

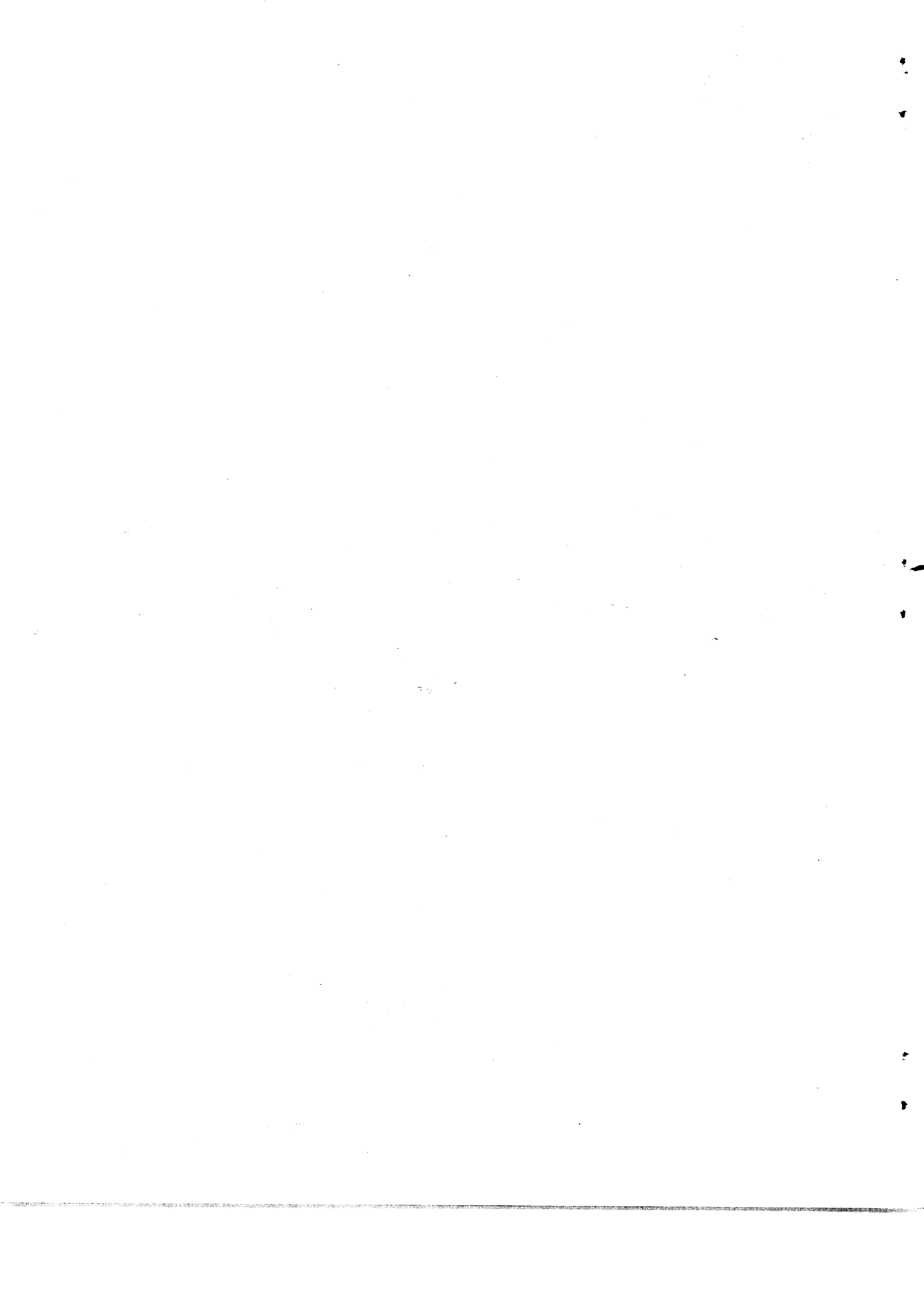
CLAVE
432
5



APUNTES DE PRODUCCION DE POZOS II

Diz Zestuche Héctor :

(PRIMERA PARTE)



APUNTES DE
PRODUCCION DE POZOS II
(PRIMERA PARTE)



P R E F A C I O

En febrero de 1979 se firmó un convenio de colaboración entre la UNAM, PEMEX, IMP y el CIPM (Colegio de Ingenieros Petroleros de México). El objetivo del convenio ha sido elevar el nivel académico de los alumnos del área de Ingeniería Petrolera en la Facultad de Ingeniería, tanto de licenciatura como de posgrado, así como crear el Doctorado y promover la superación de un mayor número de profesionales que laboran en la industria petrolera, por medio de cursos de actualización y especialización.

Uno de los programas que se están llevando a cabo a nivel de licenciatura, dentro del marco del Convenio, es la elaboración y actualización de apuntes de las materias de la carrera de Ingeniero Petrolero. Con esto se pretende dotar al alumno de más y mejores medios para elevar su nivel académico, a la vez que proporcionar al profesor material didáctico que lo auxilie en el proceso enseñanza-aprendizaje.

La elaboración de estos apuntes fue realizada por el Sr. Ing. Héctor Díaz Zertuche.

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACION DEL PETROLEO

III
EP. D. 7
432 - 9/F

CAPITULO I

I.- CONCEPTOS GENERALES.

I.1.- Fundamentos de flujo de fluidos.

Peso específico.- Densidad.- Densidad específica.-

Presión y Carga.- Gradiente de presión.- Número de Reynolds.

I.2.- Fundamentos de las bombas centrífugas.

Carga teórica desarrollada por un impulsor.- Curvas de comportamiento de la bomba.

I.3.- Efecto de algunos parámetros en el comportamiento de la bomba.

Efecto del cambio de velocidad en las curvas de comportamiento.- Efecto de la densidad específica.- Efecto del cambio de diámetro del impulsor.- Cavitación.

CAPITULO II

II.- DESCRIPCION DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTRICO.

II.1.- Componentes del equipo subsuperficial.

Bomba Sumergible.- Protector o Sección Sellante.- Motor Sumergible.- Separador de Gas.- Cables.

II.2.- Componentes del equipo superficial.-

Tablero de control.- Transformadores.- Caja de unión.-

II.3.- Accesorios.

CAPITULO III

III.- DISEÑO DE INSTALACIONES DE BOMBEO ELECTRICO.

Introducción.-

III.1.- Factores que afectan el diseño de la bomba.-

Configuración de flujo.- Capacidad de flujo del pozo.

Se bombea o no gas.- Separación de gas.- Pozos desviados.-

Empacadores.- Efectos viscosos.- Temperatura.- Operación vs condiciones de descarga.

III.2.- Detalle del Diseño de Instalaciones.-

Introducción.- Consideraciones generales en el diseño de -
bombas.- Datos requeridos del pozo.- Curvas estándar de -
comportamiento.- Carga dinámica total.- Selección del ca-
ble.- Dimensiones del transformador.- Resumen del procedi-
miento para dimensionar bombas.

III.3.- Ejemplos de diseño para pozos productores de agua.

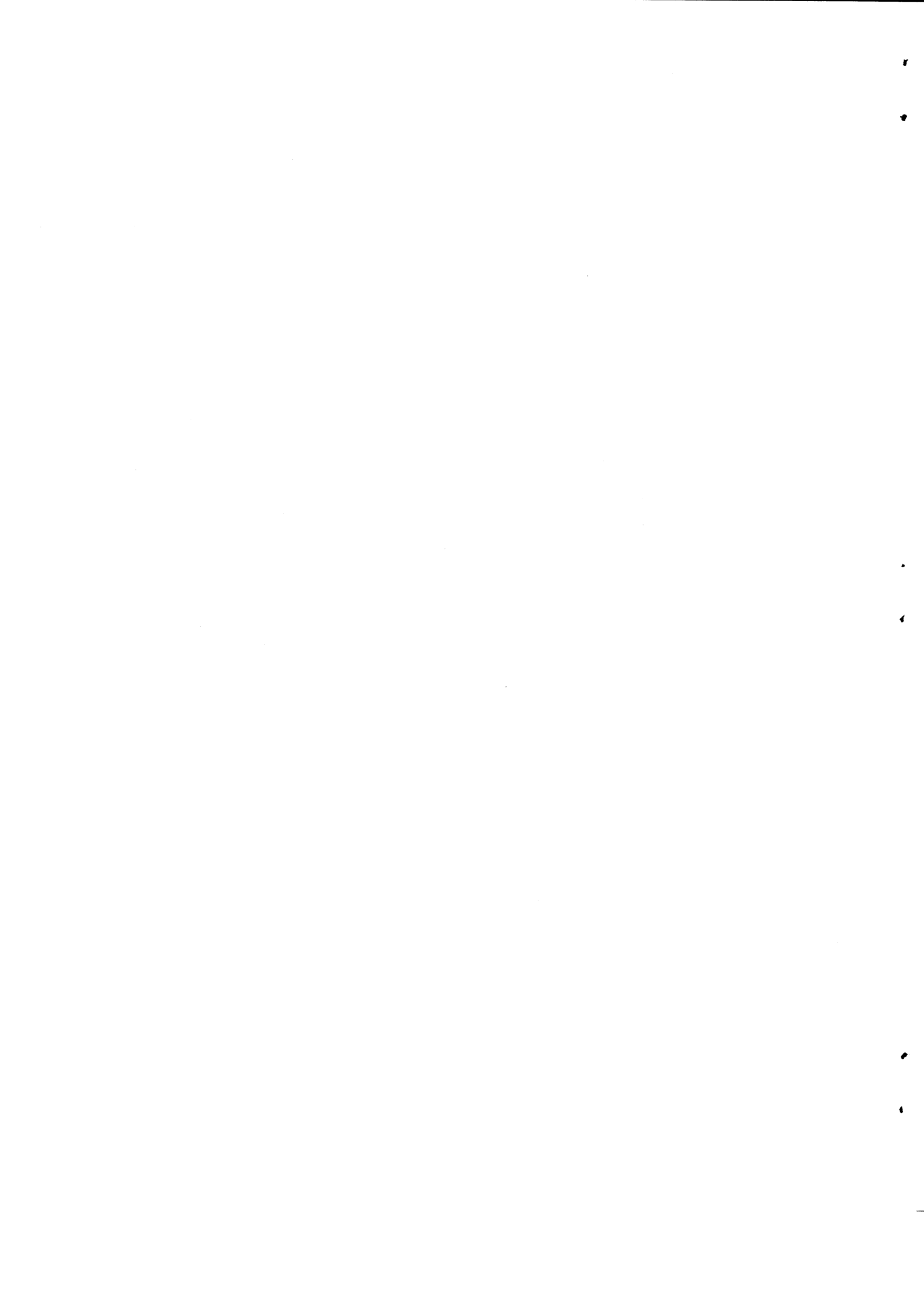
Introducción.- Problema de ejemplo para un pozo productor
de agua.- Problema comparativo para pozos productores de -
agua.- Discusión de los problemas anteriores.

III.4.- Ejemplos de diseño para pozos productores de aceite.-

Pozo productor de aceite sin gas libre.- Pozo productor de
aceite y agua sin producción de gas.

III.5.- Diseño para pozos con producción de gas de media a alta.

Introducción.- Procedimiento de diseño para pozos que pro-
ducen gas.- Problema de ejemplo para un pozo con baja pro-
ducción de gas.- Problema de ejemplo para un pozo con alta
producción de gas.



CAPITULO I

CONCEPTOS GENERALES

I.1.- Fundamentos de flujo de fluidos.-

Peso específico: Peso de una unidad de volumen

$$\gamma \text{ (lb/pies}^3\text{); (gr/cm}^3\text{)}$$

Densidad.- Masa contenida en una unidad de volumen

$$\rho \text{ (grm/cm}^3\text{); (lbm/pies}^3\text{)}$$

$$\gamma = \rho g \text{ donde: } g \text{ (cm/seg}^2\text{)}$$

Densidad Específica.- Relación del peso de un volumen dado de una sustancia entre el peso del mismo volumen de agua a 60°F (Adimensional)

$$\text{Sp. Gr.} = \frac{141.5}{131.5 + \text{°API}}$$

PRESION, CARGA Y GRADIENTE DE PRESION.-

Presión y carga representan los mismos valores en diferentes unidades y se relacionan por la expresión;

$$\text{Carga} = \frac{K \times \text{presión}}{\text{Sp. Gr.}}$$

K = Ctte. de proporcionalidad

Si	presión (lb/pb ²)	y	Carga (pies)	K = 2.31
	(kg/cm ²)	y	(m)	K = 10

Gradiente es la presión que ejerce una columna de líquido de altura unitaria

$$\text{Grad.} = \frac{\text{Sp. Gr.}}{K}$$

Número de Reynolds.-

La resistencia a fluir de un fluido se relaciona a un número conocido como número de Reynolds N_{Re}

$$N_{Re} = \frac{\rho v d}{\mu}$$

ρ = densidad del fluido Unidades consistentes

v = velocidad del fluido

μ = viscosidad del fluido

d = diámetro del conducto

Si N_{Re} es aproximadamente inferior a 2000 el flujo es laminar, o bien es turbulento a un N_{Re} mayor de 4000

I.2.- Fundamentos de las bombas centrífugas

CARGA TEORICA DESARROLLADA POR UN IMPULSOR.-

Un impulsor, operando a una velocidad dada, generará la misma cantidad de carga independientemente de la densidad específica (SP.GR.) - del fluido, ya que la carga se expresa en términos de altura de esa columna de fluido en particular.

CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA.-

La prueba práctica de una bomba se realiza 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 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. (Fig. I.1)

En resumen, un concepto muy importante es que la carga en lb/pg^2 desarrollada por una bomba centrífuga sumergible depende de la velocidad periférica del impulsor y es independiente del peso del líquido bombeado. La carga desarrollada convertida a pies será la misma, ya sea que la bomba esté manejando agua (Sp.Gr. = 1), aceite (Sp.Gr. = 0.85), salmuera (Sp.Gr. = 1.35) o cualquier otro fluido de diferente densidad específica.

La lectura de presión en un manómetro a la descarga de la bomba será diferente aunque el diámetro del impulsor y velocidad sean idénticas en cada caso.

Las figuras (I.2) y (I.3) muestran la relación de bombas idénticas manejando líquidos de diferentes densidades específicas.

