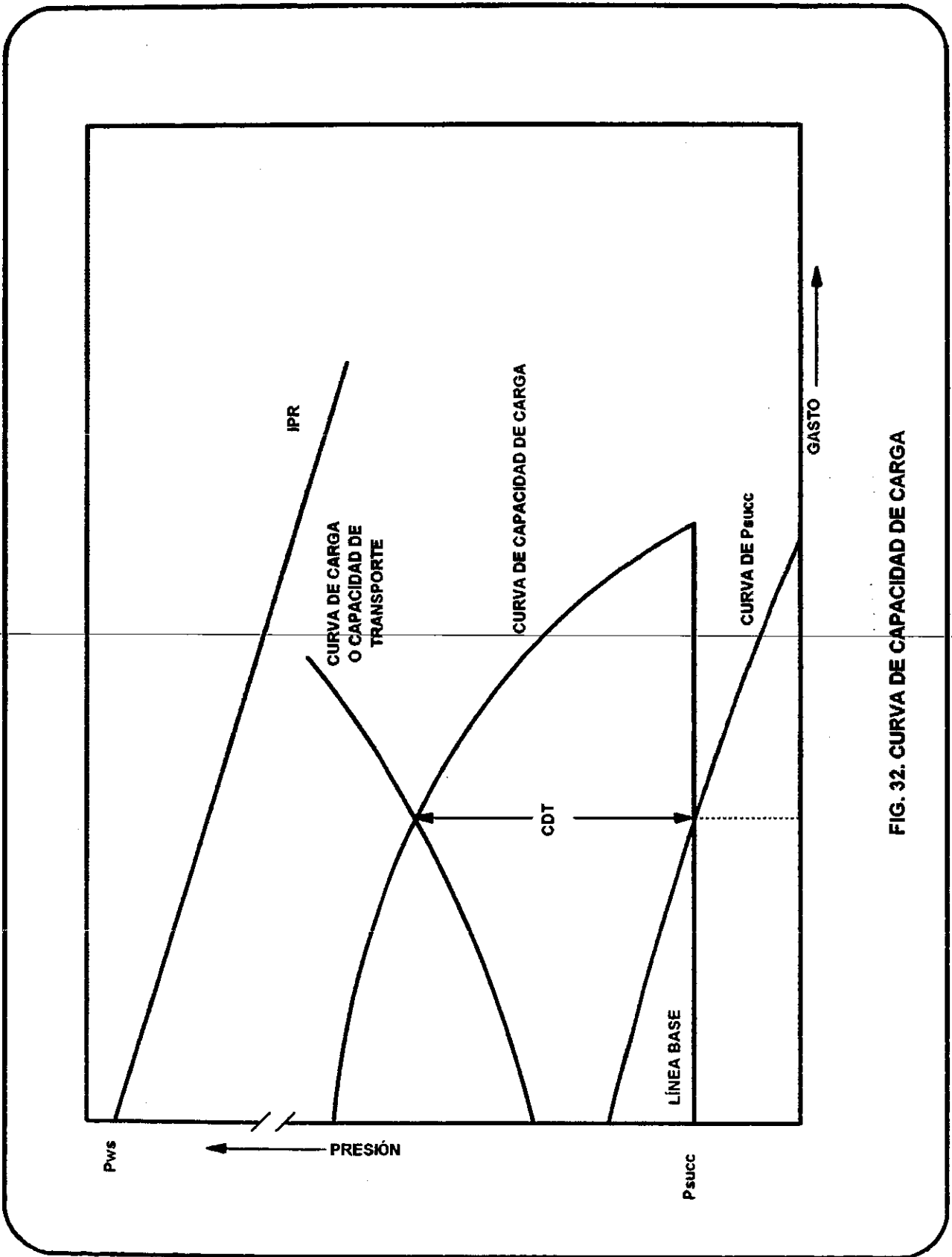


FIG. 32. CURVA DE CAPACIDAD DE CARGA

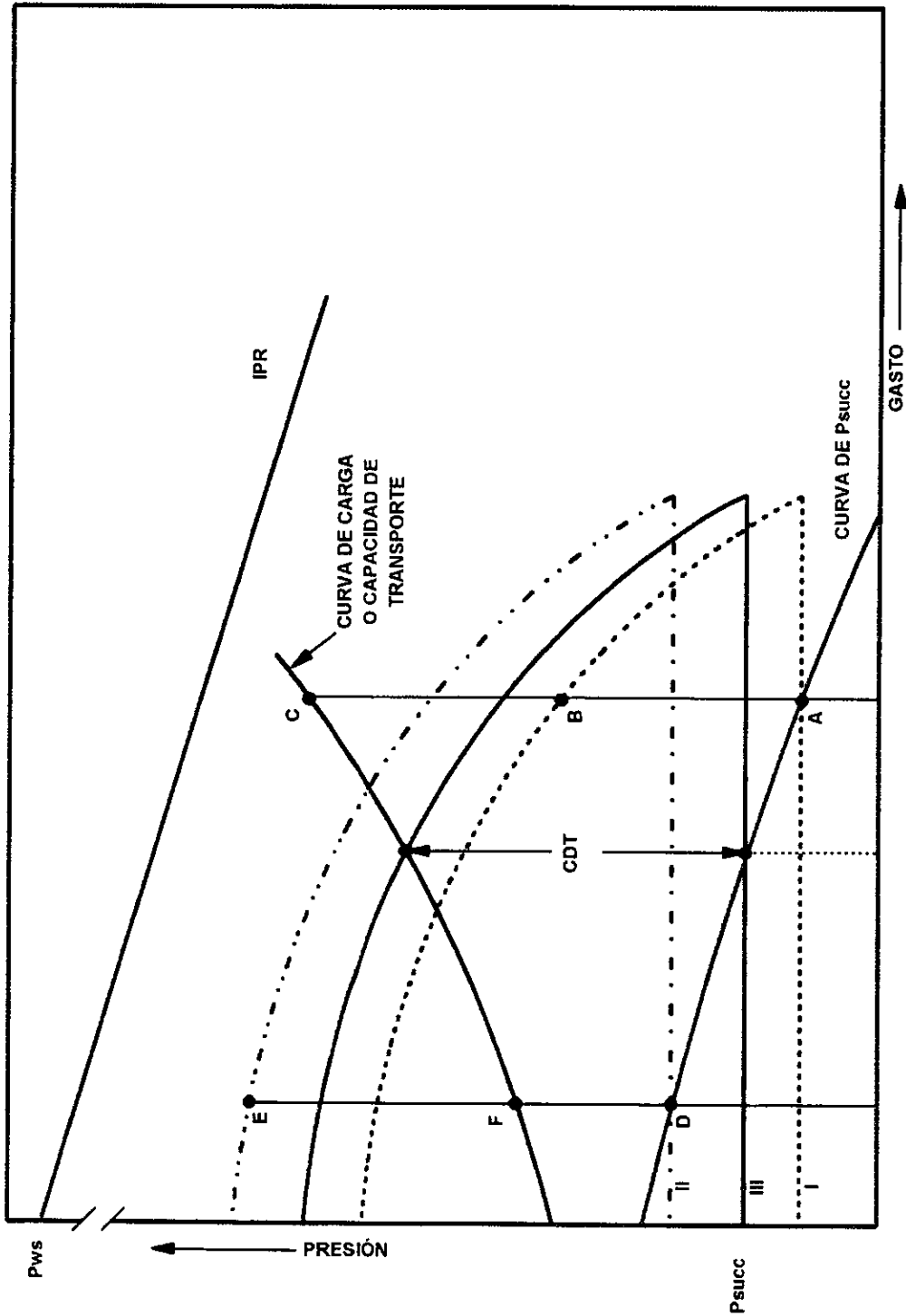


FIG. 33. CURVA DE CAPACIDAD DE CARGA DE LA BOMBA Y PRODUCCIÓN DEL POZO

2.8.2 Ejemplo de aplicación^{20,21}.

A fin de ejemplificar el procedimiento anteriormente expuesto, se presenta una aplicación a un pozo hipotético, para el que se supone que se ha realizado un diseño de aparejo de bombeo electrocentrífugo, el cual se instaló equipado con un controlador de velocidad variable. Una vez que se inicia la operación del aparejo de bombeo electrocentrífugo y cuando las mediciones de producción indican que se tienen condiciones de operación estables, se registra información para las frecuencias de 60, 55 y 50 Hz; la cual incluye la presión en la cabeza (P_{wh}), gasto (q), relación gas-aceite (RGA) y temperatura en la cabeza (T_{wh}).

Empleando el programa "BECS" para el diseño de aparejos de bombeo electrocentrífugo, se reproducen las condiciones de operación medidas, considerando fija la profundidad de colocación de la bomba. El parámetro que gobierna esta simulación es la cantidad de gas libre que entra a la bomba y el resultado es una gráfica de perfiles de presión fluyendo con aparejo de bombeo electrocentrífugo, fig. 34, donde se aprecia:

- 1) El incremento de presión que la bomba imprime a los fluidos para hacerlos llegar a la superficie con la presión medida, 2) Las presiones en la succión y en la descarga de la bomba, 3) La relación gas-aceite por arriba y por abajo de la bomba y, 4) Su profundidad de colocación.

También como resultado del programa "BECS", es posible elaborar figuras como la 35 y 36. En la fig. 35, se muestran las diferencias de gasto de fluidos que maneja la bomba en la succión y en la descarga; así como el gasto de líquido que se obtienen en la superficie. En la fig. 36, se muestra el cambio volumétrico de los fluidos conforma aumenta la presión a lo largo de la bomba.

Particularmente para el análisis del comportamiento de producción del pozo hipotético, se elaboraron las figs. 37, 38, y 39, utilizando la información supuestamente registrada durante el tiempo en el que el aparejo haya trabajado a las frecuencias de 60, 55 y 50 Hz. En la fig. 37, se incluye la línea base de la bomba (ODI K-100), considerando que su profundidad de colocación es fija, y la presión en la succión corresponde al valor calculado mediante el programa "BECS"; también se muestran las curvas de capacidad de carga que la bomba debe de desarrollar cuando trabaja a las frecuencias de 60, 55 y 50 Hz. Estas curvas se calcularon tomando en cuenta que debido a la variación volumétrica de gastos entre la succión y la descarga de la bomba, se requieren las densidades relativas (ρ_r) correspondientes y la capacidad de carga que desarrolla cada etapa de la bomba (H/etapa), ésta se expresa en unidades de presión para llevarla a la gráfica, con cada gasto considerado.

$$P\left(\frac{kg}{cm^2}\right) = NE * \rho_r * \frac{H}{etapa} * 0.433$$

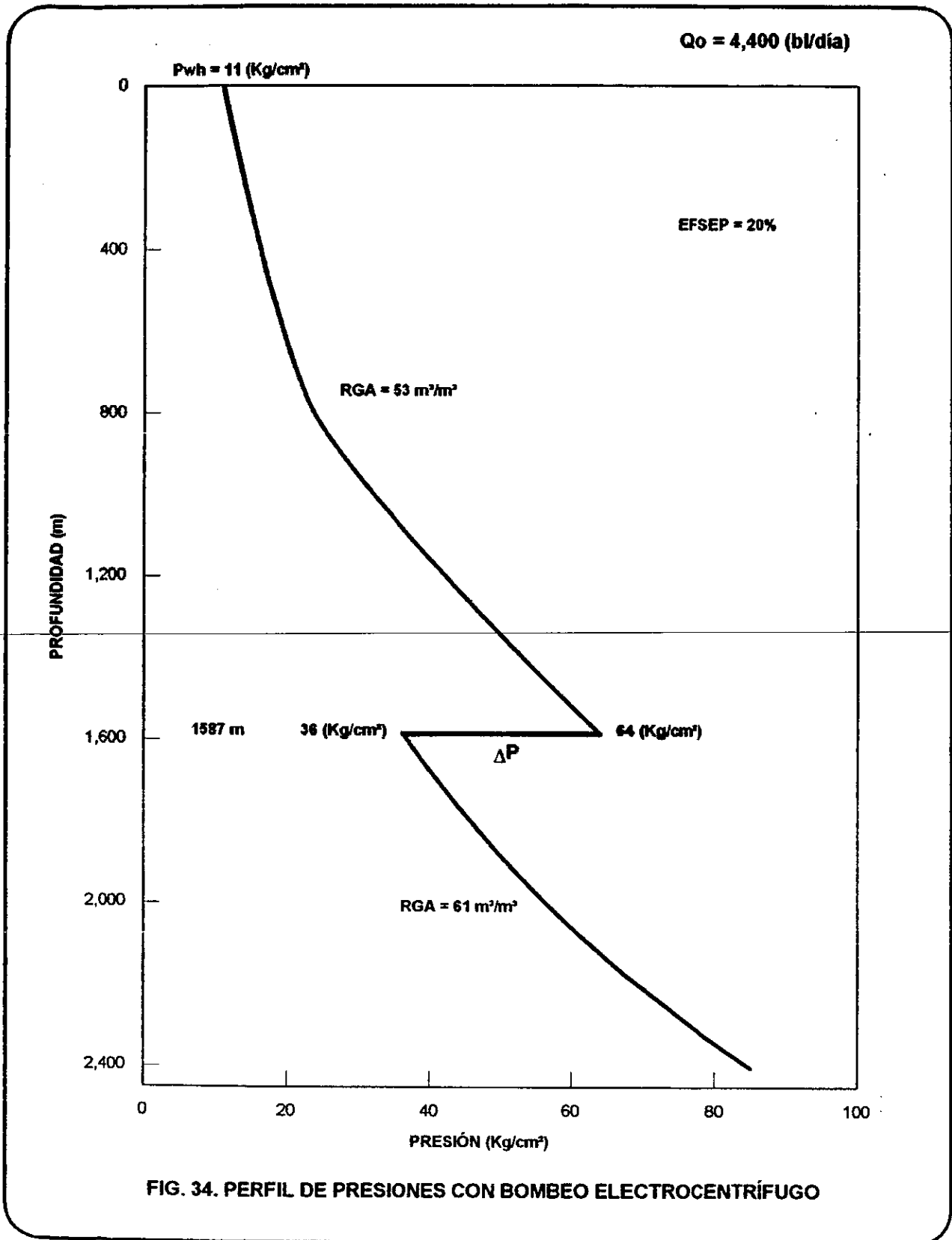
Donde: NE = Número de etapas de la bomba instalada.

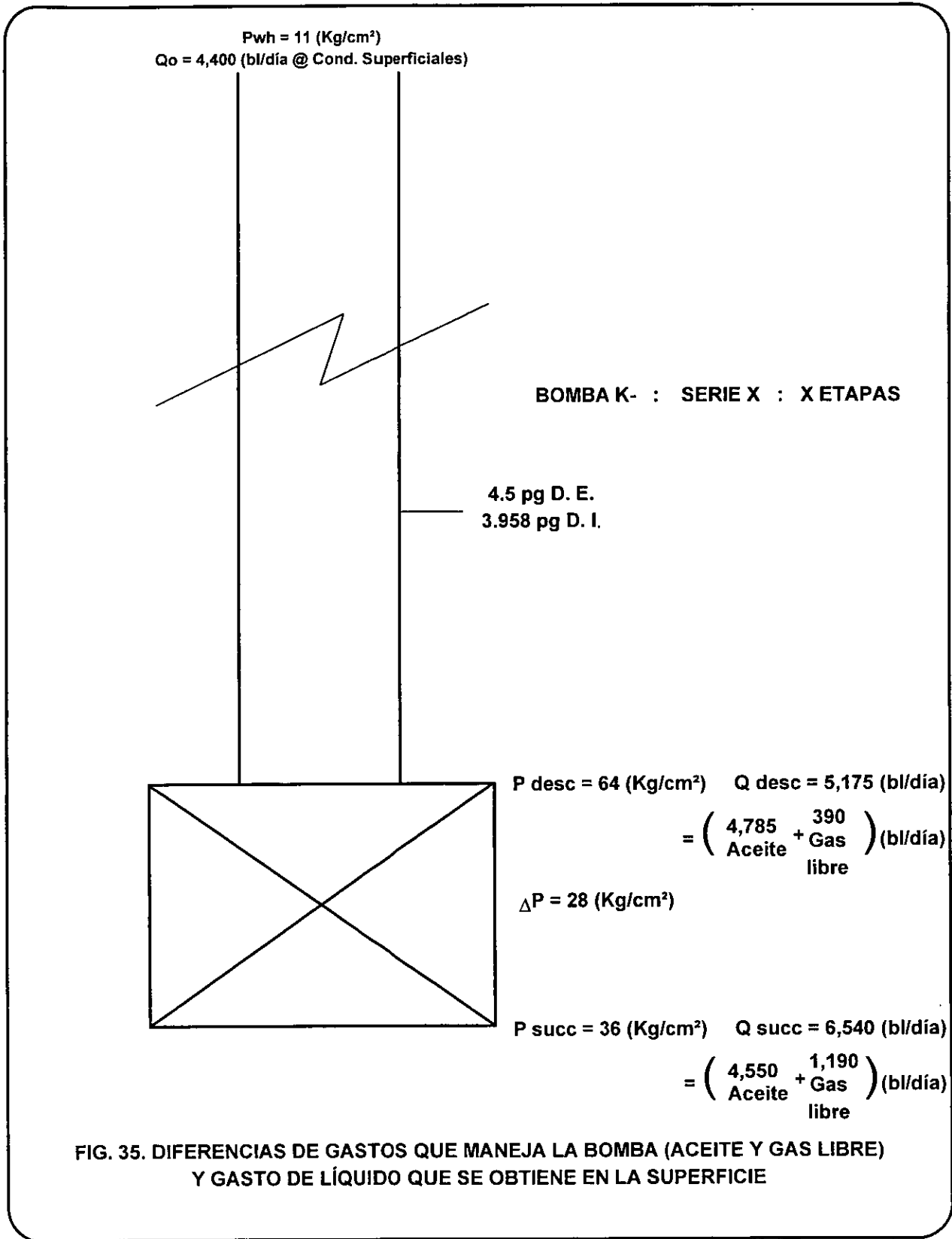
En la fig. 38, se muestran las curvas de capacidad de producción del pozo "IPR"; la de presiones en la succión de la bomba para diferentes gastos y la de capacidad de transporte del aparejo por arriba de la bomba para las presiones de 11.0 (12.4 y 9.7) Kg/cm², RGA de 53 m³/m³; medidas respectivamente, para las frecuencias de 60, (55 y 50) Hz.

De la superposición de la figs. 37 y 38, fig. 40, se observa que las intersecciones en un mismo plano vertical, de la curva de capacidad de transporte con la de capacidad de la bomba a 60 Hz y las de presión en la succión con la línea base; se encuentran a 4,400 bl/día, mismo que representa la condición de operación de la bomba durante la prueba. Sin embargo, ese gasto implica que a la profundidad de la bomba, los gastos en la succión y la descarga de la bomba son de 6,540 y 5,175 bl/día, respectivamente, el primero fuera del límite máximo recomendado de 6,000 bl/día a 60 Hz, como se muestra en la fig. 41. Debido a que en el caso particular del pozo analizado, se tiene fija la profundidad de la bomba, se busca mediante ensaye y error, el gasto superficial de aceite que no exceda los límites recomendado de la bomba y se encuentra que con 4,100 bl/día, se tienen gastos en la succión y descarga de 5,700 y 4,950 bl/día, ambos dentro del rango de la bomba, fig. 42.

A fin de generalizar el procedimiento mencionado, en la fig. 39 se incluyen las curvas de capacidad de carga para 60, 55 y 50 Hz y curvas de capacidad de transporte para 25, 20, 15, 10 y 5 Kg/cm² de presión en la cabeza del pozo.

Ahora con las figs. 37 y 38, superpuestas nuevamente, fig. 43, por interpolación se busca la línea de frecuencia que en el mismo plano vertical de 4,100 bl/día intersecte las curvas mencionadas anteriormente. En la fig. 43, se observa que dicha condición se encuentra a 57 Hz, por lo que ésta es la frecuencia recomendable para que la bomba instalada (K-100) con un número de etapas fijo, opere apropiadamente. Otra forma de operación con la que se logran las mismas condiciones, es elevar la presión en la cabeza del pozo a 23 Kg/cm² mediante estrangulamiento y sostener en 60 Hz la frecuencia.