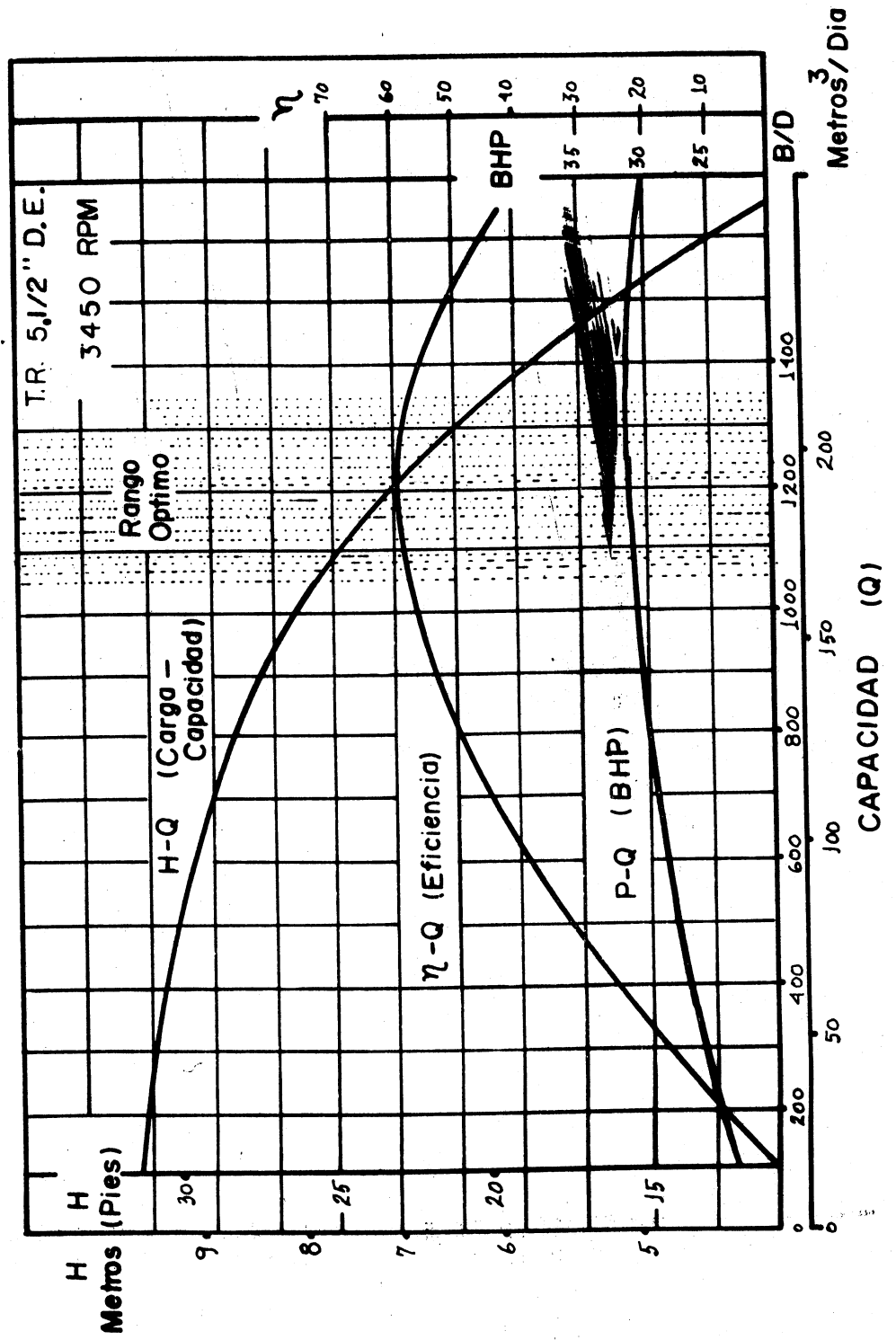
I.3.- Efecto de algunos parámetros en el comportamiento de la bomba.-

Condiciones de operación y su efecto en el comportamiento de la bomba:

Las curvas publicadas de comportamiento de la bomba (Fig. I.1), están referidas a una velocidad en revoluciones por minuto (RPM) fija, en agua dulce de Sp.Gr. = 1 y $\mu = 1$ cp. Sin embargo, las bombas se usan en

FIGURA I.1

CURVAS CARACTERISTICAS DE BOMBAS CENTRIFUGAS



$$\text{PRESION} = \frac{\text{CARGA X SP. GR.}}{K}$$

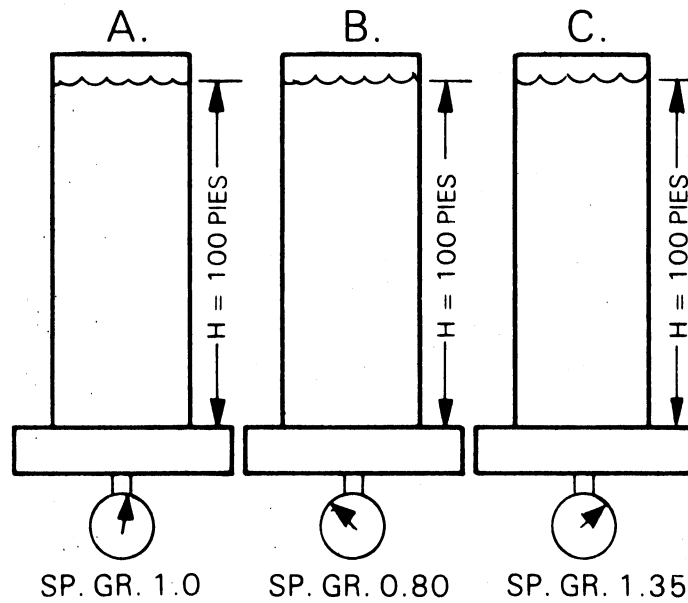


FIG. 1.2.- LOS TRES CILINDROS CONTIENEN 100 PIES DE COLUMNA DE LIQUIDO CON DIFERENTES DENSIDADES ESPECIFICAS. COMO RESULTADO LA PRESION EN EL FONDO DE CADA CILINDRO ES DIFERENTE.

FIG. 3

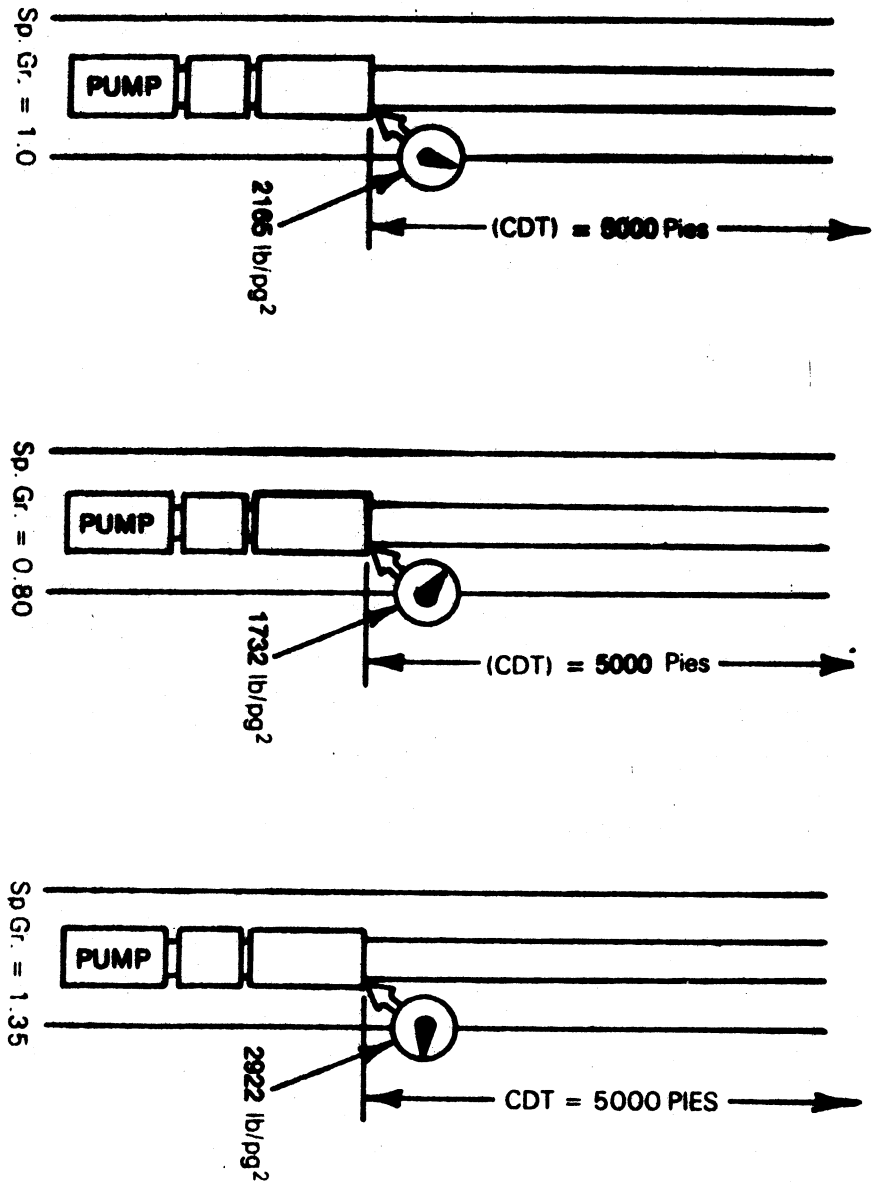
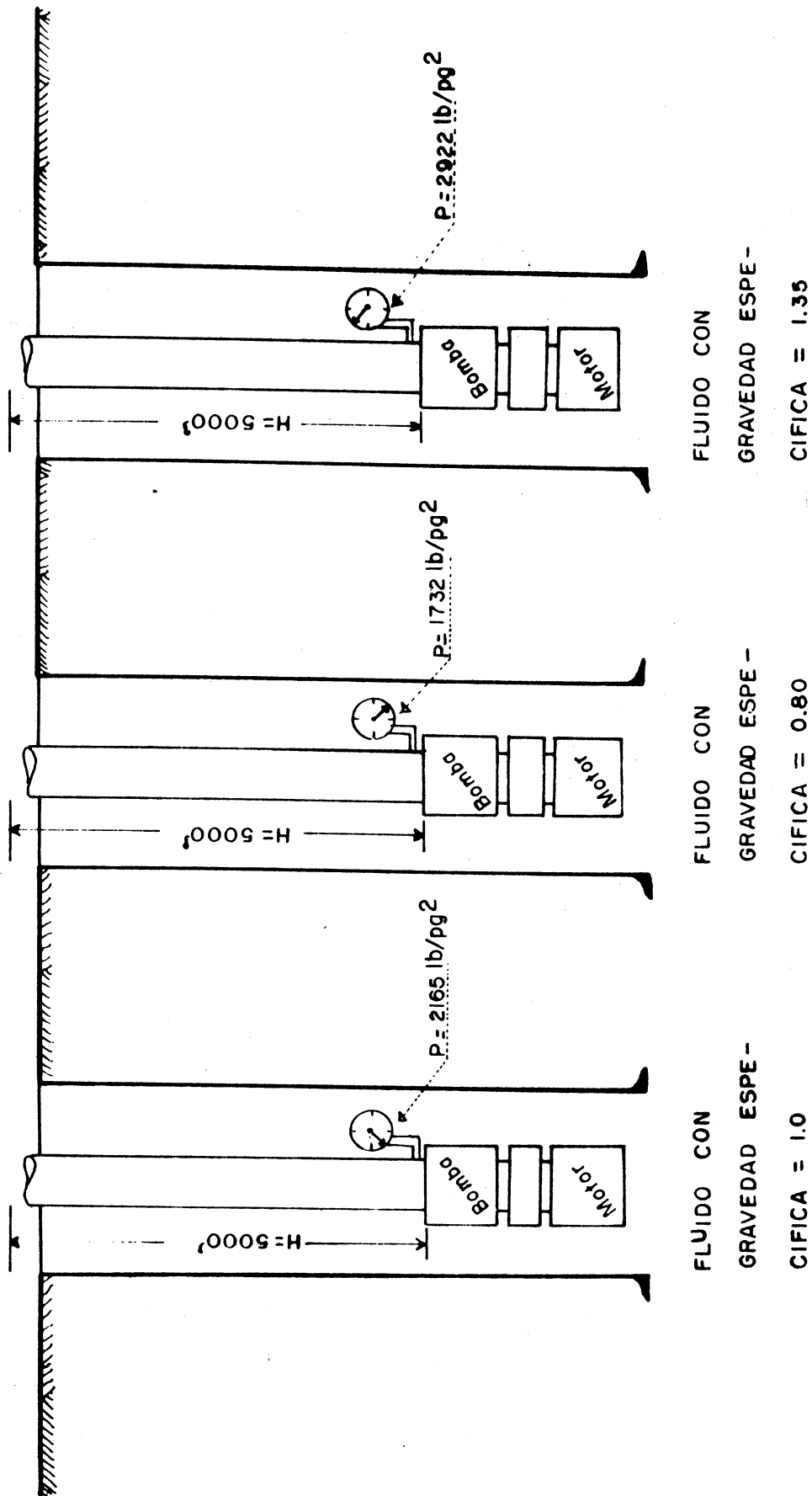


Fig. 1.3.- Se muestran tres bombas idénticas trabajando a la misma velocidad y manejando líquidos con diferentes densidades específicas. La carga dinámica total (CDT) desarrollada es igual en los tres casos, pero la presión de descarga de cada bomba es diferente.

FIGURA No. 1.3

EFFECTOS DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA DEL FLUIDO EN LA RELACION PRESION-
CARGA DE LA BOMBA.



la práctica, para bombear líquidos de Sp. Gr. y μ diferentes y pueden operar a diferentes RPM. En estos casos es necesario predecir el comportamiento de la bomba bajo condiciones reales de operación:

a).- Efecto del cambio de velocidad en las curvas de comportamiento.

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 específica.- (Sp.Gr.)

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

c).- Efecto de cambios de diámetro de impulsor.-

La capacidad varía directamente con el diámetro, la carga varía directamente con el cuadrado del diámetro y la potencia varía con el cubo del diámetro. La eficiencia de la bomba no cambia.

Cavitación.-

Si la presión absoluta del líquido en cualquier parte dentro de la bomba cae abajo 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 mas 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 a la intensa vibración.

La cavitación también tiene un efecto significativo en el comportamiento de la bomba: Su capacidad y eficiencia se reducen.



CAPITULO II

DESCRIPCION DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTRICO

COMPONENTES DEL EQUIPO SUBSUPERFICIAL

BOMBA SUMERGIBLE.-

Existen diferentes diseños para aplicaciones particulares y cada uno tiene sus propias ventajas, desventajas y limitaciones. Las bombas centrífugas son de múltiples etapas (Fig. II.1) y cada etapa consiste de un impulsor giratorio y un difusor estacionario (Fig. II.2). El tipo de etapa que se use determina el volumen de fluido que va a producirse y el número de etapas determina la carga generada y la potencia requerida. En una bomba de impulsores flotantes, éstos se mueven axialmente a lo largo de la flecha y pueden descansar en empuje ascendente o descendente en cojinetes, cuando están en operación. Estos empujes los absorbe un cojinete en la sección sellante.

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 punto de operación de la bomba. Una bomba operando 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 operar dentro de un rango de capacidad recomendado, el cual se indica en las curvas de comportamiento de las bombas y que van del 75 al 125% del punto de mayor eficiencia de la bomba.

PROTECTOR O SECCION SELLANTE.

El protector en general ejecuta cuatro funciones básicas (Fig. II.3 y II.3a):

- 1).- Conecta las carcasas de la bomba y el motor conectando 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 entrada de fluido del pozo al motor.
- 4).- Proporciona un recipiente de aceite para compensar la expansión y contracción del aceite del motor debido al calentamiento y enfriamiento del motor cuando la unidad trabaja o se para.

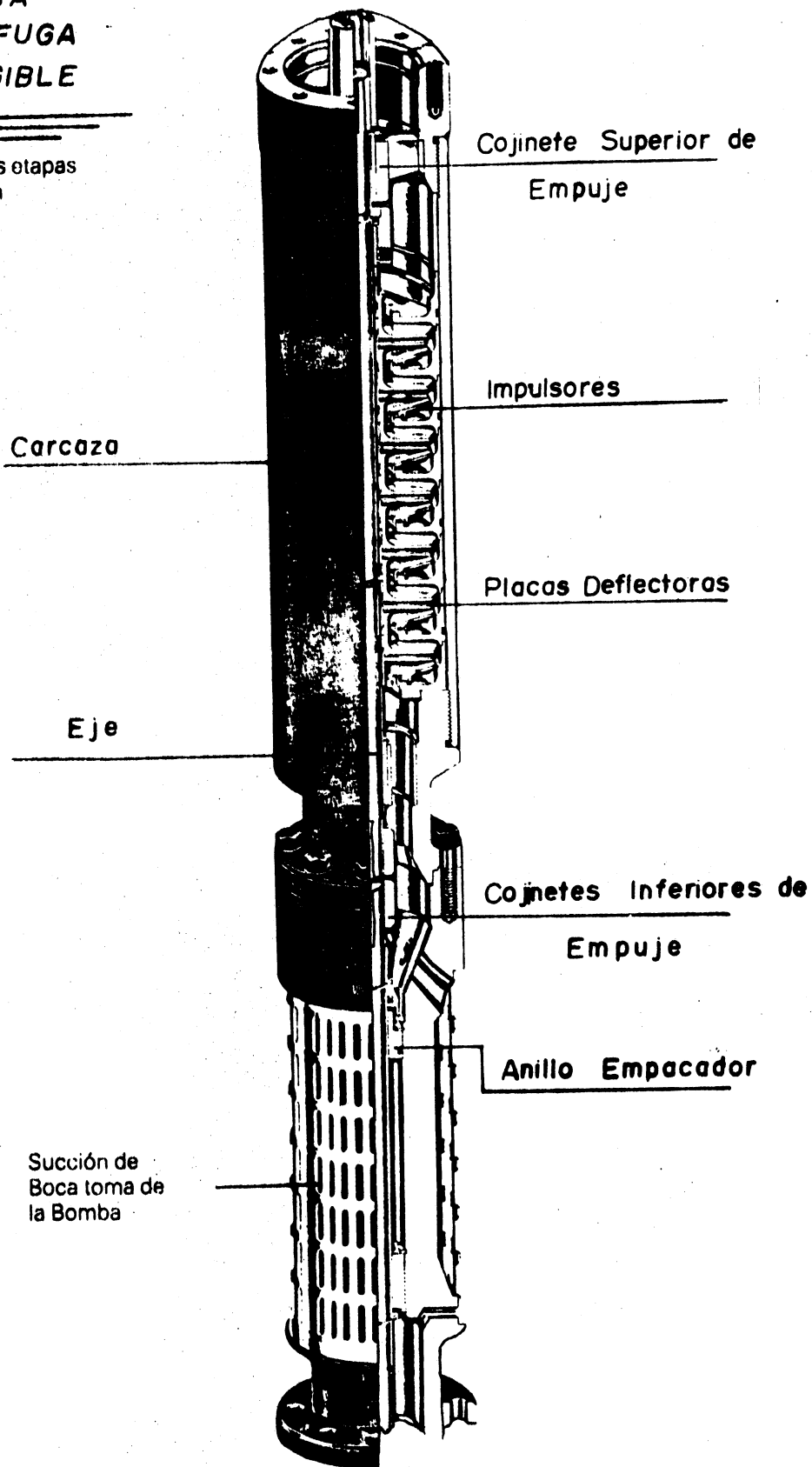
MOTOR SUMERGIBLE (Fig. II.4).-

El motor es la fuerza impulsora que hace girar a la bomba. Los motores eléctricos usados en operaciones de bombeo eléctrico son bipolares, trifásicos, del tipo jaula de ardilla de inducción y operan a una velocidad relativamente constante de 3500 rpm a 60 cps. Los motores se llenan