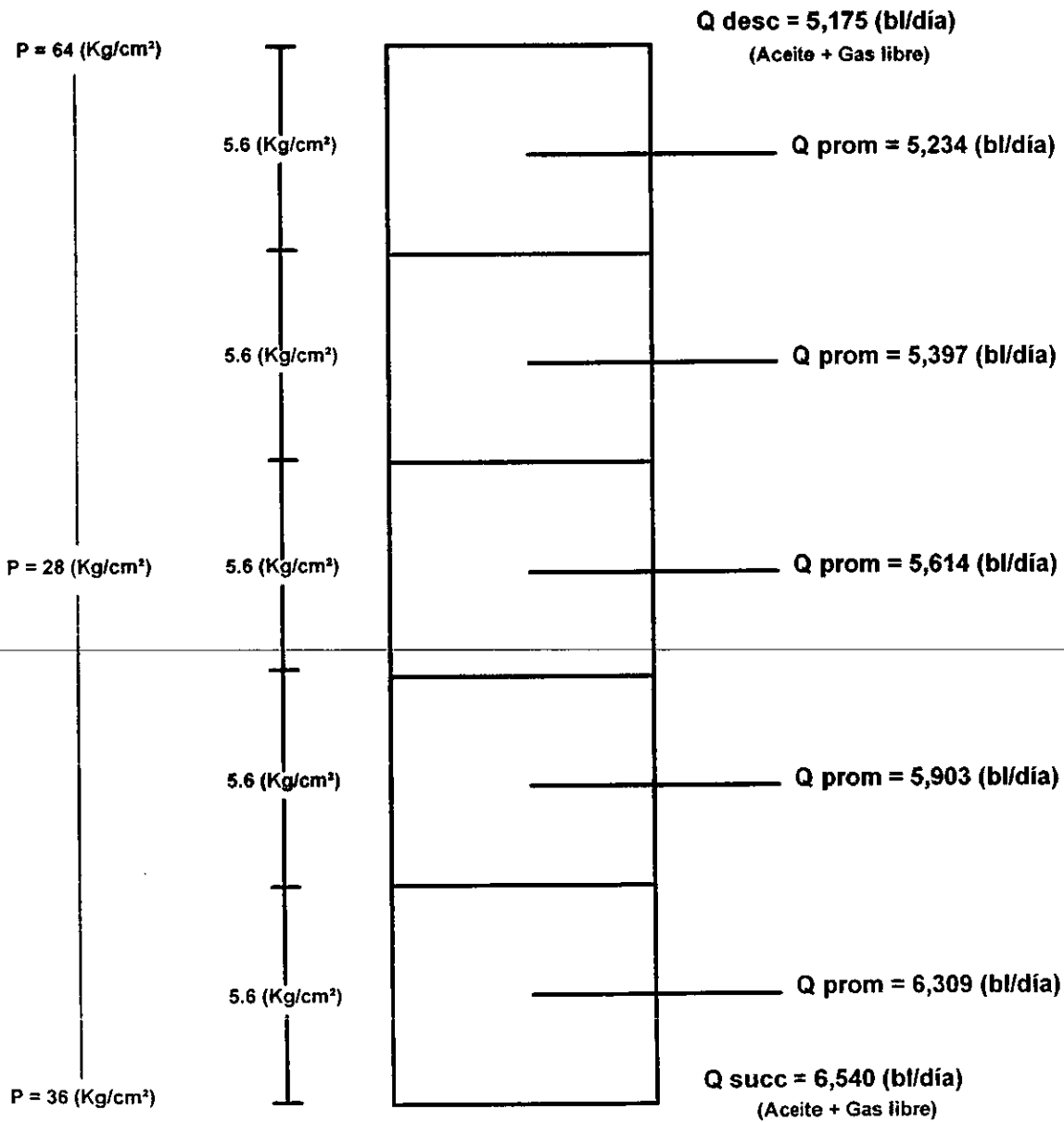


FIG. 36. CAMBIO VOLUMÉTRICO EN LA BOMBA

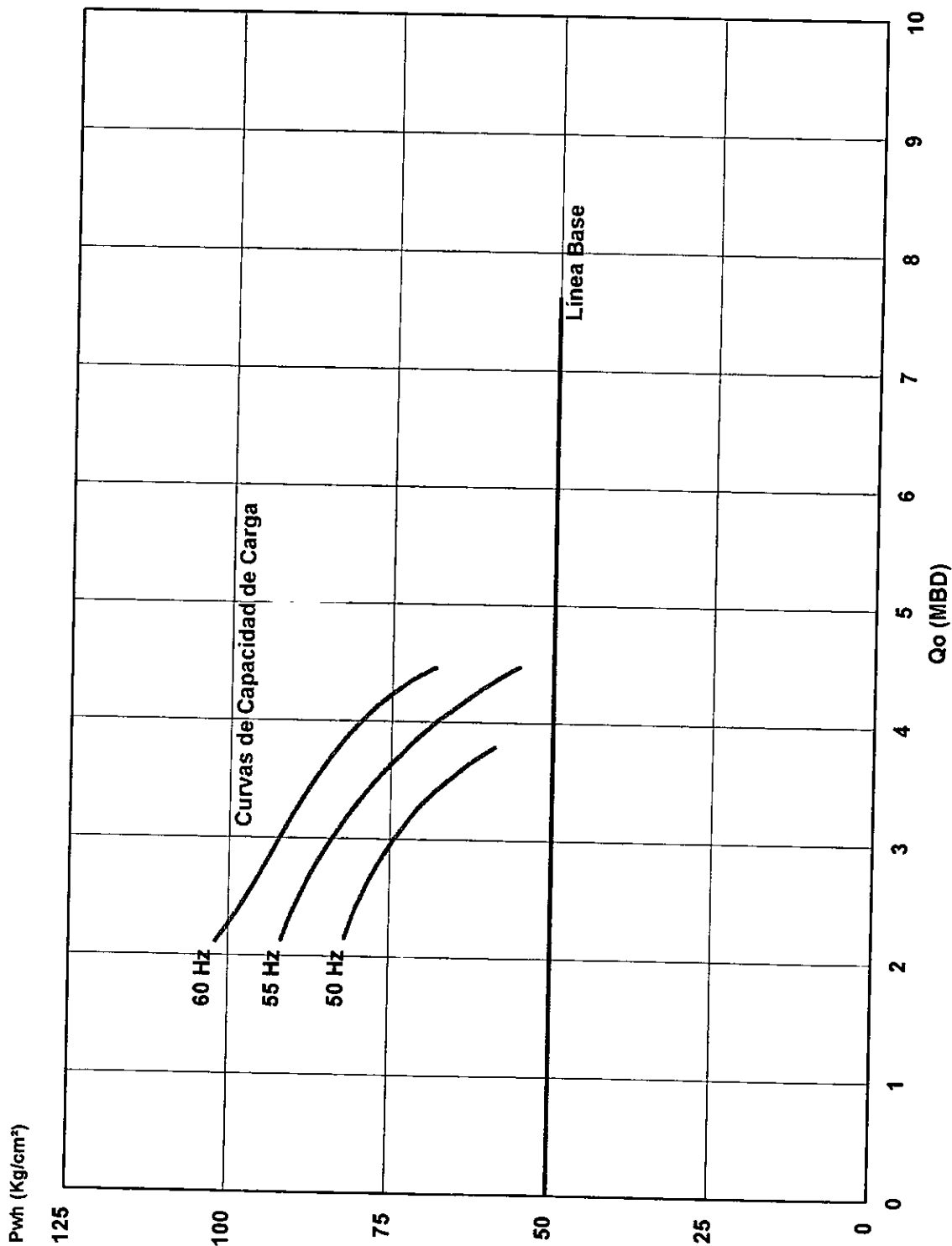


FIG. 37. CURVAS DE CAPACIDAD DE CARGA

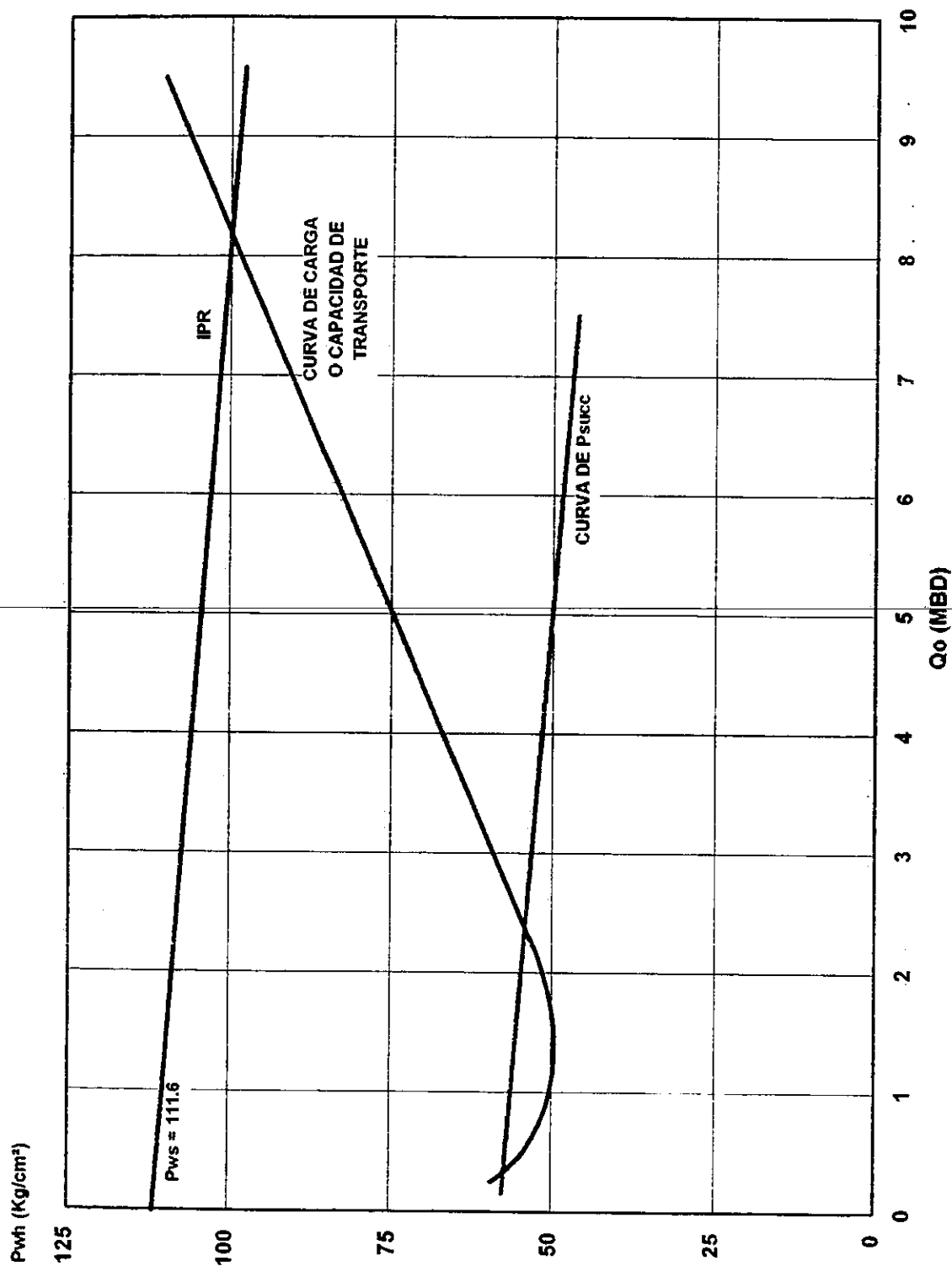


FIG. 38. CURVAS DE IPR, CARGA Y P_{succ} A 60 Hz

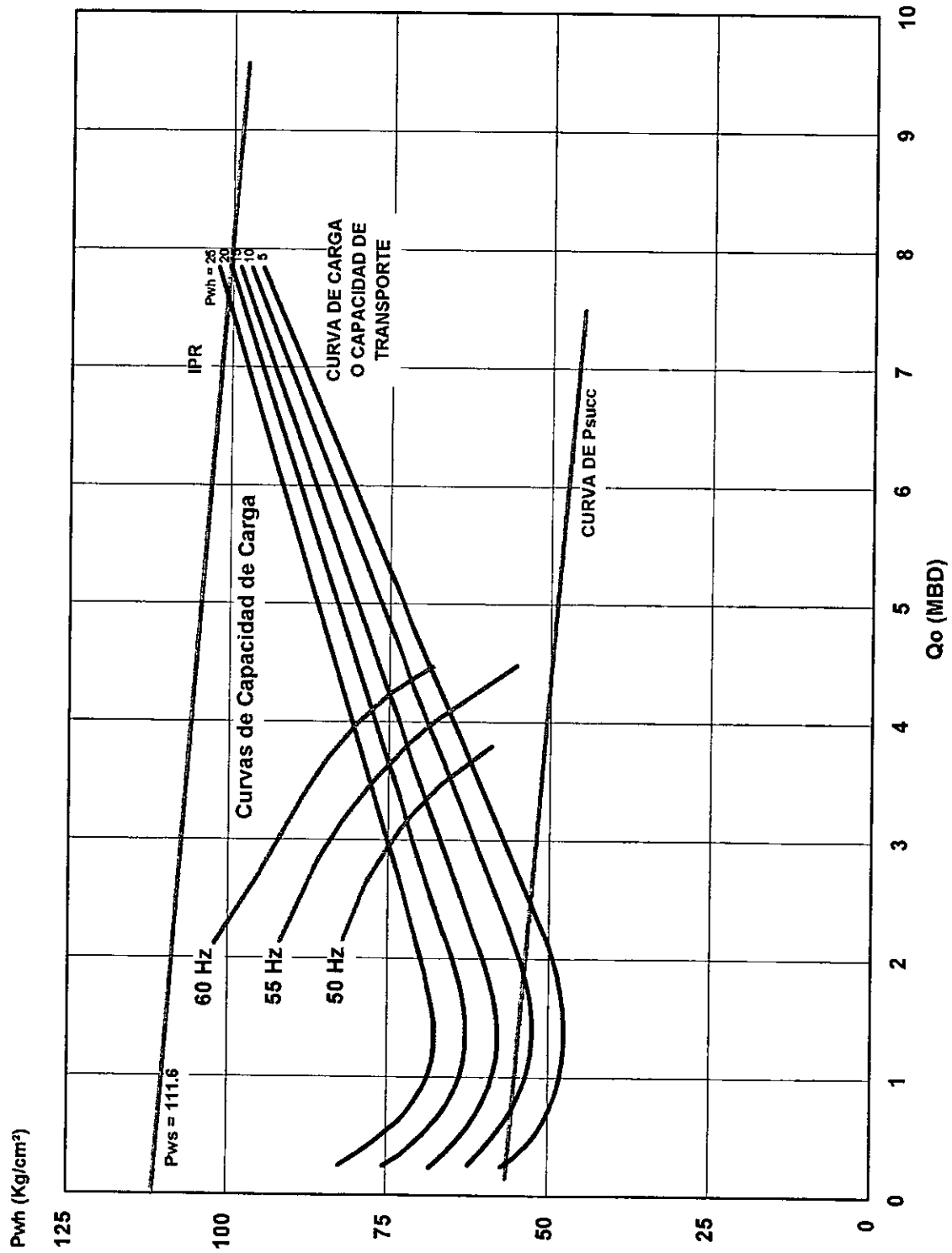


FIG. 39. GRÁFICA GENERALIZADA DE Pwh

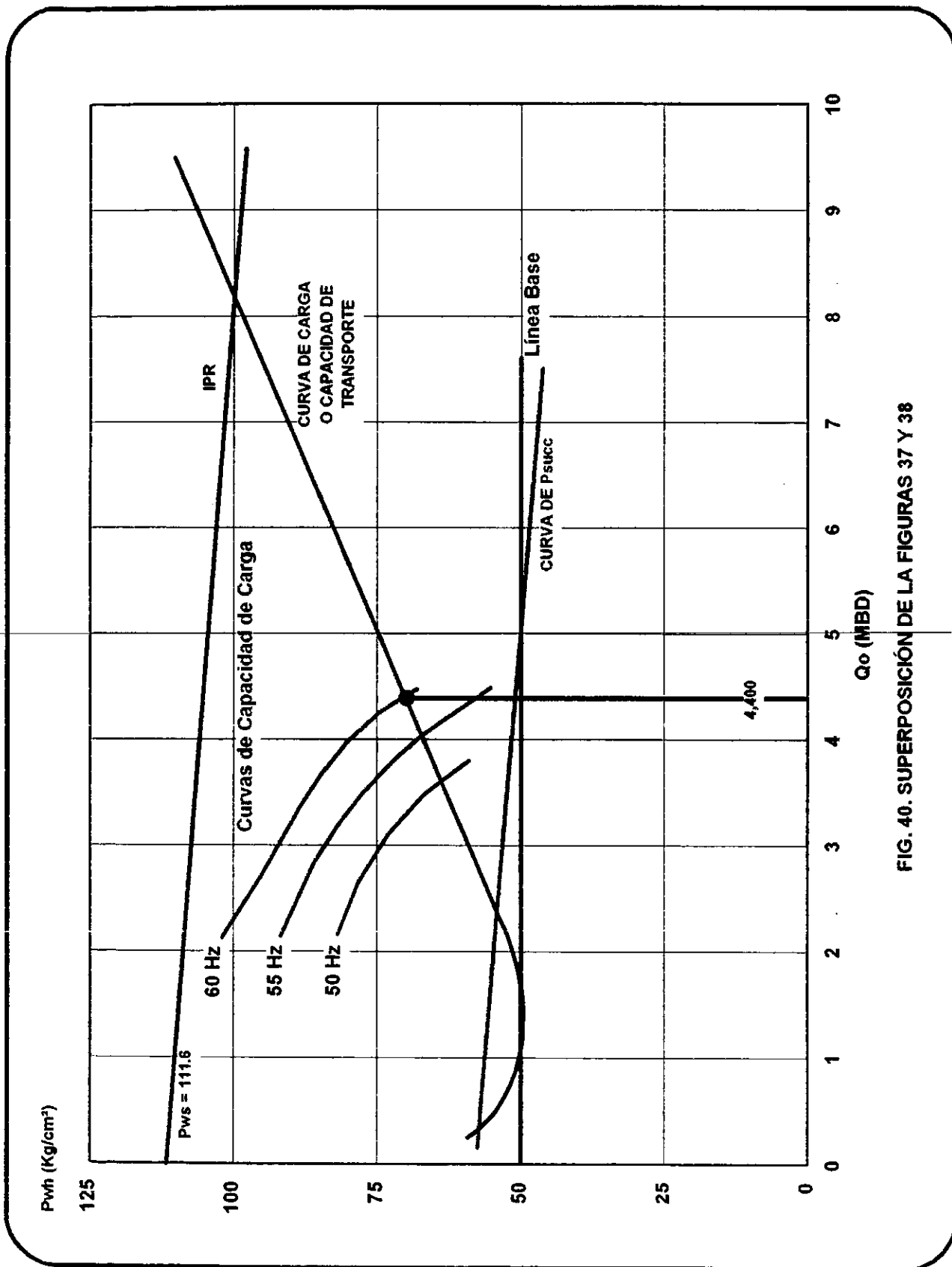


FIG. 40. SUPERPOSICIÓN DE LA FIGURAS 37 Y 38

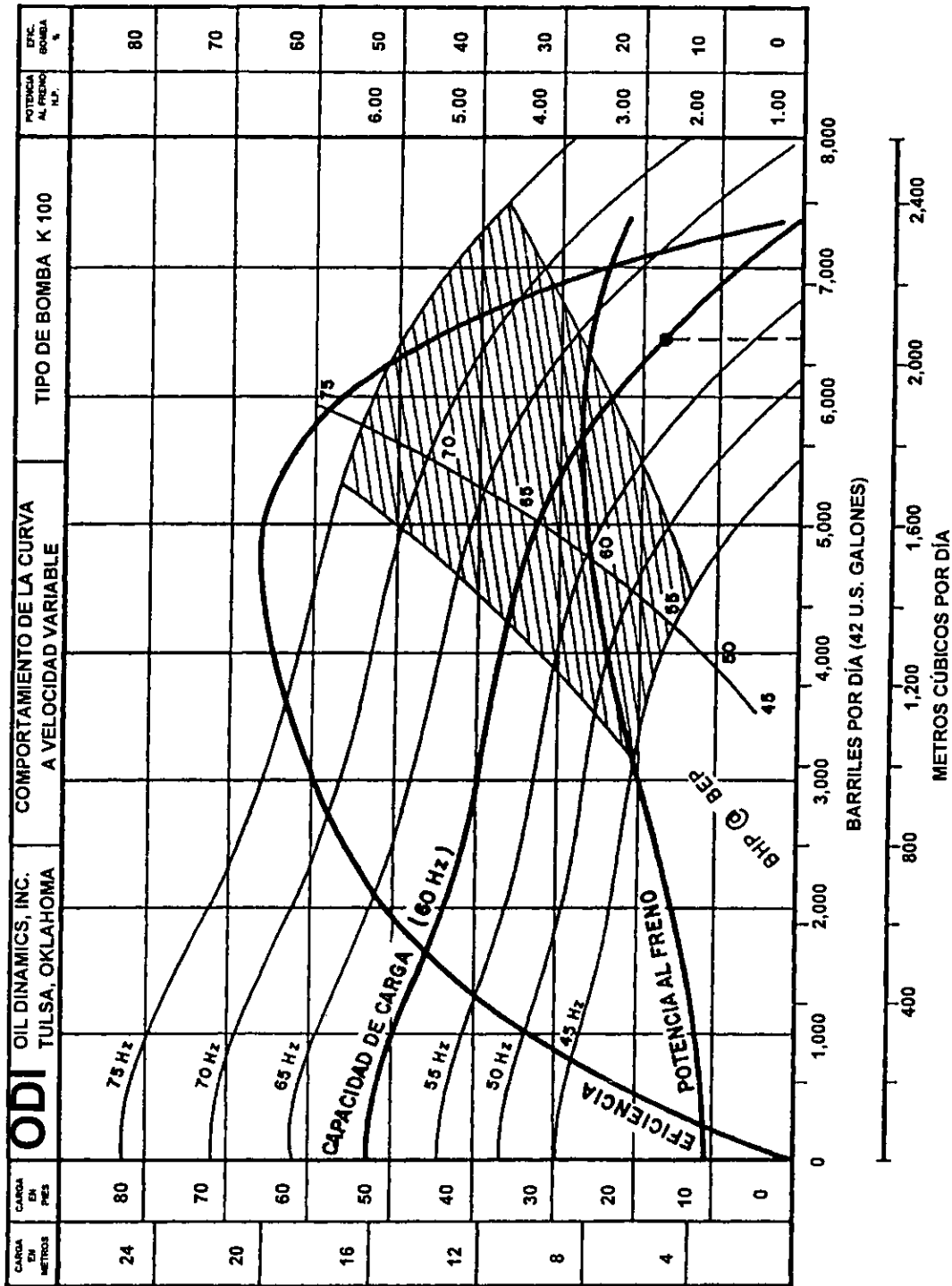


FIG. 41. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA ODI K-100

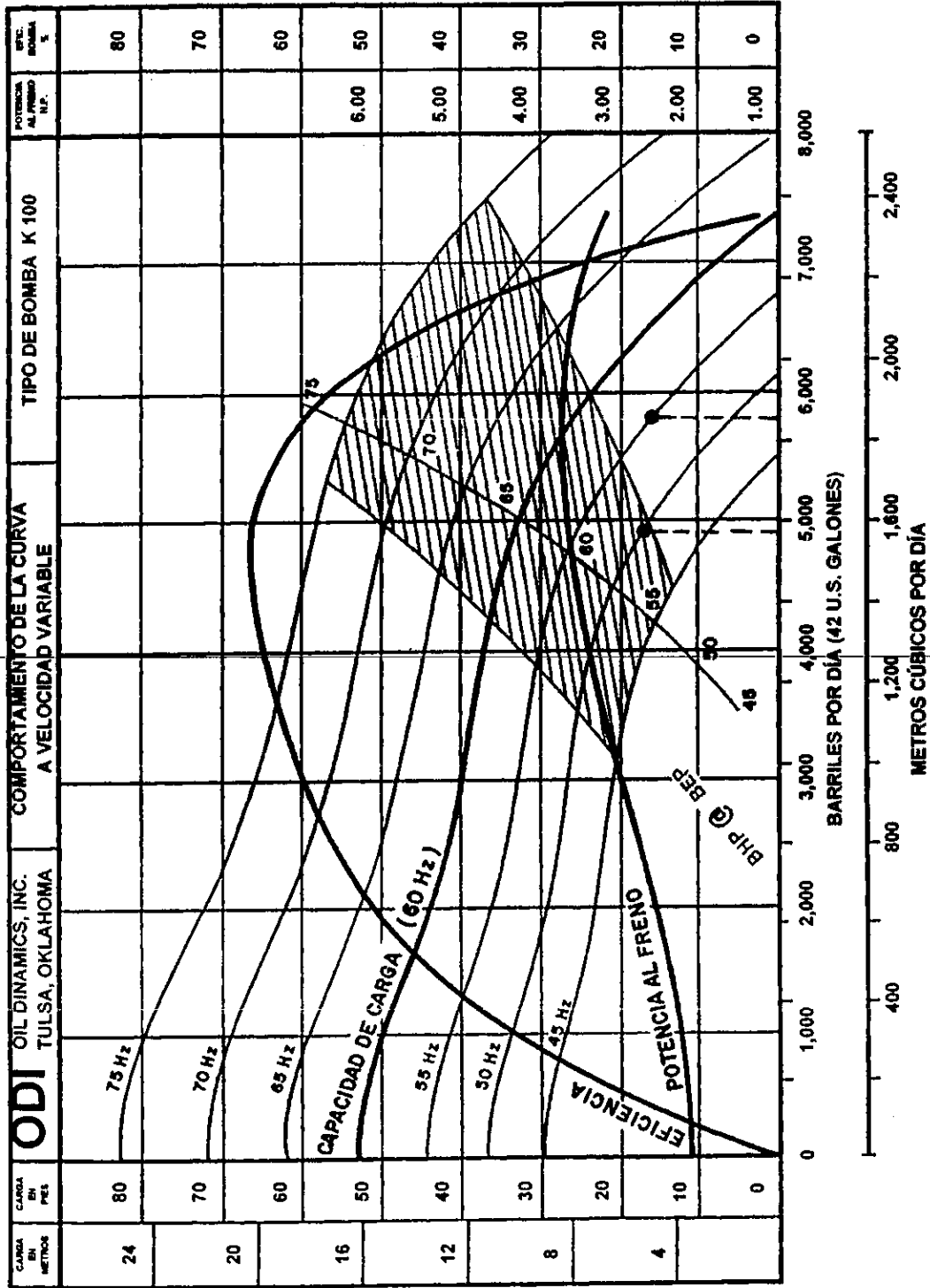


FIG. 42. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA ODI K-100

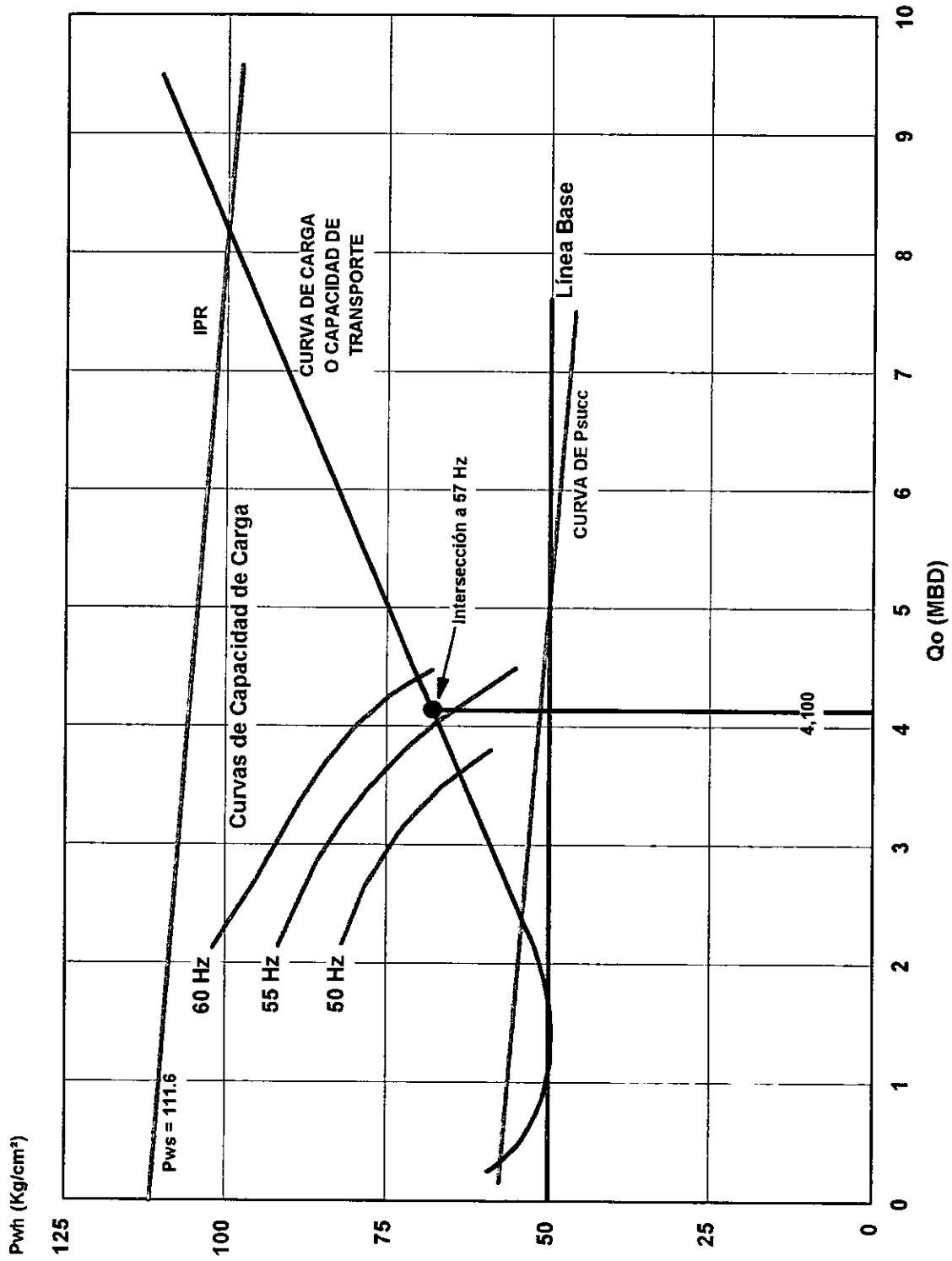


FIG. 43. SUPERPOSICIÓN DE LA FIGURAS 37 Y 38

CAPÍTULO III

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

3.1 EJEMPLO PARA UN POZO PRODUCTOR DE AGUA^{1, 23}.**1. Recopilar y analizar datos:**

Diámetro de T.R.:	$\phi_{T.R.}$	= 5½ pg.
Diámetro de T.P.:	$\phi_{T.P.}$	= 2¾ pg.
Intervalo disparado:		= 6,000 pies.
Presión estática:	P_{ws}	= 2,200 lb/pg ² .
Presión en la cabeza del pozo:	P_{wh}	= 120 lb/pg ² .
Densidad relativa del agua:	ρ_{rw}	= 1.07
Temperatura en fondo del pozo	T_{wf}	= 160 °F.
Gasto deseado:	q	= 1,500 bpd.
Índice de productividad:	IP	= 1 bpd/lb/pg ² .

Seleccionar la bomba eléctrica apropiada, así como el equipo necesario.

2. Determinar la capacidad de producción del pozo.

En este problema el gasto deseado es de 1,500 bpd.

3. Determinar la carga dinámica total (CDT) necesaria en pies para 1,500 bpd.**a) Elevación neta (profundidad de colocación de la bomba - sumergencia)**

Para definir la profundidad de colocación de la bomba, necesitamos definir qué columna hidráulica se requiere tener sobre la bomba para que nos produzca 1,500 bpd, con un $J = 1$ bpd/lb/pg².

$$IP = \frac{q}{\Delta p} \quad , \quad \Delta p = \frac{q}{IP}$$

$$\Delta p = \frac{1,500 \text{ bpd}}{1 \text{ bpd/lb/pg}^2} = 1,500 \text{ lb/pg}^2 \text{ de abatimiento}$$

Es decir se requiere levantar una presión de:

$$\Delta p = P_{ws} - P_{wf} \quad , \quad P_{wf} = P_{ws} - \Delta p$$

$$P_{wf} = 2,200 - 1,500 = 700 \text{ lb/pg}^2$$

Por otro lado:

$$ND = Prof - \frac{P_{wf}}{0.433 * \rho_{rw}} = 6,000 - \frac{700}{0.433 * 1.07} = 4,489 \text{ pies}$$

Si le demandamos una sumergencia de 311 pies, entonces la bomba se colocará a:

$$4,489 \text{ pies} + 311 \text{ pies} = 4,800 \text{ pies}$$

b) Presión en la cabeza del pozo en pies (P_{wh}).

$$P_{wh} = \frac{120 \text{ lb/pg}^2}{\left(0.433 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}\right)(1.07)}$$

$$P_{wh} = 250 \text{ pies}$$

c) Caída de presión por fricción en la T.P. para un gasto de 1,500 bpd a través de una T.P. de 2³/₈ pg (Apéndice A, fig. A2) es igual a: 60 pies/1,000 pies

Entonces:

$$\Delta p_f = \left(\frac{60 \text{ pies}}{1,000 \text{ pies}}\right) * 4,800 \text{ pies}$$

$$\Delta p_f = 288 \text{ pies}$$

Por lo tanto:

$$CDT = \text{Elevación neta} + \Delta p_f \text{ en TP} + P_{wh}$$

$$CDT = (4,800 - 311) + 259 + 288$$

$$CDT = 5,036 \text{ pies}$$

4. Seleccionar de entre las curvas características de las bombas, la que tenga la mayor eficiencia para el gasto deseado y el diámetro exterior sea menor al diámetro interior de la T.R.

$$\phi_{T.R.} = 5\frac{1}{2} \text{ pg.}$$

$$q = 1,500 \text{ bpd.}$$

Con los datos anteriores se selecciona la bomba REDA D-51 (Apéndice B), ya que es la que maneja el gasto con mayor eficiencia.

5. Determinar el número de etapas requeridas para permitir producir el gasto deseado.

De la curva característica para la bomba y para el gasto de 1,500 bpd se desarrollan 20.2 pies/etapa, para 5,036 pies de carga se requieren:

$$NE = \frac{5,036 \text{ pies}}{20.2 \text{ pies/etapa}} = 250 \text{ etapas}$$

6. Determinar la potencia que se requiere en el motor.

De la curva característica y para el gasto de 1,500 bpd se requieren 0.36 Hp/etapa (basados en la densidad del agua de 1.00).

Entonces, para una densidad relativa de 1.07, los Hp serán:

$$\begin{aligned} \text{Potencia} = \text{Hp} &= NE * \text{Hp/etapa} * \rho_r \\ \text{Potencia} = \text{Hp} &= 250 \text{ etapas} * 0.36 \text{ Hp/etapa} * 1.07 \\ \text{Potencia} = \text{Hp} &= 97 \text{ Hp} \end{aligned}$$

Considerando esta potencia y que el motor debe manejar Hp adicionales que pueden ser requeridos para propósitos de descarga, se selecciona, del Apéndice C, un motor de 60 Hz de la serie 456 de 100 Hp, 1,400 volts y 45 amperes.

7. Seleccionar el tamaño y tipo de cable:

Considerando que el cable de cobre es el más usado en el ámbito petrolero y de acuerdo con la tabla No. 1 (Apéndice D), si el amperaje que maneja el motor es de 45 amperes, el cable seleccionado es el cable No. 6 de cobre 3KV-Redalene-Estándar.

8. Determinar las pérdidas de voltaje en el cable, el voltaje superficial requerido y el tablero de control apropiado.

Considerando que la temperatura de fondo es de 160 °F, del Apéndice D, fig. D2, el factor de corrección para las pérdidas de voltaje es de 1.18 y de la fig. D1, las pérdidas para el cable de cobre No. 6 a 77 °F, es de 32.5 volts/1,000 pies, entonces:

$$\frac{32,5 \text{ volts}}{1,000 \text{ pies}} * 1.18 = \frac{38.35 \text{ volts}}{1,000 \text{ pies}}$$

Para la longitud del cable, considerar que cubra hasta la profundidad de colocación de la bomba más cien pies que se usarán como cable superficial, entonces las pérdidas de voltaje en el cable son:

$$4,900 \text{ pies} * \frac{38.35 \text{ volts}}{1,000 \text{ pies}} = 188 \text{ volts}$$

Sumado el voltaje que requiere el motor, tendremos:

$$1,400 \text{ volts} + 188 \text{ volts} = 1588 \text{ volts}$$

Aplicando la regla que dice que "las pérdidas en el transformador son del 2.5% del voltaje necesario", las pérdidas de serán:

$$1,588 \text{ volts} * 2.5\% = 39.7 \text{ volts}$$

Entonces, el voltaje total requerido, es:

$$V_s = 1,588 + 39.7 = 1628 \text{ volts}$$

9. Calcular los requerimientos de Kva para dimensionar los transformadores:

$$Kva = \frac{V_s * Amp * \sqrt{3}}{1,000} = \frac{1,628 * 45 * \sqrt{3}}{1,000}$$
$$Kva = 127 \text{ Kva}$$

Se requieren tres transformadores de una sola fase de 43 Kva cada uno, usando un paquete de tres transformadores de 50 Kva cada uno, tendremos un total de 150 Kva.

3.2 EJEMPLO PARA UN POZO DE ACEITE Y AGUA SIN GAS LIBRE^{1,23}.

1. Recopilar y analizar datos:

Diámetro de T.R.:	$\phi_{T.R.}$	= 5½ pg., 17 lb/pie a 4,234 pies
Diámetro de T.P.:	$\phi_{T.P.}$	= 2¾ pg.
Intervalo disparado:		= 4,148 - 4,158 pies.
Presión estática:	P_{ws}	= 900 lb/pg ² .
Presión de fondo fluyendo	P_{wf}	= 500 lb/pg ² .
Presión en la cabeza del pozo:	P_{wh}	= 50 lb/pg ² .
Gasto requerido	q	= 800 bpd.
Densidad relativa del agua:	ρ_{rw}	= 1.02
Densidad del aceite	ρ_o	= 36 °API.
Temperatura en fondo del pozo	T_{wf}	= 98 °F.
Relación gas-líquido	RGL	= 15 pies ³ /bl.

Para $P_{wf}=500$ lb/pg² el gasto de líquido será igual a 625 bpd (30% aceite)

Determinar el número de etapas y la potencia requerida.

2. Determinar la capacidad de producción del pozo.

El gasto de producción máximo puede ser calculado considerando que se trata de un yacimiento con empuje de gas (yacimiento saturado) y que lo podemos solucionar usando la curva general de Vogel (Apéndice F), para:

$$q = 625 \text{ bpd (aceite y agua)}$$

$$P_{wf} = 500 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{ws} = 900 \text{ lb/pg}^2$$

$$\frac{P_{wf}}{P_{ws}} = \frac{500}{900} = 0.55$$

Con este dato y el Apéndice F, tenemos que:

$$\frac{q_o}{q_{o_{mix}}} = 0.65$$

Y si $q_o = 625$ bpd:

$$q_{o_{mix}} = \frac{q_o}{0.65} = \frac{625 \text{ bpd}}{0.65}$$

$$q_{o_{mix}} = 962 \text{ bpd (de mezcla)}$$

3. Determinar la carga dinámica total (CDT).

a) Elevación neta = Profundidad de colocación de la bomba - Sumergencia

Necesitamos definir el ND para lo cual requerimos la P_{wf} para el gasto de 800 bpd.

$$\frac{q_o}{q_{o_{max}}} = \frac{800}{962} = 0.83$$

Con este dato y el Apéndice F, tenemos que:

$$\frac{P_{wf}}{P_{wy}} = 0.35$$

$$P_{wf} = 0.35 * P_{wy} = 0.35 * 900$$

$$P_{wf} = 315 \text{ lb/pg}^2$$

La densidad relativa promedio de la mezcla, es:

$$\rho_m = \frac{141.5}{131.5 + ^\circ API} = \frac{141.5}{131.5 + 36} = 0.8447$$

$$Agua = \rho_w * f_w = 1.02 * .70 = 0.714$$

$$Aceite = \rho_m * f_o = 0.8447 * 0.30 = 0.2534$$

$$Densidad\ relativa\ promedio = \rho_m = Agua + Aceite$$

$$Densidad\ relativa\ promedio = \rho_m = 0.714 + 0.2534 = 0.9674$$

Entonces:

$$ND = NMIP - \frac{P_{wf}}{0.433 * \rho_m} = 4,153 - \frac{315}{0.433 * 0.9674}$$

$$ND = 3,401 \text{ pies}$$

Donde: NMIP = Nivel medio del intervalo productor (disparado).

Si le damos una sumergencia de 299 pies, entonces colocamos la bomba a 3,700 pies

$$Elevación\ neta = 3,700 - 299 = 3,401 \text{ pies}$$

b) Caída de presión por fricción en la T.P.

Dados:

Longitud de T.P. = 3,700 pies y un gasto de 800 bpd.

Según el Apéndice A, fig. A2 y considerando la T.P. de $2\frac{3}{8}$ pg, tenemos que el factor de pérdidas de presión por fricción es de 20 pies/1,000 pies. Entonces:

$$\Delta p_f = \frac{20 \text{ pies}}{1,000 \text{ pies}} * 3,700 \text{ pies}$$

$$\Delta p_f = 74 \text{ pies}$$

c) La presión en la cabeza del pozo en pies de carga:

$$P_{wh} = 50 \text{ lb/pg}^2$$

que convertida en pies de carga, serán:

$$P_{wh} = \frac{500 \text{ lb/pg}^2}{\left(0.433 \text{ lb/pg}^2 \text{ pies}\right)(0.9674)}$$

$$P_{wh} = 119 \text{ pies}$$

Entonces:

$$CDT = 3,401 + 119 + 74$$

$$CDT = 3,594 \text{ pies}$$

4. Seleccionar el tipo y tamaño de la bomba para:

$$\phi_{T.R.} = 5\frac{1}{2} \text{ pg.}$$

$$q = 800 \text{ bpd.}$$

La bomba Reda D-26 (Apéndice B) es la que maneja este gasto con mayor eficiencia (62%).

5. Determinar el número de etapas necesarias.

Para 800 bpd, según la curva característica para esta bomba se desarrollan 24.5 pies/etapa, entonces, las etapas requeridas son:

$$NE = \frac{3,594 \text{ pies}}{24.5 \text{ pies/etapa}} = 147 \text{ etapas}$$

6. Determinar la potencia que se requiere en el motor.

Para esta bomba se requieren 0.238 Hp/etapa para manejar 800 bpd. Entonces:

$$\begin{aligned} \text{Potencia} &= \text{Hp} = NE * \text{Hp/etapa} * \rho_m \\ \text{Potencia} &= \text{Hp} = 147 \text{ etapas} * 0.238 \text{ Hp/etapa} * 0.9674 \\ \text{Potencia} &= \text{Hp} = 34 \text{ Hp} \end{aligned}$$

3.3 POZO DE ACEITE Y AGUA SIN GAS LIBRE^{1,23}.

1. Recopilar y analizar datos:

Diámetro de T. R.:	$\phi_{T.R.}$	= 7 pg.
Diámetro de T. P.:	$\phi_{T.P.}$	= 3 pg.
Profundidad total:	PT	= 7,000 pies.
Gasto de líquido:	q_l	= 25 % de aceite y 75% de agua.
Presión estática:	P_{ws}	= 1,400 lb/pg ² .
Índice de Productividad:	IP	= 2.5 bpd/ lb/pg ² (constante).
Densidad del agua:	ρ_{rw}	= 1.07
Densidad del aceite:	ρ_o	= 36 °API.
Relación gas-aceite:	RGA	= 100 pies ³ /bl.

Línea de descarga de 3,000 pies de 2½ pg (nueva), con un elevación de 200 pies. Considerar que el gas libre es venteado.

Determinar el número de etapas y los Hp requeridos.

2. Determinar la capacidad de producción del pozo.

Considerando que el IP es constante, el flujo se rige por la siguiente fórmula:

$$IP = \frac{q}{P_{ws} - P_{wf}}$$

$$P_{ws} - P_{wf} = \frac{q}{IP} \quad ; \quad P_{wf} = P_{ws} - \frac{q}{IP}$$

Si $q = 0$, entonces: $P_{wf} = P_{ws}$

Cuando $P_{wf} = 0$, se tienen el $q_{m\acute{a}x}$

$$q = IP(P_{ws} - P_{wf})$$

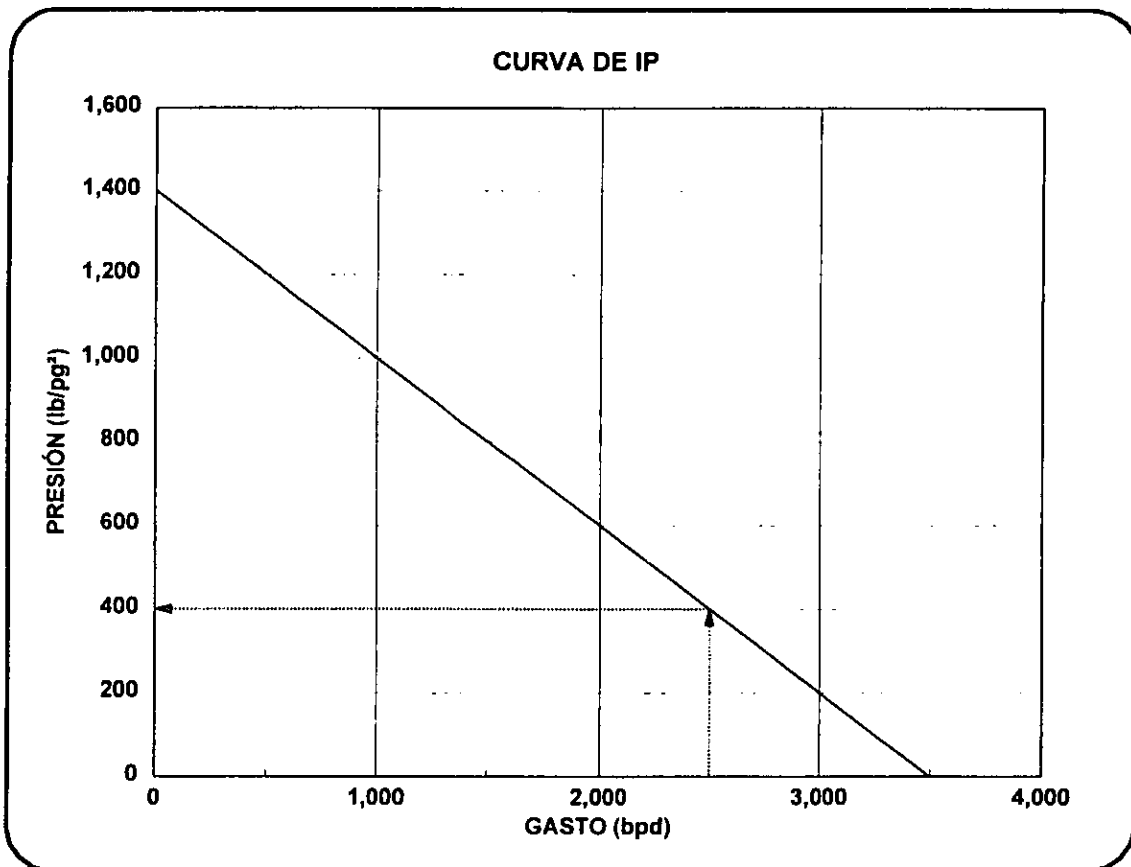
$$q_{m\acute{a}x} = IP * P_{ws} = 2.5 \frac{bpd}{pg^2} * 1,400 \frac{lb}{pg^2}$$

$$q_{m\acute{a}x} = 3,500 \text{ bpd.}$$

Entonces, con estos dos puntos construimos la curva de IP:

$$q = 0 \text{ bpd} \quad P_{wf} = 1,400 \frac{lb}{pg^2}$$

$$q = 3,500 \text{ bpd} \quad P_{wf} = 0 \frac{lb}{pg^2}$$



De acuerdo con esta curva, un valor aproximado de 2,500 bpd, es un buen valor de gasto para manejar de acuerdo con la información que se tiene.

3. Determinar la carga dinámica total (CDT).

a) Elevación neta.

De acuerdo a la figura anterior, la P_{wf} para 2,500 bpd es de:

$$P_{wf} = 400 \text{ lb/pg}^2$$

Determinamos el valor de la densidad de la mezcla.

$$\rho_m = \frac{141.5}{131.5 + \text{API}} = \frac{141.5}{131.5 + 36} = 0.8447$$

Entonces, la densidad relativa promedio es:

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= \rho_{rw} * f_w = 1.07 * 0.75 = 0.8025 \\ \text{Aceite} &= \rho_{ro} * f_o = 0.8447 * 0.25 = \underline{0.2111} \end{aligned}$$

$$\text{Densidad relativa promedio } \rho_m = 1.0136$$

Entonces:

$$\begin{aligned} ND &= PT - \frac{P_{wf}}{0.433 * \rho_m} = 7,000 - \frac{400}{0.433 * 1.0136} \\ ND &= 6,089 \text{ pies} \end{aligned}$$

Si le damos 139 pies de sumergencia, la bomba la colocaremos a:

$$6,089 + 139 = 6,228 \text{ pies}$$

Finalmente:

$$\text{Elevación neta} = 6,228 - 139 = 6,089 \text{ pies}$$

b) La caída de presión por fricción en la T.P.

En una tubería de 3 pg (nueva), según la fig. A1, Apéndice A, para un gasto de 2,500 bpd, las caídas de presión son de 15 pies/1,000 pies. Entonces:

$$\Delta P_f = \left(\frac{15 \text{ pies}}{1,000 \text{ pies}} \right) * 6,228 \text{ pies} = 94 \text{ pies}$$

c) La presión en la cabeza del pozo en pies de carga, es:

$$P_{wh} = \text{Elevación en la línea de descarga} + \Delta P_f \text{ en la línea de descarga}$$

En una tubería de 2½ pg (nueva), que maneja un gasto de 2,500 bpd, la caída de presión es de 45 pies/1,000 pies. Entonces:

$$\Delta P_{f.l.d} = \left(\frac{45 \text{ pies}}{1,000 \text{ pies}} \right) * 3,000 \text{ pies} = 135 \text{ pies}$$

$$P_{wh} = 200 + 135 = 335 \text{ pies}$$

Finalmente tenemos que:

$$CDT = 6,089 + 94 + 335$$

$$CDT = 6,518 \text{ pies}$$

4. Seleccionar el tipo de bomba.

De acuerdo con el gasto deseado y al diámetro de la T.R., la bomba seleccionada es la Reda G-75 (Apéndice B), con una eficiencia de 64%.

5. Determinar el número de etapas de la bomba.

Para un gasto de 2,500 bpd la bomba seleccionada desarrolla 45 pies/etapa. Entonces, el número total de etapas requeridas es de:

$$NE = \frac{CDT}{H/\text{etapa}} = \frac{6,518 \text{ pies}}{45 \text{ pies/etapa}}$$

$$NE = 145 \text{ etapas}$$

6. Determinar la potencia del motor.

Para el gasto de 2,500 bpd, se requieren de 1.3 Hp/etapa, cuando el fluido bombeado es agua. Entonces, los Hp requeridos por el motor a condiciones de operación, serán de:

$$\text{Potencia} = HP = NE * \frac{Hp}{\text{etapa}} * \rho_m$$

$$\text{Potencia} = HP = 145 \text{ etapas} * 1.3 \frac{Hp}{\text{etapa}} * 1.0136$$

$$\text{Potencia} = Hp = 191 \text{ Hp}$$

3.4 EJEMPLO PARA UN POZO QUE PRODUCE ACEITE, GAS Y AGUA^{1,23}.

1. Recopilar y analizar datos:

Profundidad total:	PT	= 8,000 pies.
Diámetro de T. R.:	$\phi_{T.R.}$	= 7 pg., 23 lb/pie.
Diámetro de T. P.:	$\phi_{T.P.}$	= 3 pg.
Intervalo disparado:		= 7,930 - 7960 pies.
Presión estática:	P_{ws}	= 2,600 lb/pg ² .
Presión de fondo fluyendo:	P_{wf}	= 2,000 lb/pg ² .
Presión en la cabeza del pozo:	P_{wh}	= 200 lb/pg ² .
Relación gas-aceite:	RGA	= 500 ft ³ /bl.
Gravedad específica:	ρ_{rg}	= 0.65
Gasto medido de líquido:	q_l	= 1,000 bdp (100% aceite).
Densidad del agua:	ρ_{rw}	= 1.12
Densidad del aceite:	ρ_o	= 40 °API.
Temperatura superficial	T_{wh}	= 120 °F.
Temperatura en fondo del pozo	T_{wf}	= 180 °F.
Gasto deseado:	q_d	= 2,000 bpd.

Considerar que el yacimiento se comporta de acuerdo con la curva de Vogel

Diseñar un sistema de bombeo cuando:

- A) Se bombea todo el gas y no se produce agua.
- B) Se ventea el 50% de gas y no se produce agua.
- C) Se bombea 50% de aceite, 50% de agua y el 100% del gas pasa a través de la bomba.

Solución:

1. Para que se produzcan 2,000 bpd, tenemos que si el yacimiento se comporta de acuerdo a la curva de Vogel, la presión de succión debe ser de:

$$\frac{P_{wf}}{P_{ws}} = \frac{2,000}{2,600} = 0.77$$

Con este dato y la curva de Vogel (Apéndice F):

$$\frac{q_o}{q_{o,máx}} = 0.40$$

$$q_{o,máx} = \frac{q_o}{0.40} = \frac{1,000 \text{ bpd}}{0.40}$$

$$q_{o,máx} = 2,500 \text{ bpd}$$

Para un gasto de aceite de 2,000 bpd:

$$\frac{q_o}{q_{o_{max}}} = \frac{2,000}{2,500} = 0.8$$

Con este dato y la curva de Vogel (Apéndice F):

$$\frac{P_{wf}}{P_{ws}} = 0.40$$

$$P_{wf} = P_{ws} * 0.40$$

$$P_{wf} = 2,600 * 0.40 = 1,040 \text{ lb/pg}^2$$

Entonces, la presión de succión es de 1,040 lb/pg².

2. Para determinar la presión de descarga, tenemos que la P_{wh} que se requiere es de 200 lb/pg², con este dato, el diámetro de la T.P., el gasto de 2,000 bpd, la RGA, la profundidad (Suponer que es de 7,800 pies) y una curva de gradientes de flujo vertical adecuada para estos datos, determinamos que P_{wf} le corresponde a esta P_{wh} ²⁴.

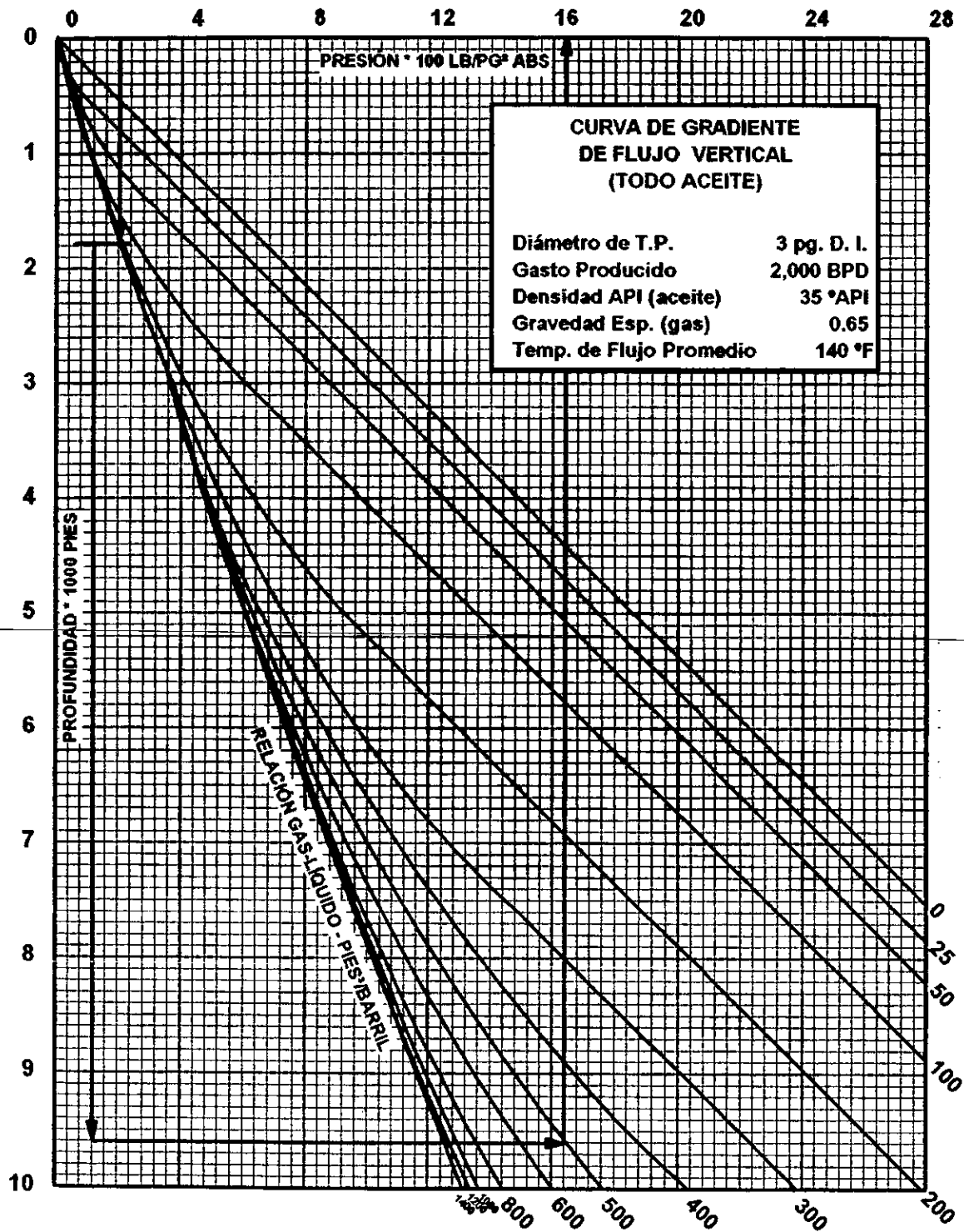
Para tener una $P_{wh} = 200 \text{ lb/pg}^2$ en la superficie, debemos tener en el fondo una $P_{wf} = 1,640 \text{ lb/pg}^2$. Esta P_{wf} , debe ser la presión de descarga de la bomba.

3. El incremento total de presión será de:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{desc} - P_{succ} \\ \Delta P &= 1,640 \text{ lb/pg}^2 - 1,040 \text{ lb/pg}^2 \\ \Delta P &= 600 \text{ lb/pg}^2 \end{aligned}$$

4. Considerar 3 incrementos de presión, entonces cada incremento de presión será de:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{600 \text{ lb/pg}^2}{3} \\ \Delta P &= 200 \text{ lb/pg}^2 \end{aligned}$$



FUENTE: BROW, K. E., "THE TECHNOLOGY OF ARTIFICIAL LIFT METHODS", VOL 2b, PENNELL PUBLISHING CO., 1980

5. Determinar la densidad relativa de cada cambio de presión:

a) Encontrar el volumen de aceite, agua y gas para cada presión.

$$V_{t_{succ}} = V_o + V_g + V_w$$

$$V_{t_{succ}} = qt(1 - f_w)B_o + qt(1 - f_w)(RGA - Rs)(PGI)B_g + qt(f_w)$$

PGI = Porcentaje de gas que pasa a través de la bomba.

Calculamos el valor de B_g para cada presión con:

$$B_g = 0.00504 * \frac{T_y * Z_y}{P_y} \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$Z(1,040) = 0.910$$

$$Z(1,240) = 0.898$$

$$Z(1,440) = 0.888$$

$$Z(1,640) = 0.878$$

$$B_g(1,040) = 0.00504 * \left[\frac{640 * 0.910}{1,054.7} \right] \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(1,040) = 0.00277 \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(1,240) = 0.00504 * \left[\frac{640 * 0.898}{1,254.7} \right] \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(1,240) = 0.00230 \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(1,440) = 0.00504 * \left[\frac{640 * 0.888}{1,454.7} \right] \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(1,440) = 0.00196 \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(1,640) = 0.00504 * \left[\frac{640 * 0.878}{1,654.7} \right] \left[\frac{bl_g @ c. yac.}{pie^3 @ c. sup.} \right]$$

$$B_g(1,640) = 0.00171 \left[\frac{bl_g @ c. yac.}{pie^3 @ c. sup.} \right]$$

Usando las correlaciones de Standing¹⁴, calcular los valores de R_s y B_o .

$$R_s = \rho_{rx} \left[\frac{P * 10^{0.0125 * \gamma_a}}{18 * 10^{0.00091 * T}} \right]^{1.2048} \left[\frac{pie^3 @ c. yac.}{bl @ c. sup.} \right]$$

$$R_s(1,040) = 0.65 \left[\frac{1,054.7 * 10^{0.0125 * 40}}{18 * 10^{0.00091 * 180}} \right]^{1.2048} \left[\frac{pie^3 @ c. yac.}{bl @ c. sup.} \right]$$

$$R_s(1,040) = 223.54 \left[\frac{pie^3 @ c. yac.}{bl @ c. sup.} \right]$$

$$R_s(1,240) = 0.65 \left[\frac{1,254.7 * 10^{0.0125 * 40}}{18 * 10^{0.00091 * 180}} \right]^{1.2048} \left[\frac{pie^3 @ c. yac.}{bl @ c. sup.} \right]$$

$$R_s(1,240) = 275.36 \left[\frac{pie^3 @ c. yac.}{bl @ c. sup.} \right]$$

$$R_s(1,440) = 0.65 \left[\frac{1,454.7 * 10^{0.0125 * 40}}{18 * 10^{0.00091 * 180}} \right]^{1.2048} \left[\frac{pie^3 @ c. yac.}{bl @ c. sup.} \right]$$

$$R_s(1,440) = 328.95 \left[\frac{pie^3 @ c. yac.}{bl @ c. sup.} \right]$$

$$R_s(1,640) = 0.65 \left[\frac{1,654.7 * 10^{0.0125 * 40}}{18 * 10^{0.00091 * 180}} \right]^{1.2048} \left[\frac{pie^3 @ c. yac.}{bl @ c. sup.} \right]$$

$$R_s(1,640) = 384.07 \left[\frac{pie^3 @ c. yac.}{bl @ c. sup.} \right]$$

$$B_o = 0.972 + 0.000147 \left[R_s \left(\frac{\rho_{rg}}{\rho_m} \right)^{0.5} + 1.25(T) \right]^{1.175}$$

$$B_o(1,040) = 0.972 + 0.000147 \left[223.54 \left(\frac{0.65}{0.825} \right)^{0.5} + 1.25(180) \right]^{1.175}$$

$$B_o(1,040) = 1.1513 \begin{array}{l} bl_o @ c. yac. \\ bl_o @ c. sup. \end{array}$$

$$B_o(1,240) = 0.972 + 0.000147 \left[275.36 \left(\frac{0.65}{0.825} \right)^{0.5} + 1.25(180) \right]^{1.175}$$

$$B_o(1,240) = 1.1744 \begin{array}{l} bl_o @ c. yac. \\ bl_o @ c. sup. \end{array}$$

$$B_o(1,440) = 0.972 + 0.000147 \left[328.95 \left(\frac{0.65}{0.825} \right)^{0.5} + 1.25(180) \right]^{1.175}$$

$$B_o(1,440) = 1.1988 \begin{array}{l} bl_o @ c. yac. \\ bl_o @ c. sup. \end{array}$$

$$B_o(1,640) = 0.972 + 0.000147 \left[384.07 \left(\frac{0.65}{0.825} \right)^{0.5} + 1.25(180) \right]^{1.175}$$

$$B_o(1,640) = 1.2242 \begin{array}{l} bl_o @ c. yac. \\ bl_o @ c. sup. \end{array}$$

A) Entonces, si se bombea todo el gas y no se produce agua.

$$Vt_{succ}(1,040) = (2,000(1)(1.1513)) + (2,000(1)(500 - 223.54)(1)(0.00278))$$

$$Vt_{succ}(1,040) = 3,834 \text{ bpd}$$

$$Vt_{succ}(1,240) = (2,000(1)(1.1744)) + (2,000(1)(500 - 275.36)(1)(0.00231))$$

$$Vt_{succ}(1,240) = 3,390 \text{ bpd}$$

$$V_{t_{smcc}}(1,440) = (2,000(1)(1.1988)) + (2,000(1)(500 - 328.95)(1)(0.00197))$$

$$V_{t_{smcc}}(1,440) = 3,068 \text{ bpd}$$

$$V_{t_{smcc}}(1,640) = (2,000(1)(1.2242)) + (2,000(1)(500 - 384.07)(1)(0.00171))$$

$$V_{t_{smcc}}(1,640) = 2,845 \text{ bpd}$$

b) Encontrar la masa de aceite, gas y agua.

$$M = M_o + M_g + M_w$$

$$M_o = 350.5\rho_{rw} + 0.0764\rho_{rx}(RGA) + 350.5\rho_{rw}$$

$$\rho_{rw} = \frac{141.5}{131.5 + 40} = 0.8250$$

$$M = 350.5(0.8250) + 0.0764(0.65)(500)$$

$$M = 314 \frac{lb_m}{bl_o}$$

c) La densidad de la mezcla será calculada de acuerdo con el volumen unitario (VU) que se tenga a cada presión.

$$VU = B_o + \frac{q_l - q_o}{q_o}(B_w) + (RGA - R_s)B_g$$

$$VU(1,040) = 1.1513 + \frac{2,000 - 2,000}{2,000}(1) + (500 - 223.54)(0.00277)$$

$$VU(1,040) = 1.41709 \frac{bl(o+g) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$VU(1,240) = 1.1744 + (500 - 275.36)(0.00230)$$

$$VU(1,240) = 1.69107 \frac{bl(o+g) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$VU(1,440) = 1.1988 + (500 - 328.95)(0.00196)$$

$$VU(1,440) = 1.53406 \frac{bl(o+g) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$VU(1,640) = 1.2242 + (500 - 384.07)(0.00171)$$

$$VU(1,640) = 1.42244 \begin{array}{l} bl(o+g) @ c. b. \\ bl_o @ c. sup. \end{array}$$

Entonces la densidad de la mezcla a cada presión es:

$$\rho_m(1,040) = \frac{M}{VU * 5.615} = \frac{314 \text{ lb}_m/bl_o}{(1.91707 * 5.615) \left(\frac{pie^3}{bl_o} \right)} =$$

$$\rho_m(1,040) = 29.17 \text{ lb}_m/pie^3$$

$$\rho_m(1,240) = \frac{314 \text{ lb}_m/bl_o}{(1.69107 * 5.615) \left(\frac{pie^3}{bl_o} \right)}$$

$$\rho_m(1,240) = 33.07 \text{ lb}_m/pie^3$$

$$\rho_m(1,440) = \frac{314 \text{ lb}_m/bl_o}{(1.53406 * 5.615) \left(\frac{pie^3}{bl_o} \right)}$$

$$\rho_m(1,440) = 36.45 \text{ lb}_m/pie^3$$

$$\rho_m(1,640) = \frac{314 \text{ lb}_m/bl_o}{(1.42244 * 5.615) \left(\frac{pie^3}{bl_o} \right)}$$

$$\rho_m(1,640) = 39.31 \text{ lb}_m/pie^3$$

6. Encontrar el gradiente de presión para cada presión manejada.

De acuerdo con la densidad calculada para cada presión en el paso anterior, el gradiente lo calculamos con:

$$Gr = \text{Gradiente de presión} = \frac{P_m}{144}$$

$$\text{Gradiente de presión (1,040)} = \frac{29.17}{144} = 0.20257 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente de presión (1,240)} = \frac{33.07}{144} = 0.22965 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente de presión (1,440)} = \frac{36.45}{144} = 0.25315 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente de presión (1,640)} = \frac{39.31}{144} = 0.27298 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

7. Encontrar el gradiente de presión promedio entre los puntos de presión manejados.

$$\text{Gradiente promedio (1,040 - 1,240)} = \frac{0.20257 + 0.22965}{2} = 0.21611 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente promedio (1,240 - 1,440)} = \frac{0.22965 + 0.25315}{2} = 0.24140 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente promedio (1,440 - 1,640)} = \frac{0.25315 + 0.27298}{2} = 0.26306 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

8. Convertir el gradiente de presión promedio a pies de carga para cada incremento de presión.

$$\text{Carga} = \frac{\text{Incremento de presión}}{\text{Gradiente promedio}}$$

$$\text{Carga (1,040 - 1,240)} = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{0.21611 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}} = 925.454 \text{ pies}$$

$$\text{Carga (1,240 - 1,440)} = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{0.24140 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}} = 828.500 \text{ pies}$$

$$\text{Carga (1,440 - 1,640)} = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{0.26306 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}} = 760.28 \text{ pies}$$

9. Definir el Gasto en bpd para cada punto de presión manejada.

$$q_r(1,040) = 3,834 \text{ bpd}$$

$$q_r(1,240) = 3,382 \text{ bpd}$$

$$q_r(1,440) = 3,068 \text{ bpd}$$

$$q_r(1,640) = 2,285 \text{ bpd}$$

10. Determinar el gasto promedio entre los puntos de presión manejados.

$$q \text{ promedio } (1,040 - 1,240) = \frac{3,834 + 3,382}{2} = 3,608 \text{ bpd}$$

$$q \text{ promedio } (1,240 - 1,440) = \frac{3,382 + 3,068}{2} = 3,225 \text{ bpd}$$

$$q \text{ promedio } (1,440 - 1,640) = \frac{3,382 + 2,845}{2} = 2,957 \text{ bpd}$$

11. Seleccionar la bomba para cada uno de los gastos promedios y obtener la carga/pie desarrollada para cada caso.

La bomba seleccionada para el rango de 3,608 bpd de volumen de succión y 2,957 bpd de volumen de descarga es la bomba REDA G-110 (Apéndice B), de cuya curva característica leemos que:

Para $q(1,040 - 1,240) = 3,608$ bpd, la bomba desarrolla 36.8 pie/etapa y requiere 1.50 Hp/etapa.

Para $q(1,240 - 1,440) = 3,225$ bpd, la bomba desarrolla 39 pie/etapa y requiere 1.48 Hp/etapa.

Para $q(1,440 - 1,640) = 2,957$ bpd, la bomba desarrolla 40.5 pie/etapa y requiere 1.45 Hp/etapa.

12. Determinar la presión desarrollada por etapa.

$$\text{Presión/etapa } (1,040 - 1,240) = 0.21611 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}} * 36.8 \frac{\text{pie}}{\text{etapa}} = 7.2598 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}$$

$$\text{Presión/etapa } (1,240 - 1,440) = 0.24140 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}} * 39 \frac{\text{pie}}{\text{etapa}} = 9.4146 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}$$

$$\text{Presión/etapa } (1,440 - 1,640) = 0.26306 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}} * 40.5 \frac{\text{pie}}{\text{etapa}} = 10.6539 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}$$

13. Determinar el número de etapas necesarias para obtener el incremento de presión requerido.

$$NE = \frac{\text{Incremento de presión}}{\text{Presión/etapa}}$$

$$NE (1,040 - 1,240) = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{7.9528 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}} = 25 \text{ etapas}$$

$$NE (1,240 - 1,440) = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{9.4146 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}} = 21 \text{ etapas}$$

$$NE (1,440 - 1,640) = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{10.6539 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}} = 19 \text{ etapas}$$

Total = 65 etapas

14. Determinar el número total de etapas del punto anterior.

$$NTE = \sum NE = 65 \text{ etapas}$$

15. Determinar la potencia requerida en cada sección.

$$\text{Potencia} = NE * \frac{Hp}{\text{etapa}} * \rho_m$$

$$\rho_m \text{ promedio } (1,040 - 1,240) = \frac{29.17 + 33.07}{2} = 31.12 \text{ lb/pie}^3$$

$$\text{Potencia } (1,040 - 1,240) = 25 * 1.50 * \frac{31.12 \text{ lb/pie}^3}{62.40 \text{ lb/pie}^3} = 18.7019 \text{ Hp}$$

$$\rho_m \text{ promedio } (1,240 - 1,440) = \frac{33.07 + 36.45}{2} = 34.76 \text{ lb/pie}^3$$

$$\text{Potencia } (1,240 - 1,440) = 21 * 1.48 * \frac{34.76 \text{ lb/pie}^3}{62.40 \text{ lb/pie}^3} = 17.3131 \text{ Hp}$$

$$\rho_m \text{ promedio } (1,440 - 1,640) = \frac{36.45 + 39.31}{2} = 37.88 \text{ lb/ pie}^3$$

$$\text{Potencia } (1,440 - 1,640) = 19 * 1.45 * \frac{37.88 \text{ lb/ pie}^3}{62.40 \text{ lb/ pie}^3} = 17.0703 \text{ Hp}$$

16. Determinar la potencia total requerida sumando los Hp del punto anterior.

$$\sum \text{Potencia} = 50.0853 \text{ Hp}$$

B) Si se bombea el 50% de gas y no se produce agua.

Todos los cálculos son iguales hasta el paso 5, en el que se modifica el $V_{l_{succ}}$.

$$V_{l_{succ}} (1,040) = (2,000(1)(1.1513)) + (2,000(1)(500 - 223.54)(0.5)(0.00277))$$

$$V_{l_{succ}} (1,040) = 3,068 \text{ bpd}$$

$$V_{l_{succ}} (1,240) = (2,000(1)(1.1744)) + (2,000(1)(500 - 275.36)(0.5)(0.00230))$$

$$V_{l_{succ}} (1,240) = 2,865 \text{ bpd}$$

$$V_{l_{succ}} (1,440) = (2,000(1)(1.1988)) + (2,000(1)(500 - 328.95)(0.5)(0.00196))$$

$$V_{l_{succ}} (1,440) = 2,733 \text{ bpd}$$

$$V_{l_{succ}} (1,640) = (2,000(1)(1.2242)) + (2,000(1)(500 - 384.07)(0.5)(0.00171))$$

$$V_{l_{succ}} (1,640) = 2,647 \text{ bpd}$$

Entonces, a partir del punto 9, tenemos para este caso:

9. Definir el gasto en bpd para cada punto de presión manejada.

$$q_i (1,040) = 3,068 \text{ bpd}$$

$$q_i (1,240) = 2,865 \text{ bpd}$$

$$q_i (1,440) = 2,733 \text{ bpd}$$

$$q_i (1,640) = 2,647 \text{ bpd}$$

10. Determinar el gasto promedio entre los puntos de presión manejados.

$$q \text{ promedio } (1,040 - 1,240) = \frac{3,068 + 2,865}{2} = 2,967 \text{ bpd}$$

$$q \text{ promedio } (1,240 - 1,440) = \frac{2,865 + 2,733}{2} = 2,799 \text{ bpd}$$

$$q \text{ promedio } (1,440 - 1,640) = \frac{2,733 + 2,647}{2} = 2,690 \text{ bpd}$$

11. Seleccionar la bomba para cada uno de los gastos promedios y obtener la carga/pie desarrollada para cada caso.

La bomba seleccionada para el rango de 2,967 bpd de volumen de succión y 2,690 bpd de volumen de descarga es la bomba REDA G-75 (Apéndice B), de cuya curva característica leemos que:

Para q (1,040 - 1,240) = 2,967 bpd, la bomba desarrolla 38.8 pie/etapa y requiere 1.32 Hp/etapa.

Para q (1,240 - 1,440) = 2,799 bpd, la bomba desarrolla 41 pie/etapa y requiere 1.32 Hp/etapa.

Para q (1,440 - 1,640) = 2,690 bpd, la bomba desarrolla 42.5 pie/etapa y requiere 1.45 Hp/etapa.

12. Determinar la presión desarrollada por etapa.

$$\text{Presión/etapa } (1,040 - 1,240) = 0.21611 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie} * 28.8 \text{ pie/etapa} = 8.3850 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}$$

$$\text{Presión/etapa } (1,240 - 1,440) = 0.24140 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie} * 41 \text{ pie/etapa} = 9.8974 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}$$

$$\text{Presión/etapa } (1,440 - 1,640) = 0.26306 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie} * 42.5 \text{ pie/etapa} = 11.1800 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}$$

13. Determinar el número de etapas necesarias para obtener el incremento de presión requerido.

$$NE = \frac{\text{Incremento de presión}}{\text{Presión/etapa}}$$

$$NE(1,040 - 1,240) = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{8.3850 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}} = 24 \text{ etapas}$$

$$NE(1,240 - 1,440) = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{9.8974 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}} = 20 \text{ etapas}$$

$$NE(1,440 - 1,640) = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{11.1800 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}} = 18 \text{ etapas}$$

Total = 62 etapas

14. Determinar el número total de etapas del punto anterior.

$$NTE = \sum NE = 62 \text{ etapas}$$

15. Determinar la potencia requerida en cada sección.

$$\text{Potencia} = NE * \frac{Hp}{\text{etapa}} * \rho_m$$

$$\text{Potencia}(1,040 - 1,240) = 24 * 1.32 * \frac{31.12 \text{ lb/pe}^3}{62.40 \text{ lb/pe}^3} = 15.7994 \text{ Hp}$$

$$\text{Potencia}(1,240 - 1,440) = 20 * 1.32 * \frac{34.76 \text{ lb/pe}^3}{62.40 \text{ lb/pe}^3} = 14.7071 \text{ Hp}$$

$$\text{Potencia}(1,440 - 1,640) = 18 * 1.32 * \frac{37.88 \text{ lb/pe}^3}{62.40 \text{ lb/pe}^3} = 14.4235 \text{ Hp}$$

16. Determinar la potencia total requerida sumando los Hp del punto anterior.

$$\sum \text{Potencia} = 44.98 \text{ Hp}$$

C) Si se bombea el 50% de aceite, 50% de agua y el 100% de gas pasa a través de la bomba.

Todos los cálculos son iguales hasta el paso 5, en el que se modifica el $V_{t_{succ}}$.

a) Encontrar el volumen de aceite, agua y gas para cada presión.

$$V_{t_{succ}}(1,040) = (2,000(1-0.5)(1.1513)) + (2,000(1-0.5)(500-223.54)(1)(0.00277)) + (2,000(0.5))$$

$$V_{t_{succ}}(1,040) = 2,917 \text{ bpd}$$

$$V_{t_{succ}}(1,240) = (2,000(1-0.5)(1.1744)) + (2,000(1-0.5)(500-275.36)(1)(0.00230)) + (2,000(0.5))$$

$$V_{t_{succ}}(1,240) = 2,691 \text{ bpd}$$

$$V_{t_{succ}}(1,440) = (2,000(1-0.5)(1.1988)) + (2,000(1-0.5)(500-328.95)(1)(0.00196)) + (2,000(0.5))$$

$$V_{t_{succ}}(1,440) = 2,534 \text{ bpd}$$

$$V_{t_{succ}}(1,640) = (2,000(1)(1.2242)) + (2,000(1)(500-384.07)(0.5)(0.00171))$$

$$V_{t_{succ}}(1,640) = 2,422 \text{ bpd}$$

b) Encontrar la masa de aceite, gas y agua.

$$M = M_o + M_g + M_w$$

$$M_o = 350.5\rho_{ro} + 0.0764\rho_{rg}(RGA) + 350.5\rho_{rg}$$

$$\rho_{ro} = \frac{141.5}{131.5 + 40} = 0.8250$$

$$M = 350.5(0.8250) + 0.0764(0.65)(500) + 350.5(1.12)$$

$$M = 706.55 \frac{lb_m}{bl_o}$$

c) La densidad de la mezcla será calculada de acuerdo con el volumen unitario (VU) que se tenga a cada presión.

$$VU = B_o + \frac{qt - q_o}{q_o} (B_w) + (RGA - R_s)B_g$$

$$VU(1,040) = 1.1513 + \frac{2,000 - 1,000}{2,000} (1) + (500 - 223.54)(0.00277)$$

$$VU(1,040) = 2.41709 \frac{bl(o+g) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$VU(1,240) = 1.1744 + \frac{2,000 - 1,000}{2,000} (1) + (500 - 275.36)(0.00230)$$

$$VU(1,240) = 2.1907 \frac{bl(o+g) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$VU(1,440) = 1.1988 + \frac{2,000 - 1,000}{2,000} (1) + (500 - 328.95)(0.00196)$$

$$VU(1,440) = 2.03406 \frac{bl(o+g) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$VU(1,640) = 1.2242 + \frac{2,000 - 1,000}{2,000} (1) + (500 - 384.07)(0.00171)$$

$$VU(1,640) = 1.92244 \frac{bl(o+g) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

Entonces, la densidad de la mezcla a cada presión, es:

$$\rho_m(1,040) = \frac{M}{VU * 5.615} = \frac{706.55 \frac{lb_m}{bl_o}}{(2.41709 * 5.615) \left(\frac{pie^3}{bl_o} \right)} =$$

$$\rho_m(1,040) = 52.0595 \frac{lb_m}{pie^3}$$

$$\rho_m(1,240) = \frac{706.55 \frac{lb_m}{bl_o}}{(2.19107 * 5.615) \left(\frac{pie^3}{bl_o} \right)}$$

$$\rho_m(1,240) = 57.4297 \frac{lb_m}{pie^3}$$

$$\rho_m(1,440) = \frac{706.55 \frac{lb_m}{bl_o}}{(2.03406 * 5.615) \left(\frac{pie^3}{bl_o} \right)}$$

$$\rho_m(1,440) = 61.8627 \frac{lb_m}{pie^3}$$

$$\rho_m (1,640) = \frac{706.55 \text{ lb}_m / \text{bl}_o}{(1.92244 * 5.615) \left(\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}_o} \right)}$$

$$\rho_m (1,640) = 65.4546 \text{ lb}_m / \text{pie}^3$$

6. Encontrar el gradiente de presión para cada presión manejada.

De acuerdo con la densidad calculada para cada presión en el paso anterior, el gradiente lo calculamos con:

$$Gr = \text{Gradiente de presión} = \frac{\rho_m}{144}$$

$$\text{Gradiente de presión (1,040)} = \frac{52.0595}{144} = 0.36152 \text{ lb} / \text{pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente de presión (1,240)} = \frac{57.4297}{144} = 0.39881 \text{ lb} / \text{pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente de presión (1,440)} = \frac{61.8627}{144} = 0.42960 \text{ lb} / \text{pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente de presión (1,640)} = \frac{65.4546}{144} = 0.45454 \text{ lb} / \text{pg}^2 \text{ pie}$$

7. Encontrar el gradiente de presión promedio entre los puntos de presión manejados.

$$\text{Gradiente promedio (1,040 - 1,240)} = \frac{0.36152 + 0.39881}{2} = 0.38016 \text{ lb} / \text{pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente promedio (1,240 - 1,440)} = \frac{0.39881 + 0.42960}{2} = 0.41420 \text{ lb} / \text{pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente promedio (1,440 - 1,640)} = \frac{0.42960 + 0.45454}{2} = 0.44207 \text{ lb} / \text{pg}^2 \text{ pie}$$

8. Convertir el gradiente de presión promedio a pies de carga para cada incremento de presión.

$$\text{Carga} = \frac{\text{Incremento de presión}}{\text{Gradiente promedio}}$$

$$\text{Carga (1,040 - 1,240)} = \frac{200 \text{ lb} / \text{pg}^2}{0.38106 \text{ lb} / \text{pg}^2 \text{ pie}} = 526.094 \text{ pies}$$

$$Carga (1,240 - 1,440) = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{0.41420 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}} = 482.858 \text{ pies}$$

$$Carga (1,440 - 1,640) = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{0.44207 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}} = 452.417 \text{ pies}$$

9. Definir el gasto en bpd para cada punto de presión manejada.

$$q, (1,040) = 2,917 \text{ bpd}$$

$$q, (1,240) = 2,691 \text{ bpd}$$

$$q, (1,440) = 2,534 \text{ bpd}$$

$$q, (1,640) = 2,422 \text{ bpd}$$

10. Determinar el gasto promedio entre los puntos de presión manejados.

$$q \text{ promedio } (1,040 - 1,240) = \frac{2,917 + 2,691}{2} = 2,804 \text{ bpd}$$

$$q \text{ promedio } (1,240 - 1,440) = \frac{2,691 + 2,534}{2} = 2,613 \text{ bpd}$$

$$q \text{ promedio } (1,440 - 1,640) = \frac{2,534 + 2,422}{2} = 2,478 \text{ bpd}$$

11. Seleccionar la bomba para cada uno de los gastos promedios y obtener la carga/pie desarrollada para cada caso.

La bomba seleccionada para el rango de 2,804 bpd de volumen de succión y 2,478 bpd de volumen de descarga es la bomba REDA G-75 (Apéndice B), de cuya curva característica leemos que:

Para $q (1,040 - 1,240) = 2,804 \text{ bpd}$, la bomba desarrolla 41 pie/etapa y requiere 1.32 Hp/etapa.

Para $q (1,240 - 1,440) = 2,613 \text{ bpd}$, la bomba desarrolla 43.6 pie/etapa y requiere 1.30 Hp/etapa.

Para $q (1,440 - 1,640) = 2,478 \text{ bpd}$, la bomba desarrolla 45 pie/etapa y requiere 1.29 Hp/etapa.

12. Determinar la presión desarrollada por etapa.

$$\text{Presión/etapa (1,040-1,240)} = 0.38016 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}} * 41 \frac{\text{pie}}{\text{etapa}} = 15.5865 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}$$

$$\text{Presión/etapa (1,240-1,440)} = 0.41420 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}} * 43.6 \frac{\text{pie}}{\text{etapa}} = 18.0591 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}$$

$$\text{Presión/etapa (1,440-1,640)} = 0.44207 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}} * 45 \frac{\text{pie}}{\text{etapa}} = 19.8931 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}$$

13. Determinar el número de etapas necesarias para obtener el incremento de presión requerido.

$$NE = \frac{\text{Incremento de presión}}{\text{Presión/etapa}}$$

$$NE (1,040-1,240) = \frac{200 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}}{15.5865 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}} = 13 \text{ etapas}$$

$$NE (1,240-1,440) = \frac{200 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}}{18.0591 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}} = 11 \text{ etapas}$$

$$NE (1,440-1,640) = \frac{200 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}}{19.8931 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}} = 10 \text{ etapas}$$

$$\text{Total} = 34 \text{ etapas}$$

14. Determinar el número total de etapas del punto anterior.

$$NTE = \sum NE = 34 \text{ etapas}$$

15. Determinar la potencia requerida en cada sección.

$$\text{Potencia} = NE * \frac{Hp}{\text{etapa}} * \rho_m$$

$$\rho_m \text{ promedio (1,040 - 1,240)} = \frac{52.0595 + 57.4297}{2} = 54.7446 \text{ lb/ pie}^3$$

$$\text{Potencia (1,040 - 1,240)} = 13 * 1.32 * \frac{54.7466 \text{ lb/ pie}^3}{62.40 \text{ lb/ pie}^3} = 15.0547 \text{ Hp}$$

$$\rho_m \text{ promedio (1,240 - 1,440)} = \frac{57.4297 + 61.8927}{2} = 59.6462 \text{ lb/ pie}^3$$

$$\text{Potencia (1,240 - 1,440)} = 11 * 1.30 * \frac{59.6462 \text{ lb/ pie}^3}{62.40 \text{ lb/ pie}^3} = 13.6689 \text{ Hp}$$

$$\rho_m \text{ promedio (1,440 - 1,640)} = \frac{61.8627 + 65.4546}{2} = 63.6586 \text{ lb/ pie}^3$$

$$\text{Potencia (1,440 - 1,640)} = 10 * 1.29 * \frac{63.65586 \text{ lb/ pie}^3}{62.40 \text{ lb/ pie}^3} = 13.1602 \text{ Hp}$$

16. Determinar la potencia total requerida sumando los Hp del punto anterior.

$$\sum \text{Potencia} = 41.88 \text{ Hp}$$

RESUMEN DE RESULTADOS

- A) Se bombea todo el gas y no se produce agua
- B) Se ventea el 50% de gas y no se produce agua
- C) Se bombea el 50% de aceite, 50% de agua y el 100% del gas pasa por la bomba

	A	B	C
Tipo de Bomba REDA	G-110	G-75	G-75
Tamaño de la Bomba (etapas)	65	62	34
Potencia del Motor (Hp)	50.08	44.93	41.88
Volumen de Succión (bpd)	3.608	2.967	2.804
Volumen de Descarga (bpd)	2.957	2.690	2.478
Presión de Succión (lb/pg ²)	1.040	1.040	1.040
Presión de Descarga (lb/pg ²)	1.640	1.640	1.640
Presión Desarrollada por la Bomba (lb/pg ²)	600	600	600

3.5 EJEMPLO PARA UN POZO PRODUCTOR DE ACEITE, GAS Y AGUA^{1,23}.

Seleccionar la unidad de bombeo electrocentrífugo adecuada para cada una de las consideraciones siguientes:

- A) El pozo produce solamente agua.
- B) El pozo produce agua y aceite.
- C) El pozo produce aceite, agua y gas
- D) Para el caso del inciso C), realizar el diseño de la unidad mediante la aproximación de campo.

1. Recopilar y analizar datos:

- Datos del pozo

Profundidad total:	PT	= 7,500 pies.
Diámetro de T. R.:	$\phi_{T.R.}$	= 7 pg, 23 lb/pie a 6,400 pies
Diámetro de T. P.:	$\phi_{T.P.}$	= 2 ⁷ / ₈ pg, EUE 8RD a 6,200 pies.
Liner:	ϕ_{Liner}	= 5 ¹ / ₂ pg, 17 lb/pie colgada a 6,300 pies.
Intervalos perforados:		= 6,500-6,520; 6,530-6590; 7,100- 7,155 pies.
Prof. de colación de la bomba:	P _{cb}	= 6,200 pies.

- Datos de producción

Presión de descarga requerida:	P _{dr}	= 200 lb/pg ² man.
Gasto deseado:	q _d	= 1,500 bpd.
Relación gas-aceite producida:	RGA	= 500 a 1
Temperatura en fondo del pozo	T _{wf}	= 100 °F.
Factor de volumen del aceite:	B _o	= 1.35 @ c. succión de la bomba.
Presión de succión:	P _{succ}	= 300 lb/pg ² .
Presión de descarga:	P _{desc}	= 2,117 lb/pg ² .

- Datos del fluido

Gravedad específica del gas:	ρ_{rg}	= 0.65
Densidad relativa del agua:	ρ_{rw}	= 1.095
Densidad API del aceite:	ρ_o	= 31 °API.
Porcentaje de agua producida:	f _w	= 13.4%

Considerar que el yacimiento se comporta de acuerdo con la curva de Vogel.

A) El pozo produce solamente agua.

2. Determinar la capacidad de producción del pozo.

En este problema el gasto deseado es de 1,500 bpd.

3. Determinar la carga dinámica total (CDT) necesaria en pies para 1,500 bpd.

a) Elevación neta (Profundidad de colocación de la bomba - Sumergencia)

Para determinar la sumergencia, según los datos del problema se tiene una presión de succión de 300 lb/pg² la cual equivale a una longitud de:

$$\text{Sumergencia} = \frac{300 \text{ lb/pg}^2}{\left(0.433 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}}\right)(1.095)} = 633 \text{ pies}$$

Si la bomba se coloca a 6,200 pies, la elevación neta será de:

$$\text{Elevación neta} = 6,200 - 633 = 5,567 \text{ pies}$$

b) La presión en la cabeza del pozo en pies (P_{wh}).

$$P_{wh} = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{\left(0.433 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}}\right)(1.095)} = 422 \text{ pies}$$

c) La caída de presión por fricción para un gasto de 1,500 bpd en una T.P. de 2⁷/₈ pg es igual a:

De la Fig. A2, Apéndice A, se obtiene un factor de pérdidas de presión por fricción igual a:

$$20 \text{ pies/1,000 pies}$$

Entonces:

$$\Delta P_f = \left(\frac{20 \text{ pies}}{1,000 \text{ pies}}\right)(6,200 \text{ pies}) = 124 \text{ pies}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \text{CDT} &= \text{Elevación neta} + P_{wh} + \Delta P_f \text{ en T.P.} \\ \text{CDT} &= 5,567 + 422 + 124 \\ \text{CDT} &= 6,113 \text{ pies} \end{aligned}$$

4. Seleccionar, de entre las curvas características de las bombas la que tenga la mayor eficiencia para el gasto deseado y el diámetro exterior sea menor al diámetro interior de la T.R.

$$\begin{aligned}\phi_{T.R.} &= 7 \text{ pg.} \\ q &= 1,500 \text{ bpd.}\end{aligned}$$

Con los datos anteriores se selecciona la bomba REDA E-41, para T.R. de 6 5/8 pg (Apéndice B), ya que es la que maneja este gasto con mayor eficiencia.

5. Determinar el número de etapas requeridas para permitir producir el gasto deseado.

De la curva característica para la bomba seleccionada y para el gasto de 1,500 bpd, se requieren 2,966 pies/100 etapas, entonces, por cada etapa se requieren 29.66 pies/etapa.

Por lo tanto:

$$NE = \text{Número de etapas requeridas} = \frac{CDT}{\text{pie/etapa}}$$

$$\begin{aligned}NE &= \frac{6,113 \text{ pies}}{29.66 \text{ pies/etapa}} \\ NE &= 206 \text{ etapas}\end{aligned}$$

6. Determinar la potencia que se requiere en el motor.

De la curva característica y para el gasto de 1,500 bpd se requieren 0.5533 Hp/etapa (basados en la densidad del agua 1.00).

Entonces, para una densidad relativa de 1.095 los Hp serán:

$$\begin{aligned}\text{Potencia} &= \left(NE * \text{Hp/etapa} \right) * \rho_r \\ \text{Potencia} &= 206 \text{ etapas} * 0.5533 \text{ Hp/etapa} * 1.095 \\ \text{Potencia} &= 125 \text{ Hp}\end{aligned}$$

B) El pozo produce aceite y agua.

2. Determinar el volumen que se manejara a las condiciones de succión de la bomba para producir 1,500 bpd a condiciones de tanque o superficiales.

$$qt @ c. bomba = qt(1 - f_w)Bo + qt(f_w)Bw$$

$$qt @ c. bomba = 1,500(1 - 0.134) * 1.35 + 1,500(0.134) * 1.0$$

$$qt @ c. bomba = 1,955 \text{ bpd}$$

3. Determinar la carga dinámica total necesaria en pies para 1,500 bpd.

Para determinar las presiones en unidades de longitud, se necesita calcular la densidad relativa promedio de acuerdo con el porcentaje de producción de agua.

$$\text{Aceite: } 0.8707 * 0.866 = 0.7540$$

$$\text{Agua: } 1.0950 * 0.134 = 0.1467$$

$$\text{Densidad relativa promedio de la mezcla: } \rho_{rm} = 0.9007$$

- a) Elevación neta (profundidad de colocación de la bomba - sumergencia).

Para determinar la sumergencia, según los datos del problema y de acuerdo con la densidad relativa promedio de la mezcla, la presión en la succión de 300 lb/pg² equivale a una longitud de:

$$\text{Sumergencia} = \frac{300 \text{ lb/pg}^2}{\left(0.433 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}\right)(0.9007)} = 769 \text{ pies}$$

Si la bomba se coloca a 6,200 pies, la elevación neta será de:

$$\text{Elevación Neta} = 6,200 - 769 = 5,431 \text{ pies}$$

- b) La presión en la cabeza del pozo en pies (P_{wh}).

$$P_{wh} = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{\left(0.433 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}\right)(0.9007)} = 513 \text{ pies}$$

c) La caída de presión por fricción es la misma que se calculó en el inciso A):

$$\Delta P_f = \left(\frac{20 \text{ pies}}{1,000 \text{ pies}} \right) (6,200 \text{ pies}) = 124 \text{ pies}$$

Por lo tanto:

$$CDT = \text{Elevación neta} + \Delta P_f \text{ en TP} + P_{wh}$$

$$CDT = 5,431 + 513 + 124$$

$$CDT = 6,068 \text{ pies}$$

4. Seleccionar de entre las gráficas de las bombas la que tenga la mayor eficiencia para el gasto deseado y el diámetro exterior sea menor al diámetro interior de la T.R.

$$\phi_{T.R.} - 7 \text{ pg. (usar la } 6^{5/8} \text{ pg.)}$$

$$q = 1,500 \text{ bpd}$$

Con los datos anteriores se selecciona la bomba REDA E-41 (Apéndice B), ya que es la que maneja este gasto con mayor eficiencia.

5. Determinar el número de etapas requeridas para permitir producir el gasto deseado.

De la curva característica para la bomba seleccionada y para el gasto de 1,500 bpd se requieren 2,966 pies/100 etapas, entonces, por cada etapa se requieren 29.66 pies/etapa.

Por lo tanto:

$$NE = \text{Número de etapas requeridas} = \frac{CDT}{\text{pie/etapa}}$$

$$NE = \frac{6,068 \text{ pies}}{29.66 \text{ pies/etapa}}$$

$$NE = 204.6 \text{ etapas}$$

6. Determinar la potencia que se requiere en el motor.

De la curva característica y para el gasto de 1,500 bpd, se requieren 0.5533 Hp/etapa (basados en la densidad del agua 1.00).

Entonces, para una densidad relativa de 1.095 los Hp serán:

$$\text{Potencia} = \left(NE * \frac{Hp}{\text{etapa}} \right) * \rho_m$$

$$\text{Potencia} = 204.6 \text{ etapas} * 0.5533 \frac{Hp}{\text{etapa}} * 0.9007$$

$$\text{Potencia} = 102 \text{ Hp}$$

C) El pozo produce aceite, agua y gas.