FIGURA No. II.-1

**BOMBA
CENTRIFUGA
SUMERGIBLE**

De múltiples etapas
con succión
estandar



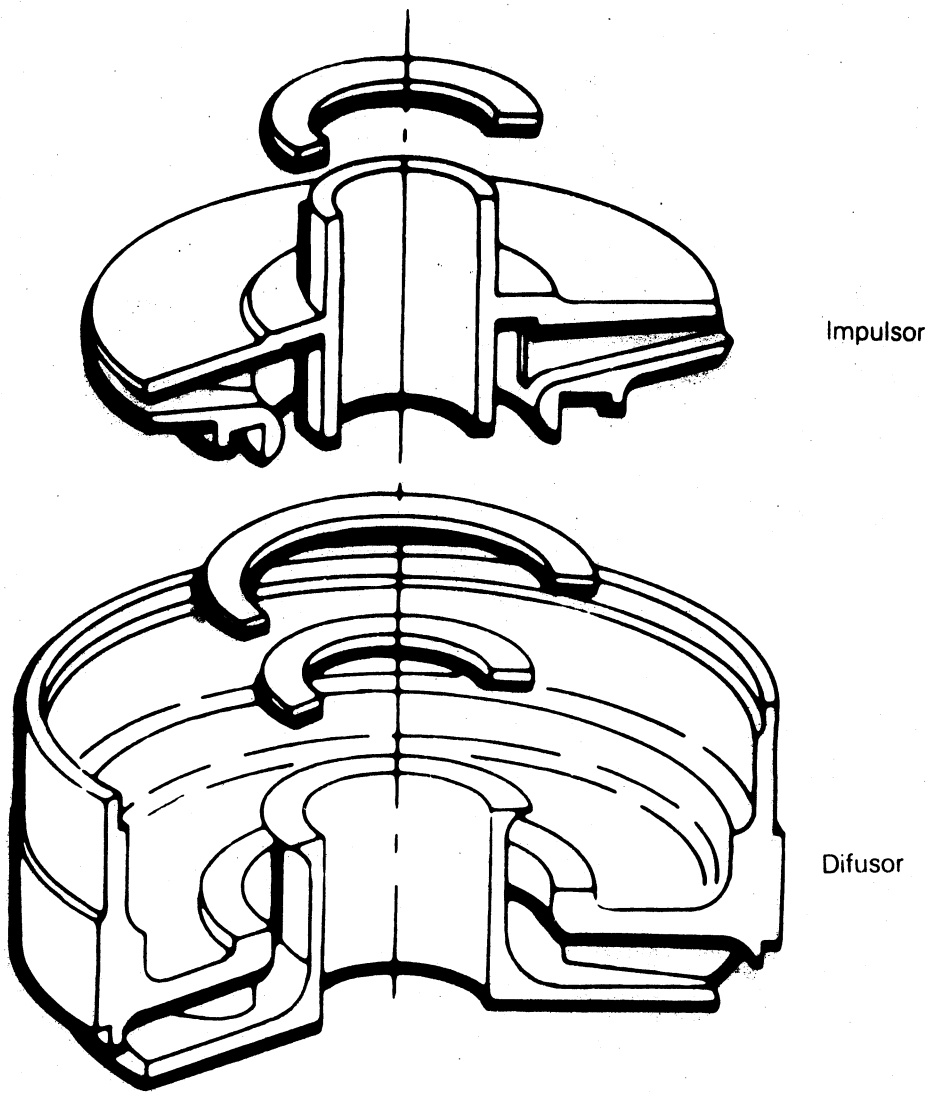


Fig. II.2.- Impulsor giratorio y difusor estacionario que componen una etapa de la bomba.

FIGURA No. II.-3

PROTECTOR DEL
MOTOR

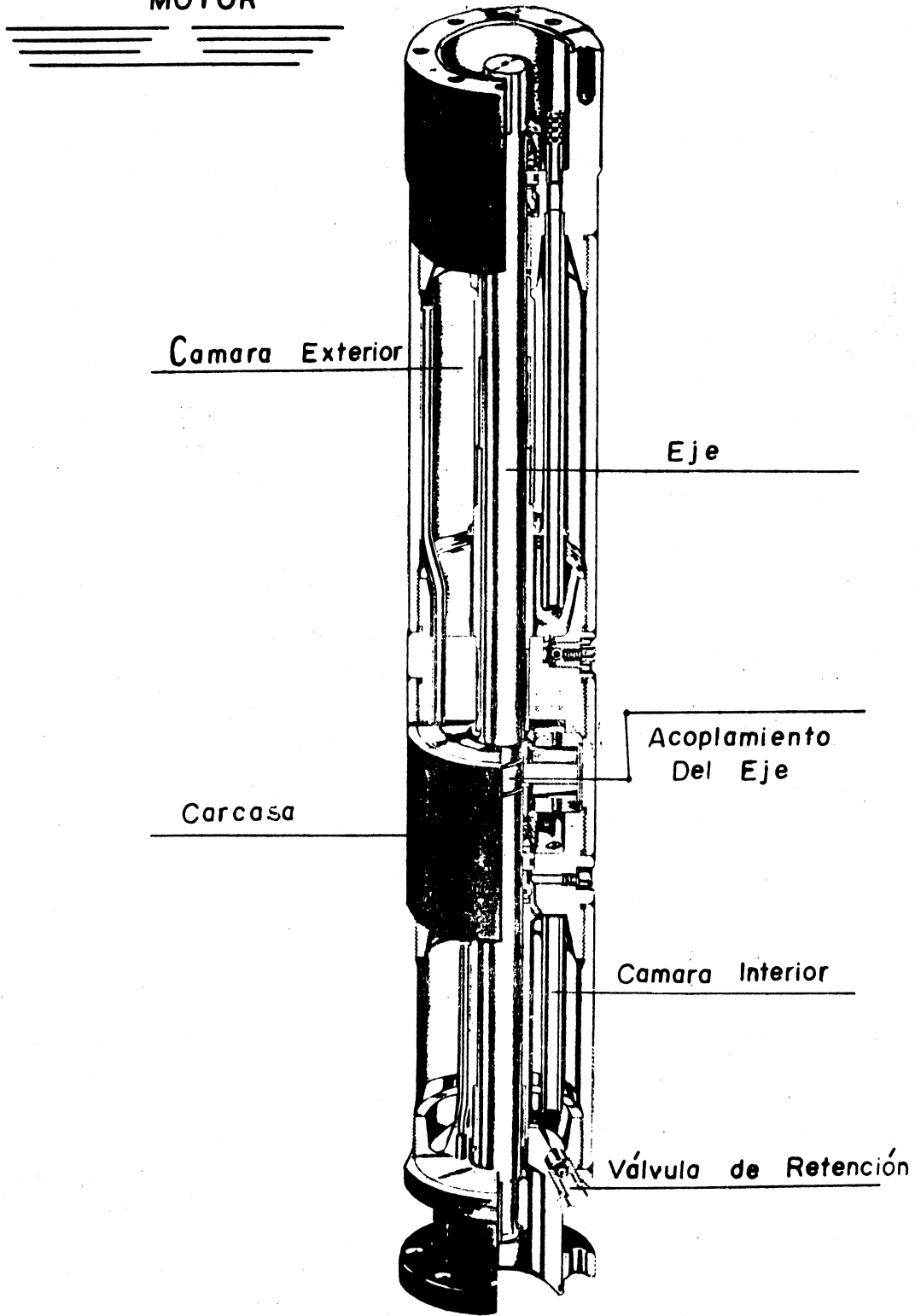
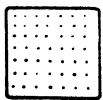
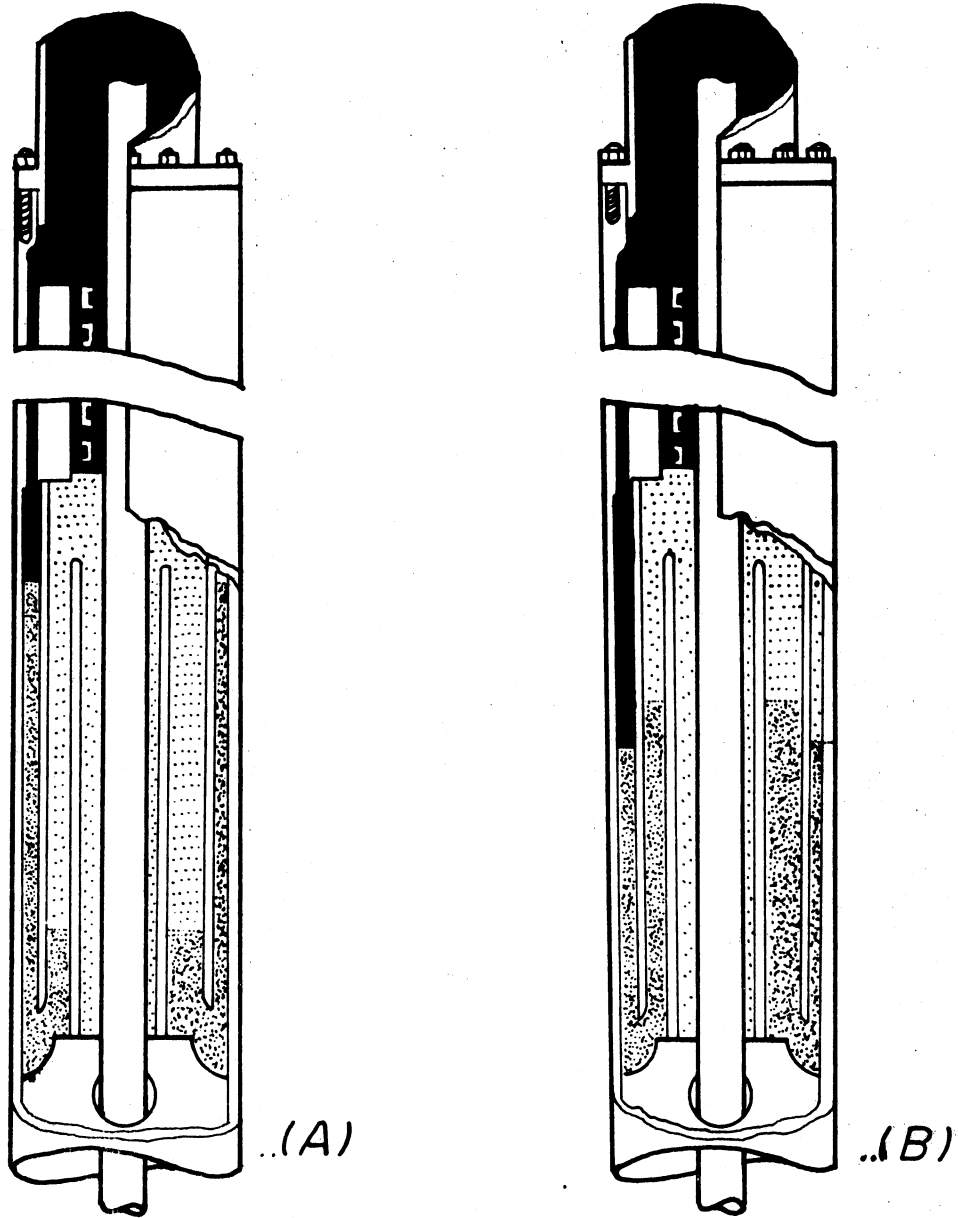


FIGURA No. II.-3a



ACEITE DEL MOTOR



FLUIDO BLOQUEANTE



FLUIDO DEL POZO

con un aceite mineral altamente refinado que debe proporcionar resistencia dieléctrica, lubricación a los cojinetes y buena conductividad térmica.

El cojinete de empuje del motor soporta la carga de los rotores del motor. El aceite no conductor en la carcasa del motor lubrica los cojinetes y transfiere el calor generado en el motor a la carcasa.

El calor de la carcasa a su vez es transferido a los fluidos del pozo que pasan por la superficie externa del motor; por lo tanto, el motor de la unidad de bombeo nunca se coloca abajo del punto de entrada de fluido.

La profundidad de colocación es un factor determinante en la selección del voltaje del motor debido a las pérdidas de voltaje en el cable. Cuando la pérdida de voltaje es demasiado grande, se requiere un motor de más alto voltaje y menor amperaje. En pozos muy profundos, la economía es un factor: Con un motor de más alto voltaje es posible usar un cable más pequeño y más barato. Sin embargo, un tablero de control de más alto voltaje y más caro, puede requerirse.

La potencia del motor se calcula multiplicando la máxima potencia por etapa (obtenida de las curvas de la bomba) por el número de etapas de la bomba y corrigiendo con la densidad específica del fluido bombeado.

Los requerimientos de amperaje pueden variar desde 12 a 130 amps. La potencia requerida se logra con incrementos de longitud de la sección del motor. El motor está construido con rotores generalmente de 12 a 18 pg. que se montan en la flecha y con estatores (bobinas) montadas en la carcasa de acero del motor.

El motor sencillo más largo es de aproximadamente 30 pies y alcanza de 200 a 250 HP, mientras que motores en tandem pueden tener 100 pies de largo y alcanzar 1000 HP.

SEPARADOR DE GAS (Fig. II.5 y II.5a.)

El separador es una sección normalmente colocada entre el protector y la bomba y sirve como succión o entrada a la bomba. Separa el gas libre del fluido y lo desvía de la succión de la bomba. El separador puede ser efectivo pero es difícil determinar su eficiencia con exactitud.

La eliminación del gas no es necesariamente la forma óptima de bombear el pozo. Es decir, aunque el volumen total en la succión de la bomba se reduce, la presión de descarga se incrementa debido a la menor cantidad de gas en la columna de fluidos por arriba de la bomba.

El separador es una ayuda en la prevención del candado de gas y normalmente permite un bombeo más eficiente en pozos gasificados.