1. Determinar el valor de la presión en la succión.

De acuerdo con los datos, se tiene que la presión en la succión es de 300 lb/pg².

2. Determinar el valor de la presión en la descarga.

De acuerdo con los datos, se tiene que la presión en la descarga es de 2,117 lb/pg².

3. El incremento total de presión será de:

$$\Delta P = P_{desc} - P_{succ}$$

$$\Delta P = 2,117 - 300$$

$$\Delta P = 1,817 \frac{lb}{pg^2}$$

4. Considerar cuatro incrementos de presión, entonces cada incremento de presión será:

$$\Delta P = \frac{1,817 \frac{lb}{pg^2}}{4}$$

$$\Delta P = 455 \frac{lb}{pg^2}$$

5. Determinar la densidad de cada cambio de presión.

a) Encontrar el volumen de aceite, agua y gas para cada presión.

$$V_{t_{succ}} = V_o + V_g + V_w$$

$$V_{t_{succ}} = qt(1 - f_w)B_o + qt(1 - f_w)(RGA - Rs)(PGI)B_g + qt(f_w)$$

PGI = Porcentaje de gas que pasa a través de la bomba.

Calculamos el valor de B_g para cada presión con:

$$B = 0.00504 * \frac{T_y * Z_y}{P_y} \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$Z(300) = 0.950$$

$$Z(753) = 0.883$$

$$Z(1,210) = 0.838$$

$$Z(1,665) = 0.795$$

$$Z(2,120) = 0.772$$

$$B_g(300) = 0.00504 * \left[\frac{560 * 0.950}{314.7} \right] \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(300) = 0.00852 \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(755) = 0.00504 * \left[\frac{560 * 0.883}{769.7} \right] \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(755) = 0.00323 \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(1,210) = 0.00504 * \left[\frac{560 * 0.838}{1,224.7} \right] \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(1,210) = 0.00193 \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(1,665) = 0.00504 * \left[\frac{560 * 0.795}{1,679.7} \right] \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_g(1,665) = 0.00136 \left(\frac{bl_g @ c. yac.}{pie_g^3 @ c. sup.} \right)$$

$$B_x(2,210) = 0.00504 * \begin{bmatrix} 560 * 0.772 \\ 2,134.7 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} bl_g @ c. yac. \\ pie^3 @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$B_x(2,210) = 0.00102 \begin{pmatrix} bl_g @ c. yac. \\ pie^3 @ c. sup. \end{pmatrix}$$

Usando las correlaciones de Standing, calcular los valores de Rs y Bo.

$$R_s = \gamma_g \begin{bmatrix} P * 10^{0.0125 * \gamma_g} \\ 18 * 10^{0.00091 * T} \end{bmatrix}^{1.2048} \begin{pmatrix} pie^3 @ c. yac. \\ bl @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$R_s(300) = 0.65 \begin{bmatrix} 3.14.7 * 10^{0.0125 * 31} \\ 18 * 10^{0.00091 * 100} \end{bmatrix}^{1.2048} \begin{pmatrix} pie^3 @ c. yac. \\ bl @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$R_s(300) = 46.48 \begin{pmatrix} pie^3 @ c. yac. \\ bl @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$R_s(755) = 0.65 \begin{bmatrix} 769.7 * 10^{0.0125 * 31} \\ 18 * 10^{0.00091 * 100} \end{bmatrix}^{1.2048} \begin{pmatrix} pie^3 @ c. yac. \\ bl @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$R_s(755) = 136.53 \begin{pmatrix} pie^3 @ c. yac. \\ bl @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$R_s(1,210) = 0.65 \begin{bmatrix} 1224.7 * 10^{0.0125 * 31} \\ 18 * 10^{0.00091 * 100} \end{bmatrix}^{1.2048} \begin{pmatrix} pie^3 @ c. yac. \\ bl @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$R_s(1,210) = 238.92 \begin{pmatrix} pie^3 @ c. yac. \\ bl @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$R_s(1,665) = 0.65 \begin{bmatrix} 1,676.7 * 10^{0.0125 * 31} \\ 18 * 10^{0.00091 * 100} \end{bmatrix}^{1.2048} \begin{pmatrix} pie^3 @ c. yac. \\ bl @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$R_s(1,665) = 349.58 \begin{pmatrix} pie^3 @ c. yac. \\ bl @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$R_s(2,120) = 0.65 \begin{bmatrix} 2,134.7 * 10^{0.0125 * 31} \\ 18 * 10^{0.00091 * 100} \end{bmatrix}^{1.2048} \begin{pmatrix} pie^3 @ c. yac. \\ bl @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$R_s(2,120) = 466.63 \begin{pmatrix} pie^3 @ c. yac. \\ bl @ c. sup. \end{pmatrix}$$

$$B_o = 0.972 + 0.000147 \left[R_s \left(\frac{\rho_{\text{gas}}}{\rho_{\text{m}}} \right)^{0.5} + 1.25(T) \right]^{1.175}$$

$$B_o(300) = 0.972 + 0.000147 \left[46.8 \left(\frac{0.65}{0.8707} \right)^{0.5} + 1.25(100) \right]^{1.175}$$

$$B_o(300) = 1.0313 \frac{bl_o @ c. yac.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$B_o(755) = 0.972 + 0.000147 \left[140.81 \left(\frac{0.65}{0.8707} \right)^{0.5} + 1.25(100) \right]^{1.175}$$

$$B_o(755) = 1.0654 \frac{bl_o @ c. yac.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$B_o(1,210) = 0.972 + 0.000147 \left[238.92 \left(\frac{0.65}{0.8707} \right)^{0.5} + 1.25(100) \right]^{1.175}$$

$$B_o(1,210) = 1.1065 \frac{bl_o @ c. yac.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$B_o(1,665) = 0.972 + 0.000147 \left[349.58 \left(\frac{0.65}{0.8707} \right)^{0.5} + 1.25(100) \right]^{1.175}$$

$$B_o(1,665) = 1.1532 \frac{bl_o @ c. yac.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$B_o(2,120) = 0.972 + 0.000147 \left[466.63 \left(\frac{0.65}{0.8707} \right)^{0.5} + 1.25(100) \right]^{1.175}$$

$$B_o(2,120) = 1.2046 \frac{bl_o @ c. yac.}{bl_o @ c. sup.}$$

Considerando, que se produce aceite, agua y gas y que todo el gas pasa a través de la bomba.

$$V_{i_{\text{mcc}}}(300) = (1,500(0.866)(1.0313)) + (1,500(0.866)(500 - 46.48)(1)(0.00852)) + (1,500(0.134))$$

$$V_{i_{\text{mcc}}}(300) = 6,560 \text{ bpd}$$

$$V_{i_{mcc}}(755) = (2,000(0.866)(1.0654)) + (2,000(0.866)(500 - 140.81)(1)(0.00316)) + (1,500(0.134))$$

$$V_{i_{mcc}}(755) = 3,059 \text{ bpd}$$

$$V_{i_{mcc}}(1,210) = (2,000(0.866)(1.1065)) + (1,500(0.866)(500 - 238.92)(1)(0.00193)) + (1,500(0.134))$$

$$V_{i_{mcc}}(1,210) = 2,293 \text{ bpd}$$

$$V_{i_{mcc}}(1,665) = (1,500(0.866)(1.1532)) + (1,500(0.866)(500 - 349.58)(1)(0.00136)) + (1,500(0.134))$$

$$V_{i_{mcc}}(1,665) = 1,956 \text{ bpd}$$

$$V_{i_{mcc}}(2,120) = (1,500(0.866)(1.2046)) + (1,500(0.866)(500 - 466.63)(1)(0.00102)) + (1,500(0.134))$$

$$V_{i_{mcc}}(2,120) = 1,810 \text{ bpd}$$

b) Encontrar la masa de aceite, gas y agua.

$$M = M_o + M_g + M_w$$

$$M_o = 350.5\rho_m + 0.0764\rho_{rg}(RGA) + 350.5\rho_{rw}$$

$$\rho_{rw} = \frac{141.5}{131.5 + 31} = 0.8707$$

$$M = 350.5(0.8707) + 0.0764(0.65)(500) + 350.5(1.095)$$

$$M = 714 \frac{lb_m}{bl_o}$$

c) La densidad de la mezcla será calculada de acuerdo con el volumen unitario (VU) que se tenga a cada presión.

$$VU = B_o + \frac{q^t - q_o}{q_o} (B_w) + (RGA - R_s)B_g$$

$$VU(300) = 1.0313 + \frac{1,500 - 1,300}{1,300} (1) + (500 - 46.48)(0.00852)$$

$$VU(300) = 5.0491 \frac{bl(o + g + w) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$VU(755) = 1.0654 + \frac{1,500 - 1,300}{1,300} (1) + (500 - 136.53)(0.00323)$$

$$VU(755) = 2.3933 \frac{bl(o + g + w) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$VU(1,210) = 1.1065 + \frac{1,500 - 1,300}{1,300}(1) + (500 - 238.92)(0.00193)$$

$$VU(1,210) = 1.7642 \frac{bl(o + g + w) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$VU(1,665) = 1.5116 + \frac{1,500 - 1,300}{1,300}(1) + (500 - 349.58)(0.00136)$$

$$VU(1,665) = 1.5116 \frac{bl(o + g + w) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

$$VU(2,120) = 1.2046 + \frac{1,500 - 1,300}{1,300}(1) + (500 - 466.63)(0.00102)$$

$$VU(2,120) = 1.3925 \frac{bl(o + g + w) @ c. b.}{bl_o @ c. sup.}$$

Entonces, la densidad de la mezcla a cada presión, es:

$$\rho_m(300) = \frac{M}{VU * 5.615} = \frac{714 \text{ lb}_m / bl_o}{(5.0491 * 5.615) \left(\frac{pie^3}{bl_o} \right)}$$

$$\rho_m(300) = 25.18 \text{ lb}_m / pie^3$$

$$\rho_m(755) = \frac{71.4 \text{ lb}_m / bl_o}{(2.3933 * 5.615) \left(\frac{pie^3}{bl_o} \right)}$$

$$\rho_m(755) = 53.13 \text{ lb}_m / pie^3$$

$$\rho_m(1,210) = \frac{714 \text{ lb}_m / bl_o}{(1.7642 * 5.615) \left(\frac{pie^3}{bl_o} \right)}$$

$$\rho_m(1,210) = 72.08 \text{ lb}_m / pie^3$$

$$\rho_m (1,665) = \frac{714 \text{ lb}_m/\text{bl}_o}{(1.5116 * 5.615) \left(\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}_o} \right)}$$

$$\rho_m (1,665) = 84.12 \text{ lb}_m/\text{pie}^3$$

$$\rho_m (2,120) = \frac{714 \text{ lb}_m/\text{bl}_o}{(1.3925 * 5.615) \left(\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}_o} \right)}$$

$$\rho_m (2,120) = 91.32 \text{ lb}_m/\text{pie}^3$$

6. Encontrar el gradiente de presión para cada presión manejada.

De acuerdo con la densidad calculada para cada presión en el paso anterior, el gradiente lo calculamos con:

$$Gr = \text{Gradiente de presión} = \frac{\rho_m}{144}$$

$$\text{Gradiente de presión (300)} = \frac{25.18}{144} = 0.1749 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente de presión (755)} = \frac{53.13}{144} = 0.3690 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente de presión (1,210)} = \frac{72.08}{144} = 0.5005 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente de presión (1,665)} = \frac{84.12}{144} = 0.5842 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente de presión (2,120)} = \frac{91.32}{144} = 0.6342 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

7. Encontrar el gradiente de presión promedio entre los puntos de presión manejados.

$$\text{Gradiente promedio (300 - 755)} = \frac{0.1749 + 0.3690}{2} = 0.27195 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente promedio (755 - 1,210)} = \frac{0.3690 + 0.5005}{2} = 0.43475 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente promedio (1,210 - 1,665)} = \frac{0.5005 + 0.5842}{2} = 0.54235 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

$$\text{Gradiente promedio (1,665 - 2,120)} = \frac{0.5842 + 0.6342}{2} = 0.60920 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}$$

8. Convertir el gradiente de presión promedio a pies de carga para cada incremento de presión.

$$Carga = \frac{\text{Incremento de presión}}{\text{Gradiente promedio}}$$

$$Carga (300 - 755) = \frac{455 \text{ lb/pg}^2}{0.27195 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}} = 1,673.10 \text{ pies}$$

$$Carga (755 - 1,210) = \frac{455 \text{ lb/pg}^2}{0.43475 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}} = 1,046.58 \text{ pies}$$

$$Carga (1,210 - 1,665) = \frac{455 \text{ lb/pg}^2}{0.54235 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}} = 838.94 \text{ pies}$$

$$Carga (1,665 - 2,120) = \frac{455 \text{ lb/pg}^2}{0.60920 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie}} = 746.88 \text{ pies}$$

9. Definir el gasto en bpd para cada punto de presión manejada, (paso 5, inciso a).

$$q_i (300) = 6,560 \text{ bpd}$$

$$q_i (755) = 3,059 \text{ bpd}$$

$$q_i (1,210) = 2,293 \text{ bpd}$$

$$q_i (1,665) = 1,965 \text{ bpd}$$

$$q_i (2,120) = 1,810 \text{ bpd}$$

10. Determinar el gasto promedio entre los puntos de presión mapejados.

$$q \text{ promedio } (300 - 755) = \frac{6,560 + 3,059}{2} = 4,809.5 \text{ bpd}$$

$$q \text{ promedio } (755 - 1,210) = \frac{3,059 + 2,293}{2} = 2,676 \text{ bpd}$$

$$q \text{ promedio } (1,210 - 1,665) = \frac{2,293 + 1,965}{2} = 2,129 \text{ bpd}$$

$$q \text{ promedio } (1,665 - 2,120) = \frac{1,965 + 1,810}{2} = 1,887.5 \text{ bpd}$$

11. Seleccionar la bomba para cada uno de los gastos promedios y obtener la carga/pie desarrollada para cada caso (Apéndice B).

Para q (300 - 755) = 4,809.5 bpd, la bomba seleccionada es una Reda G-150 que desarrolla 32 pie/etapa y requiere 1.75 Hp/etapa.

Para q (755 - 1,210) = 2,676 bpd, la bomba seleccionada es una Reda G-75 que desarrolla 42.8 pie/etapa y requiere 1.32 Hp/etapa.

Para q (1,210 - 1,665) = 2,129 bpd, la bomba seleccionada es una Reda G-52 que desarrolla 36.50 pie/etapa y requiere 0.88 Hp/etapa.

Para q (1,665 - 2,120) = 1,887.5 bpd, la bomba seleccionada es una Reda G-52 que desarrolla 40.08 pie/etapa y requiere 0.87 Hp/etapa.

12. Determinar la presión desarrollada por etapa.

$$\text{Presión/etapa (300 - 755)} = 0.27195 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}} * 32 \frac{\text{pie}}{\text{etapa}} = 8.7024 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}$$

$$\text{Presión/etapa (755 - 1,210)} = 0.43475 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}} * 42.8 \frac{\text{pie}}{\text{etapa}} = 18.6073 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}$$

$$\text{Presión/etapa (1,210 - 1,665)} = 0.54235 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}} * 36.5 \frac{\text{pie}}{\text{etapa}} = 19.7958 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}$$

$$\text{Presión/etapa (1,665 - 2,210)} = 0.60920 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ pie}} * 40.08 \frac{\text{pie}}{\text{etapa}} = 24.4167 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}$$

13. Determinar el número de etapas necesarias para obtener el incremento de presión requerido.

$$NE = \frac{\text{Incremento de presión}}{\text{Presión/etapa}}$$

$$NE (300 - 755) = \frac{455 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}}{8.7024 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}} = 52 \text{ etapas}$$

$$NE (755 - 1,210) = \frac{455 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2}}{18.6073 \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2 \text{ etapa}}} = 24 \text{ etapas}$$

$$NE(1,210 - 1,665) = \frac{455 \text{ lb/pg}^2}{19.7958 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}} = 23 \text{ etapas}$$

$$NE(1,665 - 2,210) = \frac{455 \text{ lb/pg}^2}{24.4167 \text{ lb/pg}^2 \text{ etapa}} = 19 \text{ etapas}$$

Total = 118 etapas

14. Determinar el número total de etapas del punto anterior.

$$NTE = \sum NE = 118 \text{ etapas}$$

15. Determinar la potencia requerida en cada sección.

$$\rho_m \text{ promedio } (300 - 755) = \frac{25.18 + 53.13}{2} = 39.155 \text{ lb/pie}^3$$

$$\text{Potencia } (300 - 755) = 52 * 1.75 * \frac{39.155 \text{ lb/pie}^3}{62.40 \text{ lb/pie}^3} = 57 \text{ Hp}$$

$$\rho_m \text{ promedio } (755 - 1,210) = \frac{53.13 + 72.08}{2} = 62.605 \text{ lb/pie}^3$$

$$\text{Potencia } (755 - 1,210) = 24 * 1.32 * \frac{62.605 \text{ lb/pie}^3}{62.40 \text{ lb/pie}^3} = 32 \text{ Hp}$$

$$\rho_m \text{ promedio } (1,210 - 1,665) = \frac{72.08 + 84.12}{2} = 78.10 \text{ lb/pie}^3$$

$$\text{Potencia } (1,210 - 1,665) = 23 * 0.88 * \frac{78.1 \text{ lb/pie}^3}{62.40 \text{ lb/pie}^3} = 25 \text{ Hp}$$

$$\rho_m \text{ promedio } (1,665 - 2,120) = \frac{84.12 + 91.32}{2} = 87.72 \text{ lb/pie}^3$$

$$\text{Potencia } (1,665 - 2,120) = 19 * 0.87 * \frac{87.72 \text{ lb/pie}^3}{62.40 \text{ lb/pie}^3} = 23 \text{ Hp}$$

16. Determinar la potencia total requerida sumando los Hp del punto anterior.

$$\sum \text{Potencia} = 137 \text{ Hp}$$

El Arreglo Telescopiado queda:

Tipo de Bomba Reda	No. de Etapas
G-150	52
G-75	24
G-52	42

D) Solución mediante la aproximación de campo²².

4. Se determina la carga dinámica total.

$$CDT = \text{Elevación neta} + \Delta P_f + P_{wh}$$

a) Elevación neta.

Del planteamiento del problema, se mencionan 300 lb/pg² de presión en la succión, las cuales representan:

$$\frac{300 \text{ lb/pg}^2}{0.433 * 0.9007} = 770 \text{ pies}$$

Si la bomba se coloca a 6,200 pies, la elevación neta es:

$$\text{Elevación neta} = 6,200 - 770 = 5,430 \text{ pies}$$

b) La caída de presión por fricción para un gasto de 1,500 bpd en una T.P. de 2⁷/₈ pg es igual a 20 pies/1,000 pies, (fig. A2, Apéndice A). Entonces:

$$\Delta P_f = \left(\frac{20 \text{ pies}}{1,000 \text{ pies}} \right) (6,200 \text{ pies}) = 124 \text{ pies}$$

c) La presión en la cabeza del pozo, en pies, de carga (P_{wh}).

$$P_{wh} = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{\left(0.433 \text{ lb/pg}^2 \text{ pie} \right) (0.9007)} = 513 \text{ pies}$$

Por lo tanto:

$$CDT = \text{Elevación neta} + \Delta P_f \text{ en TP} + P_{wh}$$

$$CDT = 5,430 + 513 + 124$$

$$CDT = 6,067 \text{ pies}$$

5. Selección de las bombas.

Para seleccionar la bomba básica, se debe considerar que volumen se requiere que esta descargue. De acuerdo a los cálculos realizados mediante el procedimiento anterior, se tiene que el volumen de descarga debe ser de 1,810 bpd. Entonces, la bomba básica será una que maneje aproximadamente 1,810 bpd y que ajuste en el interior de una T.R. de 7 pg de acuerdo con las gráficas que se presentan en el Apéndice B. Se manejan las bombas que ajustan en la T.R. de 6 5/8 pg, encontrándose que el tamaño óptimo de la bomba es de la serie 540, modelo G-52, la cual tiene una eficiencia de 64% para manejar este gasto.

Para obtener el volumen de 1,810 bpd en la descarga de la bomba básica, se debe manejar un volumen mayor en la bomba inferior el cual se va reduciendo conforme pasa a través de ellas. Considerando esta situación de las gráficas de las bombas (Apéndice B), se seleccionan las bombas más grandes inmediatas en la misma serie, de tal forma que la más grande maneje alrededor de 6,560 bpd (procedimiento anterior paso 5), para que se pueda estar seguro de que los volúmenes manejados caerán dentro de rango de las bombas.

Las bombas seleccionadas en orden ascendente de colocación, son:

G-180 con un rango de 5,000 a 7,250 bpd.

G-150 con un rango de 4,400 a 6,400 bpd.

G-110 con un rango de 3,200 a 4,500 bpd.

G-59 con un rango de 2,500 a 3,600 bpd.

Para determinar el número de etapas de cada sección telescopiada inferior, se determina el número de carcaza y la cantidad de etapas que lleva cada una⁴. Se selecciona la carcaza más pequeña que se tiene para cada tipo de bomba, encontrándose que:

G-180 tendrá 3 etapas.

G-150 tendrá 3 etapas.

G-110 tendrá 5 etapas.

G-59 tendrá 10 etapas.

6. Ahora se determina el total de carga que suministrará cada sección telescopiada. De las gráficas de las bombas, se encuentra que cada sección desarrolla:

G-180	30.0 pies/etapa.
G-150	31.6 pies/etapa.
G-110	37.2 pies/etapa.
G-59	43.3 pies/etapa.

Entonces:

G-180	3 etapas	*	30.0 pies/etapa	=	90 pies.
G-150	3 etapas	*	31.6 pies/etapa	=	95 pies.
G-110	5 etapas	*	37.2 pies/etapa	=	186 pies.
G-59	10 etapas	*	43.3 pies/etapa	=	433 pies.

Total = 804 pies.

La carga total requerida para obtener en la superficie 1,500 bpd se determinó en 6,070 pies, entonces la carga restante necesaria, es:

$$6,070 - 804 = 5,266 \text{ pies.}$$

La cual debe ser suministrada por la bomba básica G-52, misma que suministrará una carga de 42 pies/etapa para 1,810 bpd, con eficiencia de 64%.

El número de etapas requerido para esta bomba, es:

$$\frac{5,266 \text{ pies}}{42 \text{ pies/etapa}} = 125 \text{ etapas}$$

Entonces, el diseño telescopiado, es:

G-180	con	3 etapas.
G-150	con	3 etapas.
G-110	con	5 etapas.
G-59	con	10 etapas.
G-52	con	125 etapas

7. La potencia requerida se determina multiplicando la potencia al freno máxima de cada bomba encontrada de las curvas para agua, por el número de etapas, por la densidad relativa promedio del fluido y sumando las 5 potencias:

G-180	3 etapas	*	1.86 Hp/etapa	*	0.9007	=	5.025 Hp
G-150	3 etapas	*	1.70 Hp/etapa	*	0.9007	=	4.593 Hp
G-110	5 etapas	*	1.49 Hp/etapa	*	0.9007	=	6.710 Hp
G-59	10 etapas	*	1.50 Hp/etapa	*	0.9007	=	13.510 Hp
G-52	125 etapas	*	0.87 Hp/etapa	*	0.9007	=	97.951 Hp

Total = 127.789 ≈ 128 Hp

3.6 EJEMPLO PARA UN POZO PRODUCTOR DE ACEITE, GAS Y AGUA. SOLUCIÓN MEDIANTE EL PROGRAMA DE CÓMPUTO BECS.

1. Recopilar y analizar datos:

- Datos del pozo

Diámetro de T. R.:	$\phi_{T.R.}$	= 7 pg, a 10,653 pies
Diámetro de T. P.:	$\phi_{T.P.}$	= 4 ½ pg, a 6,842 pies.
Prof. media de los disparos:		= 10,653 pies.
Angulo de inclinación:		= 16.9 grados.

- Datos de producción

Gasto deseado:	q_d	= 7,000 bpd.
Relación gas-aceite producida:	RGA	= 326 pie ³ /bl
Temperatura en fondo del pozo	T_{wf}	= 231.6 °F.
Temperatura en la cabeza	T_{wh}	= 177.8 °F.
Presión estática:	P_{ws}	= 2,614.25 lb/pg ² .
Presión de fondo fluyendo:	P_{wf}	= 2,557.93 lb/pg ² .
Presión en la boca del pozo:	P_{wh}	= 60 lb/pg ² .
Presión de saturación:	P_b	= 1,963 lb/pg ² .
Gasto de líquido medido:	q_l	= 2,300 bl/día

- Datos del fluido

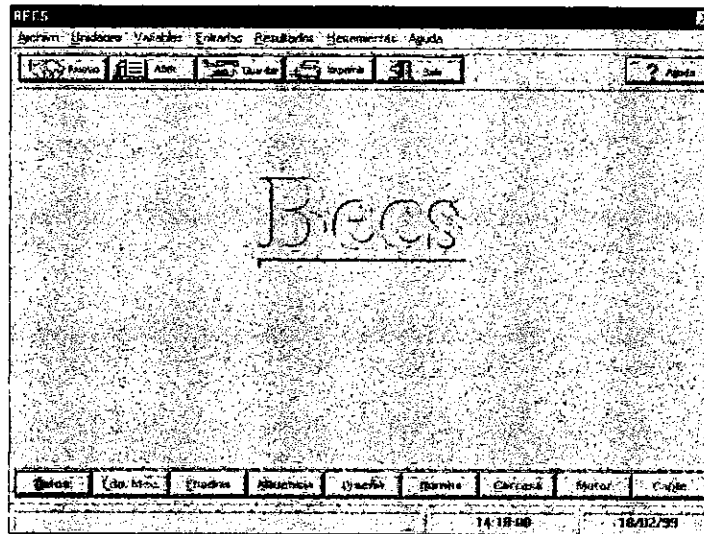
Tipo de aceite:	Aceite tipo Ku (Región Marina)	
Gravedad específica del gas:	ρ_{rg}	= 0.987 adim.
Densidad relativa del agua:	ρ_{ro}	= 1.0 adim.
Densidad API del aceite:	ρ_o	= 23 °API.
Porcentaje de agua producida:	f_w	= 0%

- Datos de laboratorio

Viscosidad del aceite:	μ_1	= 5,224 cp, para T = 100 °F
	μ_2	= 127 cp, para T = 208 °F

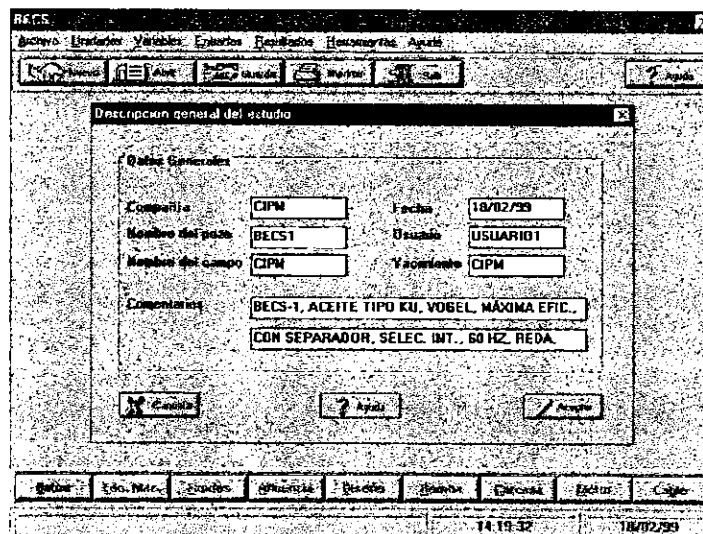
Considere que el yacimiento se comporta de acuerdo a la curva de Vogel. Emplee una eficiencia de separación del 45% y las correlaciones de Standing y Orkiszewski para el cálculo de las propiedades PVT de los fluidos y la construcción del perfil de presiones con flujo multifásico respectivamente. Suponga que el costo de la electricidad es de 0.5 \$/KWH.

2. Pantalla principal.



3. Descripción general del estudio.

Para acceder a esta pantalla haga "click" en el botón "Datos" o en el menú Entradas - Descripción general. Estos datos permiten identificar el estudio, ingresando información tal como: nombre del pozo, la Compañía a la que pertenece, el usuario y la fecha del estudio, entre otros. Además tiene dos campos de descripción, que sirven para identificar rápidamente la aplicación del programa de cómputo cuando se "abre" un ejemplo existente. Cuando finalice la captura de datos o de ver una pantalla de resultados haga "click" en el botón "✓ Aceptar".



4. Estado mecánico del pozo

Para acceder a esta pantalla haga "click" en el botón "Edo. Mec.". Los datos del estado mecánico del pozo son los referentes a los pesos, diámetros y profundidades de las tuberías, temperatura en la boca y en el fondo del pozo, profundidad media del intervalo disparado, y el ángulo de inclinación del pozo. Para capturar las características de las tuberías de producción y revestimiento se cuenta con una lista para seleccionar y complementar los datos de las tuberías existentes en el pozo. Si por alguna razón no existiera el tipo de tubería dentro de las medidas existentes, el usuario puede teclear los valores correspondientes, cuidando de que todos los campos estén completos.

The screenshot shows a software interface for well mechanical status. It contains several data tables and input fields:

Id	Nº/pis	PS
0	6842	4.800
6842		

Additional data fields on the right side:

- 177.8 °F
- 231.26 °F
- 10653 pie
- 16.9

Id	Nº/pis	PS	Ang
0	6842	3.825	31.566
6842	10653	7.000	17.473
10653			

5.5000	11.4247	4.8520
5.5000	13.4400	4.7700
5.5000	15.4670	4.6700
5.5250	13.4400	5.0450
5.5250	16.1200	5.3210
5.5250	18.8172	5.7910
5.5250	21.5054	6.0700

5. Datos del fluido y datos PVT.

Para acceder a esta pantalla haga "click" en el botón "Fluidos". Los datos de los fluidos son: densidad del aceite, gas y agua, presión de saturación, fracción de agua producida, relación gas-aceite producida. La relación gas-líquido se calcula directamente con la fracción de agua y la relación gas-aceite producidas.

The screenshot shows a software interface for fluid and PVT data. It contains several input fields and labels:

- 23 API
- 1 Adm
- 0.987 Adm
- 1.963 lb/peg
- 0
- 325 pie²/h
- 525.0

Para capturar los datos "PVT" presione el botón marcado con esta leyenda. Aquí se deberán especificar las correlaciones con las cuales se deberán de calcular la relación de solubilidad, el factor de volumen de aceite y la viscosidad del aceite.

Si para la viscosidad del aceite se cuenta con datos de laboratorio, estos deberán introducirse en la siguiente pantalla.

6. Datos del comportamiento de afluencia del pozo.

Para acceder a esta pantalla haga "click" en el botón "Afluencia". El comportamiento de afluencia del pozo se calcula por índice de productividad o por el método de Vogel. Los datos a introducir están en función del método seleccionado.

The screenshot shows a software window with a dark background and a grid of input fields. A central table contains the following data:

2514.2	l ³ /pp ²
0	l ³ /día/l ³ /pp ²
2200	l ³ /día
2557.8	l ³ /pp ²

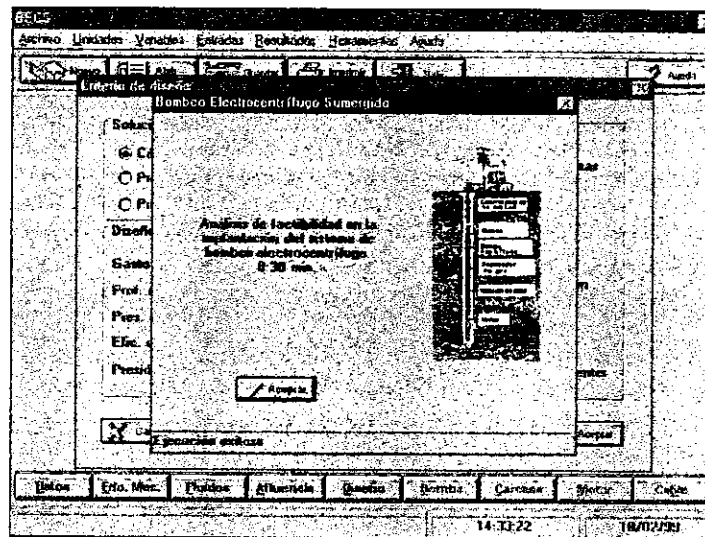
7. Datos para el criterio de diseño.

Para acceder a esta pantalla haga "click" en el botón "Diseño". Para definir el criterio de diseño debemos seleccionar el método de solución y la correlación de flujo multifásico a emplear. La solución se puede realizar por cálculo interno, profundidad de colocación de la bomba o por presión de entrada a la bomba. Los datos de diseño requeridos están en función del método de solución seleccionado.

The screenshot shows a software window with a dark background and a grid of input fields. A central table contains the following data:

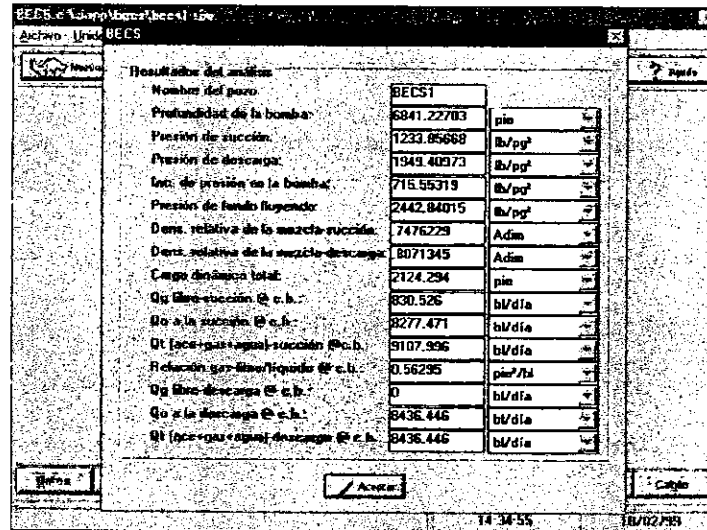
7000	l ³ /día
0	sin
0	l ³ /pp ²
45	X
50	l ³ /pp ²

Cuando haga "click" en el botón "✓ Aceptar" el programa realizará el análisis de factibilidad para la implantación del sistema.



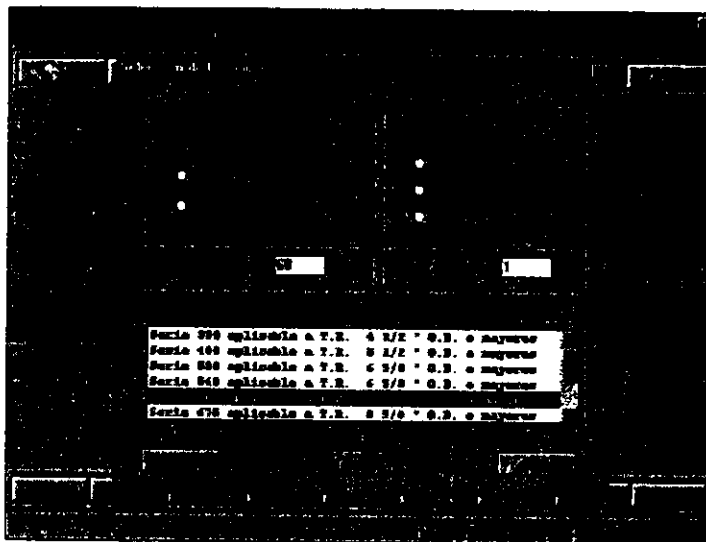
8. Resultados

Si el análisis de factibilidad para la implantación del sistema es satisfactorio, el programa nos proporcionará un listado con los resultados de los cálculos realizados.



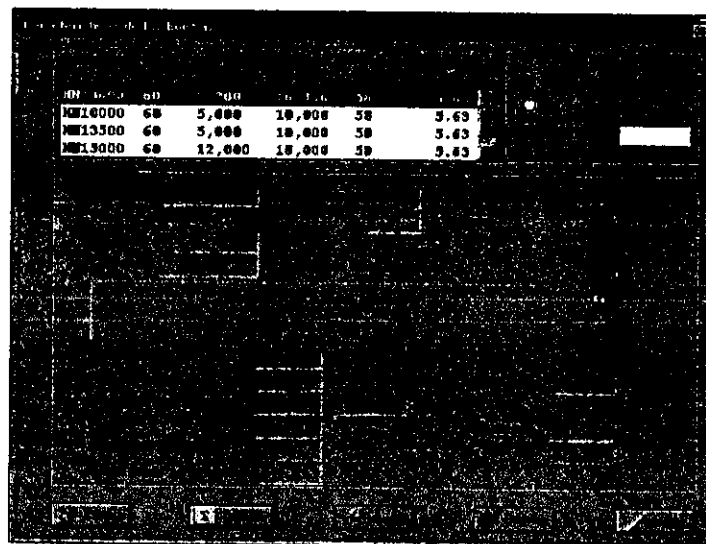
9. Datos para el criterio de selección de la bomba centrífuga óptima.

Para acceder a esta pantalla haga "click" en el botón "Bomba". Para seleccionar la bomba a emplear es necesario definir el criterio de selección, el fabricante, la frecuencia de operación, el número de secciones y el número de serie de la bomba. El criterio de selección de la bomba se puede ser por: máxima eficiencia, rango de gastos o por eficiencia - gasto.

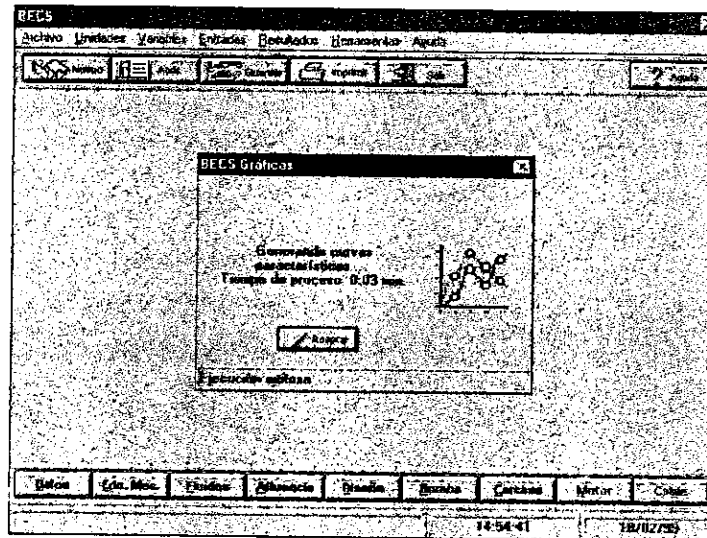


10. Evaluación de bombas de la serie seleccionada.

Para evaluar las bombas de la serie seleccionada se puede emplear uno de los dos métodos disponibles: por selección interna o selección por usuario. Si elige la opción por selección interna el paso inmediato es hacer un "click" en el botón "Σ Calcular", pero si se elige hacer la selección por usuario el paso inmediato es elegir de la lista de bombas que se muestra en la parte superior izquierda aquélla cuyo rango de gastos de operación recomendado incluya al gasto promedio que la bomba deberá manejar, paso siguiente haga "click" en el botón "Σ Calcular". Como resultado se determinarán la eficiencia, el número total de etapas y la potencia total requerida.