CABLES.-

La potencia se suministra al motor por medio de un cable eléctrico. Un rango de tamaños de conductor permite cubrir los requerimientos del motor. Existentes en estilo redondo (Fig. II.6) y plano (Fig. II.7). y con

FIGURA No. II.-4

MOTOR ELECTRICO SUMERGIBLE

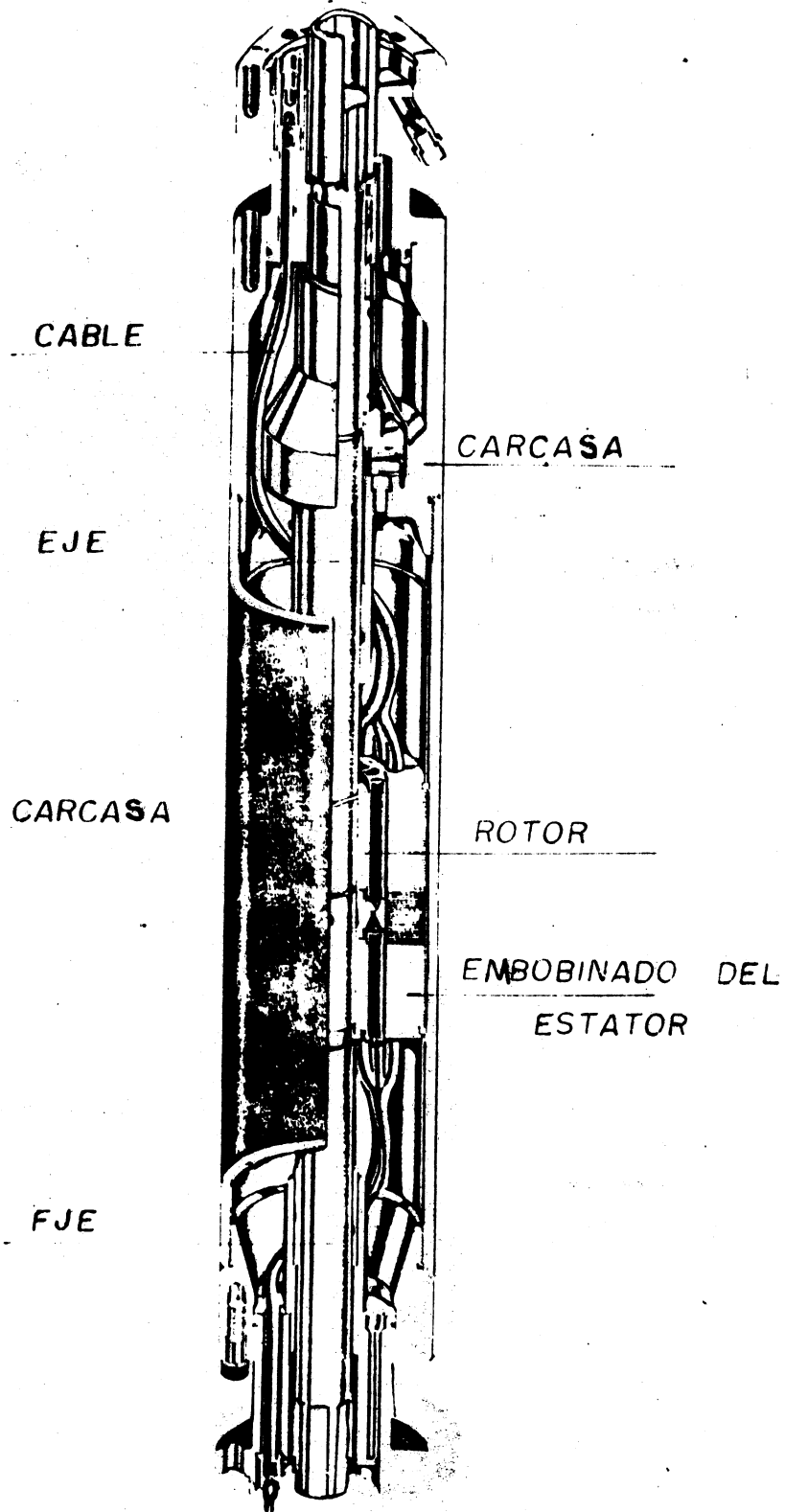


FIGURA No. II.5

**SEPARADOR DE
GAS**

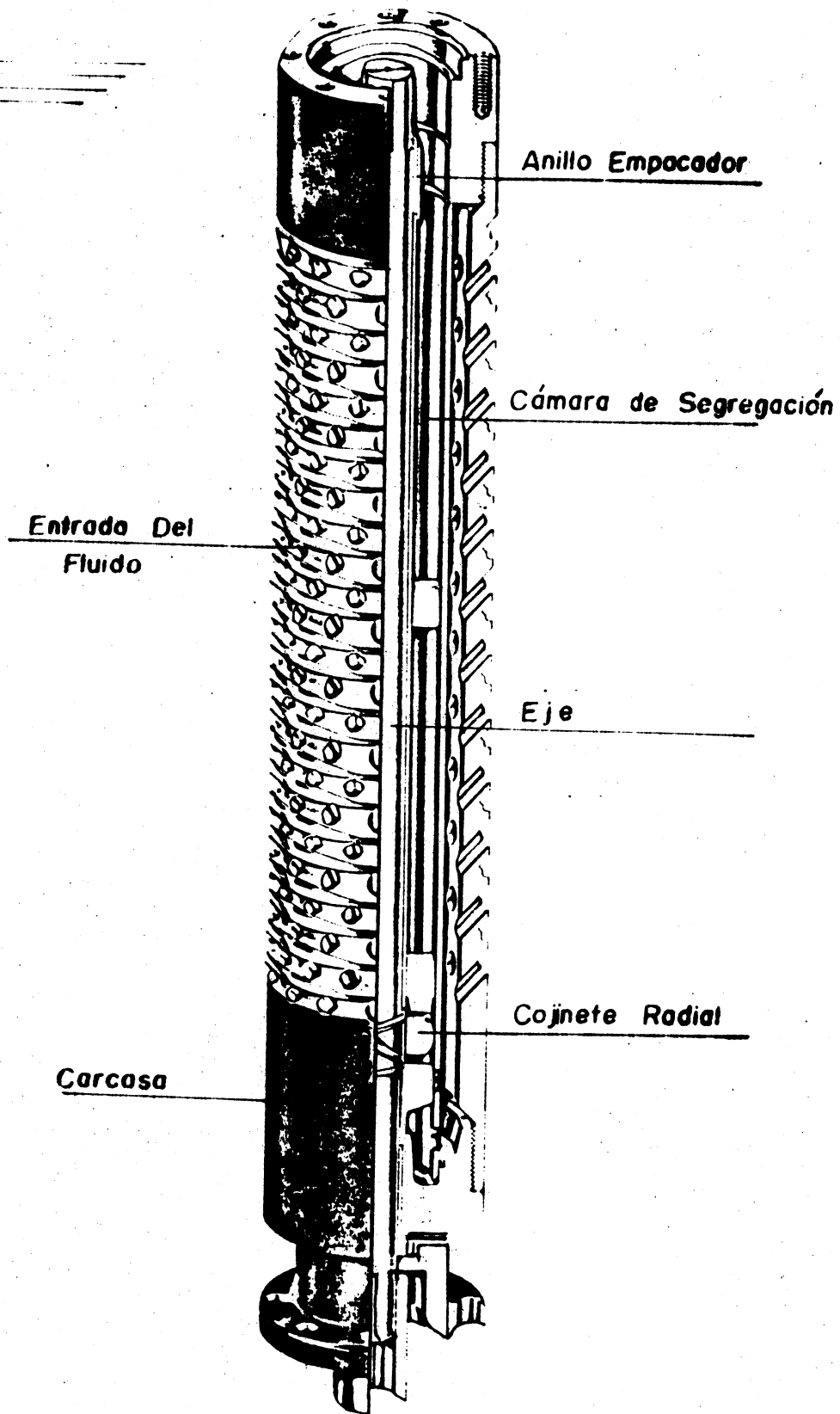
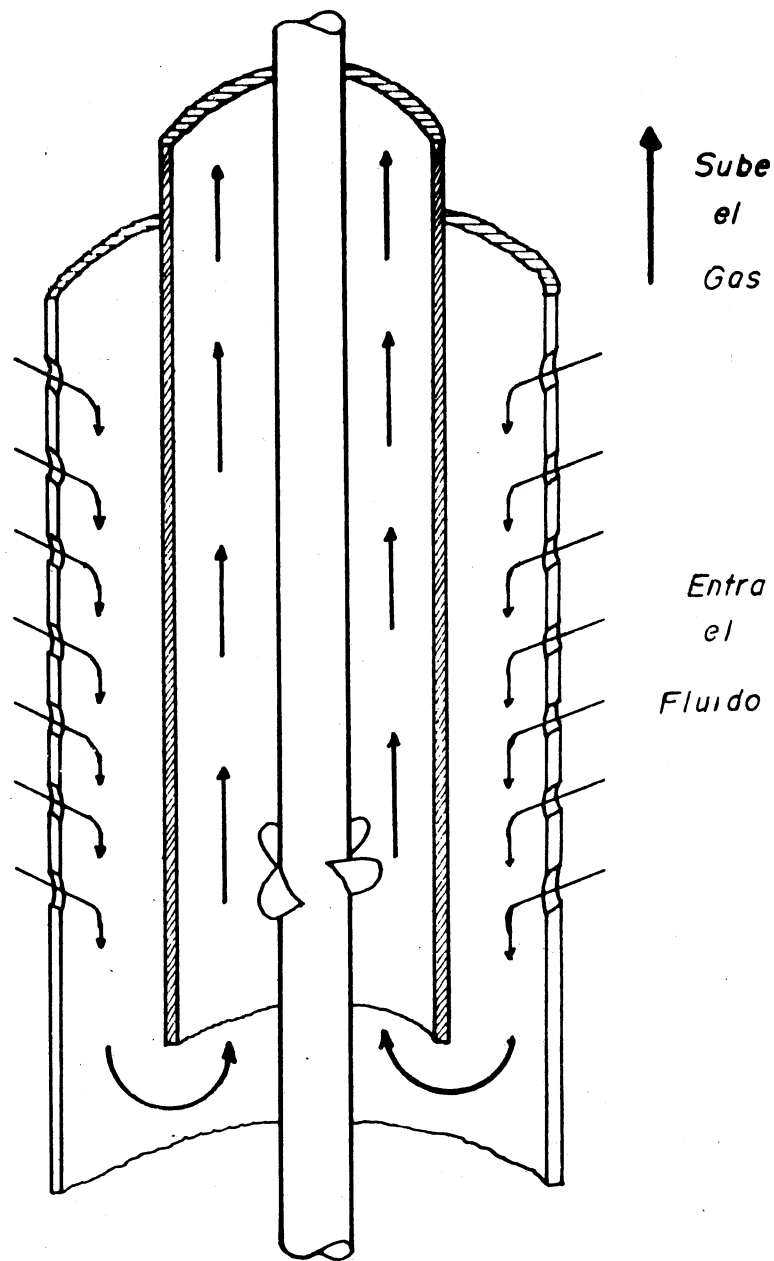


FIGURA No. II.-5a.



SEPARADOR DE GAS

aislamientos los cables pueden instalarse en pozos con temperaturas superiores a 300°F (148°C). Dependiendo de las condiciones del pozo el cable puede tener armadura de acero, bronce o monel.

Existen en el mercado los cables planos y redondos con conductores de tamaño del 2 al 6 en cobre o aluminio. El tamaño apropiado del cable lo determina el amperaje, la caída de voltaje y el espacio disponible entre la tubería de revestimiento y la tubería de producción. El mejor tipo de cable se selecciona en base a la temperatura de fondo y los fluidos encontrados.

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

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

Agrandar la sección transversal de un alambre, 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 fem (fuerza electromotriz) dada ya que se moverán más electrones por unidad de tiempo, en otras palabras "La resistencia es inversamente proporcional al área de la sección transversal".

CABLE (Sumergible).-

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 es a lo largo del conductor existe una pequeña corriente que pasa a través del aislamiento (fuga de corriente) (Fig. II.-8) de un conductor a otro. Esta fuga se considera despreciable.

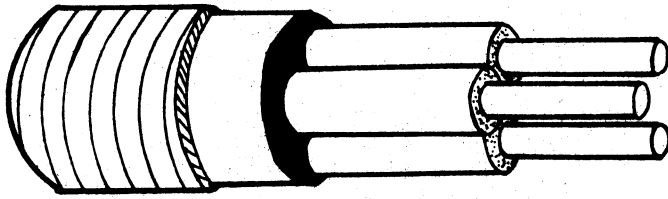
El aislamiento de los cables debe resistir las temperaturas y presiones del agujero. Sin embargo, existen limitaciones para los cables usados actualmente debido a las limitaciones de los materiales utilizados en su construcción. Los cables estándar tienen en general 10 años de vida a una temperatura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

TABLERO DE CONTROL (Fig. II.9):

Los tableros de control estándar son a prueba de agua y están disponibles en varios tamaños acompañados de accesorios para ajustarse a cualquier instalación de bombeo. Los hay desde unidades muy simples con un botón magnético y protección de sobrecarga hasta muy complejos, ensamblados con fusibles de desconexión, amperímetro, protección de baja carga y sobrecarga, luces, relojes para bombeo intermitente, e instrumentos para operación automática o a control remoto.

FIGURA No. II.-6

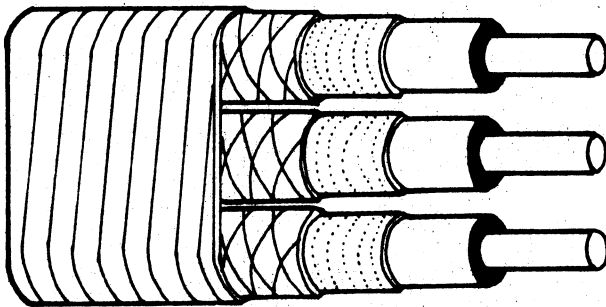
(A)



Cable Redondo

FIGURA No. II.-7

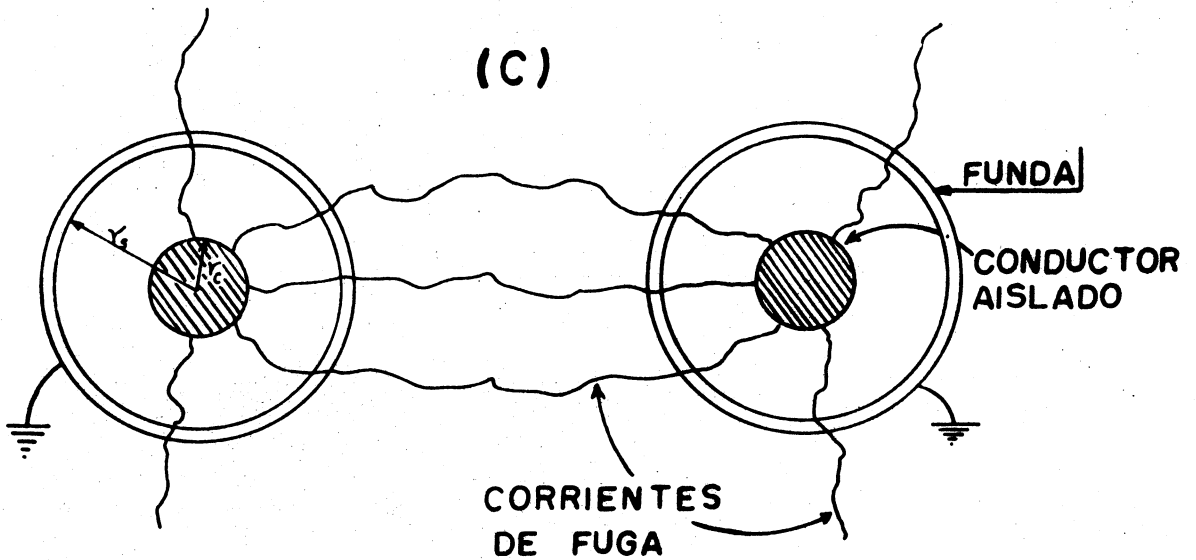
(B)



Cable Plano

FIGURA No. II.-8

(C)



TRANSFORMADORES (Fig. II.9.a):

Conjuntos de tres transformadores de fase única, transformadores estándar trifásicos y autotransformadores trifásicos se fabrican para uso en bombeo sumergido. Estas unidades llenas de aceite para autoenfriamiento, están diseñadas para convertir el voltaje de la línea primaria al voltaje requerido por el motor. Están equipados con "taps" para mayor flexibilidad.

CAJA DE UNION.- (Fig. II.10.)

Esta caja se localiza entre el cabezal del pozo y el transformador por razones de seguridad. El gas puede viajar a través del cable superficial hasta el transformador y producir un incendio o explosión. La caja de unión impide este viaje del gas.

TIPOS DE INSTALACIONES.-

- a) Estándard
- b) Cubierta (Shrouded) Suministra enfriamiento al motor instalado
- c) Relevador (Booster) Pozo somero elevador de presión de una línea.
- d) Sistema producción/inyección.
- e) Caverna de almacenamiento
- f) Inyección de zona superior a zona inferior
- g) Producción a través de tubería de revestimiento con la bomba en el extremo inferior.
- h) Sistema suspendido del cable.

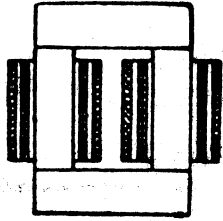
ACCESORIOS.-

- a) Válvula de contrapresión
- b) Válvula de Drene
- c) Centrales
- d) Flejes
- e) Registradores de presión de fondo
- f) Cabezal

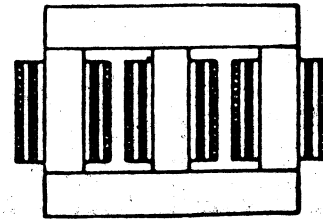
En la Fig. II.11 se muestra la forma en que quedan distribuidas en el pozo y en la superficie todas las partes del equipo anteriormente descritas.

FIGURA No. II.-9a

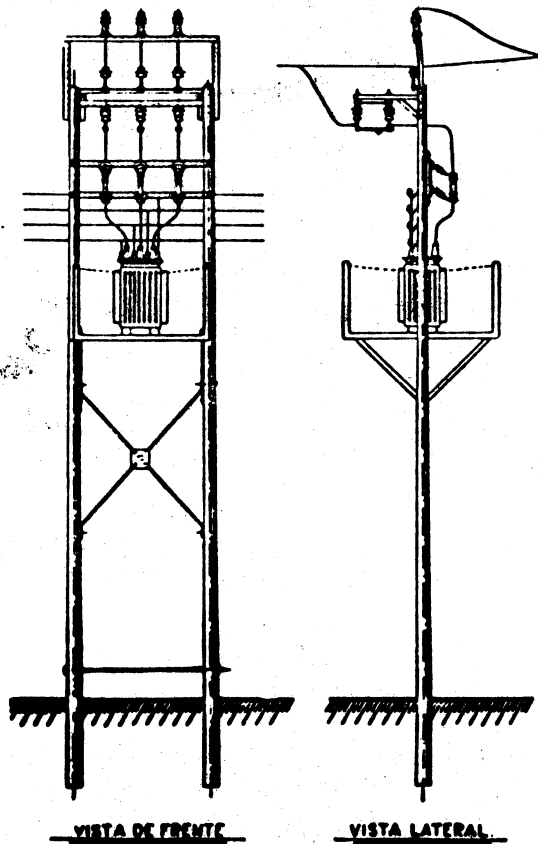
TRANSFORMADOR



Monofásico



Trifásico

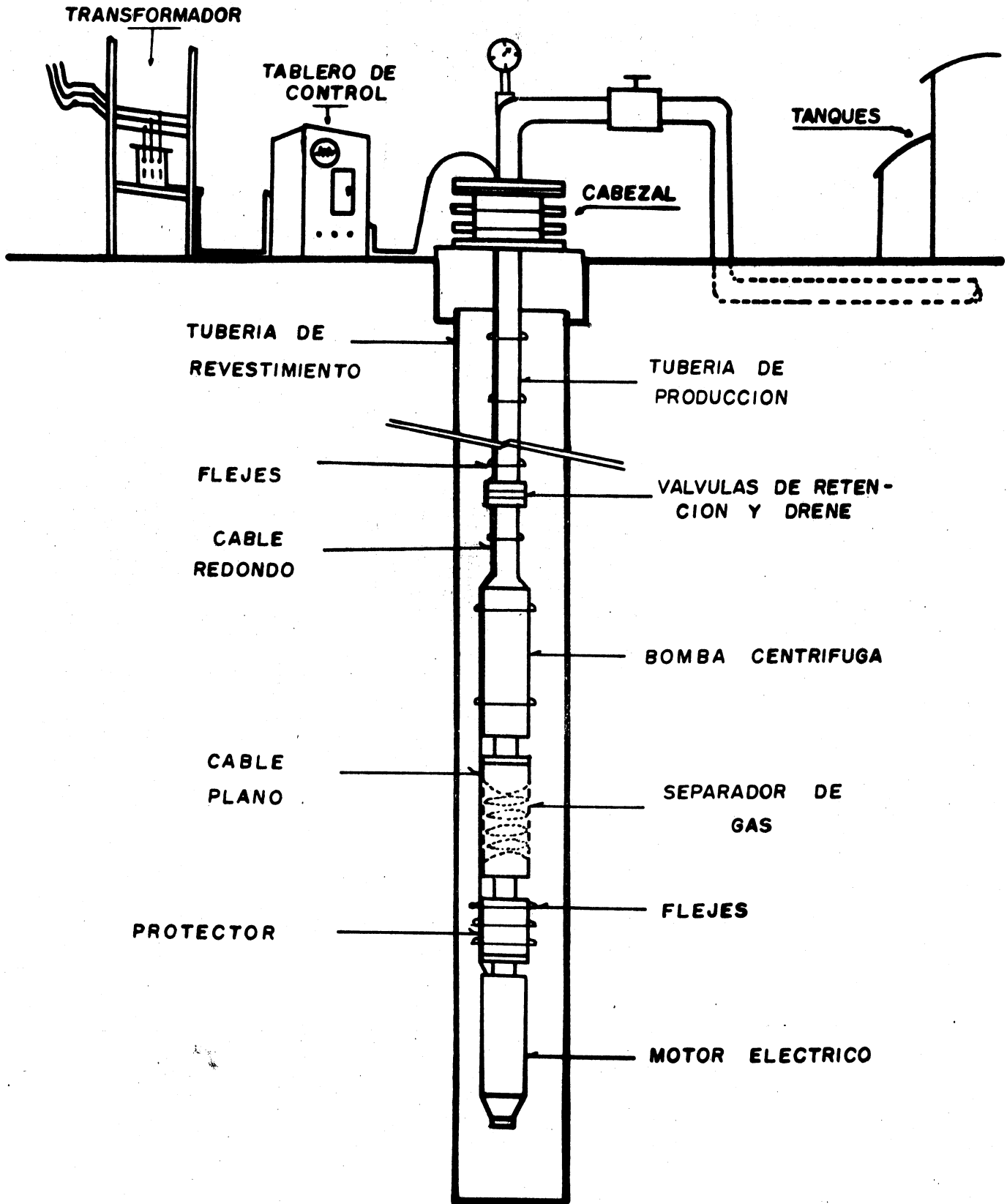


VISTA DE FRENTE

VISTA LATERAL

FIGURA No. II.-11

Distribución de los componentes del aparato de bombeo eléctrico instalado en un pozo.



CAPITULO III

DISEÑO DE INSTALACIONES DE BOMBEO ELECTRICO

INTRODUCCION

El diseño de instalaciones de bombeo eléctrico normalmente requiere de la consideración metódica de varios factores:

- 1).- Es importante que la bomba se seleccione para el gasto deseado de producción. Cada bomba tiene su propio rango de gasto sobre el que es más eficiente y está menos sujeta al desgaste mecánico. La buena información de la capacidad de flujo del pozo y del yacimiento ayuda a evitar el sobre dimensionamiento de la bomba, lo cual puede resultar en una operación de bombeo intermitente cuando la bomba trabaja en vacío.
- 2).- La bomba debe dimensionarse para producir el incremento de presión necesario para elevar el fluido del pozo a la superficie y mantener la presión requerida en la boca del pozo. En el bombeo centrífugo vertical es importante seleccionar el número correcto de etapas. Nuevamente la información de comportamiento de flujo es útil.
- 3).- El tamaño del motor puede seleccionarse para el flujo y carga adecuados junto con la eficiencia de la etapa de bomba seleccionada.

El comportamiento de la bomba y requerimientos del motor también se ven afectados por las características de la mezcla de fluido que se bombea de un pozo en particular. Por lo tanto, deben considerarse: densidad y viscosidad del fluido, contenido de gas, corrosividad y abrasividad.

FACTORES QUE AFECTAN EL DISEÑO DE LA BOMBA.

Configuración de flujo.-

El tamaño de la tubería de revestimiento es muy importante ya que controla el diámetro máximo de la bomba y el motor que puede introducirse en el pozo. Generalmente los costos inicial y de operación resultarán menores cuando los diámetros de bomba y motor sean mas grandes.

El tamaño de la tubería de producción depende del gasto a producir y está relacionado con el diámetro de la bomba, es decir, mayor diámetro de bomba, mayor diámetro de tubería de producción.

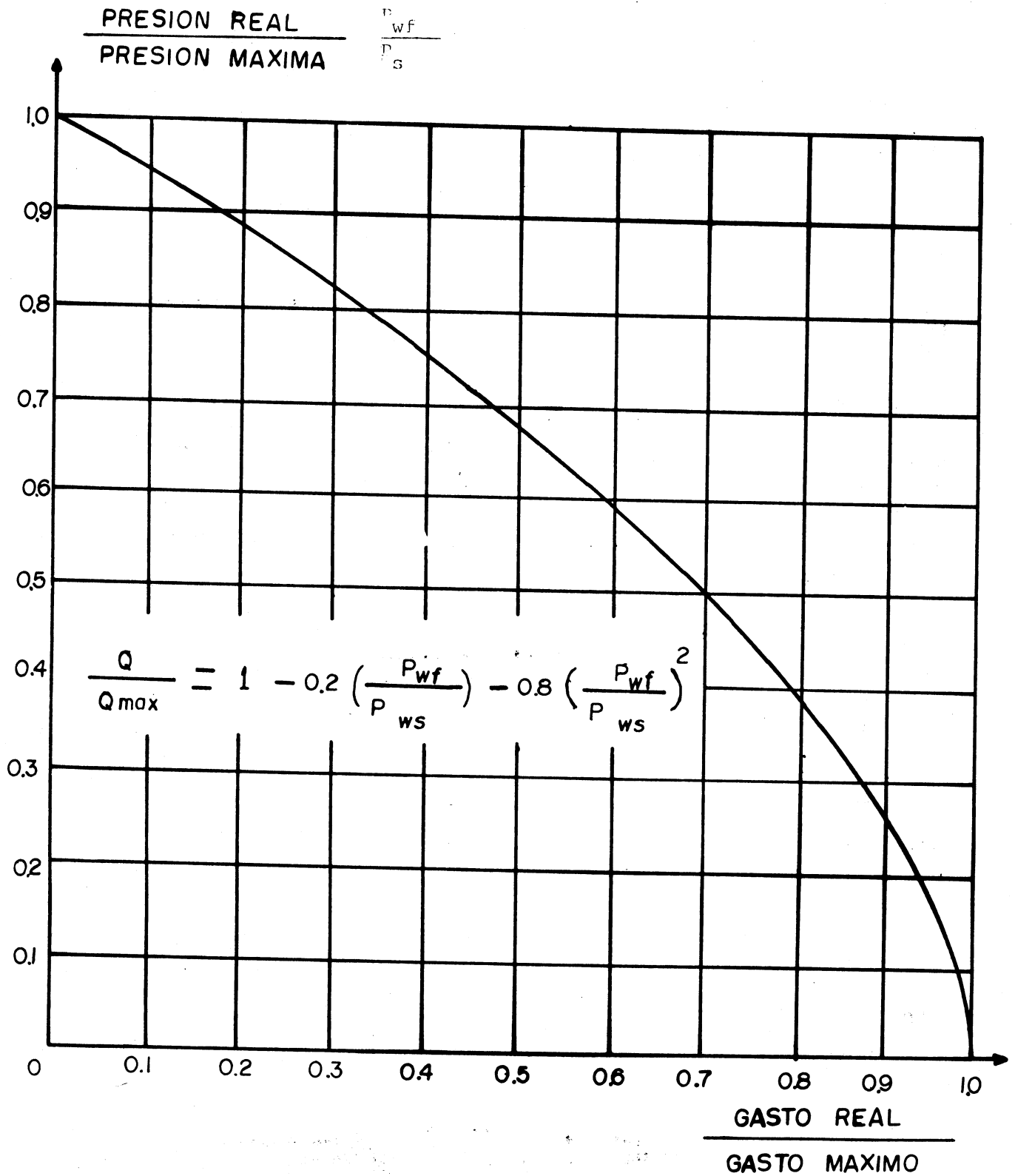
Capacidad de Flujo del pozo.-

Recuérdese que el flujo arriba de la presión de burbujeo conduce a que el pozo probablemente tenga un índice de productividad constante. Esto mismo es verdadero para pozos productores de agua sin gas ya que fluye una sola fase líquida. Para flujo abajo del punto de burbujeo, podemos usar el procedimiento de Vogel (Fig. III.-1) para eficiencia de flujo igual a 1.00 y la extensión de Standing del trabajo de Vogel para eficiencias diferentes de 1.00 (Pozos dañados o mejorados).

FIGURA No. III.1

Curva general de IPR (Comportamiento de flujo al pozo)

CURVA DE J. V. VOGEL (J.P.T., Jan 1968)



Si se conoce la capacidad de flujo, se puede diseñar una bomba para el máximo gasto o cualquier gasto deseado. Esto asegura que la bomba opere cerca de la máxima eficiencia.

En muchos casos la bomba podría llegar a bombear en vacío, es decir, si la capacidad de la bomba excede la capacidad de aportación del pozo. Sin embargo, debe tenerse cuidado de asegurar que no se bombee en vacío.

La mayoría de las bombas sumergibles operan apropiadamente con 220 lb/pg², o menos, de presión en la succión de la bomba si el fluido que se bombea es líquido. Sin embargo, si existe gas libre en las proximidades de la succión, la pregunta no es acerca de la mínima presión de succión, sino cuánto gas libre es capaz de manejar la bomba en particular, sin caer en el candado de gas y/o cuánto gas puede separarse de manera que la bomba pueda manejar el gas que no se separa.

Se bombea o no Gas.-

Como regla general, la mayoría de las instalaciones bombean la producción por la tubería de producción sin empacador en el pozo. Esto significa que el gas puede ser desviado al espacio anular o pasado a través de la bomba.

Si existe gas en el pozo hay, entre el nivel del fluido y el fondo, un amplio rango de combinaciones de líquido y gas que son significativas para el tamaño y localización de la bomba en el pozo. Es imposible decir que cualquier criterio sea siempre el mejor para seleccionar la bomba y su localización ya que los datos del pozo y yacimiento no siempre son de la misma confiabilidad, las condiciones del yacimiento pueden cambiar con el tiempo y otros factores pueden ser diferentes de un pozo a otro.

Una posibilidad es colocar la bomba de manera que la presión de succión sea superior a la presión de burbujeo. Entonces no hay gas libre en la succión de la bomba y el volumen que la bomba maneja es simplemente la producción a condiciones superficiales multiplicado por el factor de volumen de la formación. Esto puede hacerse únicamente si el punto de presión de burbujeo ocurre arriba del extremo de la sarta de producción.

Otra posibilidad es colocar la bomba de manera que la presión de succión sea inferior a la presión de burbujeo. Esto tiene la ventaja de acortar la longitud de la tubería de producción y del cable, pero la bomba debe manejar un flujo igual al mismo gasto a condiciones superficiales multiplicado por un factor de volumen de la formación ligeramente menor, más el gas libre que pasa a través de la bomba. Conforme la bomba se coloque mas arriba en el pozo la cantidad de gas 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 manejar. El separador de gas construido integralmente con la bomba desvía el gas libre de la succión de la bomba, hacia el espacio anular, donde puede ser purgado a la atmósfera o bien, a instalaciones de recolección de gas.

La bomba y el motor se ven afectados por la cantidad de gas que pasa a través de la bomba. Generalmente el gas tendrá un efecto benéfico en la tubería de producción y reducirá la potencia requerida por el motor, pero la bomba necesitará manejar un gasto mayor. La capacidad de la bomba se afecta grandemente por la relación gas libre-líquido que debe manejar. Cuanto más gas esté en solución la bomba se comportará normalmente, es decir, como si bombeara un líquido de baja densidad y así continuará hasta que la relación gas libre líquido alcance aproximadamente 0.1. Arriba de esta cantidad la bomba empezará a producir una carga menor que la normal y conforme el gas libre se incrementa, eventualmente caerá en el candado de gas y dejará de bombear cantidades apreciables de fluido.

Separación de gas.-

Un problema sin resolver que actualmente se tiene en el bombeo eléctrico es, como determinar el volumen de gas que es posible separar. Antiguamente, el gas podía descargarse a la atmósfera pero actualmente es una práctica prohibida. La tubería de revestimiento puede unirse a la línea de flujo para permitir que el gas separado, entre a dicha línea cerca de la cabeza del pozo.

Debe tenerse cuidado de colocar la bomba sumergida una cierta profundidad en el líquido. Sería una situación obscura decir que se puede separar de 15 a 25% del gas libre.

Pozos Desviados.

Las bombas sumergibles están diseñadas para operar generalmente en una posición vertical. Sin embargo, pueden operar en pozos desviados. La bomba en si misma, operará en posición aproximadamente vertical cuando sea necesario. El límite de desviación de la vertical se determina frecuentemente por la capacidad de la unidad para mantener la separación entre el aceite del motor y el fluido del pozo, lo cual incumbe al fabricante. Para unidades diseñadas con una barrera flexible entre el aceite del motor y el fluido del pozo, el límite de desviación cambia.

Empacadores.

La forma preferente de instalar una bomba eléctrica sumergible es sin empacador de manera que queda colgando de la tubería de producción. Puede instalarse un empacador, pero significa una instalación especial ya que el cable de potencia al motor debe pasar a través del empacador. Si éste se requiere en el pozo, su selección se hará cuidadosamente de modo que la bomba tenga sobre sí muy poco o nada de peso a compresión. Un empacador permanente utilizando sellos de tipo largo trabajaría satisfactoriamente, teniendo en mente que la tubería de producción se alarga cuando la bomba empieza a mover grandes volúmenes de líquidos calientes y ejercerá una compresión sobre la bomba si no se hacen los ajustes necesarios.

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.

Efectos Viscosos.

La viscosidad afecta el comportamiento de las bombas centrífugas disminuyendo la curva de capacidad de carga, reduciendo la eficiencia y haciendo que la más alta eficiencia ocurra a un gasto menor. Para cualquier bomba el efecto en la carga producida es mayor a más altos gastos y menor a bajos gastos.

Ya que las curvas publicadas de comportamiento de las bombas están basadas en pruebas en las que el agua es el fluido, es necesario ajustar las curvas para fluidos de más alta viscosidad. La cantidad de ajuste varía entre bombas. Aquéllas con pasajes de flujo más pequeño generalmente se afectarán más por la viscosidad alta.