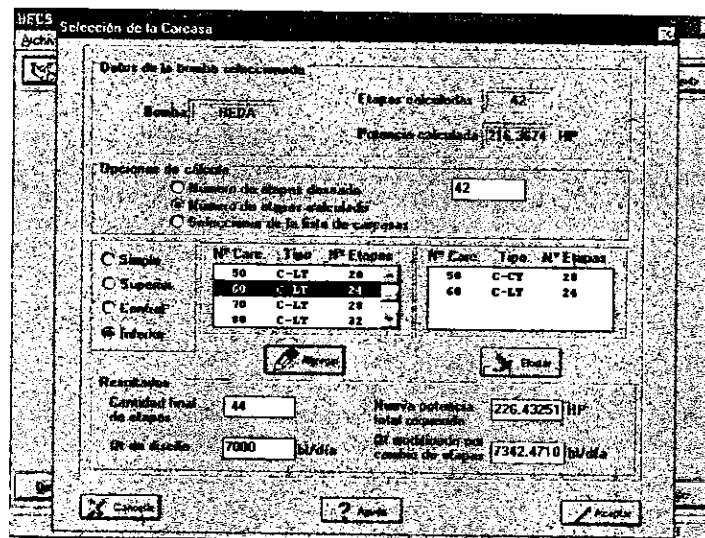


Si los resultados son satisfactorios, el programa procederá a generar la curva de IPR, el perfil de presiones con aparejo de bombeo electrocentrífugo, la curva del comportamiento sistema - pozo y las curvas características de la bomba. Si se requiere realizar algún cambio en los datos para la selección de la bomba presione el botón "← Regresar".



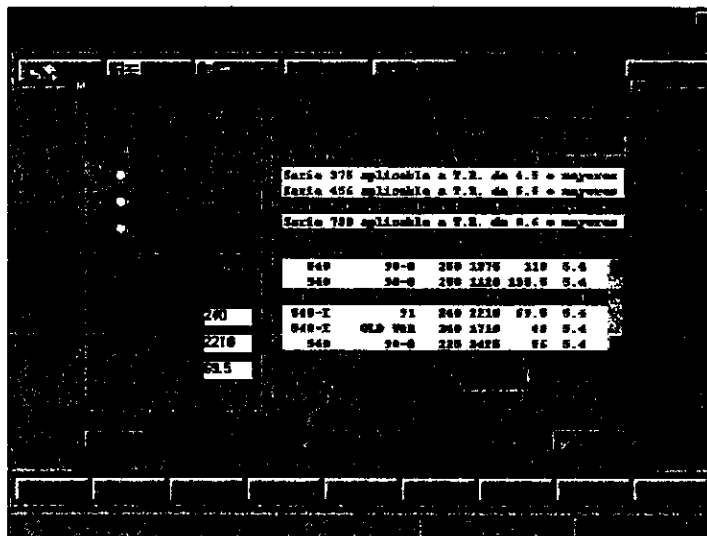
11. Selección de la carcasa de la bomba seleccionada.

Para acceder a esta pantalla haga "click" en el botón "Carcasa". Esta pantalla nos presenta tres opciones de cálculo: por el número de etapas deseado, por el número de etapas calculado o por selección de la lista de carcasas. Cualquier opción nos permite realizar el diseño en tandem de la bomba. Si al elegir la(s) carcasa(s) de la bomba el número final de etapas difiere del calculado el gasto total de diseño, la cantidad final de etapas y la potencia total requerida pueden ser modificados.



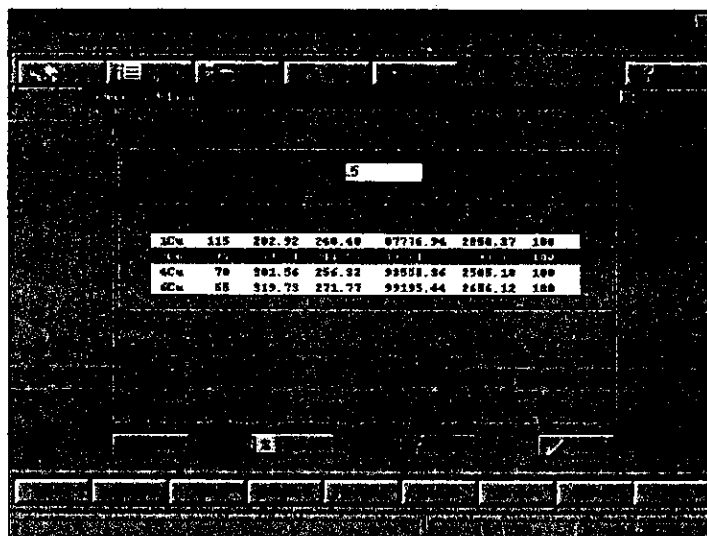
12. Selección del motor apropiado.

Para acceder a esta pantalla haga "click" en el botón "Motor". Para realizar la selección del motor apropiado se deberá elegir el fabricante y el número de serie del mismo, con lo cual estamos en posibilidades de seleccionar de la lista de motores el que mejor se ajuste a nuestras necesidades y que proporcione la potencia mínima a suministrar. Como resultado obtenemos la potencia, el voltaje y el amperaje requeridos.



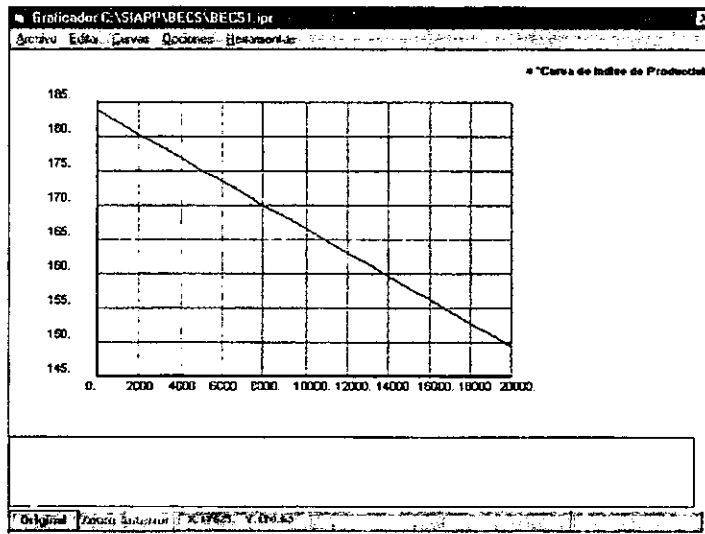
13. Selección del cable apropiado.

Para acceder a esta pantalla haga "click" en el botón "Cable". Para seleccionar el cable apropiado se hace necesario el costo de la electricidad, inmediatamente presione el botón "Σ Calcular". El resultado es un listado con las características de operación de los cables. En el cuadro de mensajes se hacen comentarios referentes a los cables que no cumplen con los requerimientos de diseño.

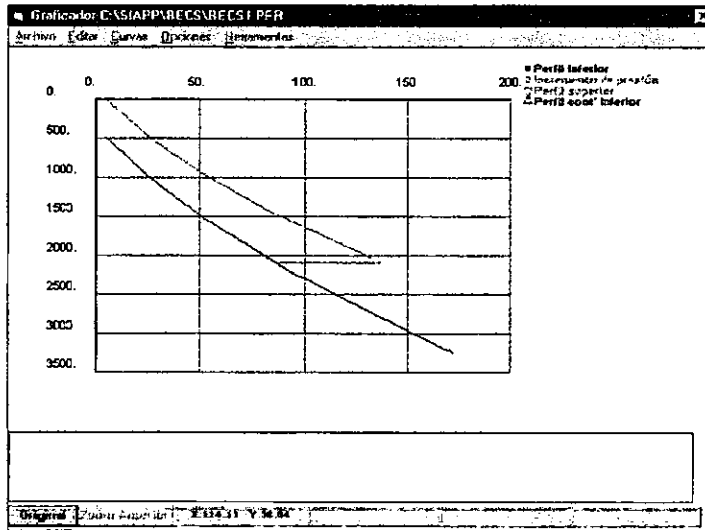


14. Curvas generadas por el programa en el paso 10.

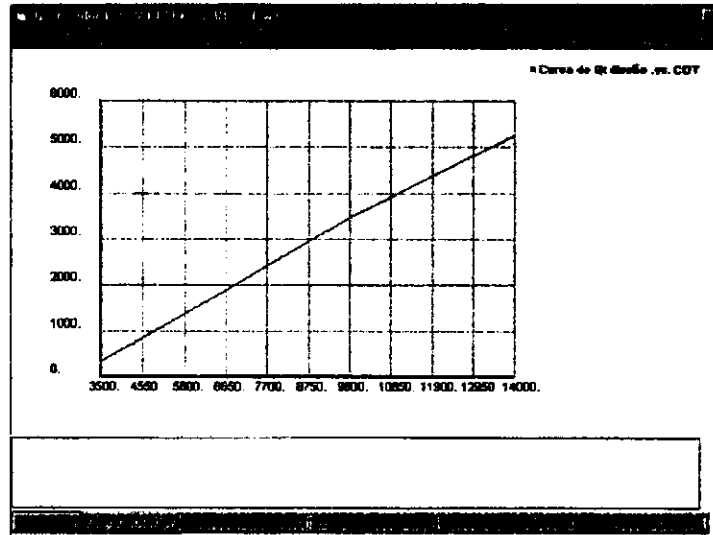
Curva de índice de productividad



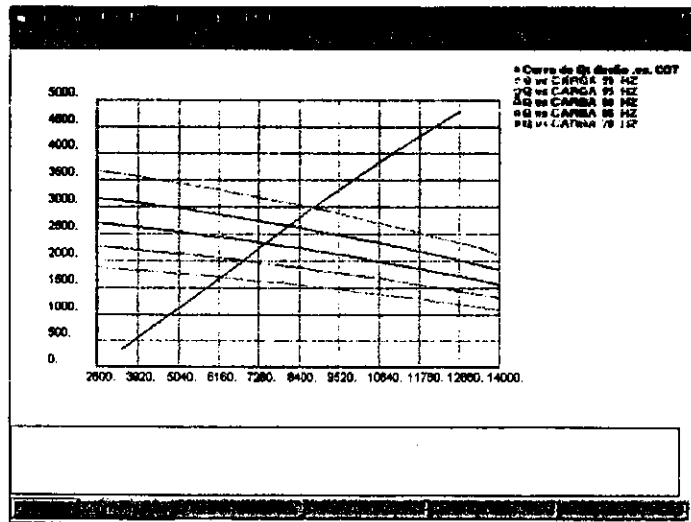
Perfil de presiones con bombeo electrocentrífugo



Curva de comportamiento sistema – pozo



Curvas características de la bomba Reda HN1000



16. Resumen de los resultados del análisis de acuerdo con los datos del problema.

<i>Profundidad de colocación de la bomba</i>	= 6,841.22 pies.
<i>Presión de succión</i>	= 1,233.86 lb/pg ² .
<i>Presión de descarga</i>	= 1,949.41 lb/pg ² .
<i>Incrementos de presión en la bomba</i>	= 715.55 lb/pg ² .
<i>Presión de fondo fluyendo</i>	= 2,242.44 lb/pg ² .
<i>Densidad relativa de la mezcla en la succión</i>	= 0.74762 adim.
<i>Densidad relativa de la mezcla en la descarga</i>	= 0.80713 adim.
<i>Carga dinámica total</i>	= 2124.294 pies.
<i>Gasto de gas libre en la succión @ c. bomba</i>	= 830.526 bpd.
<i>Gasto de aceite en la succión @ c. bomba</i>	= 8277.471 bpd.
<i>Gasto total (ac + gas + agua) en la succión @ c. bomba</i>	= 9107.996 bpd.
<i>Relación gas libre - líquido @ c. bomba</i>	= 0.56295 pie ³ /bl.
<i>Gasto de gas libre en la descarga @ c. bomba</i>	= 0.0 bpd.
<i>Gasto de aceite en la descarga @ c. bomba</i>	= 8436.446 bpd.
<i>Gasto total (ac + gas + agua) en la descarga @ c. bomba</i>	= 8436.446 bpd.

Bomba seleccionada:

<i>Modelo de la bomba y frecuencia</i>	= 1 etapa - HN10000 - 60 HZ
<i>Serie de la bomba y sus revoluciones</i>	= serie 562 - 3500 rpm.
<i>Serie de la bomba aplicable a T.R. de</i>	= 7 pg o mayores.
<i>Gasto promedio entre la succión y la descarga</i>	= 8772.25 bpd.
<i>Eficiencia de trabajo</i>	= 58%.
<i>Capacidad de carga de la bomba</i>	= 51.14 pie/etapa.
<i>Número total de etapas</i>	= 44 etapas.
<i>Potencia total requerida por el motor</i>	= 226.43 Hp.

Motor seleccionado:

<i>Serie</i>	= 540-I.
<i>Tipo</i>	= 0-0 INT.
<i>Potencia</i>	= 240 Hp.
<i>Voltaje</i>	= 2,210 volts.
<i>Amperaje</i>	= 69.5 amperes.
<i>Diámetro</i>	= 5.4 pg.

Cable seleccionado:

<i>Calibre</i>	= # 2Cu.
<i>Amperaje</i>	= 95 amperes.
<i>Kva</i>	= 287.71 Kva.
<i>Kw</i>	= 244.55 Kw.
<i>Costo</i>	= \$ 89, 261.31 por mes.
<i>Voltaje superficial requerido</i>	= 2,390.11 volts.

Mensajes: Los cables # 4Cu y # 6Cu no cumplen con los requerimientos de diseño, el amperaje del motor es mayor el que soporta el cable # 6Cu.

CAPÍTULO IV

DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN EL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO

4.1 FACTORES PRINCIPALES DE FALLA DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO.

Los factores principales por los cuales falla el equipo de bombeo electrocentrífugo son: la temperatura, la cantidad de gas libre a las condiciones de presión y temperatura del fondo del pozo, naturaleza de los fluidos producidos y el nivel dinámico de los fluidos^{2,26}.

4.1.1 Temperatura:

La temperatura de operación es uno de los factores más importantes que ocasionan fallas, ya que afecta al cuerpo del cable, al empate, al motor, y a la mufa. En la medida que la temperatura aumenta más allá de la máxima permitida por dichos componentes, éstos ven reducida su vida esperada y presentan problemas, como cortos circuitos, sobrecalentamiento, etc.

4.1.2 Gas libre:

La existencia de presiones y temperaturas elevadas en el fondo del pozo, causan que el gas libre se filtre en el cuerpo del cable, en el empate, en la extensión de la mufa y en la mufa, reduciendo la constante dieléctrica de los materiales de que están contruidos. Esto produce fugas de corriente y cortos circuitos. Conforme aumenta el gas libre que ingresa a la bomba, se reduce la presión en la descarga y esto provoca que el motor se acelere. Como en ese momento, el motor está trabajando con potencia sobrada, se sobrecalienta y en consecuencia se quema. Al existir gas libre en la bomba, se produce el fenómeno de cavitación que provoca daños mecánicos, golpeteos y reduce la eficiencia de bombeo.

4.1.3 Naturaleza de los fluidos:

Si los fluidos producidos son de naturaleza corrosiva, abrasiva o incrustante, pueden dañar seriamente a los componentes subsuperficiales; por tal motivo, éstos deben de estar contruidos con materiales capaces de soportar ese medio ambiente. Del mismo modo, fluidos muy densos y/o viscosos, pueden acarrear problemas al motor ya que en su caso, se le demanda mayor potencia de la que puede aportar ocasionándole sobrecalentamiento y sobrecargas de corriente. Si el pozo produce arena, se deben tomar las medidas necesarias para evitar que esta llegue a tapar la succión de la bomba.

4.1.4 Nivel Dinámico:

El aumento o disminución del nivel dinámico provoca daños al motor y a la bomba. Así por ejemplo: Bombear a un alto ritmo fluido que no tiene gas libre, abate al nivel dinámico hasta las proximidades de la succión de la bomba, ocasiona que el motor disminuya el consumo de amperaje y deja de operar. Esto se debe a que la bomba opera en vacío, con la consecuente falla de la misma. Lo mismo ocurre aumenta el nivel dinámico, el motor se acelera, debido a que la carga dinámica total disminuye, y el consumo de corriente aumenta. Esto puede producir una sobrecarga de corriente y por lo tanto dejan de funcionar el motor y la bomba.

4.2 TABLERO DE CONTROL Y AMPERÍMETRO.

El diagnóstico y prevención de fallas en el aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido, se realiza mediante la interpretación del registro de corriente eléctrica que proporciona el amperímetro, que si bien es un dispositivo opcional instalado en el tablero de control, su utilización siempre es rentable y recomendable.

Debido a que el amperímetro permite obtener los elementos necesarios para la detección de fallas en un sistema eléctrico, se da por un hecho que el tablero de control del aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido siempre está provisto de amperímetro y accesorios necesarios. Por su importancia, a continuación se describen sus funciones^{1,23,26}.

Tablero de control.- Se construyen con dos secciones principales llamadas:

- a) Compartimiento de alto voltaje que comprende cuatro elementos básicos: a.1) Cable superficial inductor de corriente eléctrica, a.2) Interruptor, a.3) Transformador reductor de corriente y, a.4) Cable para salida de energía eléctrica hacia el pozo.

El circuito inductor de energía eléctrica se acciona con el interruptor, éste abre cuando se pone en marcha la unidad de bombeo o cierra cuando se para, a partir del interruptor se suministra la energía eléctrica al motor sumergible por medio del cable.

- b) Compartimiento de bajo voltaje, sección provista de dispositivos llamados relevadores de bajacarga y de sobrecarga, los cuales son sensibles a los cambios de corriente y al ser activados se suspende el bombeo. La activación de los relevadores de sobrecarga, se debe a la presencia de una carga de corriente por arriba de la normal de operación; los relevadores de bajacarga son activados cuando se presenta una carga menor a la normal de operación. En ambos casos deben desactivarse manualmente.

El relevador de sobrecarga se gradúa para que se active a un máximo de 120% del amperaje estipulado en la placa del motor, a fin de evitar que sea accionado por una ligera sobrecarga de corriente que puede presentarse cuando la unidad esté operando normalmente. También se gradúa para que no sea activado en un amperaje menor al 110% del estipulado en la placa del motor. Si bajo estas condiciones, el relevador de sobrecarga se activa, todo el equipo superficial y subsuperficial debe revisarse, antes de poner en marcha nuevamente el bombeo.

El relevador de bajacarga debe graduarse para ser activado en un rango de amperaje entre 80 a 85% del estipulado en la placa del motor. Este porcentaje se considera como una graduación estándar y proporciona una protección máxima cuando la unidad de bombeo está bajo condiciones de apagado, candado de gas o condiciones en que la succión de la bomba esté taponada. Ocasionalmente se puede tener una producción de fluidos que permita el funcionamiento de la unidad y enfriamiento del motor adecuados; pero puede ocurrir que el gradiente de fluidos se vea disminuido continuamente, con la consecuente reducción en la demanda del amperaje del motor. Bajo estas condiciones es recomendable graduar el relevador de bajacarga a un nivel inferior al 80%, para evitar que la unidad pare constantemente. La activación de los relevadores de bajacarga causa la desactivación del interruptor y en consecuencia la detención del bombeo.

La sección de bajo voltaje incluye un mecanismo de relojería que protege al relevador de bajacarga en el momento en que la operación sea interrumpida, por condición de bombeo intermitente. Además, proporciona una secuencia automática de remarcha después de un tiempo determinado, que el ingeniero o el operador, fijan en el reloj del tablero de control. Todo tablero de control con amperímetro, tiene un mecanismo de relojería para control de bombeo intermitente. El tiempo recomendado para que la unidad de bombeo vuelva a ponerse en marcha automáticamente, es de 30 minutos o mayor, para dar tiempo a que los niveles de fluido dentro del pozo se estabilicen. En esta forma se reducen los efectos de torsión sobre la flecha del motor al iniciarse el bombeo.

Si el aparejo cuenta con válvula de retención, el tiempo que permanezca suspendido el bombeo puede ser menor.

Amperímetro.- Su función es registrar la corriente que consume el motor. Para tal fin en el tablero de control, se cuenta con un transformador reductor de corriente, unido a una derivación del cable conductor. En él, se reduce la corriente linealmente y mediante dispositivos llamados portadores de rejilla, se grafica sobre la carta del amperímetro, lo que permite conocer el amperaje real en el cable conductor que suministra la energía eléctrica al motor.

4.3 CARTA DEL AMPERÍMETRO.

El comportamiento de operación del aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido en el fondo del pozo, se puede observar con el registro de corriente o carta del amperímetro. Esto es posible debido a que la carga eléctrica o amperaje que consume el motor, es sensible a los cambios de la densidad relativa y gasto de los fluidos producidos. Es decir, al aumentar la densidad relativa de los fluidos, se requiere de más corriente a fin de que el motor genere mayor potencia y para que la bomba mantenga la misma cantidad de carga sobre los fluidos. Por otra parte, si el gasto de fluidos en la bomba se altera por la presencia de gas libre o algún otro factor, el motor demanda más o menos corriente, dependiendo de que el gasto aumente o disminuya. Estas variaciones de corriente, se reflejan en la carta del amperímetro, de donde son útiles para identificar las causas del problema y el lugar donde se presente.

La carta del amperímetro se utiliza como herramienta de detección y diagnóstico de fallas en el aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido, pero desafortunadamente el amperímetro es uno de los instrumentos menos comprendidos o conocidos. La carta que proporciona, es muy semejante al registro de electrocardiogramas usados por los médicos y también al registro medidor de orificio usado en la industria petrolera. El análisis de la carta del amperímetro aporta valiosa información para la detección y corrección de diversos problemas que se presentan durante la operación de bombeo.

La carta del amperímetro se presenta en formatos para grabar 24 horas o 7 días de operación, de tal manera que se indica a qué hora deja trabajar la unidad por una falla o por disposición técnica, durante qué tiempo se presentaron ciertas anomalías, si hay restablecimiento automático, etc. Las cartas tienen una etiqueta para identificación del pozo, fecha y hora en que se inicia y/o se detiene el bombeo. Es importante señalar que una vez que se ha usado una carta, debe cambiarse por una nueva para continuar con el registro del día o semana siguiente, puesto que si se registra sobre la misma, se dificulta la interpretación del registro.

Una carta típica del amperímetro sobre la cual se obtiene el registro de corriente, se muestra en la fig. 44.

Como se observa, tanto la escala como el trazo de la carta se confunden para su lectura en el dibujo, por lo que en las figuras que se ilustran posteriormente, sólo se incluyen las líneas más relevantes.

4.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN.

Los cambios en las condiciones de operación y en consecuencia del amperaje, durante el bombeo, pueden definirse mediante la interpretación de las cartas del amperímetro. Algunas de esas condiciones que producen las averías más comunes en el aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido, son: a) Fluctuaciones de voltaje en la línea primaria de energía, b) Bajo amperaje de operación, c) Alto amperaje de operación y d) Variaciones de amperaje durante la operación^{2,26}.

Los motores eléctricos sumergibles, se caracterizan porque su consumo de corriente es constante. Es decir, el amperaje que el motor demanda siempre es el mismo para todo tiempo, a menos que se presenten imprevistos, como fallas o cambios de relación gas-aceite, de relación agua-aceite, etc.

La instalación del aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido, se dice que trabaja en condiciones ideales, cuando el porcentaje de la potencia real a la que trabaja el motor, con respecto a la potencia nominal que aparece en la placa del motor, es menor o igual a $\pm 10\%$. En esta forma, la carga dinámica total y el gasto producido reales, varían en aproximadamente $\pm 5\%$, con respecto a los valores calculados. En estas condiciones, la gráfica que proporciona el amperímetro, es una curva continua, simétrica y con un amperaje próximo al señalado en la placa del motor.

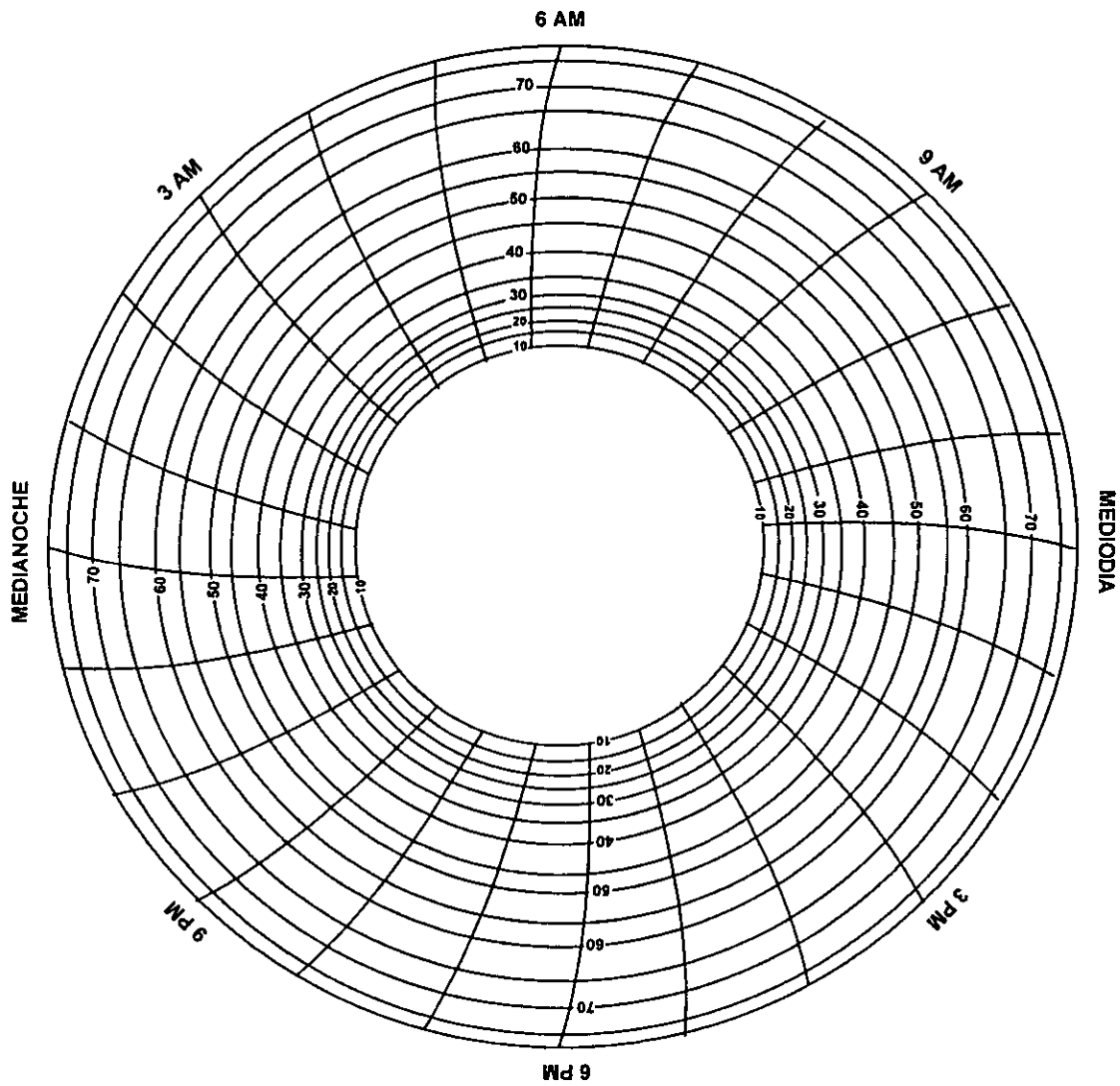


FIG. 44. DIAGRAMA DE UNA CARTA TÍPICA DEL AMPERÍMETRO.

4.5 DETECCIÓN DE FALLAS EN EL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO.

Como todo sistema artificial de producción, el bombeo electrocentrífugo sumergido está expuesto a fallas como resultado de defectos de fabricación, mal diseño, malas técnicas de operación o de instalación, formación de emulsiones, variaciones en las condiciones de producción, corto circuito, suministro inadecuado de energía eléctrica, y otras causas menos comunes; las cuales se reflejan como cambios en la demanda de corriente del motor.

La interpretación del registro de corriente que se obtiene de la carta del amperímetro, requiere de un amplio conocimiento acerca del significado de los diferentes tipos de variación de corriente. Por supuesto, la experiencia de estar en contacto con la operación de bombeo y con el tablero de control, proporciona la mejor interpretación. Conocer la causa de la variación de corriente, conduce al diagnóstico de la posible falla y su localización.

A continuación se presentan algunos ejemplos como guía para la interpretación, diagnóstico y prevención de fallas del aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido. De la figura A hasta la N, se ilustran las tendencias de las curvas de amperaje registradas y se comenta el tipo de problema del que se trata^{1,23,26}.

4.5.1 Fig. 45. Operación normal. Ilustra las condiciones ideales de operación, donde se puede producir una curva arriba o abajo del amperaje nominal del motor; pero si ésta es continua y simétrica, se considera ideal. Un aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido no puede producir una línea curva continua y constante por largo tiempo, debido a que día a día se producen cambios en las condiciones de producción del pozo. Cualquier desviación de la operación normal del aparejo, indica la posibilidad de un problema o cambio en las condiciones del pozo, lo cual se refleja en el amperaje registrado.

4.5.2 Fig. 46. Pequeñas fluctuaciones de corriente. Bajo condiciones normales de operación, la energía eléctrica tiende a salir del motor en residuos relativamente constantes. Además, dado que el amperaje varía en proporción inversa con el voltaje; entonces, si el suministro de corriente primaria sufre fluctuaciones de voltaje, el amperaje hace un intento por mantener la potencia de salida constante. Estas fluctuaciones se reflejan en la carta del amperímetro, como se muestra en la figura.

La causa más común de la variación en la potencia, es el alto consumo de corriente que se realiza durante "horas pico", en el sistema primario de suministro de corriente eléctrica. Al continuar el bombeo, se puede detectar a qué se deben dichas fluctuaciones y determinar la causa exacta del problema. Este tipo de fluctuaciones, no es tan perjudicial como las que se presentan en caso de un disturbio causado por una tormenta eléctrica cercana al pozo, daño que se puede reducir si se instalan pararrayos en la zona de operaciones.

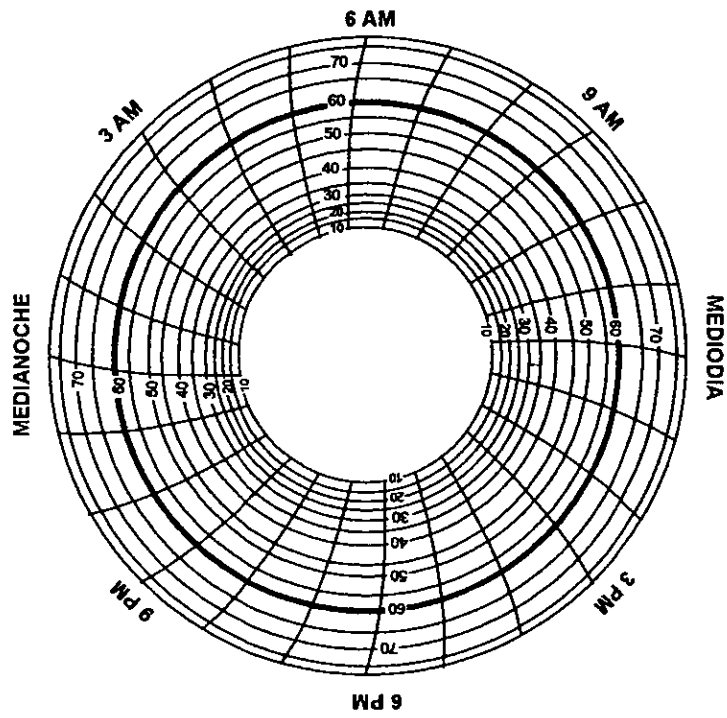


FIG. 45. OPERACIÓN NORMAL.

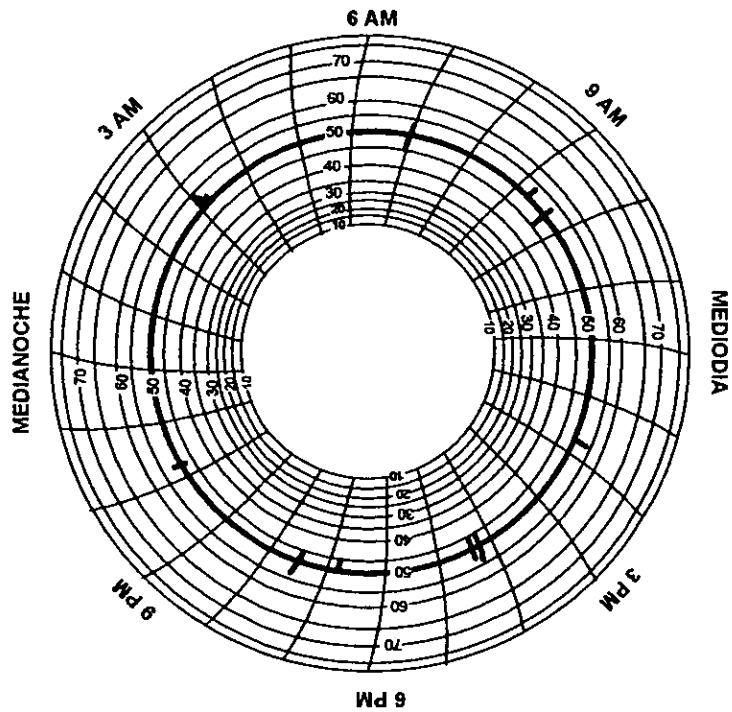


FIG. 46. PEQUEÑAS FLUCTUACIONES DE CORRIENTE.

4.5.3 Fig. 47. Candado de gas. En esta figura se muestra el comportamiento del aparato de bombeo electrocentrífugo sumergido bombeando con baja presión en la succión y aumento de gas libre, de manera que cae en el candado de gas y por consiguiente deja de operar.

La sección A, muestra el inicio de la operación con un amperaje superior al normal. En este momento, el nivel de fluidos en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la de producción, es alto, por lo que el gasto y el amperaje son ligeramente mayores. La sección B, muestra la curva normal de operación, para ese tiempo el nivel dinámico de fluidos es el de diseño. La sección C, muestra un decremento en el amperaje debido a que el nivel de fluidos es inferior al de diseño y empieza a aumentar la cantidad de gas libre en las cercanías de la bomba. La sección D, muestra un amperaje bajo y variante debido a que el nivel de fluidos está alcanzado la succión de la bomba y se produce el candado de gas. Es decir, la bomba opera sin carga suficiente en la succión y bombea únicamente gas. Para remediar este problema, se puede considerar bajar la unidad sumergible a un punto donde la liberación de gas no sea tan abundante; es decir, a una profundidad tal que la bomba tolere la relación gas-aceite existente, sin que se alteren sus curvas características, lo que permite continuar con la operación. Si no se puede bajar la bomba, estrangúlese la producción hasta alcanzar el nivel dinámico apropiado. Si dichas acciones no son factibles, otra posibilidad es el bombeo intermitente programado por tiempo para retirar el máximo de fluidos usando un mínimo de ciclos. También es necesario verificar si la bomba cumple todavía con las condiciones de diseño, en caso contrario, se debe rediseñar el aparato de bombeo electrocentrífugo sumergido, sin descartar la posibilidad de estimular al pozo.

Si en la instalación se cuenta con el convertidor de velocidad variable, únicamente se requiere reducir la frecuencia de la corriente (Hz), para ajustar la capacidad del aparato a la del pozo.

4.5.4 Fig. 48. Bombeo en vacío. Esta figura muestra el comportamiento de una unidad sumergible bombeando a un ritmo mayor al que el pozo aporta, por lo que opera en vacío y se para. Posteriormente, transcurridas dos horas de apagado dispuestas en el reloj del tablero de control, se trata de restablecer la operación y nuevamente cae a las condiciones de bombeo en vacío. Una vez más, se intenta restablecer el bombeo sin éxito y finalmente el sistema queda apagado.

El análisis de las secciones A, B, y C es idéntico al tratado cuando se presenta candado de gas; pero para este caso, no se presentan las variaciones de corriente debidas a la presencia de gas libre. En la sección D, el nivel de fluidos se acerca a la succión de la bomba, por lo que el gasto y el amperaje declinan y la carga dinámica total aumenta. Enseguida, se alcanza el nivel de baja corriente y la unidad deja de bombear.

Como se observa, la unidad reinicia automáticamente su operación después de un tiempo establecido en el tablero de control, únicamente dos veces. Antes de suspenderse el bombeo en D, el nivel dinámico alcanza la succión y durante el tiempo en que permanece sin bombear, el pozo no recupera su nivel estático, ya que al reiniciar el bombeo, éste empieza en alguna parte de la sección C. La causa de este problema es que la bomba está

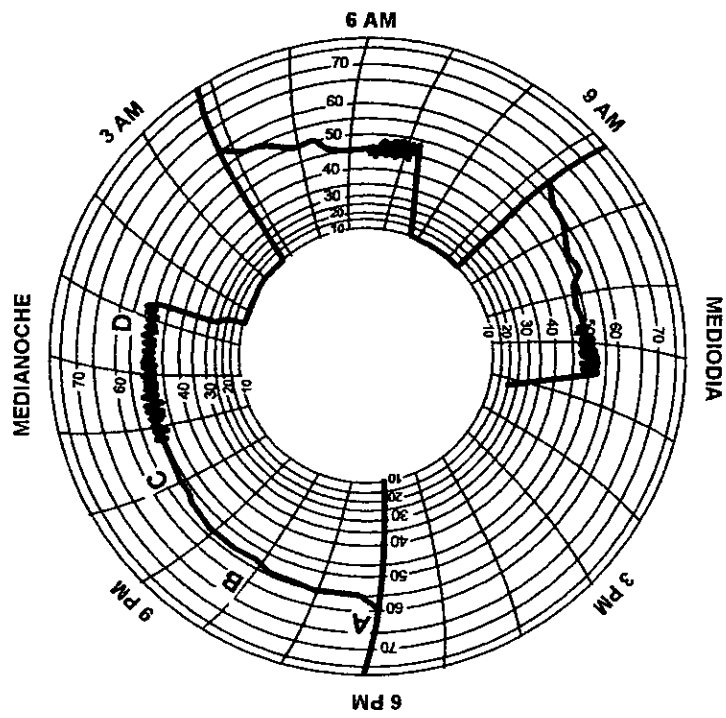


FIG. 47. CANDADO DE GAS.

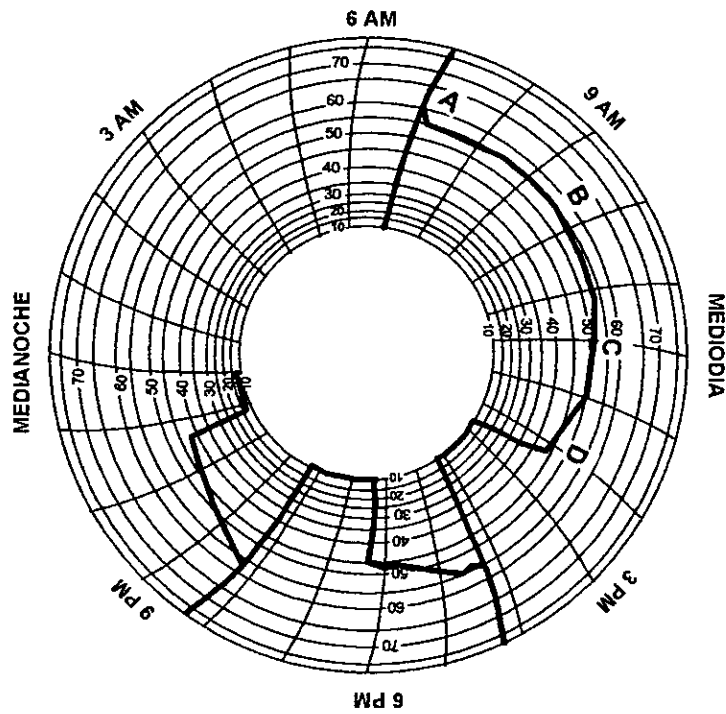


FIG. 48. BOMBEO EN VACÍO.

sobrediseñada; es decir, la capacidad de bombeo es mayor a la capacidad de aportación del pozo. Como resultado, el nivel dinámico disminuye bruscamente sin dar tiempo a que los fluidos se estabilicen, dando lugar a una condición de bombeo intermitente no programada muy perjudicial, ya que la bomba opera en vacío por un corto tiempo en varias ocasiones. Las acciones recomendadas para solucionar este problema son las mismas que se aplican cuando se presenta el candado de gas. Es decir, se puede estrangular el pozo, bajar el aparejo de bombeo a mayor profundidad. Nuevamente, si la instalación cuenta con controlador de velocidad variable, sólo se requiere reducir la frecuencia de la corriente (Hz), para ajustar la capacidad del aparejo a la del pozo.