Temperatura.-

La temperatura de fondo es importante para la instalación de bombas eléctricas sumergibles. Es necesario conocer la temperatura a la que el motor va a operar. También en la selección del cable uno de los factores de control es la temperatura.

Aunque la bomba no puede colocarse en el fondo, un alto ritmo de producción moverá a los fluidos rápidamente hacia la tubería de producción, acarreado a la bomba una temperatura mucho más alta que la existente bajo condiciones estáticas. La temperatura más alta en la bomba acorta la vida del motor. Por ejemplo por cada 18°F de aumento de temperatura por arriba del rango del aislamiento del motor, la vida de éste se reduce en un medio. Los cables disponibles que operarán existosamente a 350°F o más, serán más costosos conforme la temperatura sea mayor.

La temperatura también debe conocerse para determinar el volumen total de entrada especialmente para manejo de gas.

Operación vs Condiciones de descarga.

En la selección final de la potencia del motor, los requerimientos en HP de operación pueden ser menores que los requerimientos en HP de descarga. Sin embargo, el ritmo de descarga puede disminuir a un valor mucho menor que el ritmo de operación para propósitos de descarga. Habrá casos cuando un pozo ha sido cargado con salmuera y la potencia requerida para operación puede ser mucho menor que la potencia requerida para descarga. Puede ser necesario promediar entre los dos requerimientos de HP teniendo en mente que el motor puede sobre cargarse cuando mucho 20% por un período corto de tiempo, necesario para descargar el pozo. Esto siempre se verificará al finalizar el diseño para asegurar que el pozo se descargará.

DETALLE DEL DISEÑO DE INSTALACIONES.

Introduccion.

Existen procedimientos de diseño para dos tipos de pozos:

1).- Pozos que no producen gas y

2).- Pozos que producen gas

Si no hay gas en el pozo, los cálculos para seleccionar el equipo de bombeo son relativamente cortos y simples. La cantidad de carga que la bomba debe producir es simplemente la suma de los pies de carga requeridos para elevar el líquido a la superficie, más la fricción en la tubería de producción y la presión necesaria en la cabeza del pozo a lo que se le resta la presión producida por el fluido sobre la succión de la bomba. Así de simples son los cálculos debido a que la densidad específica del fluido es, para propósitos prácticos, la misma a través del pozo, por lo tanto, la conversión entre presión en lb/pg^2 y presión en pies de carga es la misma en todos los puntos del interior del pozo.

Sin embargo, si el pozo es productor de gas el problema es mucho más complicado. Ya que la presión y temperatura no son iguales en ningún punto del interior del pozo, el volumen de gas tampoco es el mismo y su proporción en la mezcla de la que está siendo liberado no es igual. Esto resulta en un cambio constante de densidad conforme la mezcla de fluido y gas pasa a través de las perforaciones, a la bomba y hacia la superficie a través de la tubería de producción.

No existe una conversión constante entre la presión (en lb/pg^2) y la presión (en pies) de carga; por lo tanto es necesario hacer cálculos en pequeños intervalos a lo largo de la columna de flujo, desde el yacimiento hasta la superficie. La presión que la bomba debe producir es igual a la sumatoria de las cargas calculadas para cada intervalo. Ya que dichos cálculos son laboriosos y relativamente complejos, deben estar programados para resolverse con computadora. El uso de esos programas es probablemente la única forma práctica de seleccionar o diseñar una bomba y motor para pozos productores de aceite y gas.

Ya sea que exista o no gas para ser considerado, hay algunas condiciones especiales que afectan la selección de bomba y motor. Si el fluido es viscoso se seleccionará una bomba de mayor capacidad y mayor carga, lo cual aumentará el tamaño de motor requerido. Si existen condiciones corrosivas, abrasivas o de incrustaciones pueden necesitarse consideraciones especiales para dar protección a los metales.

La instalación mas simple desde un punto de vista de diseño es para un pozo de agua debido a que no pasa gas libre a través de la bomba. La siguiente más simple es para un pozo con baja relación gas-aceite donde el gas puede o no pasar a través de la bomba. La tercera es para un pozo que produce bastante gas de manera que una porción de todo el gas debe bombearse. Finalmente están las aplicaciones especiales tales como para fluidos viscosos.

CONSIDERACIONES GENERALES EN EL DISEÑO DE BOMBAS.

El dimensionamiento de una bomba sumergible, en la mayoría de las aplicaciones es simple cuando se han entendido los fundamentos básicos del equipo sumergible y los datos del pozo. Cada aplicación es una situación individual debido a las condiciones variantes del pozo y al tipo de fluidos que se bombean.

Datos requeridos del pozo.

La información inicial usada para dimensionar una unidad sumergible es muy importante y debe ser real para asegurar la unidad de tamaño apropiado. Los datos requeridos caen en las siguientes cuatro categorías generales:

- 1) Comportamiento de flujo del pozo y del yacimiento (IPR).
- 2) Dimensiones físicas del pozo.
- 3) Características de los fluidos del pozo.
- 4) Objetivos del diseño y requerimientos preestablecidos de suministro de potencia, etc.

1).- El comportamiento de flujo del pozo y yacimiento, establece la capacidad máxima de producción del pozo y también determina la presión para cualquier gasto menor que el máximo. El comportamiento de flujo generalmente está descrito como la presión estática a una profundidad conocida mas una presión fluyendo a un mínimo de gasto conocido. Si no hay gas en el pozo los niveles de fluido son suficientes en lugar de las presiones. La presión para otros gastos se determina por extensión de los datos de la curva de comportamiento de flujo en una de las dos formas generalmente aceptadas. La línea recta de índice de productividad se usa si no hay gas o si todo el gas está en solución. La curva de comportamiento de flujo (IPR) Fig. III.1., se usa cuando la presión del yacimiento cae abajo de la presión de burbujeo en el flujo hacia el pozo, causando que el gas se libere y que fluyan dos fases en el yacimiento.

2).- El tamaño y peso de la tubería de revestimiento determinan el diámetro máximo de motor y bomba que ajustarán en el pozo. Esto es importante ya que generalmente se tendrá la instalación mas eficiente cuando se utilice la bomba de mayor diámetro que tenga el rango de flujo adecuado.

3).- La profundidad total y la de los intervalos perforados determinan respectivamente la máxima profundidad posible de colocación de la bomba y la máxima profundidad a la que puede colocarse la bomba sin necesitar un motor recubierto. Si las perforaciones quedan arriba del motor es necesario usar una camisa para obligar al flujo a que pase externamente por el motor y así lo enfríe.

4).- Las densidades específicas y porcentajes de los líquidos y gas que componen la mezcla que se bombea determinan la potencia del motor. Por lo tanto la densidad específica del agua y del gas, la densidad API del aceite, el porcentaje de agua y relación gas-aceite son datos necesarios.

5).- La viscosidad, si está disponible, es necesaria ya que las curvas publicadas de comportamiento de la bomba están basadas en pruebas con agua.

6).- La temperatura del fluido cerca del fondo y en la cabeza del pozo son necesarias particularmente si hay gas presente ya que la cantidad de gas en solución y el volumen de gas libre son sensibles a la temperatura y cambian a lo largo del pozo y de la tubería de producción. También la selección del material del cable para el motor queda afectada por la temperatura del líquido a la cual está expuesto.

7).- Los datos PVT en forma de presión, relación gas-aceite en solución y factor de volumen de la formación son necesarios si hay gas presente. Si para un caso en particular se desconocen los datos P.V.T. pueden aproximarse mediante las correlaciones estándar.

8).- Otra información no perteneciente al pozo ni al yacimiento pero importante para el sistema de bombeo, también se requiere. Dicha información es necesaria a fin de impulsar a la producción a su destino final.

El voltaje disponible del suministro de potencia determinará el tamaño de los transformadores y otros componentes eléctricos. Si es de 50 ó 60 Hz (ciclos) establecerá la velocidad y rendimiento de la bomba. El tamaño de la tubería de producción generalmente está relacionado con el diámetro de la bomba y determina las pérdidas por fricción que deben incluirse en la carga dinámica total. El tamaño y tipo de roscas de la tubería de producción deben conocerse a fin de que las válvulas de contrapresión, las de purga, extensión de la bomba y cabezal del pozo puedan seleccionarse.

A fin de familiarizarse con las curvas de comportamiento y cartas, en esta sección se cubre el procedimiento de dimensión para un pozo petrolero típico. Para demostrar las diferencias en los dos tipos básicos de pozos, los mismos datos de pozo y yacimiento se usarán en ambos con la única diferencia del gas presente en uno de ellos. Entiendase que los dos procedimientos básicos pueden admitir el rango de variables tales como diferencias en porcentaje de agua, densidad específica y viscosidad experimentadas en la selección de una bomba y motor.

Curvas Estándard de Comportamiento.

La figura III.2 ilustra las curvas estándar de comportamiento. La curva de capacidad de carga está graficada con la carga en pies y en metros como ordenada (vert.) contra capacidad en barriles por día y en m³/día como abscisa (horiz.). El agua dulce (Densidad específica = Sp. Gr. = 1) es el fluido usado en las pruebas de las bombas sumergibles. La carga para una aplicación propuesta puede estar dada en pies y la carga deseada y capacidad se pueden leer directamente de las curvas de agua sin corrección, si la viscosidad del líquido es aproximada a la del agua.

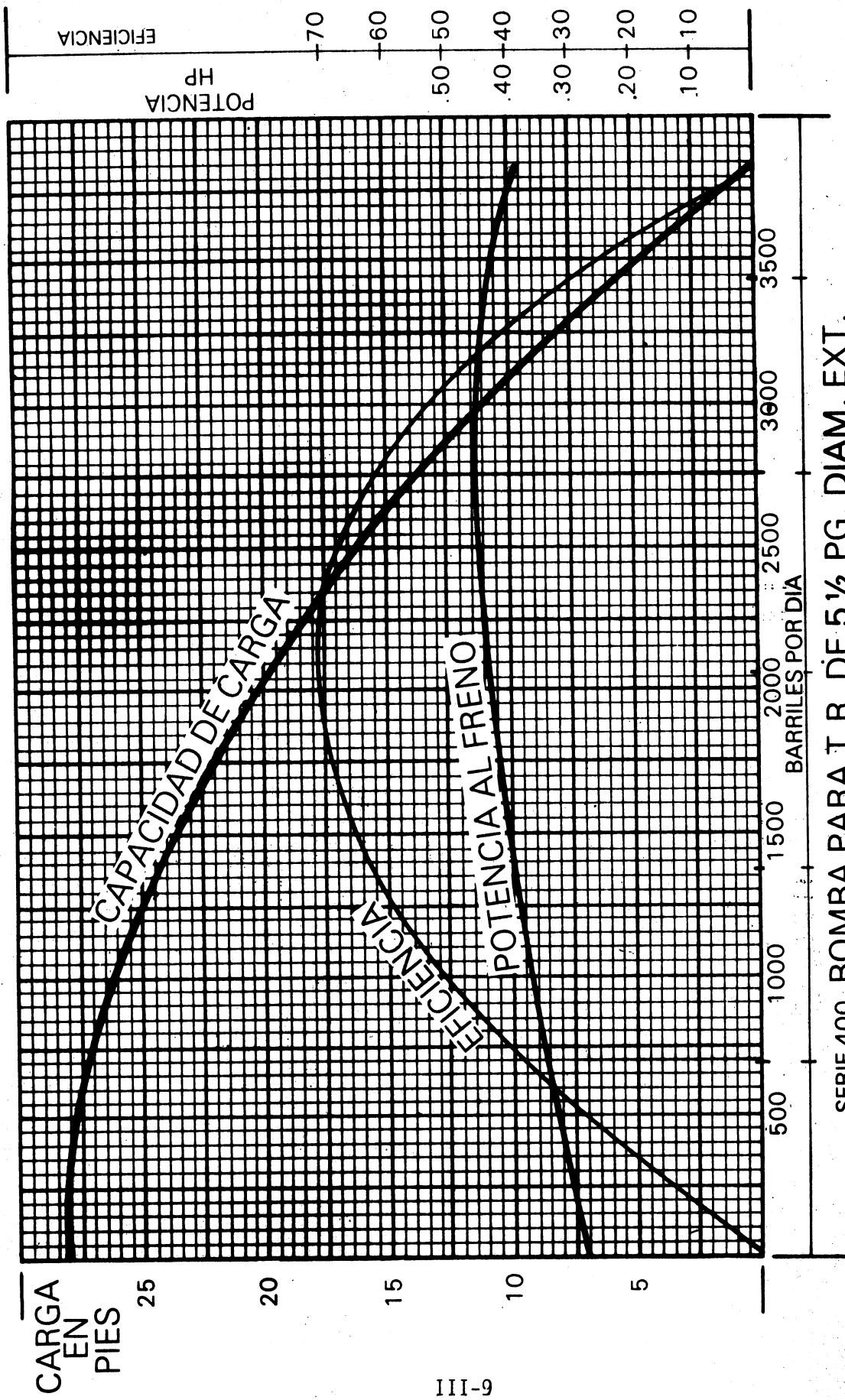
El total de etapas requerido se encuentra con la fórmula:

$$\text{Total de Etapas} = \frac{\text{Carga Dinámica Total (pies)}}{\text{Carga (pies)/ una etapa}}$$

Como un ejemplo, con referencia a la Fig. III.2, si el total de la carga calculado fuera 5000 pies y el volumen requerido de 2100 bl/día, el número de etapas se encontraría entrando a la curva de la bomba con 2100 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 de 19.7 pies. Entonces el número de etapas sería:

$$\text{Total de Etapas} = \frac{5000 \text{ pies}}{19.7 \text{ pies/etapa}} = 254 \text{ etapas}$$

CURVAS DE COMPORTAMIENTO POR ETAPA



SERIE 400 BOMBA PARA T.R. DE 5 1/2 PG. DIAM. EXT.

Fig. III.-2

La potencia mostrada en la curva para agua se aplicará únicamente a líquidos con densidad específica 1.0. Para otros líquidos la potencia de esta curva para agua debe multiplicarse por la densidad específica del fluido.

$$HP = HP/etapa \times \text{Total de Etapas} \times \text{Sp. Gr.}$$

Nuevamente usando la curva estándar de comportamiento y suponiendo una densidad específica (1.0) de agua dulce, el requerimiento de potencia de las 254 etapas calculadas se encontraría tomando la potencia por etapa de la curva de la bomba. Dicho requerimiento sería 0.435 HP/etapa. La potencia total sería:

$$HP = 0.435 \text{ HP/etapa} \times 254 \text{ etapas} \times 1.0 = 110 \text{ HP}$$

Carga Dinámica Total.-

La carga dinámica total (CDT) es simplemente la carga total que se requiere que la bomba produzca cuando está bombeando el gasto deseado. Es la diferencia entre la carga requerida en la descarga de la bomba para impulsar al flujo a su destino final y cualquier carga existente en la succión de la bomba (Fig. III.3)

A continuación se hacen algunas aclaraciones para la descripción de la carga dinámica total:

Los ingenieros diseñadores se refieren a la carga dinámica total como la presión en la cabeza del pozo fluyendo expresada en pies, mas la fricción desde la profundidad de la bomba mas la elevación efectiva. La elevación efectiva es la profundidad a la que la bomba se coloca para producir el gasto deseado, es decir, la profundidad de colocación menos la su mergencia.

Mas específicamente, cuando se bombea un líquido sin gas, la carga dinámica total es la suma de (1) Las pérdidas por fricción en la tubería de producción y línea superficial (2) La diferencia de elevación entre el destino final del fluido producido y la profundidad de la bomba, (3) Cual quier pérdida significativa en la línea de descarga debido a válvulas, separador, etc. (4) Menos la carga existente en la succión de la bomba debida a la columna de fluido por arriba de la succión. Estos cálculos pueden hacerse utilizando carga como unidad de presión ya que la densidad del fluido es la misma a través del sistema de bombeo.

Sin embargo, cuando hay gas presente en el pozo, la densidad no es la misma a través del sistema y los cálculos deben hacerse en unidades de libras por pulgada cuadrada (lb/pg^2) y convertirse a carga a fin de utilizar las curvas estándar de comportamiento de la bomba.

Con frecuencia para propósitos de diseño, las pérdidas y diferencias de elevación en la línea superficial, son reemplazadas por una presión en la cabeza del pozo, la cual es suficiente para mover el flujo a través de di cha línea.

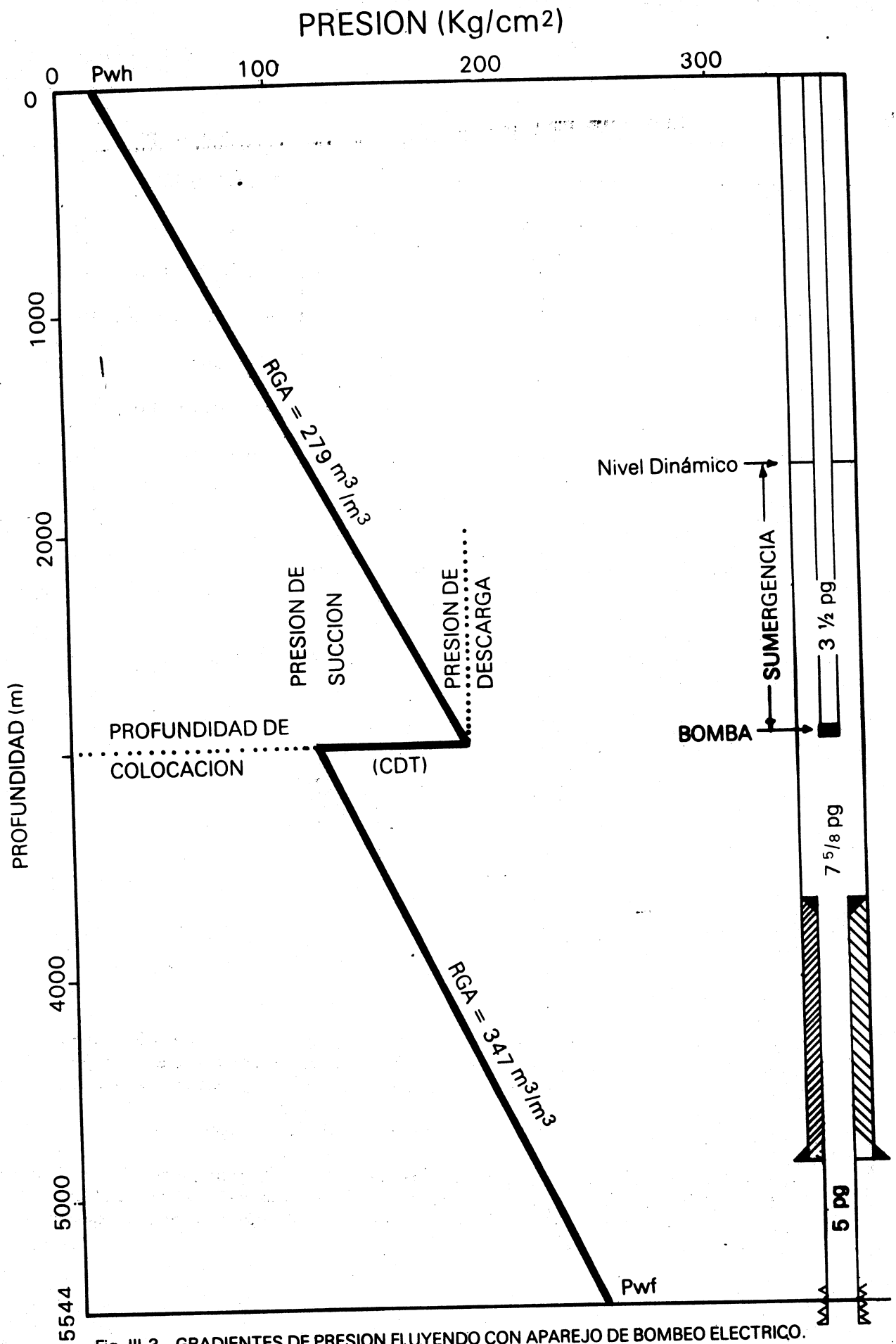


Fig. III.3.- GRADIENTES DE PRESION FLUYENDO CON APAREJO DE BOMBEO ELECTRICO.

EJEMPLO:

Presión requerida en la boca del pozo	200 lb/pg ²
Profundidad de colocación de la bomba	10,570 pies
Tubería de producción	2 7/8 pg.
Gasto	1,600 bl/día
Fluido Bombeado	70 % aceite API 40° 30 % agua S.G. = 1.05 = 54.79 lbm/pie ³
Fluido por arriba de la bomba	650 pies
Presión en la cabeza en pies de carga:	

$$200 \text{ (lb/pg}^2\text{)} \times \frac{144 \text{ (pg}^2\text{/pie}^2\text{)}}{54.79 \text{ lb/pie}^3} = 526 \text{ pies}$$

Pérdidas por Fricción en 10,570 pies de T.P. (Fig. III.3a)

$$10,570 \times 20.5 \frac{\text{ft}}{1,000 \text{ ft}} = 217 \text{ pies}$$

Diferencia de elevación = Bomba - Cabeza del Pozo

$$10570 - 650 = 9920 \text{ pies}$$

Carga Dinámica Total

$$9920 + 217 + 526 = 10663 \text{ pies}$$

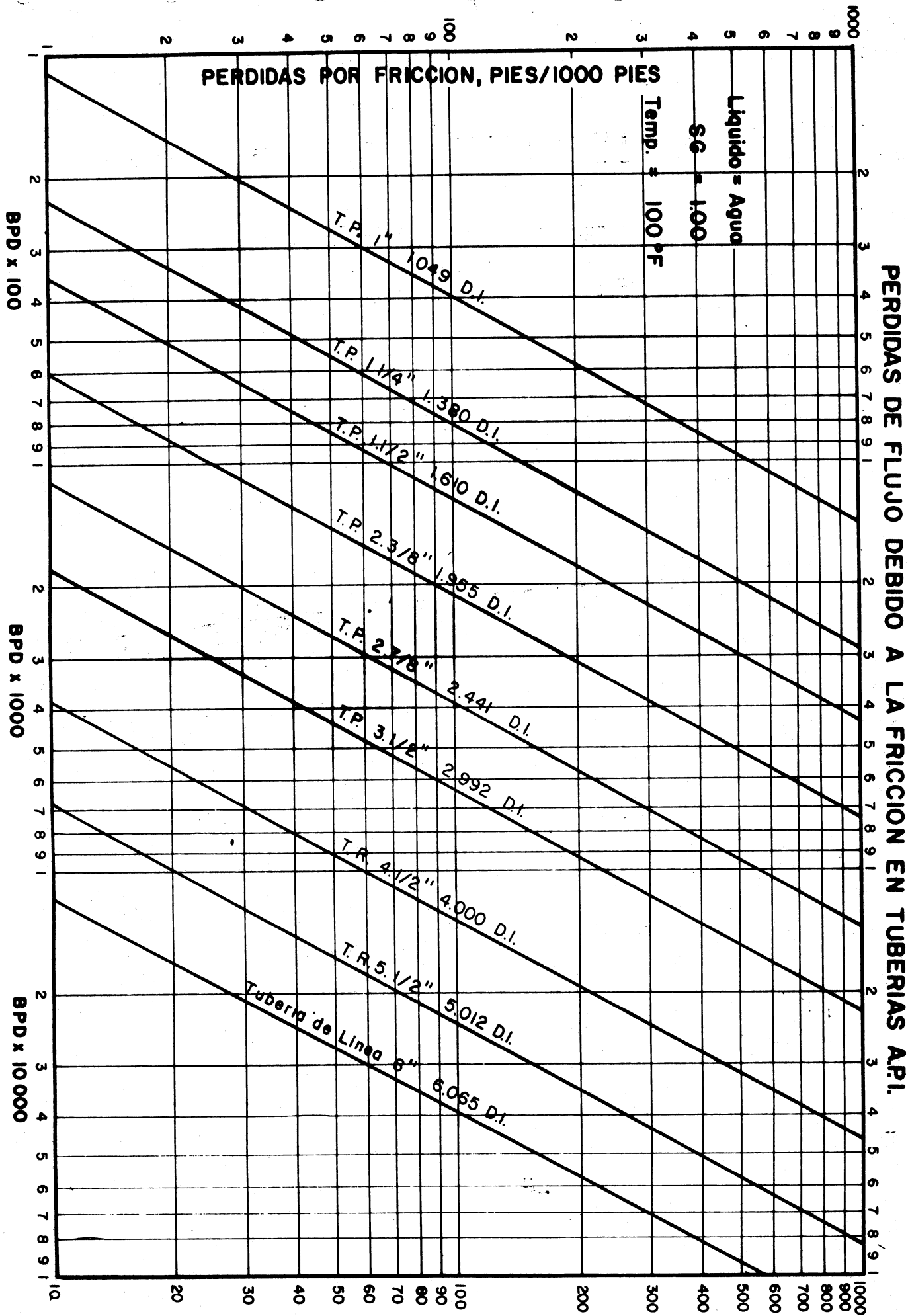
Selección del Cable.-

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 el 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.

FIGURA N.º III. 30



Utilizando la Fig. III.4 se calcula el voltaje superficial requerido para:

Motor: 890 volts, 58 amperes

Cable: 3600 pies, No. 2, conductor de cobre

De la gráfica se encuentra una pérdida de voltaje de 20 v/1000 pies de cable No. 2, cobre y 58 amps. Entonces en 3600 pies de cable se pierden:

$$3.6 \times 20 = 72 \text{ volts}$$

Sumando al voltaje del motor:

$$890 + 72 = 962 \text{ volts}$$

Una buena regla en pérdidas de voltaje para transformadores trifásicos es el 2.5 % del voltaje requerido:

$$962 \text{ volts} \times 2.5\% = 24 \text{ volts}$$

El voltaje total requerido será:

$$962 + 24 = 986 = 990 \text{ volts}$$

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 (990v) conforme lo permita el transformador.

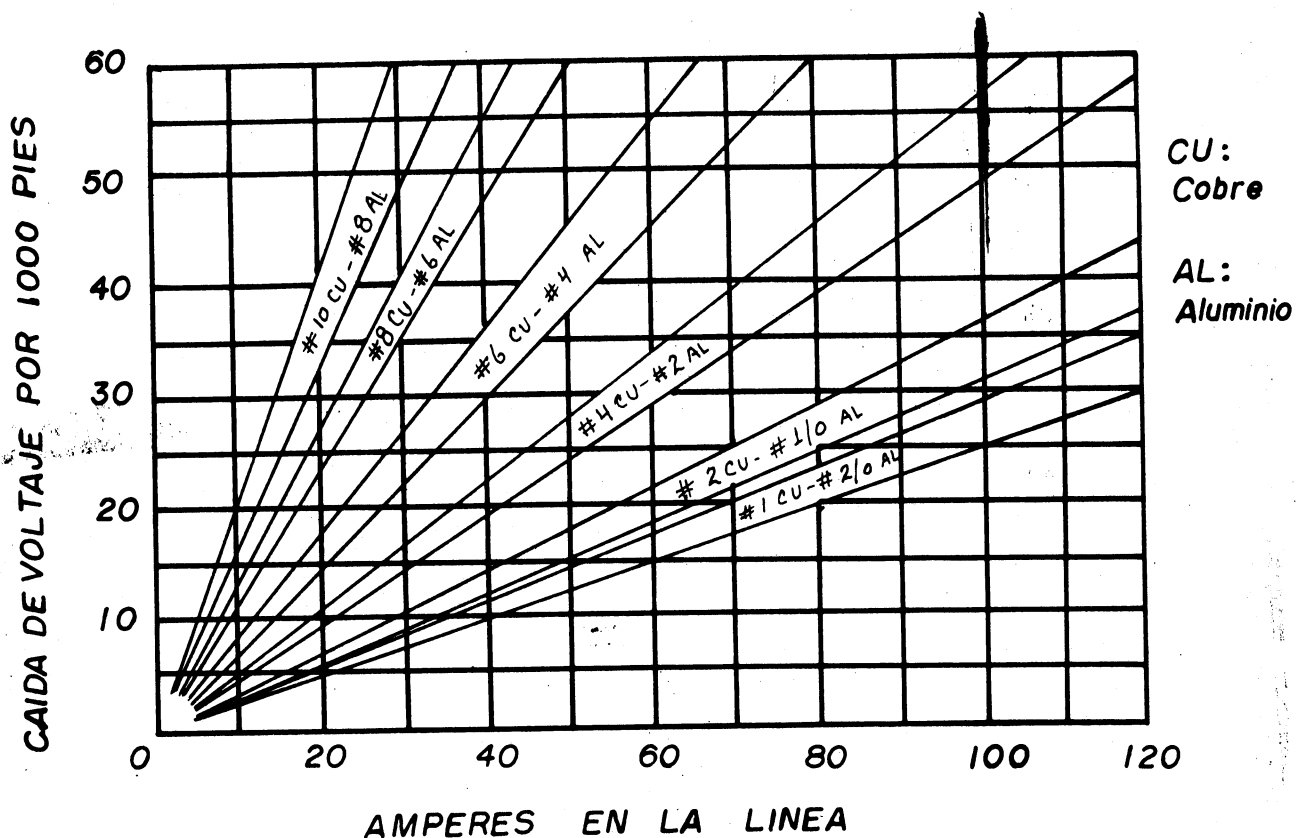
Algunos diseñadores prefieren utilizar motores de alto voltaje y tableros de control grandes, anticipándose a incrementos de producción posteriores. También los motores de alto voltaje con bajo amperaje, deben utilizarse en pozos profundos donde el tamaño de la tubería de revestimiento limita el tamaño de cable que puede usarse y por lo tanto limita el amperaje del motor.

Si existen varias opciones, entonces la determinación del uso o no de un sistema de 2400 volts, dependerá de la evaluación económica. La selección del voltaje del motor es función de la profundidad, tamaño de 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) Bajo HP | Profundidad Somera | 440 V |
| B) HP > 70 | Profundidad Intermedia | 762 - 830 v |
| C) 70 - 200 HP | Pozos Profundos | Tablero de 1500 V
Motor 900 - 1300 v |
| D) > 200 HP | Sistema de 1500 v ó 2400 v. | |
- Dependiendo de la profundidad, costo del tablero de control, del cable y la potencia.

FIGURA No. III.-4

Pérdida de voltaje a lo largo del cable eléctrico



tamaño del cable

caída de voltaje por ampere por
1000 pies @ 100% p.f. y 149 °F

# 12 Cu.	ó	# 10	Al.	3.907
# 10 "		# 8	"	2.447
# 8 "		# 6	"	1.553
# 6 "		# 4	"	0.998
# 4 "		# 2	"	0.624
# 2 "		# 1/0	"	0.390
# 1 "		# 2/0	"	0.307

Ejemplo:

Basado en el costo, para determinar el uso o no de un sistema de 2400 v.

Dados: Motor 150 HP
Profundidad 6000 pies

Selección del voltaje del motor:

- 1) 2150 v -- 43 amps.
- 2) 1150 v -- 80 amps.

Se tienen los siguientes costos, los cuales mantienen su relación cuando cambian: (costos en dólares)

Tablero de control	2400 v --	\$ 5,300.00
	1500 v --	\$ 3,000.00
Cable # 2		\$ 2.70/pie
		\$16,200.00
Cable # 4		\$ 1.85/pie
		\$11,100.00

Costo Total:

2400 v	$5300 + 11,100 = 16,400.00$
1500 v	$3000 + 16,200 = 19,200.00$

El ahorro con el sistema de 2400 v 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 = 3000 pies

Costos: Cable # 4 = $\$1.85 \times 3000 = 5550.00$
2 = $\$2.70 \times 3000 = 8100.00$

Con el # 4 el ahorro es de \$ 2,550.00

Costo Total:

$$2150 \text{ v} \quad 5300 + 5550 = 10,850.00$$

$$1500 \text{ v} \quad 3000 + 8100 = 11,100.00$$

$$\text{Diferencia} = \$ 250.00$$

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:

$$43 \text{ amps. en cable \# 4} \quad \text{Pérdidas} = 23\text{v}/1000 \text{ pies}$$

$$80 \text{ amps. en cable \# 2} \quad \text{Pérdidas} = 27\text{v}/1000 \text{ pies}$$

Para el cable # 4:

$$(3000)(23/1000) = 69\text{v}, \text{ para el motor de } 2150 \text{ v}$$

$$\text{Voltaje superficial} = 2150 + 69 = 2219 \text{ volts}$$

$$\begin{aligned} K_w &= \frac{(v)(\text{amps})(P.F.)\left(\frac{\sqrt{3}}{1000}\right)}{1000} = \\ &= \frac{(2219)(43)(0.85)(1.73)}{1000} = 140.31 \end{aligned}$$

Para el cable # 2

$$(3000)(27/1000) = 81 \text{ v}, \text{ para el motor de } 1150 \text{ v}$$

$$\text{Voltaje Superficial} = 1150 + 81 = 1231 \text{ volts}$$

$$k_w = \frac{(1231)(80)(0.85)(1.73)}{1000} = 144.81$$

La diferencia es de 4.5 kw mas, para el motor de 1150 v:

$$(4.5)(24 \text{ hrs})(30 \text{ días}) = 3240 \text{ kwhr/mes}$$

La diferencia en costo:

$$(3240)(\$0.01) = \$32.40/\text{mes}$$

Entonces la selección será: Motor de 2,150 v, con ahorros de:

$$\text{Costo Inicial} = \$ 250.00$$

$$\text{Costo de Operación} = \$ 32.40/\text{mes}$$

Dimensiones del Transformador.