4.5.5 Fig. 49. Fallas por posibles condiciones de vacío en el arranque. El análisis de esta gráfica señala que la unidad deja de bombear poco después del arranque, debido a una rápida disminución en la corriente de operación; o bien, a que el tiempo que permanece apagada, no es suficiente para que se recupere el nivel de fluidos. Lo anterior se repite en varios intentos de arranque.

El comportamiento es similar al descrito en la figura D; es decir, el tiempo que la unidad permanece sin bombear no es suficiente para que el pozo recupere su nivel y la bomba opere normalmente. Posiblemente, la bomba está sobrediseñada; si esto se verifica, se debe rediseñar y cambiar lo más pronto posible. También debe de considerarse una posible estimulación al pozo, para incrementar el nivel estático de fluidos.

De acuerdo con lo observado, se recomienda tomar en cuenta la posibilidad de operar con bombeo intermitente programado y tiempo sin bombear no menos a 5 horas, para que los fluidos alcancen un nivel dinámico capaz de mantener un bombeo normal. Nuevamente, si la instalación cuenta con controlador de velocidad variable, sólo se requiere reducir la frecuencia de la corriente (Hz), para ajustar la capacidad del aparejo a la del pozo.

4.5.6 Fig. 50. Frecuentes ciclajes de bombeo. La unidad se comporta en forma similar a lo observado en la figura E, pero en este caso los ciclos de bombeo son más cortos y más frecuentes. Normalmente la configuración de esta carta también indica que la bomba está sobrediseñada. Si por el contrario, la productividad del pozo parece es compatible con el aparejo de bombeo, las causas de la anomalía pueden ser otros problemas.

La sugerencia inmediata para detectar la causa del problema, es determinar la profundidad del nivel de fluidos, mediante un registro acústico llamado ecómetro. Si éste muestra que los fluidos están al nivel de diseño, entonces esta causa se elimina. Ahora debe revisarse la presión en la tubería de producción, pues una resistencia en ésta, reduce la producción acompañada de una caída en el amperaje. La resistencia al flujo dentro de la T.P. generalmente es producto de la depositación de parafinas o asfaltenos debida a la disminución de temperatura. Si la línea de descarga está tapada, o una válvula está cerrada, o semiabierta en la trayectoria de flujo, también ocurre una reducción en la producción acompañada por una caída en el amperaje, como el que se muestra en la figura. Este tipo de problemas es extremadamente perjudicial para el motor sumergible y debe corregirse lo más pronto posible.

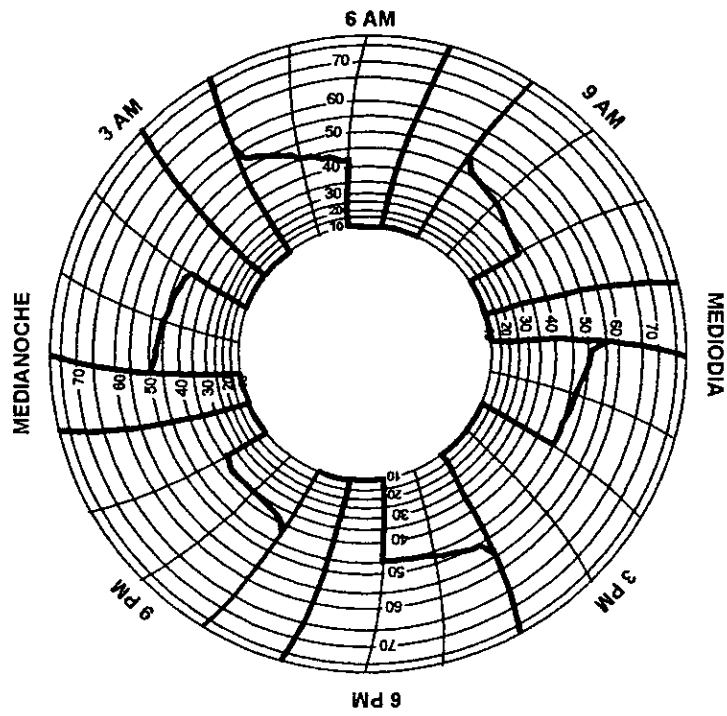


FIG. 49. FALLAS POR POSIBLES CONDICIONES DE VACIO EN EL ARRANQUE.

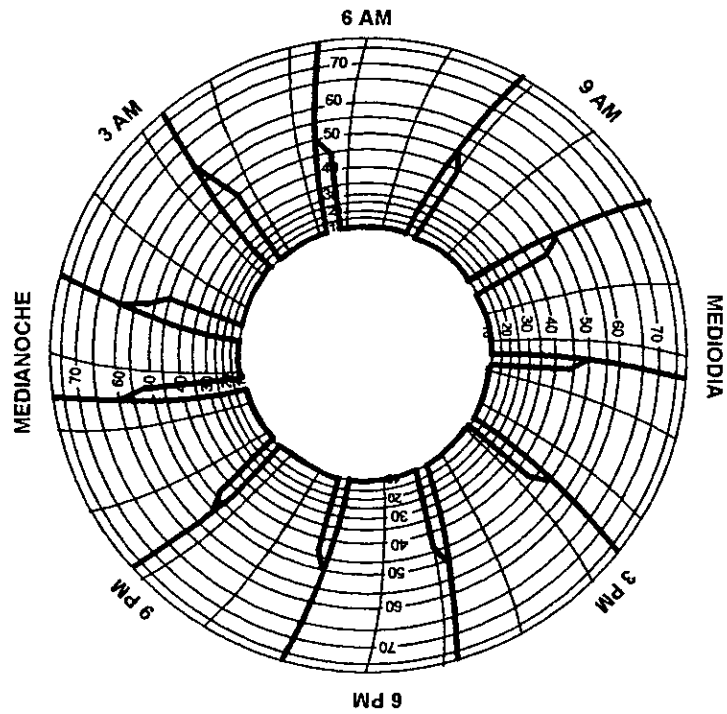


FIG. 50. FRECUENTES CICLAJES DE BOMBEO.

4.5.7 Fig. 51. Condiciones de gasificación. Esta figura muestra el comportamiento de un aparato de bombeo operando dentro del rango de los niveles de fluido y corriente diseñados, pero está manejando líquidos ligeramente gasificados.

Las fluctuaciones de corriente son causadas por el ingreso de gas libre a la bomba. Esta condición, usualmente está acompañada por una reducción en la producción total de líquidos medido a condiciones de tanque; comparativamente con el volumen de fluidos que entra en la succión. Una bomba maneja determinado número de barriles de cualquier fluido incluyendo gas, aún en perjuicio del comportamiento indicado en sus curvas características y en este caso, un barril de gas no representa contribución en el tanque de almacenamiento, pero sí es un volumen substancial cuando se maneja a través de la bomba. Esto ocasiona serios problemas como candados de gas, cavitación, incluso la destrucción del equipo.

Este tipo de carta también puede ser resultado de que la succión de la bomba esté taponada por emulsiones, parafinas, asfaltenos, etc. Al existir un taponamiento en la bomba, ésta deja de trabajar, pues la corriente eléctrica cae por abajo de la normal de operación.

4.5.8 Fig. 52. Suministro de corriente insuficiente. Ilustra el comportamiento del aparato de bombeo que deja de funcionar por bajacarga de corriente, dos horas después se intenta restablecer la operación automáticamente, sin éxito, y parando en la misma zona. Normalmente este registro lo produce un fluido de muy baja densidad. Si la prueba de producción muestra fluido disponible en la succión de la bomba, la solución al problema es reducir la graduación de corriente en el relevador de bajacarga, para evitar su activación y la suspensión del bombeo. Este cambio debe hacerse después de consultar las curvas características de la bomba, para verificar que no disminuya la eficiencia de bombeo.

Otra causa de este tipo de gráfica puede ser la falla del relevador de tiempo, utilizado para bloquear al relevador de bajacarga de los circuitos de control, durante la secuencia automática de arranque.

Cuando se presenta esta gráfica, todas las áreas involucradas en el tablero de control, deben ser revisadas punto por punto.

4.5.9 Fig. 53. Carga reducida de corriente. En esta figura se ilustra el inicio de una operación normal seguida por una declinación en el amperaje; después, el aparato de bombeo electrocentrífugo sumergido opera con una carga de corriente reducida constante y por último, deja de bombear debido a una sobrecarga.

Este registro es típico resultado de una falla en el relevador de bajacarga, debida al valor de corriente mal establecido para su activación. En este caso, la unidad sumergible se encuentra a una profundidad que ocasiona la disminución en el consumo de corriente del motor; entonces, el relevador de bajacarga debería activarse para evitar que el motor trabaje por un largo período con bajacarga. Por lo observado en la gráfica, es muy probable que los fluidos no estén enfriando adecuadamente al motor, como resultado aumenta su

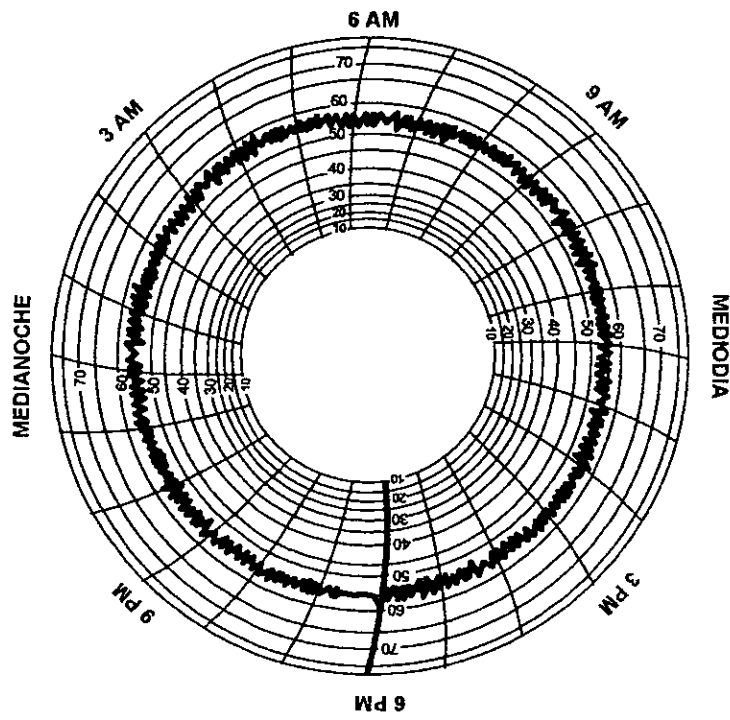


FIG. 51. CONDICIONES DE GASIFICACIÓN.

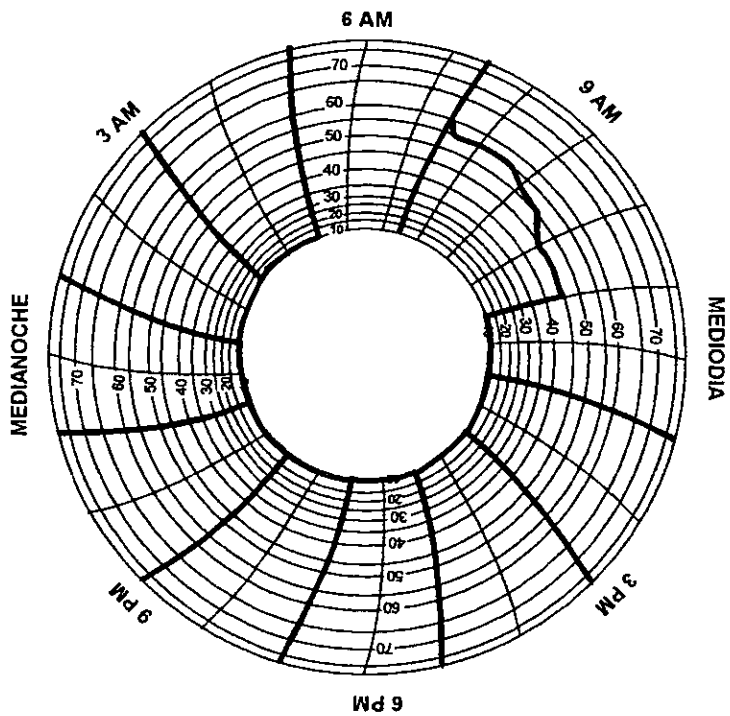


FIG. 52. SUMINISTRO DE CORRIENTE INSUFICIENTE.

temperatura de operación y éste o el cable pueden quemarse. Esto se refleja en la sobrecarga de corriente observada y para evitarlo, el fluido debe ser obligado a pasar por las paredes externas del motor para que lo enfríe.

4.5.10 Fig. 54. Efectos de controles de nivel de tanque. El bombeo se está controlado mediante un interruptor colocado en el tanque de almacenamiento, naturalmente esta es una instalación más sofisticada. El aparato de bombeo electrocentrífugo sumergido inicia su operación, o se detiene automáticamente, cuando el nivel de fluidos en el tanque, decrece o se eleva a niveles preestablecidos. Este tipo de instalación es común para mantener un nivel de producción, ya sea por limitaciones de almacenamiento, políticas de explotación, etc. Debido a que la secuencia automática de remarcha, depende de la rapidez o lentitud con que se haga la extracción de los fluidos, los tiempos de operación varían, como se observa en la gráfica. Esta forma de producción ocasiona que al momento de interrumpir el bombeo, los fluidos en T. P., regresen a través de la bomba y la flecha gire en sentido inverso, lo que daña al equipo. Para evitarlo, se recomienda un tiempo mínimo sin bombear de 30 minutos, para asegurar que el movimiento de fluidos en sentido inverso haya terminado.

Para evitar el movimiento inverso de fluido, se coloca la válvula de retención en la T.P., una lingada por arriba de la bomba.

4.5.11 Fig. 55. Condiciones de sobrecarga de corriente. Esta figura muestra que el aparato de bombeo electrocentrífugo sumergido deja de operar por sobrecarga de corriente, la sección A, indica el inicio del bombeo con amperaje abajo del normal de operación y gradualmente se eleva hacia el normal. En la sección B, la unidad está operando normalmente. La sección C, indica un incremento continuo de amperaje, hasta que cae a cero debido a una sobrecarga. Si se presenta este registro, no se debe intentar el reinicio de operación hasta localizar y corregir la causa exacta del problema.

En este caso, las causas más comunes del problema, son los incrementos de densidad o viscosidad del fluido que se bombea, la producción de arena, la formación de emulsiones, o problemas mecánicos como los causados por relámpagos, motor sobrecalentado y/o desgaste en el equipo.

NOTA: Cada vez que los relevadores de sobrecarga se activan, éstos deberán cambiarse por otros nuevos.

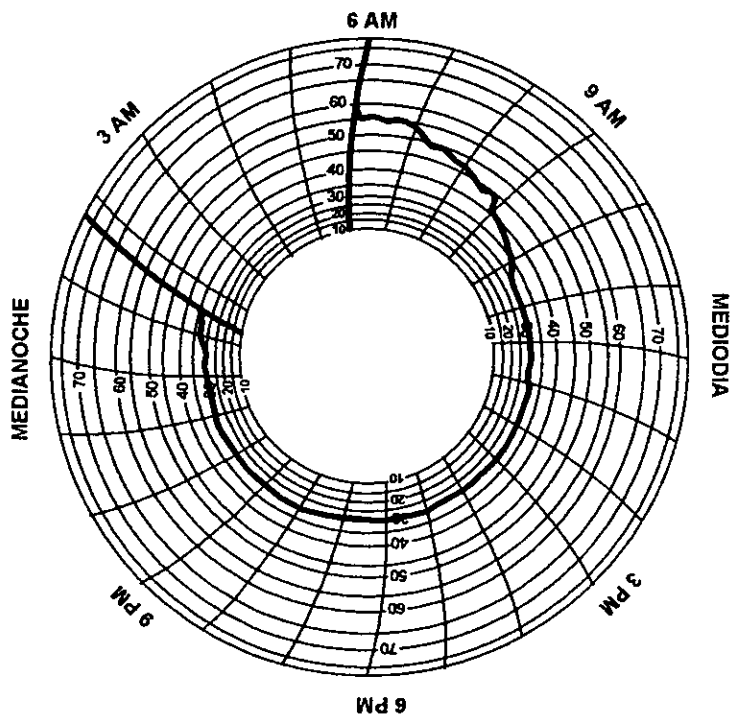


FIG. 53. CARGA REDUCIDA DE CORRIENTE.

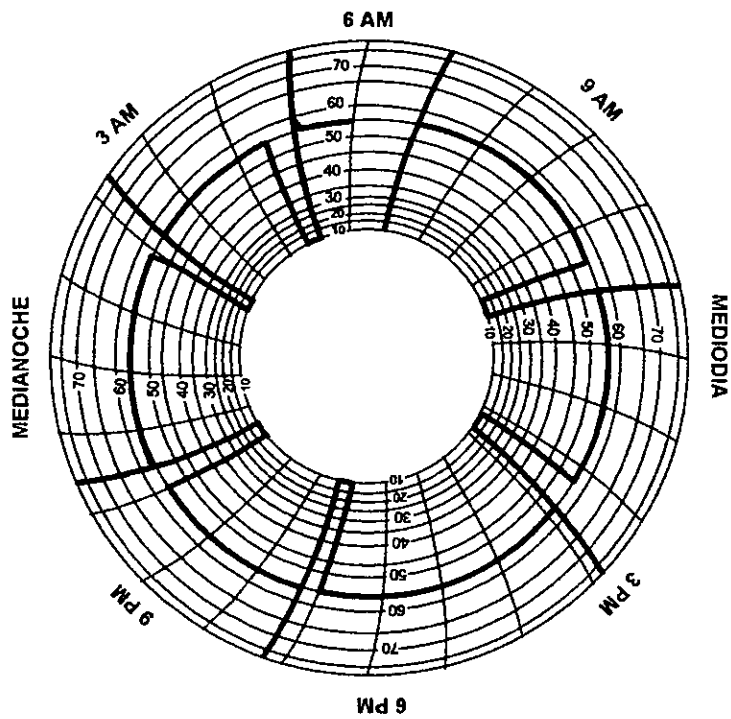


FIG. 54. EFECTOS DE CONTROLES DEL NIVEL DE TANQUE.

4.5.12 Fig. 56. Producción de arena o incrustaciones. Muestra variaciones al inicio del bombeo por un corto período y posteriormente se normaliza. Este tipo de registro se espera cuando se limpia un pozo de residuos tales como: arena suelta, incrustaciones, lodos pesados o salmueras. Este tipo de operación es común que se realice en pozos petroleros y sólo se recomienda si es indispensable; ya que puede causar problemas a la unidad de bombeo electrocentrífugo sumergido, sobre todo al inicio del bombeo.

La potencia que entrega el motor es función directa de la densidad relativa de los fluidos que se bombean. Por tal razón, al tratar de bombear un fluido limpiador muy pesado, que exceda la potencia disponible del motor y la capacidad de la bomba, se puede matar al pozo. Para evitarlo, se deben consultar las curvas características de la bomba y determinar si las dimensiones de motor y bomba, son las suficientes para desalojar dicho fluido.

Si el pozo inicialmente produce arena, la unidad debe arrancarse lentamente con un gasto reducido, para prevenir el arrastre abundante de residuos de la formación, que puedan ocasionar problemas de taponamientos o incrustaciones en la succión de la bomba.

4.5.13 Fig. 57. Excesivos intentos manuales de operación. Muestra la operación normal del aparejo de bombeo por un largo tiempo, hasta que surgen fluctuaciones de corriente que terminan por producir sobrecarga, la cual ocasiona la suspensión del bombeo. Se observa que posteriormente, se hicieron varios intentos manuales para volver a poner en marcha la unidad, sin éxito. Es muy importante tomar en cuenta que si se realiza un intento manual por poner en marcha la unidad y no responde, ya no debe hacerse otro intento, pues es muy perjudicial para el sistema de bombeo. En su lugar, llame a un especialista para que revise la unidad.

Es muy posible que las fluctuaciones de corriente que provocaron la sobrecarga, se deban a una tormenta eléctrica. En este caso, durante el tiempo que permanece apagada la unidad debe revisarse el sistema; ya que una línea primaria de suministro de corriente puede estar desconectada o quemada. Esto da lugar a que se opere sólo con una o dos fases, ocasionando severos daños al equipo eléctrico al tratar de arrancar la unidad. Aparentemente, la activación de los relevadores de sobrecarga, no afectan el arranque de la unidad y permiten los múltiples intentos manuales.

4.5.14 Fig. 58. Variaciones de corriente impredecibles. Esta figura ilustra una operación de bombeo en que la variación de corriente es impredecible. Posteriormente, la línea de corriente se interrumpe, el sistema queda apagado y no hay restablecimiento automático. La reoperación manual no debe intentarse hasta que un especialista revise completamente la unidad y se determine la causa exacta del problema. Normalmente este tipo de registro se produce por variaciones en la densidad relativa de los fluidos, o por cambios importantes en la presión superficial.

También, las fallas de sobrecarga de esta naturaleza, pueden deberse a alguna de las siguientes razones: bomba atascada, motor y/o cable quemado y fusibles primarios o secundarios desgastados.

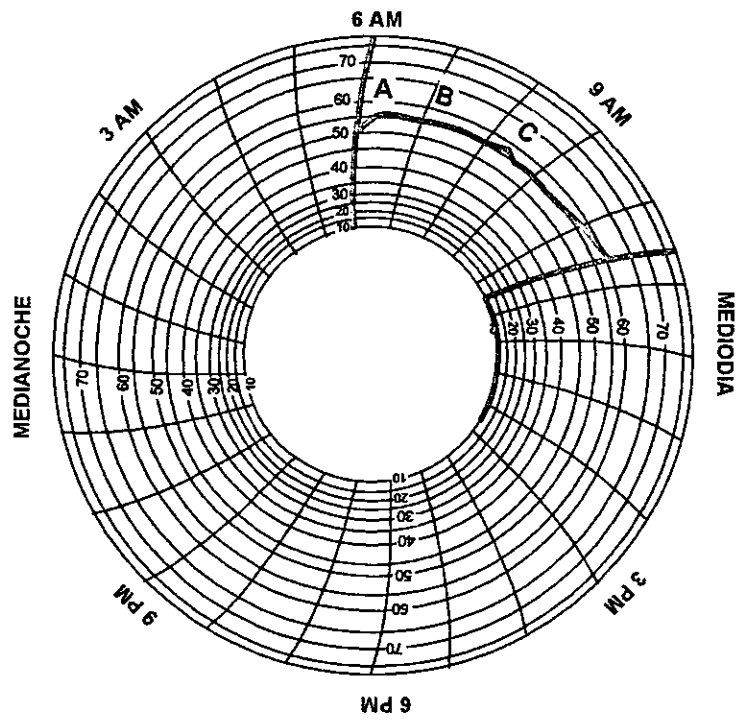


FIG. 55. CONDICIONES DE SOBRECARGA DE CORRIENTE.

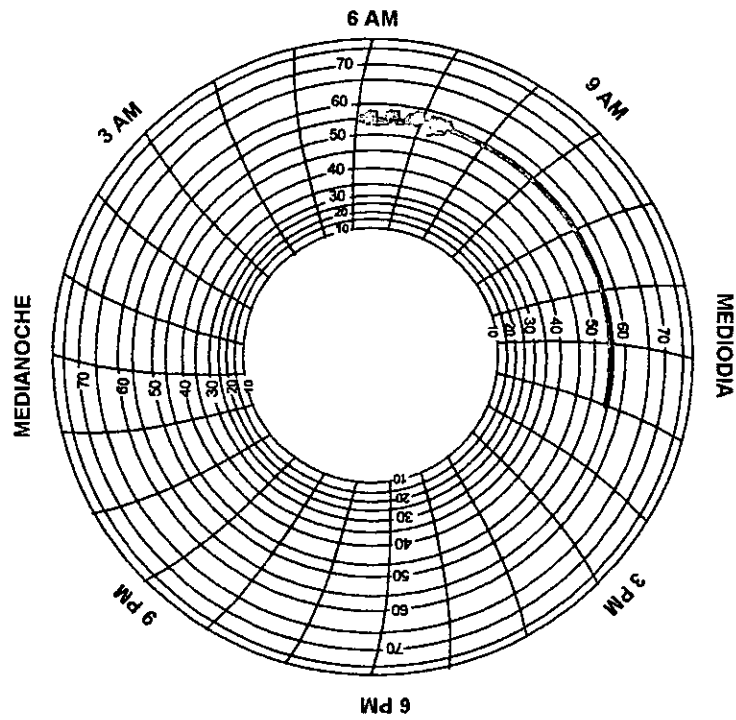


FIG. 56. CONDICIONES DE RESIDUOS DE ARENA U OTRO MATERIAL.

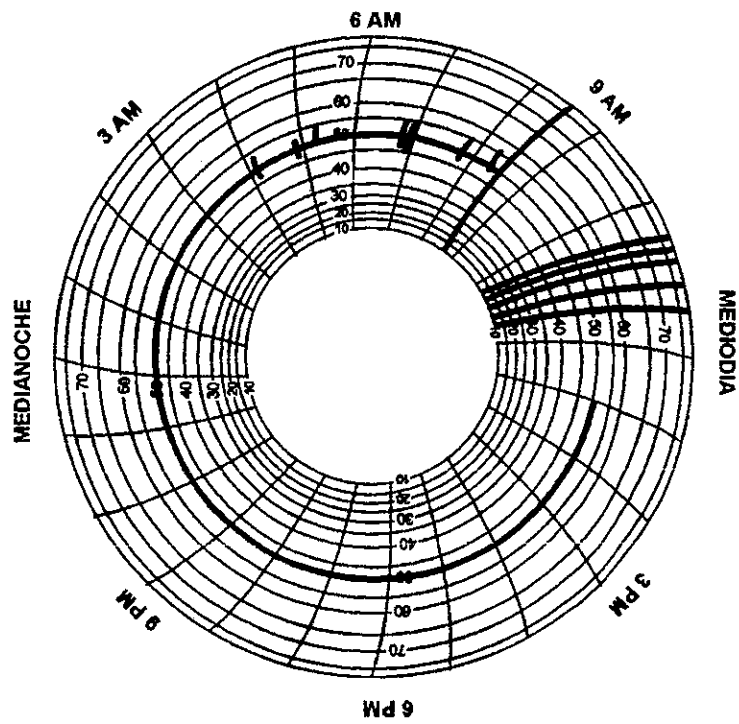


FIG. 57. EXCESIVOS INTENTOS MANUALES DE OPERACIÓN.

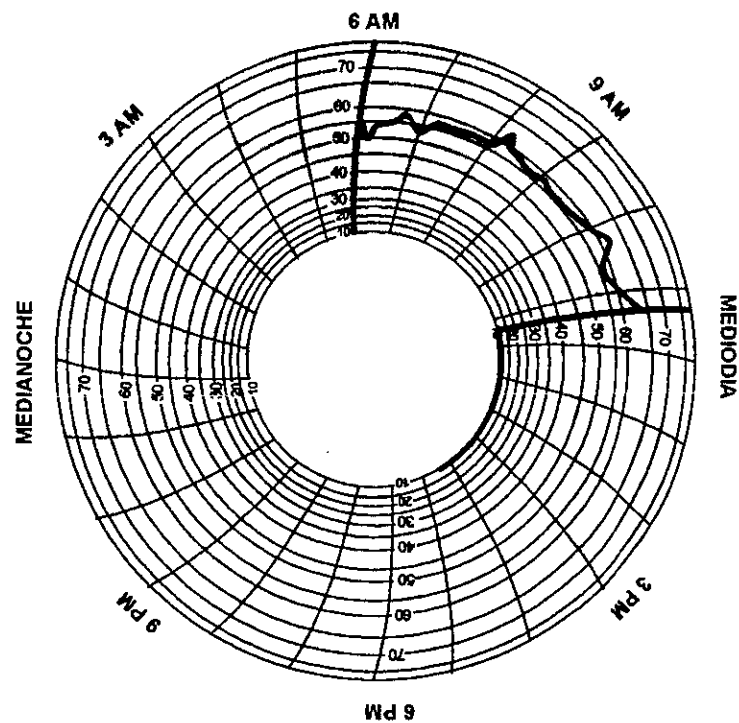


FIG. 58. VARIACIONES DE CORRIENTE IMPREDECIBLES.

4.5.15 Fig. 59. Registro raro o misterioso. Esta figura muestra un registro de corriente raro y difícil de interpretar. Se observa que durante un período, el motor está cargado y pierde una cantidad de carga de corriente durante otro. Se requiere el uso de todos los datos disponibles, para analizar cartas de este tipo.

Probablemente, la operación de bombeo es totalmente normal y la variación de corriente registrada, se debe simplemente a deformaciones del papel o plumillas, producidas por cambios de temperatura en el transcurso del día y la noche.

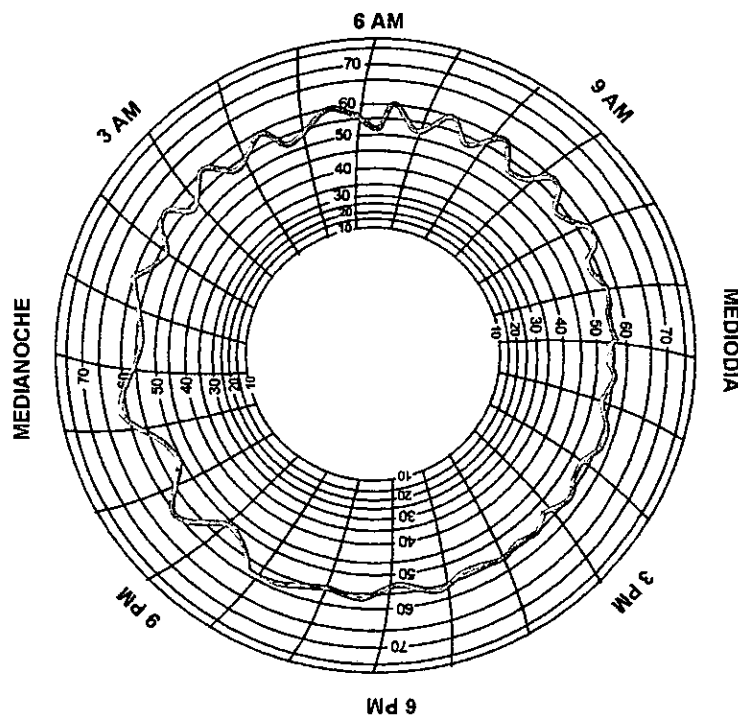


FIG. 59. REGISTRO RARO O MISTERIOSO

COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

El diseño de aparejos de bombeo electrocentrífugo sumergido y la instalación de los componentes del mismo, requieren de personal técnico y operativo con un alto grado de especialización. Particularmente en México, se carece de éste personal para la implantación de dicho sistema, el cual se ha considerado ya, como un éxito desde el punto de vista económico, debido a que su costo inicial generalmente se recupera en un corto tiempo, así como por sus gastos de extracción y reparación, y por el notable incremento en la producción.

Para desarrollar estos apuntes se buscaron los ejemplos más didácticos, con el firme propósito de proporcionar una fuente de fácil consulta que contribuya al entendimiento de la operación del sistema a través de la descripción de sus componentes, la importancia de la información de calidad y las consideraciones necesarias para obtener un diseño apropiado, cuyo resultado se refleje en un mayor beneficio económico.

Por lo anteriormente expuesto se recomienda:

1. El empleo del separador de gas centrífugo, ya que permite el diseño del sistema de bombeo electrocentrífugo en pozos con altas relaciones gas-aceite, al mismo tiempo que prolonga substancialmente la vida útil del sistema, reduciendo así los costos de mantenimiento del equipo.
2. Realizar el cálculo de la profundidad de colocación de la bomba con especial atención en aquéllos pozos que produzcan con cantidades apreciables de gas, principalmente si éste se encuentra libre en las proximidades de la bomba. Aquí se hace indispensable el empleo de correlaciones PVT y de flujo multifásico en tuberías verticales, de tal forma que, al considerar los cambios en las propiedades de los fluidos y los cambios volumétricos en su trayectoria ascendente en el interior de la bomba, resulte en el dimensionamiento óptimo de la misma y consecuentemente del sistema.
3. Emplear los programas de cómputo que nos permitan efectuar los cálculos del diseño en una forma más rápida y con mayor aproximación, obteniendo automáticamente el número de serie, tipo, eficiencia y número de etapas de cada sección de la bomba. Empleando dichos programas, se sugiere efectuar predicciones sobre el comportamiento de la bomba y de la producción del pozo variando las condiciones de operación del sistema de bombeo.

4. Se recomienda, siempre que sea posible, la instalación de un controlador de velocidad variable, ya que nos permitirá ampliar el rango de operación de la bomba cuando por diversas razones se considere necesario incrementar o reducir el ritmo de producción del pozo. La flexibilidad de operación que el controlador de velocidad variable nos proporciona y/o el recurso del estrangulamiento en la cabeza del pozo, permiten ajustar las condiciones de operación del equipo con la capacidad de producción del pozo, sobre todo si dicha capacidad varía rápidamente con el tiempo. La utilidad del controlador de velocidad variable, es evidente cuando se realizan diseños a partir de información poco confiable.
5. Para operar el aparejo a cualquier frecuencia y presión en la cabeza del pozo, se recomienda determinar siempre, que el gasto a condiciones superficiales corresponda a un gasto a condiciones de profundidad de colocación de la bomba; tal que éste último se encuentre dentro del rango recomendado para su operación apropiada.
6. El correcto análisis de las cartas del amperímetro, cuando se presente cualquier falla o problema en el funcionamiento del sistema, siempre proporcionará la solución adecuada, con lo cual evitaremos hacer cambios o ajustes en el aparejo del sistema que tendrían como consecuencia mayores costos o resultados inadecuados. A fin de obtener las mejores condiciones de bombeo se recomienda dar el mantenimiento periódico necesario.
7. Diseñar la perforación de cualquier pozo pensando si éste será candidato a producir mediante un sistema artificial en lo futuro. Lo anterior con la finalidad de efectuar un programa de tuberías de revestimiento que nos brinde el espacio suficiente entre la T.R. y el aparejo de producción para su instalación.
8. La combinación de dos sistemas artificiales en un solo aparejo puede resultar una buena alternativa de producción, ya que nos permitirá contar con un sistema artificial como relevo para mantener al pozo en producción, cuando por alguna razón el sistema principal de bombeo deje de operar.
9. El sistema de bombeo es mejorado continuamente por lo que es recomendable mantenerse actualizado en cuanto a cualquier innovación tecnológica que mejore el desempeño de sus componentes y del sistema.

APÉNDICE A
PÉRDIDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN

BASADA EN LAS TABLAS DE WILLIAM & HAZEN
 TUBERÍA NUEVA - CEDULA 40
 TUBERÍA VIEJA - CEDULA 40 (10 AÑOS DE USO)

LÍQUIDO = AGUA
 $\rho r = 1.0$
 TEMPERATURA = 100 °F

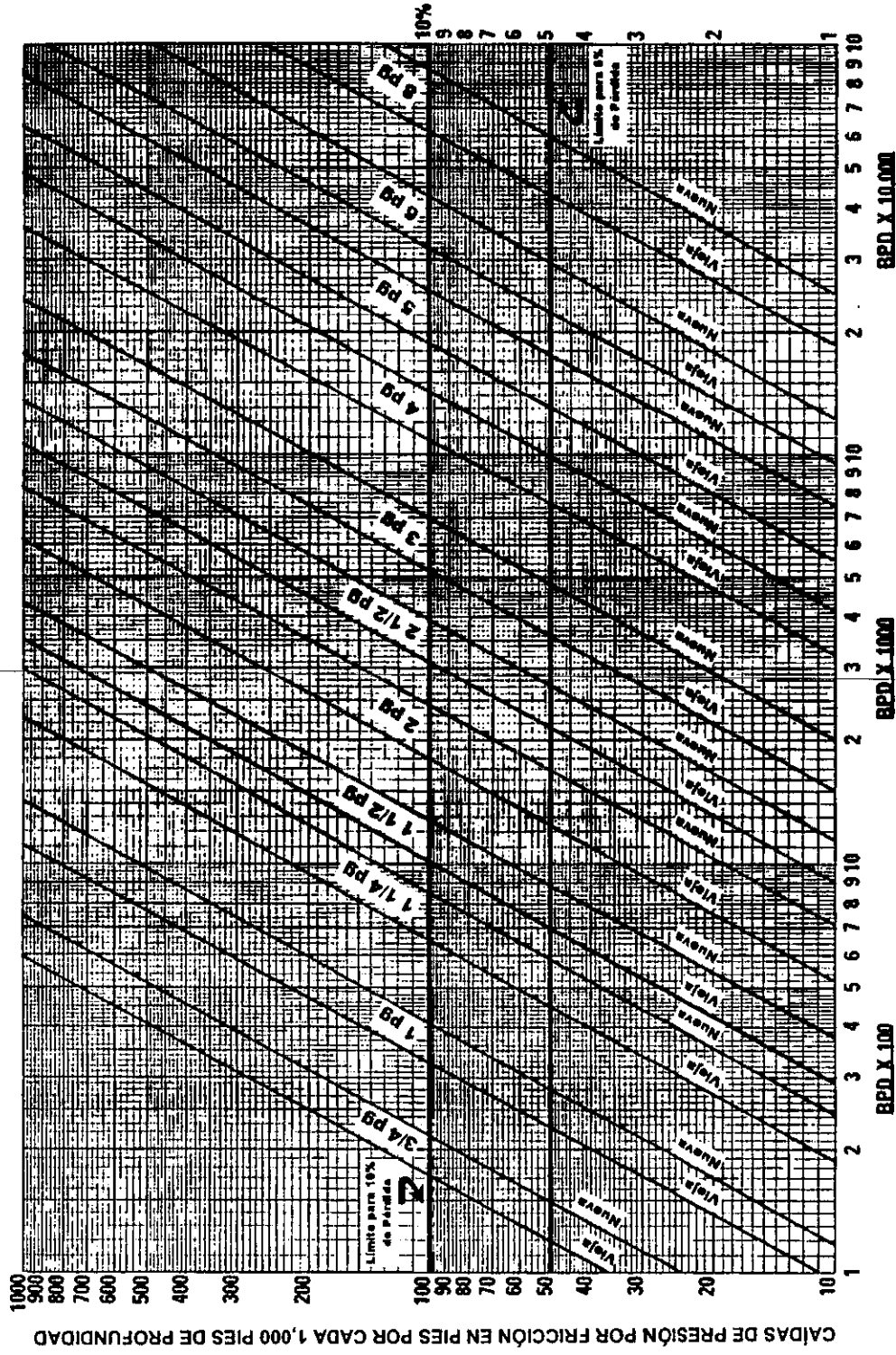


FIG. A1. PÉRDIDAS DE PRESIÓN DEBIDA A LA FRICCIÓN EN TUBERÍAS A.P.I.
 FUENTE: CATALOGO REDA, A CAMCO COMPANY; INDUSTRIAL SUBMERSIBLE PUMPS, ENERO, 1989



BASADA EN LA FÓRMULA DE WILLIAM & HAZEN
 TUBERÍA NUEVA - CEDULA 40
 TUBERÍA VIEJA - CEDULA 40 (10 AÑOS DE USO)

LÍQUIDO = AGUA
 $\rho_f = 1.0$
 TEMPERATURA = 100 °F

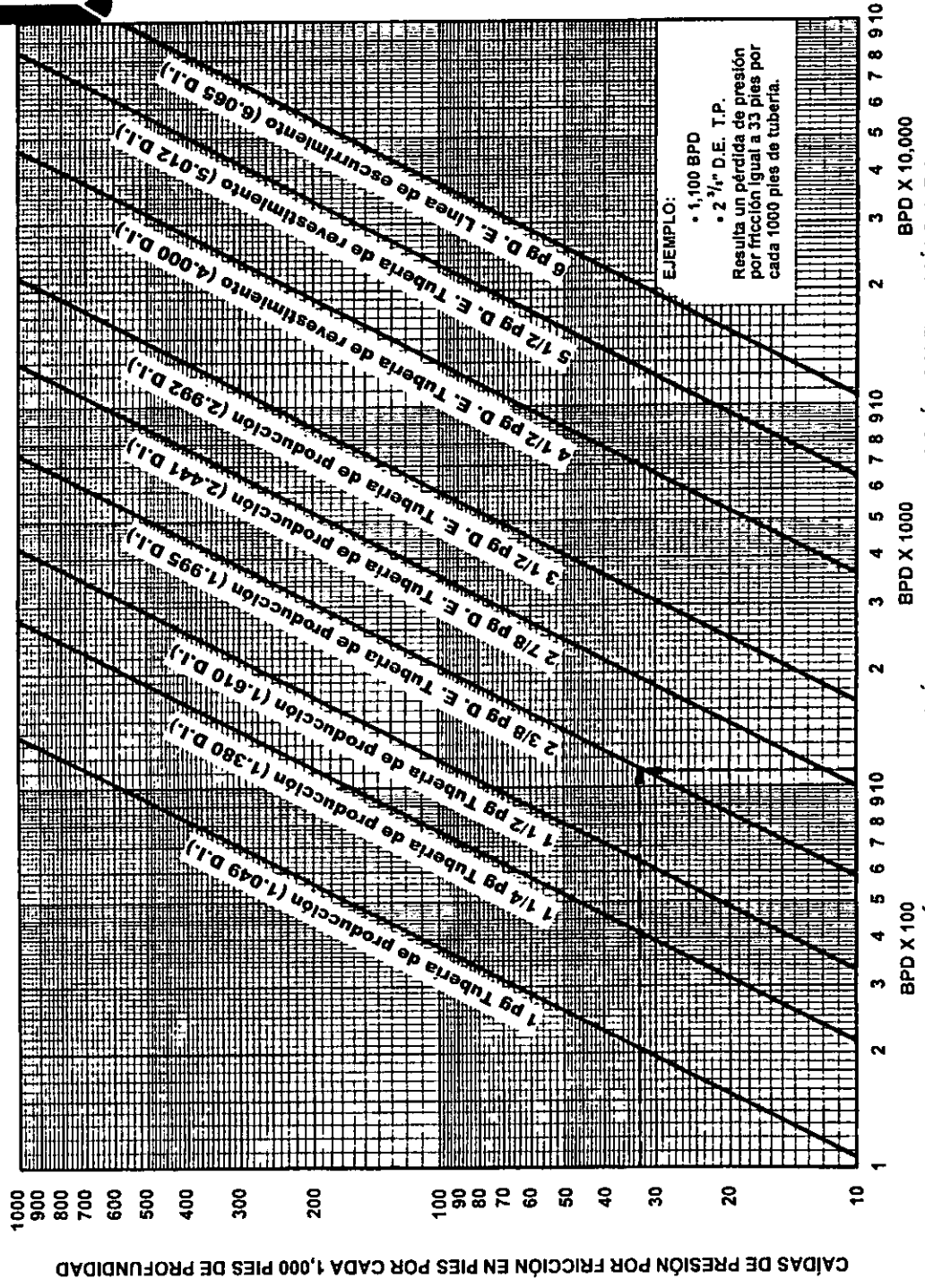


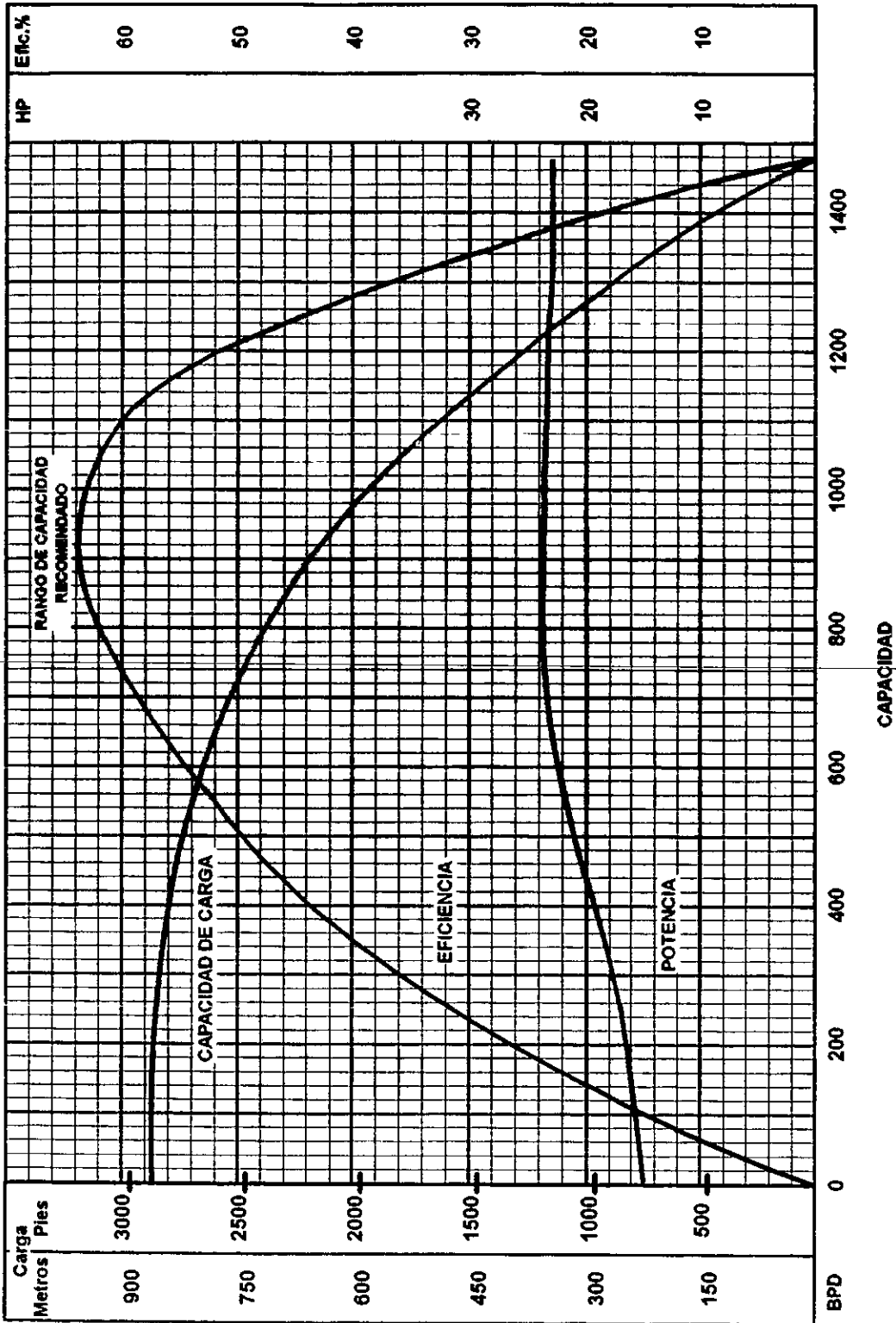
FIG. A2. PÉRDIDAS DE PRESIÓN DEBIDA A LA FRICCIÓN EN TUBERÍAS A.P.I.
 FUENTE: CATALOGO ODI; ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPING SYSTEM, SEP., 1989

APÉNDICE B
CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS

CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA
100 ETAPAS - D26 - 60 Hz
SERIE 400 - 3500 RPM

TRW REDA PUMP Co.
 Bartlesville, Oklahoma
 JULIO 1977

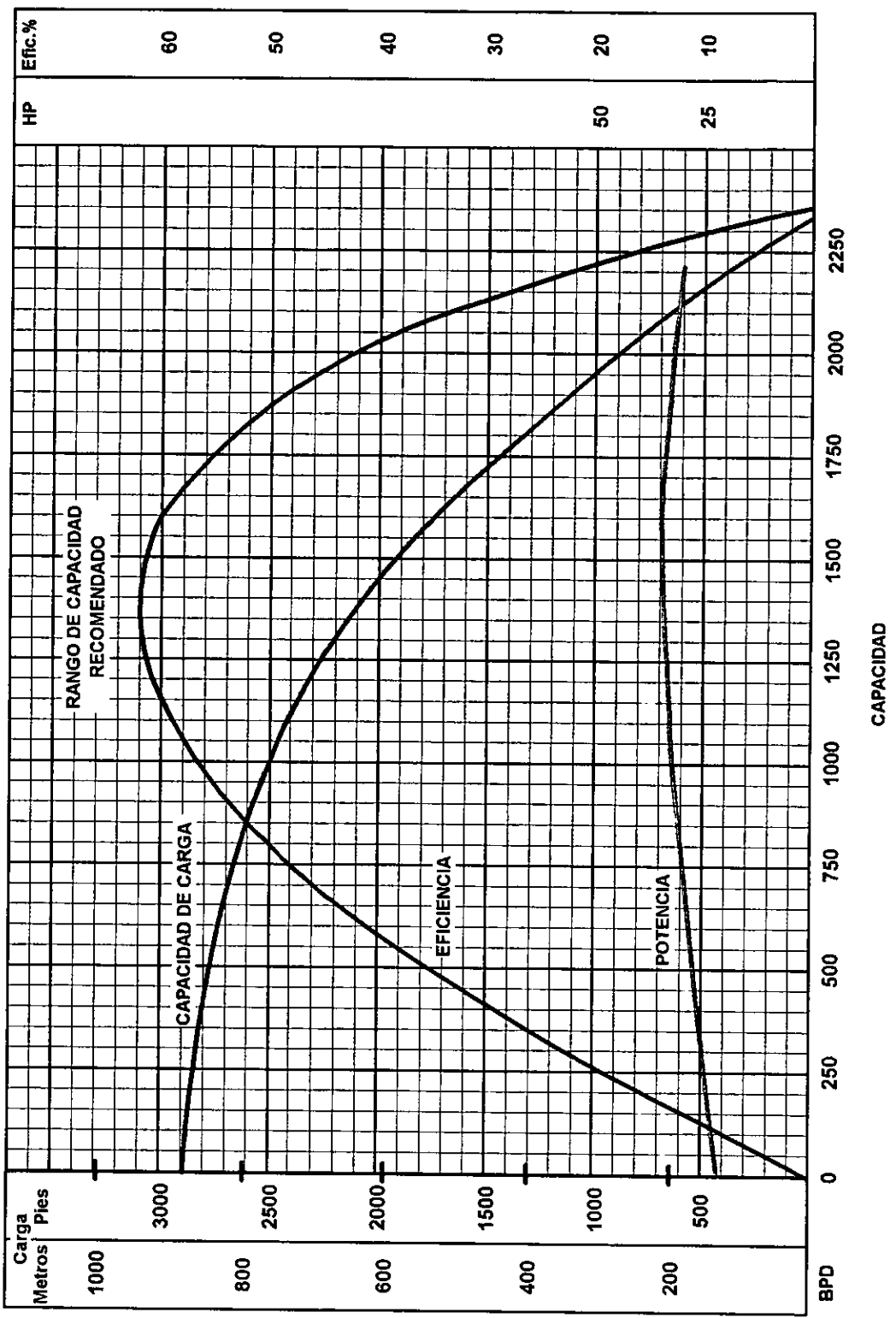
Tamaño Mínimo de
T. R. 5 1/2" D. E.



CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA
100 ETAPAS - D40 - 60 Hz
SERIE 400 - 3500 RPM

Tamaño Mínimo de
 T. R. 5 1/2" D. E.

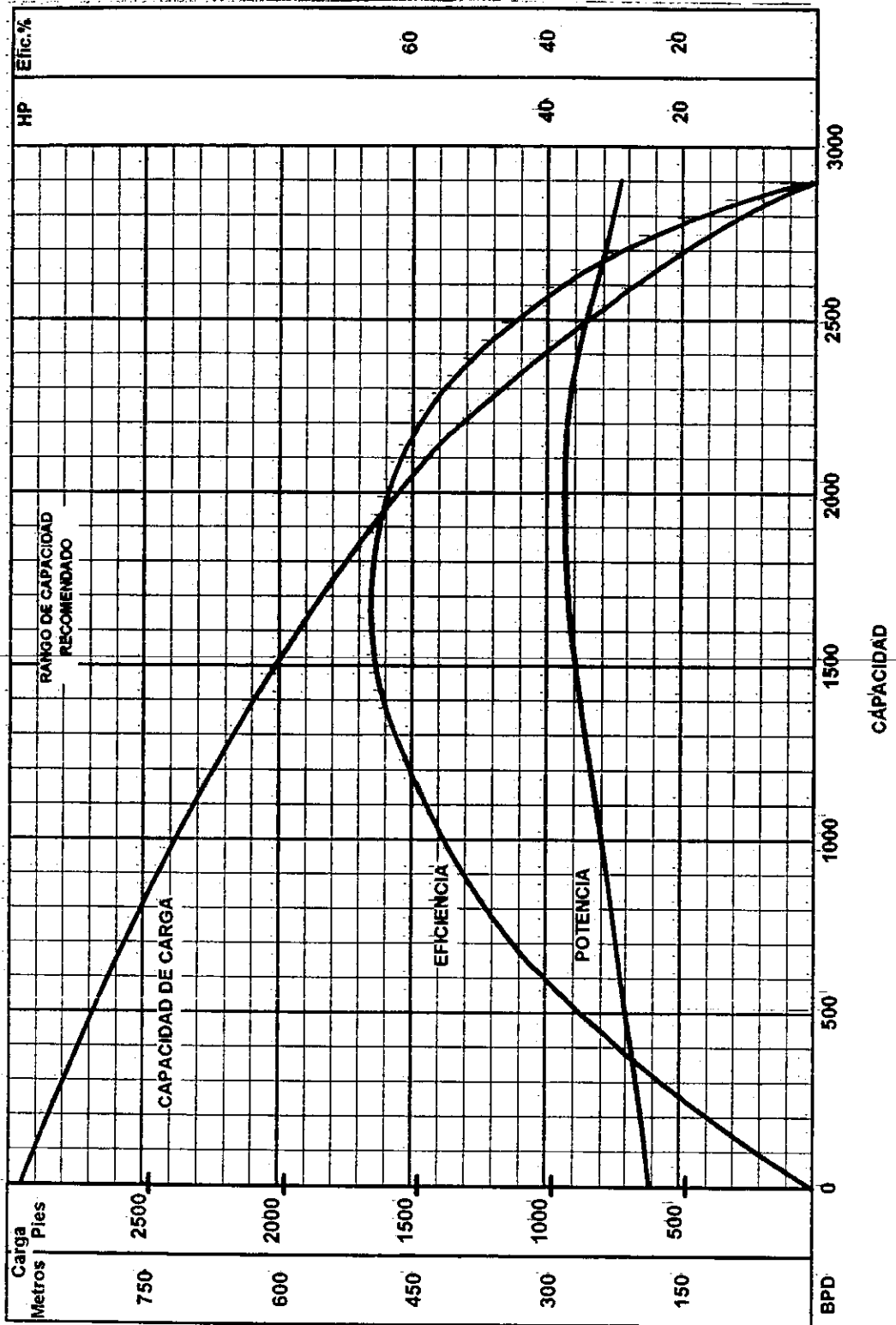
TRW REDA PUMP Co.
 Bartlesville, Oklahoma
 JULIO 1977



CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA
100 ETAPAS - D51 - 60 Hz
SERIE 400 - 3500 RPM

TRW REDA PUMP Co.
 Bartlesville, Oklahoma
 Abril 1977

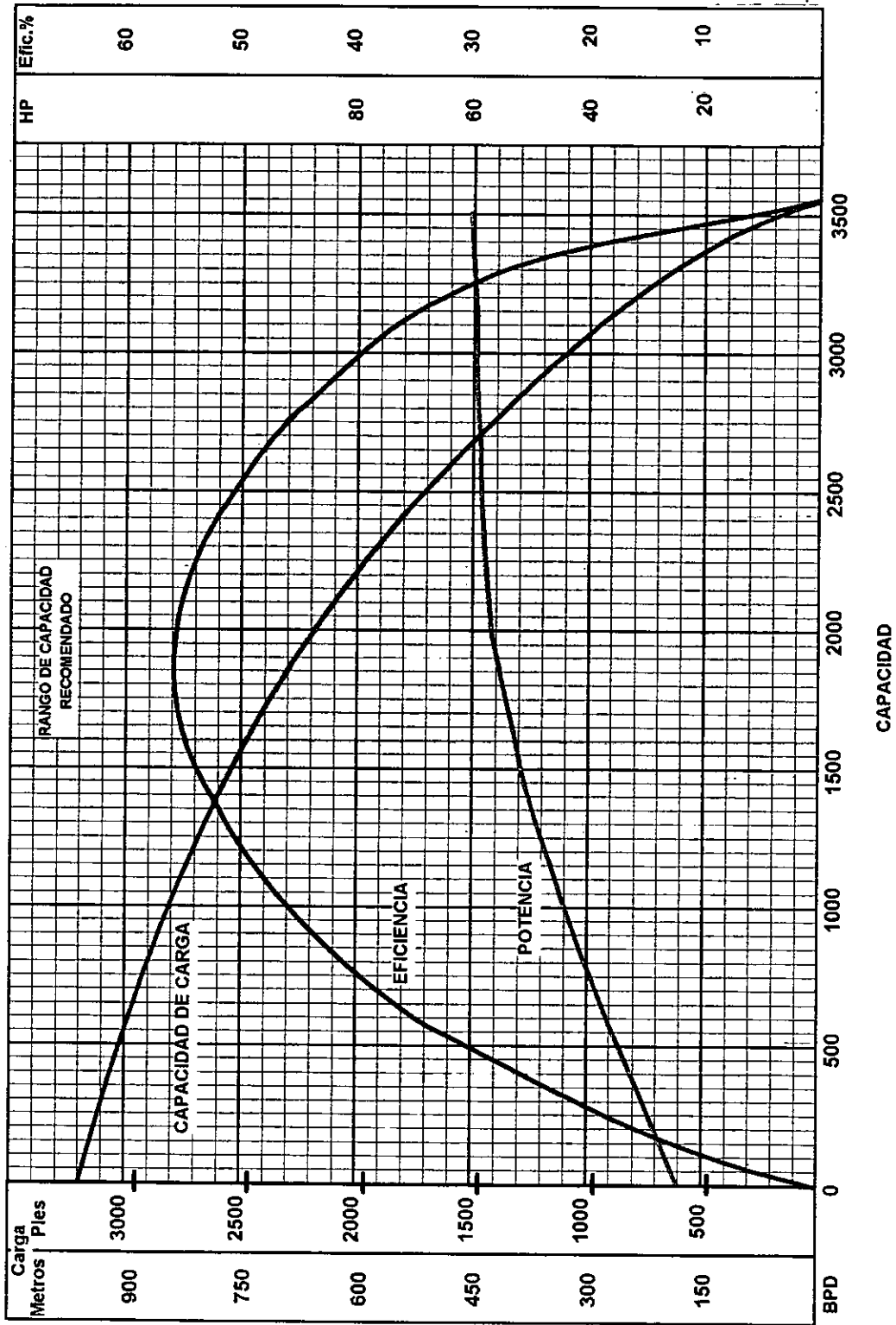
Tamaño Mínimo de
 T. R. 5 1/2" D. E.



CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA
100 ETAPAS - D55 - 60 Hz
SERIE 400 - 3500 RPM

Tamaño Mínimo de
 T. R. 5 1/2" D. E.

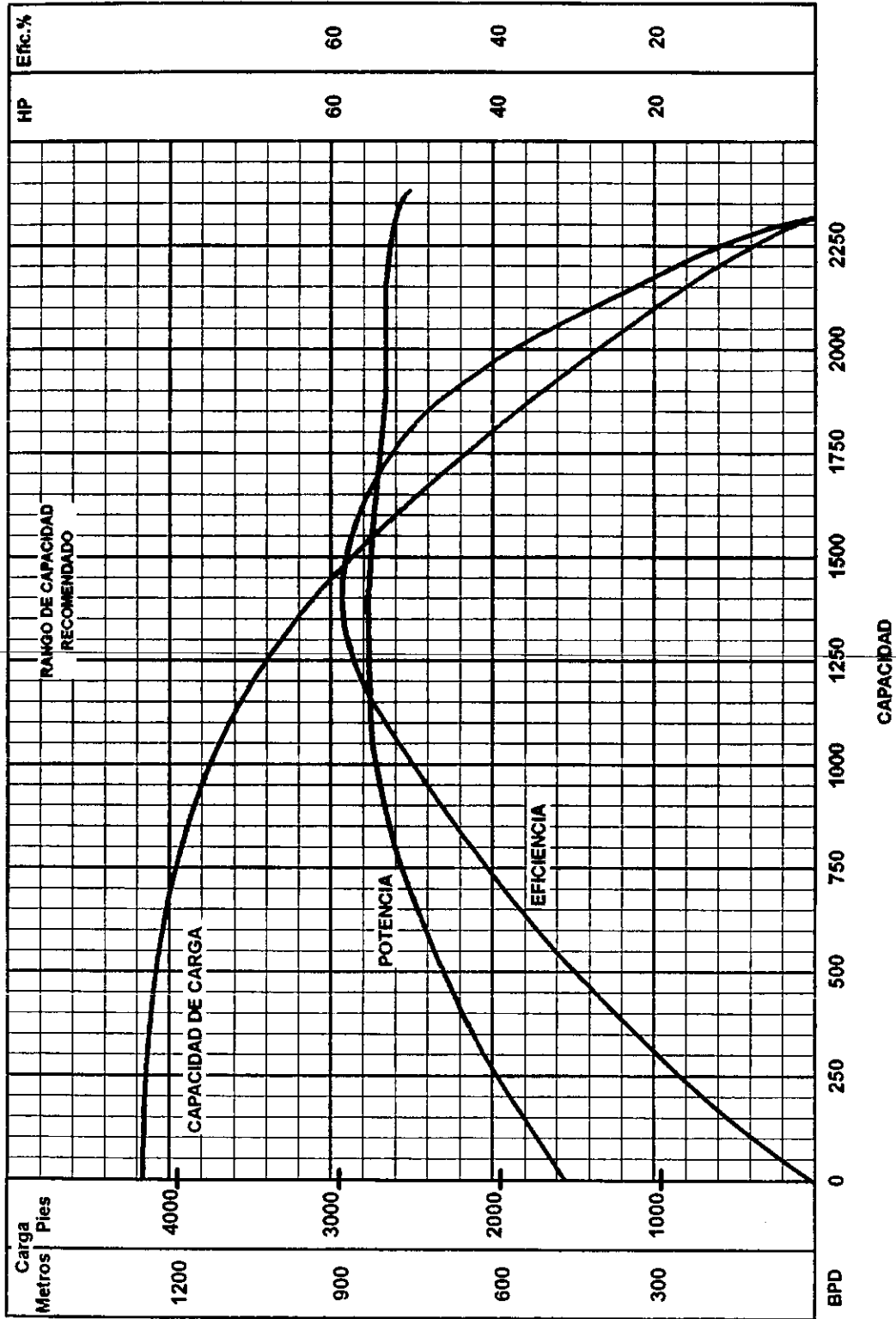
TRW REDA PUMP Co.
 Bartlesville, Oklahoma
 April 1997



CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA
100 ETAPAS - E41 - 60 Hz
SERIE 450 - 3500 RPM

TRW REDA PUMP Co.
 Bartlesville, Oklahoma
 Abril 1977

Tamaño Mínimo de
 T. R. 6 3/8" D. E.



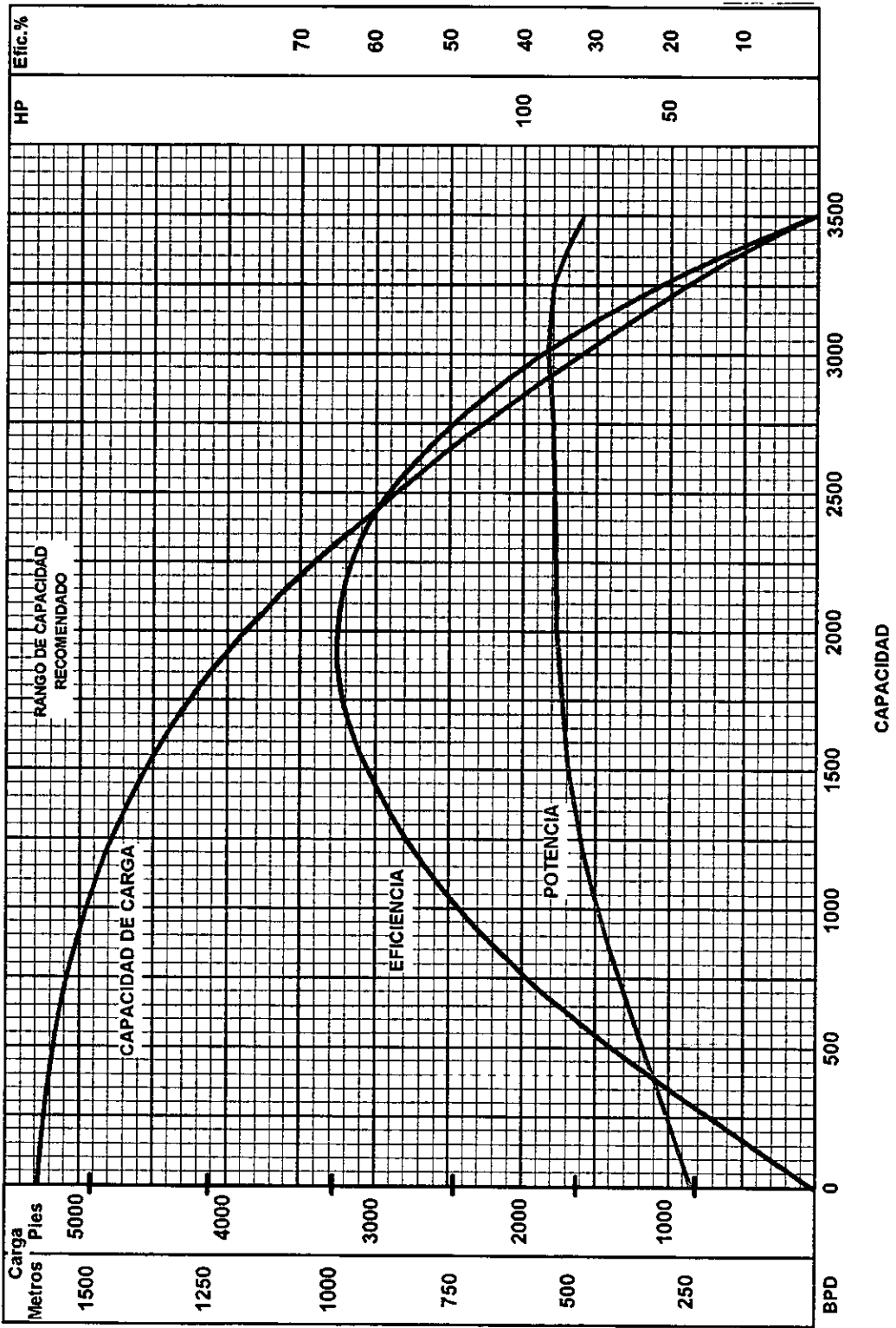
CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA

100 ETAPAS - G52 - 60 Hz

SERIE 540 - 3500 RPM

**Tamaño Mínimo de
T. R. 6 3/4" D. E.**

TRW REDA PUMP Co.
Bartlesville, Oklahoma
Abril 1977

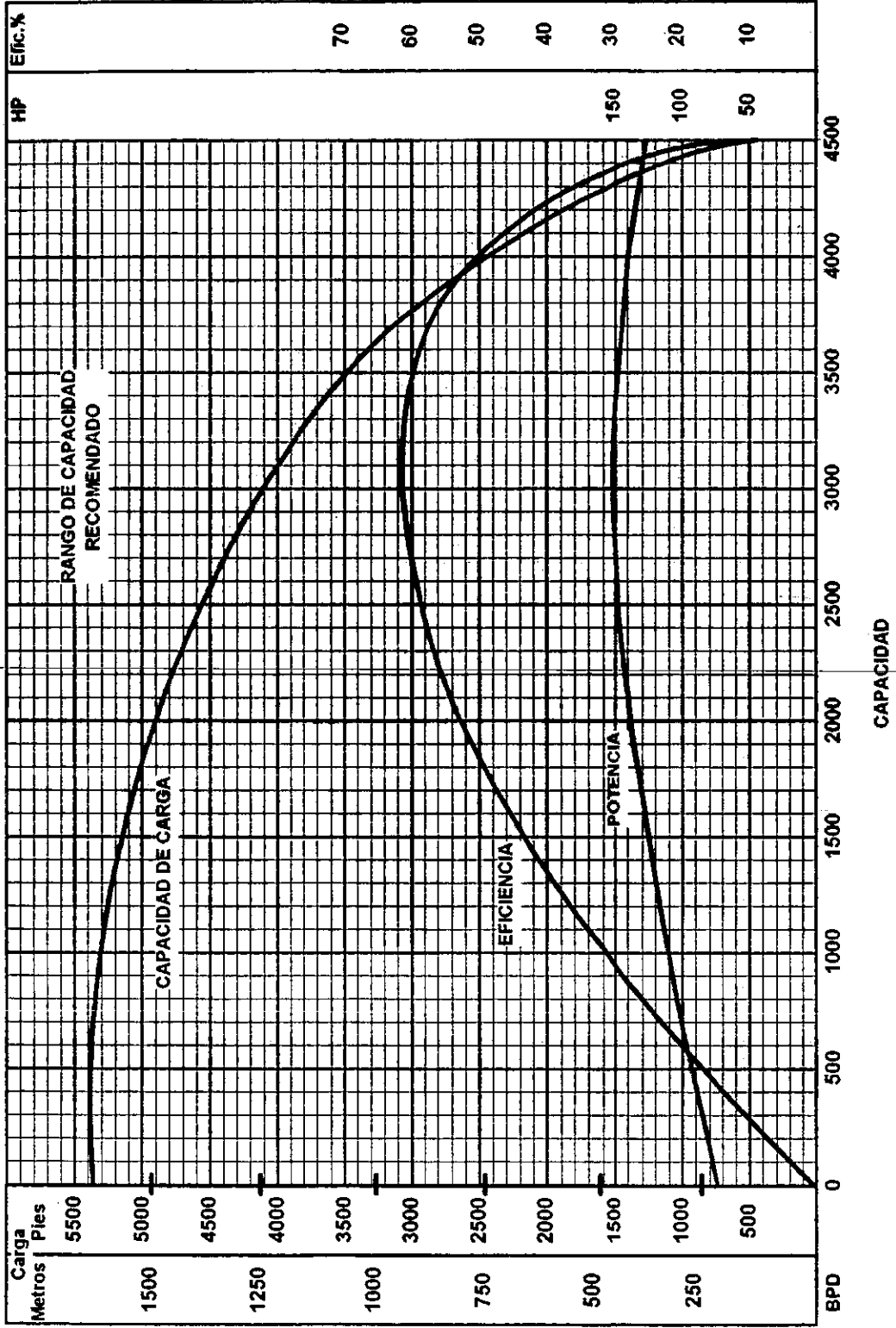


CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA

100 ETAPAS - G59 - 60 Hz
SERIE 540 - 3500 RPM

TRW REDA PUMP Co.
Bartlesville, Oklahoma
Abril 1977

Tamaño Mínimo de
T. R. 6 1/2" D. E.

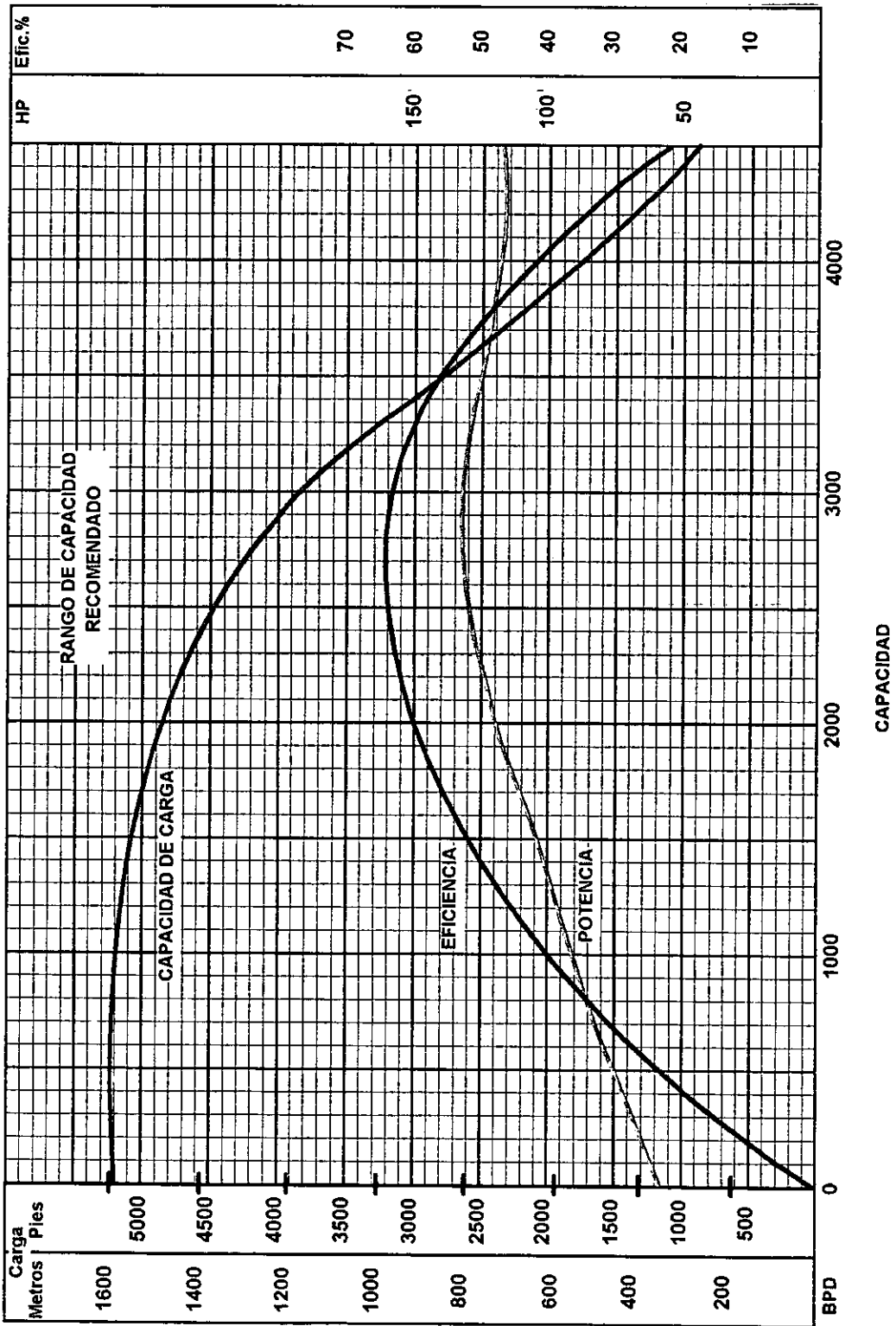


CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA

**Tamaño Mínimo de
T. R. 6 5/8" D. E.**

**100 ETAPAS - G75 - 60 Hz
SERIE 540 - 3500 RPM**

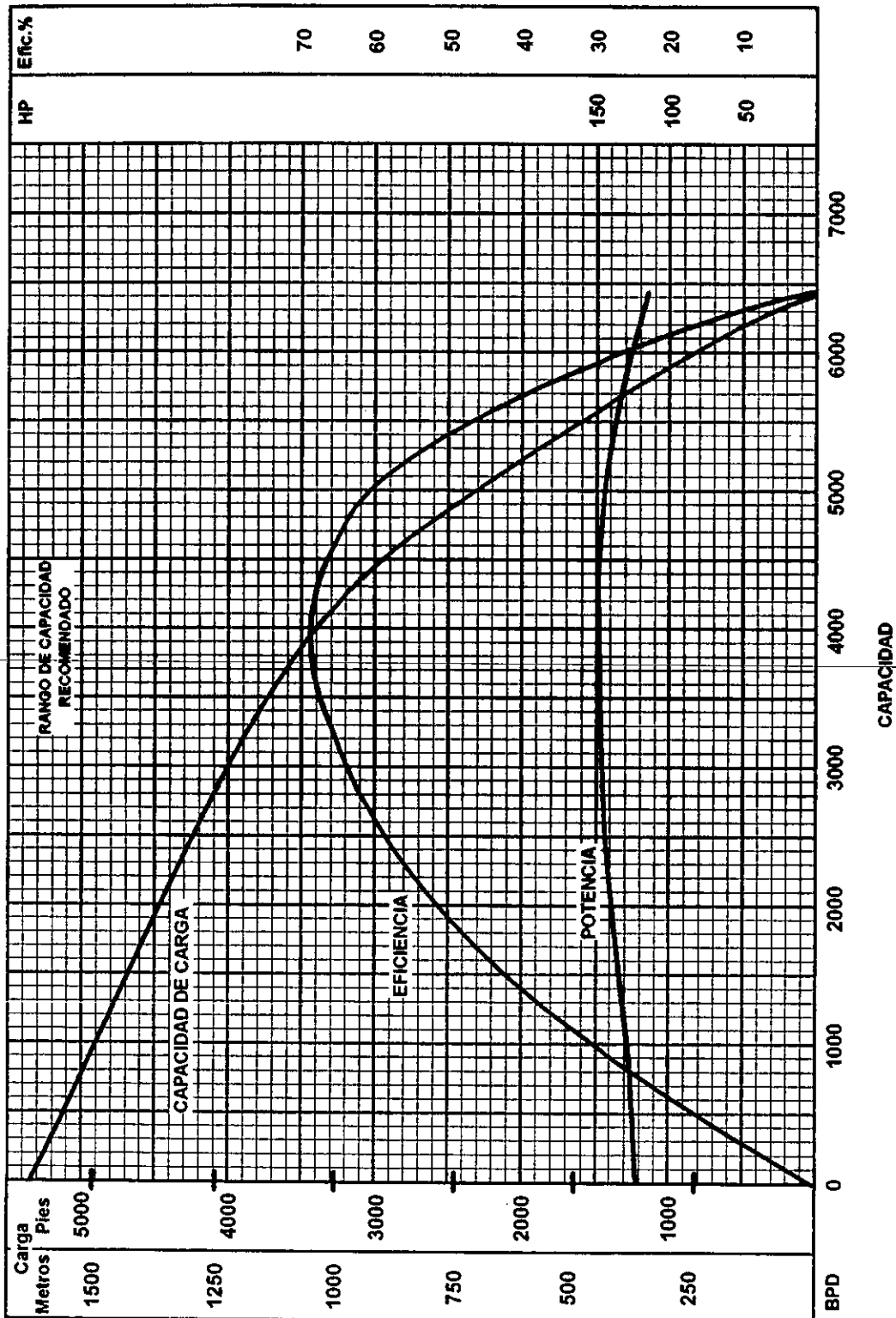
TRW REDA PUMP Co.
Bartlesville, Oklahoma
Abril 1977



CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA
100 ETAPAS - G110 - 60 Hz
SERIE 540 - 3500 RPM

TRW REDA PUMP Co.
 Bartlesville, Oklahoma
 Abril 1977

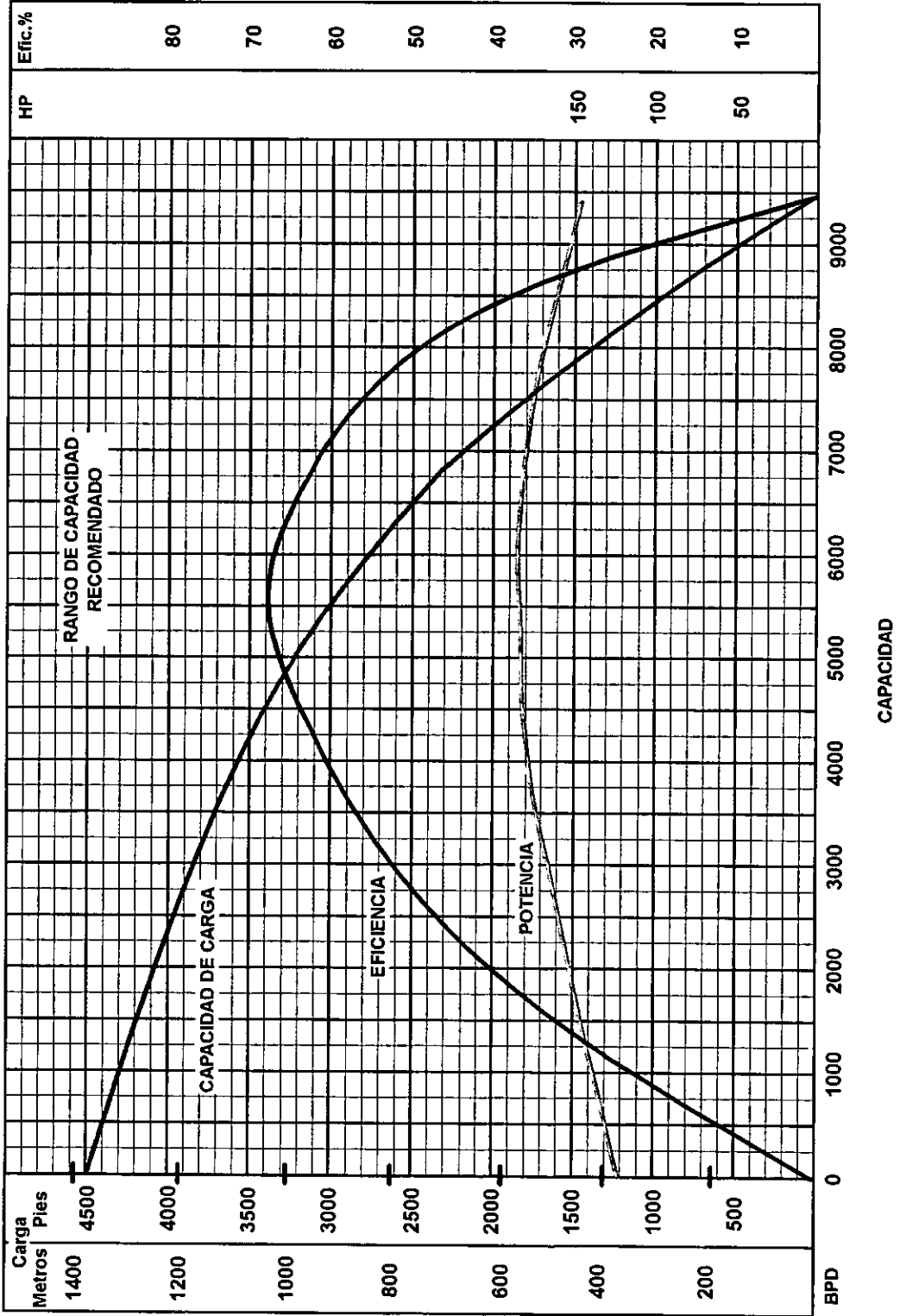
Tamaño Mínimo de
 T. R. 6 7/8" D. E.



CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA
100 ETAPAS - G180 - 60 Hz
SERIE 540 - 3500 RPM

Tamaño Mínimo de
 T. R. 6 5/8" D. E.

TRW REDA PUMP Co.
 Bartlesville, Oklahoma
 Abril 1977

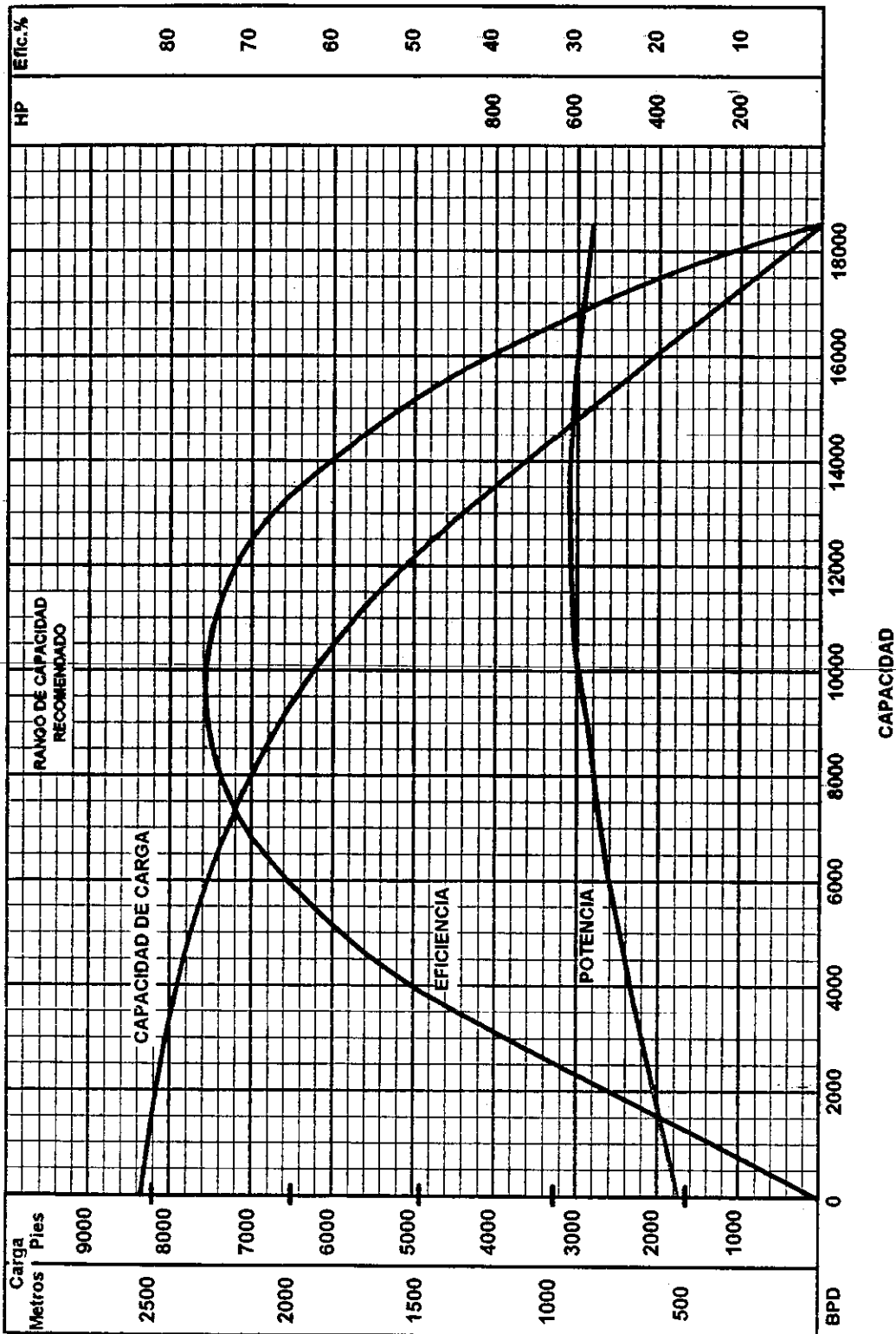


CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA REDA

TRW REDA PUMP Co.
 Bartlesville, Oklahoma
 Abril 1977

100 ETAPAS - 1300 - 60 Hz
SERIE 650 - 3500 RPM

Tamaño Mínimo de
T. R. 8 5/8" D. E.



APÉNDICE C
SELECCIÓN DEL MOTOR

MOTORES

SERIE 375
(3.75" ϕ ext.)

Hp	Volts	Amperaje
7.5	415	13.5
10.5	400	20.0
	690	12.0
15.5	330	34.0
	415	27.0
19.5	415	35.0
	650	22.5
22.5	440	38.5
	750	22.5
25.5	650	29.5
	780	24.5

MOTOR TANDEM

30.0	630	35.5
39.0	575	51.0
	774	38.0
45.0	660	51.5
51.0	740	51.0
	1000	37.0
	1250	31.0
58.5	860	51.0
67.5	990	51.5
76.5	1110	51.0
90.0	1320	51.5
102.0	1480	51.0
112.5	1650	51.5
127.5	1850	51.0

SERIE 738
(7.38" ϕ ext.)

Hp	Volts	Amperaje
200.0	2300	53.0
220.0	1350	97.0
	2300	57.0
240.0	2300	64.0
260.0	2300	70.0

MOTOR TANDEM

400.0	2300	106.0
440.0	2000	131.0
480.0	2200	134.0
520.0	2300	140.0
600.0	3450	106.0
680.0	3200	140.0
720.0	3300	134.0

SERIE 456
(4.56" ϕ ext.)

Hp	Volts	Amperaje
10.0	440	15.0
15.0	440	23.0
	750	14.0
20.0	460	28.0
	760	17.0
25.0	420	38.0
	700	22.0
30.0	440	43.0
	765	25.0
35.0	400	55.0
	690	32.0
	800	27.5

40.0	450	57.0
	675	38.0
	790	32.5
	900	28.5
50.0	700	45.5
	840	38.0
	980	32.5
60.0	670	57.0
	775	50.0
	840	45.0
	1000	38.0
70.0	785	57.0
	980	45.0
	1170	38.0

80.0	900	57.0
	1120	45.0
	1350	38.0
90.0	1000	57.0
	1260	45.0
	1500	38.0
	2000	29.0
100.0	970	66.0
	1120	57.0
	1400	45.0
	2250	29.0
110.0	1080	65.0
	1240	57.0
	1000	77.0
	1170	66.0
	1350	57.0
	2300	34.0

MOTOR TANDEM

140.0	1080	82.5
	2270	39.0
160.0	1270	80.0
	2160	47.5
180.0	2270	50.0
200.0	2140	59.0
220.0	2380	60.0
240.0	2250	70.0

SERIE 540
(5.40" ϕ ext.)

Hp	Volts	Amperaje
20.0	445	29.0
	762	17.0
30.0	445	44.0
	720	27.5
40.0	445	59.0
	670	39.0
	740	36.0
	890	30.0
50.0	430	75.0
	740	44.0
	920	33.0
60.0	445	87.0
	665	58.0
	755	52.0
	890	44.0
	990	39.0

70.0	775	58.0
	880	51.0
	1035	44.0
80.0	685	76.0
	770	68.0
	890	58.0
	1185	44.0
100.0	740	85.0
	855	74.0
	960	66.0
	1100	58.0
	2200	29.0

120.0	770	98.0
	890	85.0
	1330	57.0
	2200	32.0
130.0	835	98.0
	965	84.0
150.0	965	97.0
	1150	75.0
	2150	43.0
160.0	1015	99.0
	2230	45.0
180.0	1000	113.0
	2000	57.0
200.0	1160	105.0
	2200	53.0
225.0	1200	120.0
	2300	62.5

MOTOR TANDEM

240.0	2060	73.0
260.0	2250	67.0
300.0	2150	87.0
320.0	2230	88.5
360.0	1890	120.0
400.0	2200	115.0

APÉNDICE D
SELECCIÓN DEL CABLE Y TABLERO DE CONTROL

CABLES Y TABLERO DE CONTROL.

De TRW - REDA, se dispone de los siguientes cables:

- a) 3KV - Redalene - Estándar (para 180 °F) GALV.
- b) 3KV - Redalene - GALV (para 300 ° F).
- c) 3KV - Polietileno (para medios ambientes corrosivos a temperaturas menores a 140 °F).

CABLE	VOLTAJE
1 CU	115
2/0 AL	115
2 CU	95
1/0 AL	95
4 CU	70
2 AL	70
6 CU	55
4 AL	55

SELECCIÓN DEL CABLE.

El tamaño y tipo de cable que se selecciona para una aplicación queda determinado por la capacidad de conducción de corriente del cable y por el medio ambiente en el que el cable va a trabajar (temperatura y presión).

Ejemplo para determinar al voltaje superficial requerido.

La definición de voltaje superficial requerido es la carga de voltaje necesaria en la superficie para satisfacer el voltaje del motor utilizado más las pérdidas de voltaje debidas al tamaño del cable y otros componentes eléctricos en el sistema.

Utilizando la fig. D1 se calcula el voltaje superficial requerido para:

- Motor 890 volts, 58 amperes
- Cable 3,600 pies, No. 2, conductor de cobre.

De la fig. D1, se encuentra una pérdida de voltaje de 17 v/1,000 pies en el cable No. 2 de cobre para 58 amps. Entonces en 3,600 pies de cable se pierden:

$$3.6 * 17 = 61.2 \text{ volts}$$

Sumando el voltaje del motor:

$$890 + 61.2 = 921.2 \text{ volts.}$$

Una buena regla en pérdidas de voltaje para transformadores trifásicos es el 2.5% del voltaje requerido:

$$921.2 \text{ volts} * 2.5\% = 23.03 \text{ volts.}$$

El voltaje requerido será:

$$921.2 + 23.03 = 944.23 \approx 950 \text{ volts.}$$

La cantidad de voltaje de operación es algo flexible dentro del rango de 50 volts. Si el voltaje no puede ser exacto será ligeramente mayor en lugar de menor. Sin embargo el voltaje se establece lo más cercano posible al óptimo (950 volts) conforme lo permita el transformador.

Algunos diseñadores prefieren utilizar motores de alto voltaje y tableros de control grandes, anticipándose a incrementos de producción posteriores. También los motores de alto voltaje con bajo amperaje, deben utilizarse en pozos profundos donde el tamaño de la tubería de revestimiento limita el tamaño de cable que puede usarse y por lo tanto limita el amperaje del motor.

TABLEROS DE CONTROL.

Si existen varias opciones, entonces la determinación del uso o no del un sistema de 2,400 volts, dependerá de la evaluación económica. La selección del voltaje del motor es función de la profundidad, tamaño de la tubería de revestimiento, tamaño del cable, costo del cable, costo del tablero de control y costo de la energía eléctrica. Como regla general se puede usar:

A) Bajos Hp

Profundidades someras – Usar 440 volts.

B) Hp < 70

Profundidades intermedia – Usar 762 - 300 volts.

C) (70 - 200) Hp

Pozos profundos – Usar tablero de control de 1,500 volts, y motores de 900 a 1,300 volts.

D) Para Hp mayores de 200

– Tener un sistema que cambie de 1,500 a 2,400 volts, dependiendo de la profundidad, el costo del tablero de control y el costo de la energía (potencia).

Ejemplo:

Basado en el costo, para determinar el uso o no de un sistema de 2,400 volts.

Datos: Motor 1,500 Hp.
 Profundidad 6,000 pies.

Selección del voltaje de motor:

1).- 2,150 volts - 43 amperes

2).- 1,150 volts - 80 amperes

Se tienen los siguientes costos, los cuales mantienen su relación cuando cambia: (costos en dolares).

Tablero de control	2,400 volts	\$5,300.00
	1,500 volts	\$3,000.00
Cable # 2		\$2.70 /pie
		\$16,200.00
Cable # 4		\$1.85 /pie
		\$11,100.00

Costo Total:		
2,400 volts		5,300 + 11,100 = 16,400.00
1,500 volts		3,000 + 16,200 = 19,200.00

El ahorro con el sistema 2,400 volts es de \$2,800.00 y por lo tanto es el que se selecciona.

A continuación se presenta otro ejemplo que muestra la determinación final basada en los costos de operación.

Ejemplo.-

Dados los datos del ejemplo anterior excepto la profundidad es de 3,000 pies.

Costos: Cable # 4 = \$ 1.85 * 3,000 = \$ 5,550.00

 # 2 = \$ 2.70 * 3,000 = \$ 8,100.00

Con el # 4 el ahorro es de \$ 2,550.00

Costo Total:

2,150 volts	5,300 + 5,500 = 10,850.00
1,500 volts	3,000 + 8,100 = 11,100.00

Diferencia = \$ 250.00

Existe muy poca diferencia, de aquí que la decisión debe tomarse con base en los costos de potencia de operación (energía eléctrica) de ambas unidades:

43 amperes en cable # 4	pérdidas = 19 volts / 1,000 pies
80 amperes en cable # 2	pérdidas = 23.5 volts / 1,000 pies

Para el cable # 4:

$(3,000) (19/1,000) = 57$ volts, para el motor de 2,150 volts.

Voltaje superficial = $2,150 + 57 = 2,207$ volts.

$$Kw = \frac{(Vs)(Amp)(P.F.)(1.73)}{1,000}$$

$$Kw = \frac{(2,207)(43)(0.85)(1.73)}{1,000} = 139.55$$

Para el cable # 2:

$(3,000) (23.5/1,000) = 70.5$ volts, para el motor de 1,150 volts.

Voltaje superficial = $1,150 + 70.5 = 1,220.5$ volts.

$$Kw = \frac{(Vs)(Amp)(P.F.)(1.73)}{1,000}$$

$$Kw = \frac{(1,220.5)(80)(0.85)(1.73)}{1,000} = 143.58$$

La diferencia es de 4.03 Kw más, para el motor de 1,150 volts:

$(4.03) (24 \text{ hrs}) (30 \text{ días}) = 2,901.6$ Kw hrs / mes

La diferencia del costo:

$(2901.6) (\$ 0.01) = \$29.016/\text{mes}$

Entonces la selección será: Motor de 2,150 v, con ahorros de:

Costo inicial = \$ 250.00

Costo final = \$ 29.016/mes

Dimensiones del Transformador.

Para dimensionar un autotransformador, un transformador trifásico o un conjunto de tres transformadores de una fase, se utiliza la ecuación:

$$Kva = \frac{(Vs)(Amp)(1.73)}{1,000}$$

Donde:

Kva = Kilovolt amps.

Vs = Voltaje superficial requerido.

Amp = Amperaje nominal del motor o amperaje que será utilizado.

Ejemplo:

Voltaje superficial requerido = 990 volts.

Amperaje = 58 amps.

$$Kva = \frac{(990)(58)(1.73)}{1,000} = 99.4$$

Si se usan tres transformadores de una fase, los 99 Kva, se dividen entre 3 para establecer un valor para cada transformador.

El transformador o transformador trifásico necesitará un tamaño mínimo para 100 Kva.

Si se sabe que en el futuro se requerirá una unidad más grande puede resultar económicamente factible instalar transformadores con el rango superior adecuado.

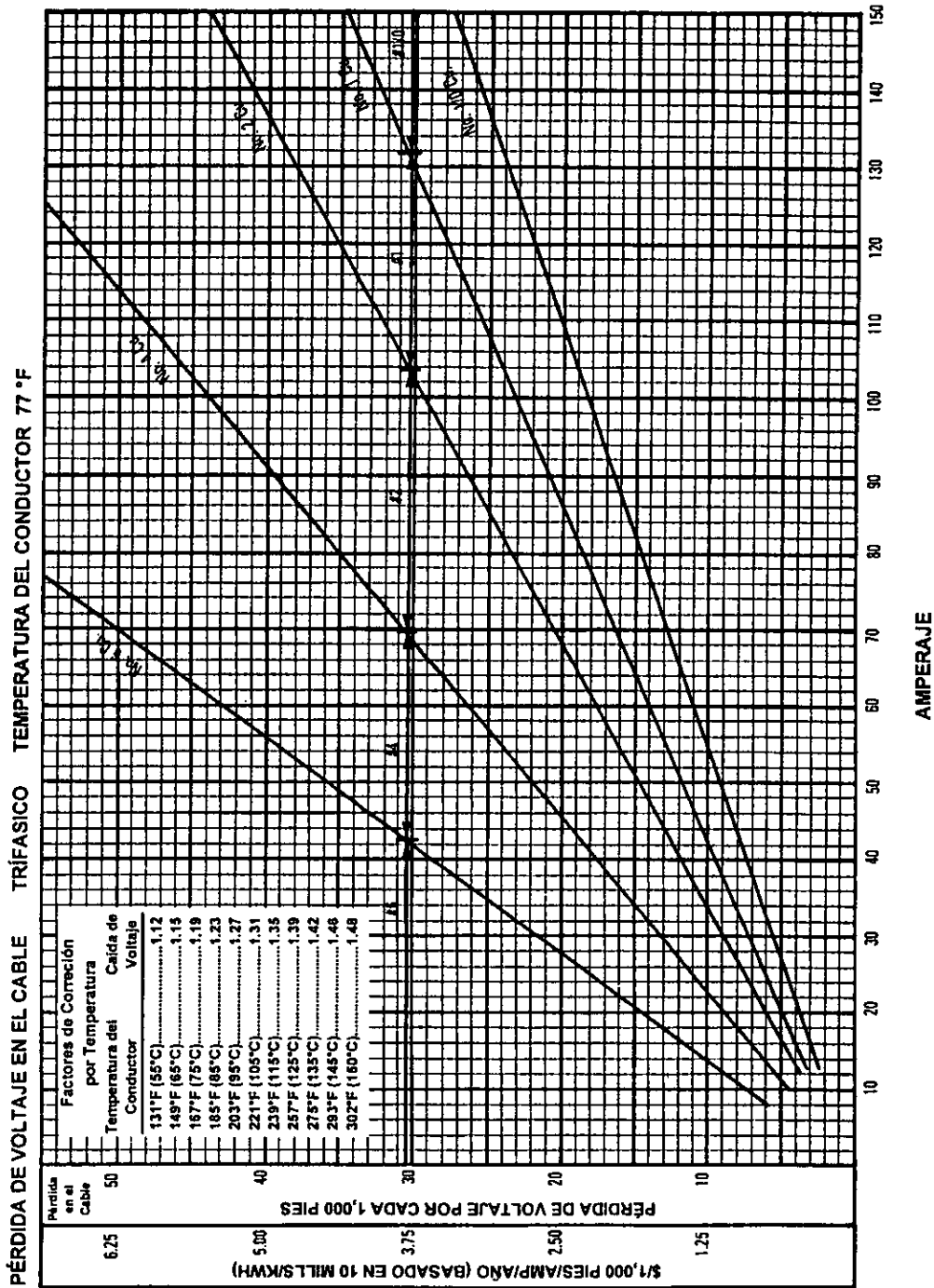


FIG. D1. CAÍDAS DE VOLTAJE CONTRA AMPERES A 77 °F
 FUENTE: CATALOGO REDA, A CAMCO COMPANY; INDUSTRIAL SUBMERSIBLE PUMPS, ENERO, 1989

APÉNDICE E
TRANSFORMADORES

**TRANSFORMADORES
FASE SIMPLE
(DISC 60 Hertz REDA)**

TAMANO	ALSTURA	ANCHO	Peso	DISC	DISC	SERIE					
25	40.0	1.02	22.5	0.57	24.8	0.63	460	209	12500	480/960	66270-0
25	47.5	1.21	22.5	0.57	24.8	0.63	500	227	24950	480/960	80830-3
50	51.5	1.31	29.0	0.74	33	0.84	915	416	12500	650/1300	80822-0
50	52.5	1.33	29.0	0.74	33	0.84	935	425	24950	650/1300	80825-3
75	53.5	1.36	29.0	0.74	33	0.84	1085	493	12500	650/1300	80823-8
75	59.0	1.51	29.0	0.74	33	0.84	1100	500	24950	650/1300	80826-1
100	56.5	1.43	29.0	0.74	33	0.84	1325	602	12500	650/1300	80824-6
100	62.5	1.59	29.0	0.74	33	0.84	1350	614	24950	650/1300	80827-9

**INMERSO - ACEITE. AUTOREFRIGERANTE (DISC). FASE SIMPLE. 60 CICLOS.PARA USAR ARRIBA DE 55 °C
CON RANGOS DE VOLTAJE SECUNDARIO DE 480/960 Y 650/1300. CONEXIÓN DELTA. CONEXIÓN WYE.
RANGOS DE VOLTAJE BAJOS CON 830/1660 Y 1125/2250**

APÉNDICE F
COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA AL
POZO (IPR), VOGEL.

COMPORTAMIENTO DE FLUJO AL POZO
CURVA DE VOGEL (J. P. T., ENERO DE 1968)

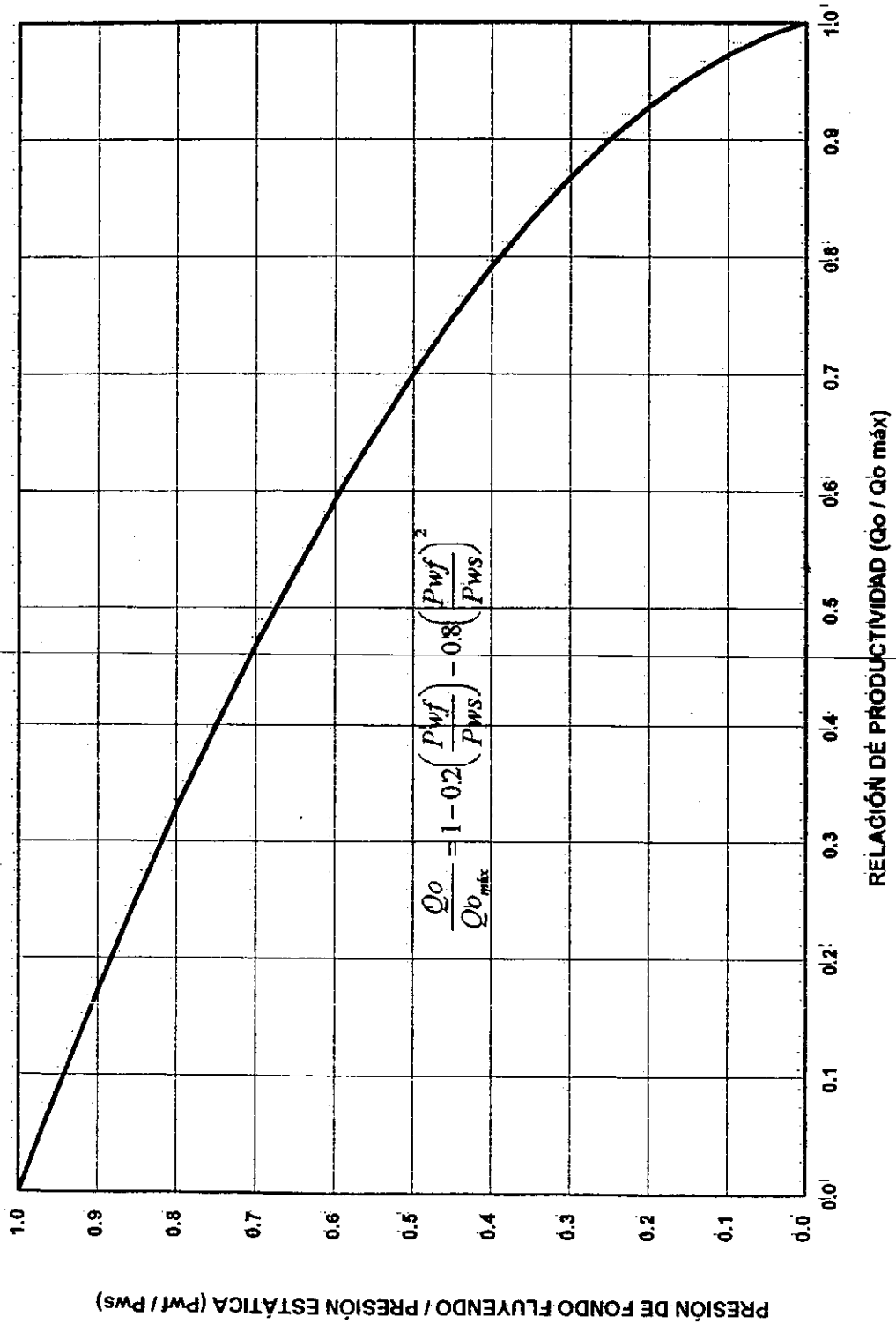


FIG. F1. CURVA GENERAL DE IPR

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
ΔP	Incremento de presión	lb/pg ²
ΔP_e	Incremento de presión por etapa	lb/pg ² etapa
ΔP_f	Pérdidas de presión por fricción	lb/pg ² /1,000 pies
$\Delta P_{f L.D.}$	Pérdidas de presión por fricción en línea de descarga	lb/pg ² /1,000 pies
ΔP_t	Incremento de presión total	lb/pg ²
ρ	Densidad	lb _m /pie ³
ρ_r	Densidad relativa	adimensional
ρ_{ro}	Densidad relativa del aceite	adimensional
ρ_{rw}	Densidad relativa del agua	adimensional
ρ_{rg}	Densidad relativa del gas	adimensional
ρ_{rm}	Densidad relativa de la mezcla	adimensional
ρ_m	Densidad de la mezcla	lb _m / pie ³
$\phi_{T.P.}$	Diámetro exterior de tubería de producción	pg
$\phi_{T.R.}$	Diámetro exterior de tubería de revestimiento	pg
ϕ_{Liner}	Diámetro exterior del liner	pg
@ c. b.	Medido a condiciones de bomba	
@ c. esc.	Medido a condiciones de escurrimiento	
@ c. sup.	Medido a condiciones de superficie	
@ c. yac.	Medido a condiciones de yacimiento	
Amp	Amperaje	amperes
B_g	Factor de volumen del gas	bl _g @ c.yac. / pies _g ³ @ c. sup.
B_o	Factor de volumen del aceite	bl _o @ c. yac. / bl _o @ c. sup.
B_w	Factor de volumen del agua	adimensional
CDT	Carga dinámica total	pies
D.E.	Diámetro exterior	
f_w	Porcentaje de agua producida	porcentaje o fracción
f_o	Porcentaje de aceite producido	porcentaje o fracción
Gl	Relación gas libre-aceite	pies ³ /bl
Gl _{lb}	Relación gas libre-aceite que tolera la bomba	pies ³ /bl
Gr	Gradiente de presión	lb/pg ² por pie
Grp	Gradiente de presión promedio	lb/pg ² por pie
H/etapa	Carga por etapa	pies/etapa
H_e	Carga desarrollada por etapa	pies/etapa
H_f	Pérdidas de presión por fricción	pies
H_{p_e}	Potencia desarrollada por etapa	Hp/etapa
Hp/etapa	Potencia por etapa	Hp/etapa
Hp	Potencia requerida por el motor	Hp
H_s	Carga estática	pies
Hz	Frecuencia	Hz

IP	Índice de productividad	bl/día/lb/pg ²
Kva	Kilovatios	Kva
M	Masa total	lb _m
M _g	Masa del gas	lb _m
M _o	Masa del aceite	lb _m
M _w	Masa del agua	lb _m
ND	Nivel dinámico	pies
NEF	Nivel estático del fluido	pies
NE	Número de etapas requeridas	etapas
NTE	Número total de etapas requeridas	etapas
P _{cb}	Profundidad de colocación de la bomba	pies
P _{desc}	Presión en la descarga de la bomba	lb/pg ²
P _i	Incremento de presión	lb/pg ²
PGI	Porcentaje de gas que entra a la bomba	fracción
NMIP	Nivel medio del intervalo perforado	pies
PT	Profundidad total	pies
P _{succ}	Presión en la succión de la bomba	lb/pg ²
P _{wf}	Presión de fondo fluyendo	lb/pg ²
P _{wh}	Presión en la cabeza del pozo	lb/pg ²
P _{whea}	Presión en el espacio anular (sumergencia)	lb/pg ²
P _{whip}	Presión en la cabeza del pozo	lb/pg ²
P _{ws}	Presión estática	lb/pg ²
P _b	Presión de burbujeo	lb/pg ²
q	Gasto	bl/día
q _b	Gasto de aceite, gas y agua	m ³ _{o,g,w} /día
q _l	Gasto de líquido	bl/día
q _m	Gasto total de masa	lb _m /día
q _o	Gasto de aceite	bl/día
q _{omáx}	Gasto máximo	bl/día
q _t	Gasto total producido	bl/día
q _p	Gasto promedio	bl/día
rpm	Revoluciones por minuto.	bl/día
RGA	Relación gas-aceite	pies ³ /bl
RGL	Relación gas-líquido	pies ³ /bl
Rs	Relación de solubilidad	pies ³ @ c. yac. / bl @ c. sup
T _{wf}	Temperatura en el fondo del pozo	°F
T _{wh}	Temperatura en la cabeza del pozo	°F
V _g	Volumen de gas	bls
V _o	Volumen de aceite	bls
V _s	Voltaje superficial	volts
V _{t_{suc}}	Volumen total de succión	bls
V _u	Volumen unitario	bl(o+g+w) @ c. b. / bl _o @ c. sup.
V _w	Volumen de agua	bls
Z	Factor de compresibilidad del gas	adimensional

REFERENCIAS

1. Brown K. E., "The Technology of Artificial Lift Methods", Vol. 2b. University of Tulsa. Penwell Publishing Co., 1980. Tulsa, Ok.
2. Díaz Z. H., "Apuntes para la Cátedra de Producción por Bombeo Mecánico y Bombeo Electrocentrífugo Sumergido", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1986.
3. TRW Reda Pump., Service Manual, Nov. 1978, Dic. 1985.
4. Reda, A Camco Company, Industrial Submersible Pumps, Jan. 1989.
5. Centrilift Electrical Submersible Pump & Equipment Catalog, Jan. 1979 y Feb. 1991.
6. Oil Dinamycs Inc., Submersible Pump Catalog, Secc. Equipment Selection pp. 3-54, Oct. 1971 y Sep. 1989.
7. Sanchez H. M. y García L. E., "Efectos del Gas en el Sistema de Bombeo Electrocentrífugo", Tesis (Dir. Díaz z. H.), Facultad de Ingeniería. U.N.A.M., 1994.
8. Vogel, J. V., "Inflow Performance Relationship for Solution Gas Drive Wells", J.P.T., Jan. 1978.
9. Villa J. E. y Acuña R. A., "Bombeo Centrífugo en Pozos con Flujo Multifásico", Revista I. M. P., Abril, 1971.
10. Díaz Z. H. y Poblano O. R., "Diseño Mejorado de Aparejos de Bombeo Electrocentrífugo", Ingeniería Petrolera, Julio, 1984.
11. Orkiszewski, J., "Predicting Two-Phase Pressure Drops in Vertical Pipes", J.P.T., Junio, 1967.

12. Hagerdon A. R. and Brown K. E., "Experimental Study of Pressure Gradients Occuring During Continuos Two-Phase Flow in Small Diameter Vertical Conduits", J.P.T., Abril, 1965; pp 457-484.
13. Poettmann, F. H. and Carpenter P.G., "The Multiphase Flow of Gas, Oil and Water Throug Vertical Flow Strings with Applications to the Desing of Gas Litf Installations", Drill and Prod. Prac., API (1952); pp 257-317.
14. Standing M. B., "A General Pressure - Volume - Temperature Correlation for Mixtures of California Oils and Greases", Drill and Prod. Prac. API, 1974.
15. Baxendel, P. and Thomas R. "The Calculations of Pressure Gradientes in High rate Flowing Wells", J.P.T., Mayo, 1973.
16. Díaz Z. H., "Desarrollo y Prueba de un Programa de Cómputo para Diseñar Aparejos de Bombeo Electrocentrífugo, Considerando Flujo Multifásico en Tuberías Verticales y Variación Volumétrica en el Interior de la Bomba", I.M.P., Sudirección de Tecnología de la Explotación., Diciembre, 1982.
17. Díaz Z. H., "Instructivo de Manejo del Programa para Diseñar Aparejos de Bombeo Eléctrico", I.M.P., Sudirección de la Tecnología de la Explotación., Enero, 1983.
18. Díaz Z. H., "Análisis de Diseño de Aparejos de Bombeo Eléctrico Propuesto por la Compañía Reda para Nueve Pozos de Poza Rica", I.M.P., Sudirección de Tecnología de la Explotación., Febrero, 1983.
19. Díaz Z. H., "Descripción y Análisis de las Instalaciones de Bombeo Electrocentrífugo Realizadas por las Compañías Kobe, Reda y Centrilift en los Pozos Poza Rica 206, 49, 92, 172 y Escolín 11", I.M.P., Sudirección de Tecnología de la Explotación., Mayo, Agosto y Dic. 1980.
20. Díaz Z. H., Apoyo Técnico en la Evaluación, Selección y Prueba de Nuevas Tecnologías en las Instalaciones de Producción, "Prueba Piloto de Bombeo Eléctrico en Pozos Productores de Aceite Pesado", Gerencia de Tecnología de la Producción., I.M.P., Diciembre, 1993.

21. Díaz Z. H., Apoyo Técnico en la Evaluación, Selección y Prueba de Nuevas Tecnologías en las Instalaciones de Producción, "Prueba de Bombeo Electrocentrífugo en los Pozos KU-445 y 427 (H)", Gerencia de Tecnología de la Producción., I.M.P., Diciembre, 1992.
 22. Centrilift, Borg-Warner Co., Submersible Pump Handbook, Cap. IV, VI, 1978.
 23. Martínez B. A. y Martínez G. J., "Problemas Prácticos de Bombeo Electrocentrífugo y Bombeo Mecánico", Tesis (Dir. Díaz Z. H.), facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1990
 24. Dávila A. A. y Díaz Z. H., "Aplicación de Curvas de Gradiente de Presión en Tuberías Verticales con Flujo Multifásico en Pozos de la Zona Sureste de Petroleos Mexicanos", Ingeniería Petrolera., Octubre, 1983.
 25. Adrián R. R., "Diagnostico de Fallas en el Bombeo Electrocentrífugo", Tesis (Dir. Díaz Z. H.), Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1988.
 26. Hicks, Tyler G. "Pump Selection and Application", Mc Graw Hill Book, Co., 1975, New York, N. Y.
 27. Martínez G. J. y Sánchez A. F., "Estudio Integral de Comportamiento de Producción de los Pozos de la Plataforma Akal I", I.M.P., Subdirección de Tecnología de la Explotación., Agosto, 1981.
-