Para dimensionar un autotransformador, un transformador trifásico o un conjunto de tres transformadores de una fase, se utiliza la ecuación:

$$Kva = \frac{Vs \times Am \times 1.73}{1000}$$

Donde:

Kva = Kilovolts amps.

Vs = Voltaje superficial requerido

Am = Amperaje nominal del motor ó amperaje que será utilizado.

Ejemplo:

Voltaje superficial requerido = 990 v

Amperaje = 58 amps

$$Kva = \frac{990 \times 58 \times 1.73}{1000} = 99.4$$

Si se usan tres transformadores de una fase, los 99 Kva se dividen entre 3 para establecer un valor para cada transformador.

El autotransformador ó el transformador trifásico necesitarán un tamaño mínimo para 100 Kva.

Si se sabe que en el futuro se requerirá una unidad mas grande puede resultar económicamente factible instalar transformadores con el rango superior adecuado.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA DIMENSIONAR BOMBAS

Para dimensionar una unidad de bombeo sumergible se proporciona la siguiente secuencia:

- 1) Recopilar y analizar información del pozo, producción, fluidos y datos eléctricos.
- 2) Determinar la capacidad de producción del pozo a la profundidad de colocación de la bomba ó determinar la profundidad de colocación al gas to deseado. Esto incluye determinar la presión de succión de la bomba (psucc) misma que se usará para el diseño y el volumen que se va a bombear para obtener los barriles de líquidos deseados a condiciones de tanque.
- 3) Calcular la carga dinámica total (CDT) = (Pérdidas por fricción) + (Presión del sistema) + (Elevación vertical).

- 4) Para el cálculo de la capacidad y carga total, seleccionar de entre las curvas características, la del tipo de bomba que tenga la mas alta eficiencia para la aplicación. La bomba seleccionada también debe ser de diámetro exterior que ajuste en el interior de la tubería de revestimiento del pozo.
- 5) Calcular para el tipo de bomba seleccionada, el número de etapas requerido para suministrar la carga necesaria para producir el gasto deseado.
- 6) Determinar la potencia requerida para el motor, usando la densidad específica mas alta del fluido que encuentre para estos cálculos. El tipo de protector generalmente se selecciona de la serie del motor de terminado.
- 7) Seleccionar el tamaño y tipo de cable más económico para la aplicación, de los datos técnicos disponibles.
- 8) Determinar la pérdida de voltaje en el cable y el voltaje superficial requerido. Este valor establece el tamaño del tablero de control.
- 9) Calcular los requerimientos de KVA a fin de dimensionar los transformadores.
- 10) Seleccionar los accesorios adecuados tales como:
 - A) Tamaño y tipo de cabezal para tubería de producción (Bola colgadora)
 - B) Equipo de servicio requerido para terminar la instalación.
 - C) Equipo opcional.
- 11) Determinar que otras etapas se requieren para asegurar buenas operaciones:
 - A) Cubrir el equipo con protecciones anticorrosivas o el uso de materiales inhibidores de corrosión.
 - B) Usar, si se requiere, cubierta en forma de camisa en el aparejo.

EJEMPLOS DE DISEÑO PARA POZOS PRODUCTORES DE AGUA

INTRODUCCION.-

Las bombas eléctricas frecuentemente se utilizan en todos los tipos de pozos de agua para uso doméstico, irrigación, pozos de agua dulce para inyección y pozos de agua salada también para inyección, pozos de agua salada para remoción de sal y posiblemente para disolver gas en agua salada.

Estos representan el problema de diseño mas simple. Como en el caso de un pozo petrolero, se necesita buena información. Aunque se tiene algo de flexibilidad en la bomba, es preferible operarla a su máxima eficiencia cuando se produce el gasto deseado.

PROBLEMA DE EJEMPLO PARA UN POZO PRODUCTOR DE AGUA

1) Recopilar y analizar la información:

Tubería de Revestimiento	=	8 5/8 pg Diam. ext.
Tubería de Producción	=	5 1/2 pg Diam ext.
Profundidad	=	2200 pies
Disparos	=	1900 - 2200 pies
Fuente de Potencia	=	12,500 volts
Nivel Estático de Fluido	=	500 pies
Densidad específica del agua	=	1.1
Temperatura	=	120 °F
Índice de Productividad	=	10 bl/día/pie
Gasto deseado	=	10,000 bl/día
Línea Superficial	=	2000 pies, 4pg, 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 problema se desea un gasto de 10,000 bl/día.

3) Determinar la carga dinámica total requerida para 10,000 bl/día:

$$A) \quad P \text{ (en pies)} = \frac{q}{J} = \frac{10,000 \text{ bl/día}}{10 \text{ bl/día/pie}} = 1000 \text{ pies}$$

$$\text{Carga de Elevación} = 1000 \text{ pies} + 500 \text{ pies (niv.estat.)} = 1500 \text{ pies}$$

Por seguridad colocar la bomba a 1600 pies

Esta sería la carga total sin considerar la fricción y la contra presión en la cabeza del pozo, pero deben tomarse en cuenta.

B) P_{wh} = Presión en la cabeza del pozo (En pies de carga)

P_{wh} = Componente de elevación + Pérdidas por fricción en la línea horizontal

$$P_{wh} = 30 \text{ pies} + (55 \text{ pies}/1000 \text{ pies})(2000 \text{ pies}) = 140 \text{ pies}$$

C) Las pérdidas por fricción en la tubería de producción:

(Fig. III.3)

$$\text{Para } 10,000 \text{ bl/día en T.P. } 5 \text{ pg} = 18.5 \text{ pies}/1000 \text{ pies}$$

$$(18.5)(1.6) = 29.6 \text{ pies}$$

$$\text{Carga dinámica total} = 1500 + 29.6 + 140 = 1670 \text{ pies}$$

4) Seleccionar la bomba adecuada:

Selección basada en las curvas características de bombas

a) Tubería de revestimiento = 8 5/8 pg

b) Gasto = 10,000 bl/día

Seleccione la bomba I-300, con rango de capacidad de:

8,000 a 11,500 bl/día. Fig. III.5

5) Determinar el número de etapas requerido:

Curvas características para la bomba I-300-60Hz - 3500 rpm para diámetro de tubería de revestimiento mínimo de 8 5/8 pg.

A 10,000 bl/día, cada 100 etapas desarrollan 5950 pies de carga.

$$\text{Número de etapas requerido} = \frac{1670 \text{ pies de carga}}{5950 \text{ pies/100 etapas}}$$

$$N_e = 28 \text{ etapas}$$

6) Determinar la potencia requerida para el motor:

Para 10,000 bl/día, se requieren 585 HP/100 etapas basado en $S_p.G_r. = 1.0$

Para agua de $S_p. Gr. = 1.1$

$$H.P = (28 \text{ etapas}) \left(\frac{585 \text{ HP}}{100 \text{ etapas}} \right) (1.1) = 180 \text{ HP}$$

Nótese que el máximo HP en el rango de operación es de 610 HP/100 etapas = 6.1 HP/etapa

$$HP = (6.1)(28)(1.1) = 188 \text{ HP}$$

Generalmente se selecciona este último valor ya que pueden necesitarse HP adicionales para propósitos de descarga.

La selección del motor de 60 Hz se realiza tomando en cuenta:

Si el pozo tiene una temperatura superior a 180°F, seleccione un motor de suficientes HP de manera que los 188 HP representen únicamente el 80% del total de HP.

En este caso la temperatura es inferior y por lo tanto una unidad de - 190 a 200 HP es suficiente. Se encuentra que un motor de la serie 540 proporciona 200 HP con 1160 volts y 105 amps. (Fig. III.6)

7) Seleccionar el cable:

Si se tiene suficiente espacio usese cable redondo.

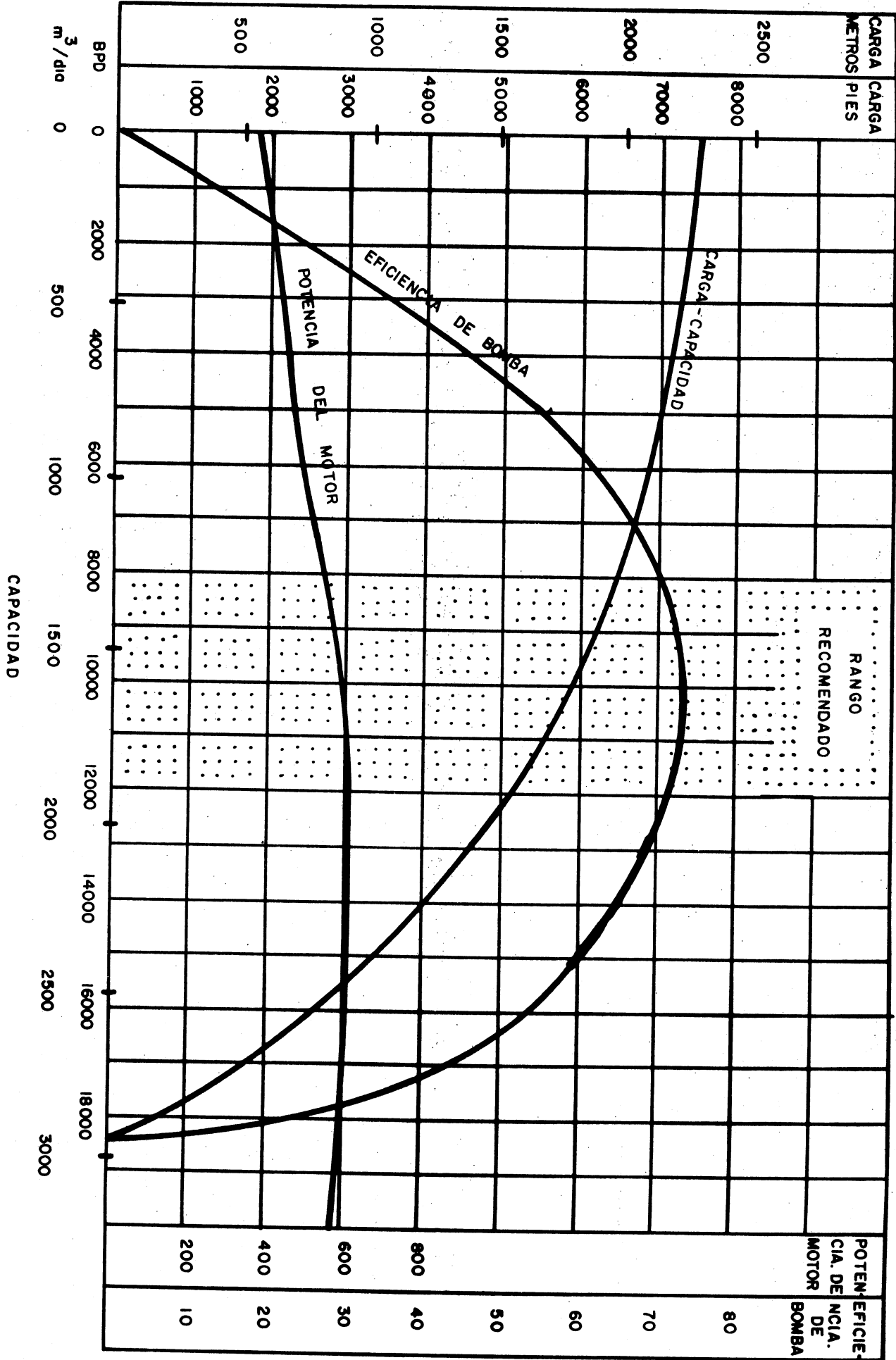
Los siguientes cables están disponibles (TRW-REDA)

TRW REDA Inc.

**CURVAS CARACTERISTICAS DE BOMBEO
100 ETAPAS - 1-300 - 60 HZ
SERIE 650 - 35000 RPM**

T.R. Mínimo
8.5/8" D.E.

FIGURA No. III.-5



Datos de motores disponibles

Serie 375 (3.75" D.E.)

H. P.	Volts	Amps
7.5	415	13.5
10.5	400	20
	690	12
15*	330	34
	415	27
19.5*	415	35
	650	22.5
22.5	440	38.5
	750	22.5
25.5	650	29.5
	780	24.5
Motores Tandem		
30*	630	35.5
39*	575	51
45	660	51.5
	740	51.5
51	1000	38
	1250	31
58.5*	860	51
67.5	990	51.5
90	1320	51.5
102	1480	51.5

Serie 450 (4.56 D.E.)

H. P.	Volts	Amps
8.4	415	14.2
12.6	390	21
	455	18
16.8	390	27.6
	415	25.9
21	445	30
	450	29.5
	450	35.5
25.2	465	34.2
	540	29.5
	775	20.5
29.4	450	41.1
	710	26
33.6	415	51
	465	50.7
37.8	585	40.2
	725	32.5
	570	50.3
46.2	705	40.5
	845	34
54.5	670	50
	845	39.5
	670	57.3
63	775	50
	980	39.5
71.5	775	57.3
	880	50.5
Motores Tandem		
109	950	71
126	1080	72
143	840	105

Serie 456 (4.56" D.E.)

H. P.	Volts	Amps
10	440	15
15	440	23
	750	13.5
20	460	28
	760	17
25	420	38
	720	22.5
30	440	43.5
	765	25
35	400	55
	690	32
	800	27.5
40	450	57
	675	38
	900	28.5
50	700	45.5
	840	38
	980	32.5
60	670	57
	840	45.5
	1000	38
70	980	45
	785	57
	1170	38
80	900	57
	1120	46
	1350	38
90	1000	57
	1260	45
	1500	38
100	1120	57
	970	66
	1400	45.5
110	1080	65
	1240	57
120	1000	77
	1170	66
	1350	57
	2300	33.5
Motores Tandem		
140	1080	82.5
	2280	39
160	1270	80
	2160	47.5
180*	2270	50
200	2140	59
220	2275	62
240	2250	70

Serie 540 (5.43" D.E.)

H. P.	Volts	Amps
20	445	29
	762	17
30	445	44
	720	27.5
40	445	59
	670	39
	740	36
	890	30
50	430	75
	740	44
	920	35
60	445	87
	665	58
	755	52
	890	44
70	775	58
	880	51
	1035	44
80	685	76
	770	68
	890	58
	1185	44
	740	85
100	855	74
	960	66
	1100	58
120	770	98
	890	85
	1330	57
130	835	98
	965	84
150	965	97
160	1015	99
180	1000	113
200	1160	108
	2200	57
225	1200	120
	2300	62.5
Motores Tandem		
240*	2060	70
260*	2250	69.5
300*	2150	83
320	2230	88.5
400	2200	115
480	2475	122

SERIE 738 (7.38" D.E.)

H. P.	Volts	Amps
200	2300	54
220	1350	101
	2300	59
240	2300	65
260	2300	70
Motores Tandem		
400*	2300	108
440*	2000	136
480*	2200	135
520*	2300	140

* DISPONIBLE EN PEDIDO ESPECIAL

FIGURA No. III.-6.- CARACTERISTICAS DE DIVERSOS MOTORES

- a) 3 KV - Redalane = std. (bueno para 180°F) - Galv.
- b) 3 KV - Redared - Galv. (bueno para 300°F)
- c) 3 KV - Polietileno (bueno para corrosión a T 140°F)

Seleccionar el # 1 Cu (Fig. III.-7)

8) Determinar la pérdida de voltaje en el cable (Fig. III.4)

30v/1000 pies

$$1.6 \times 30 = 50 \text{ volts}$$

Seleccionese el tablero de control.

Use cable de polietileno

9) Seleccionar el transformador.

Voltaje superficial = 1160 + 50 = 1210 volts

$$Kva = \frac{(V) (amp)}{1000} \times 3 = \frac{(1210)(105)(1.73)}{1000} = 220$$

Use un conjunto de tres transformadores de 75 Kva cada uno para un total de 225 Kva.

PROBLEMA COMPARATIVO PARA POZOS PRODUCTORES DE AGUA.

Los dos siguientes problemas son, uno para:

5 1/2" T.R. x 2 3/8" T.P. y otro para: 7" T.R. x 2 7/8" T.P.

Nótese que en los dos ejemplos se tiene la misma presión en la cabeza del pozo y la misma profundidad de elevación. Sin embargo se pueden usar menos HP en 7" x 2 7/8" debido a que las pérdidas por fricción son menores en T.P. de 2 7/8" y también al hecho de que una bomba de mayor diámetro exterior es mas eficiente.

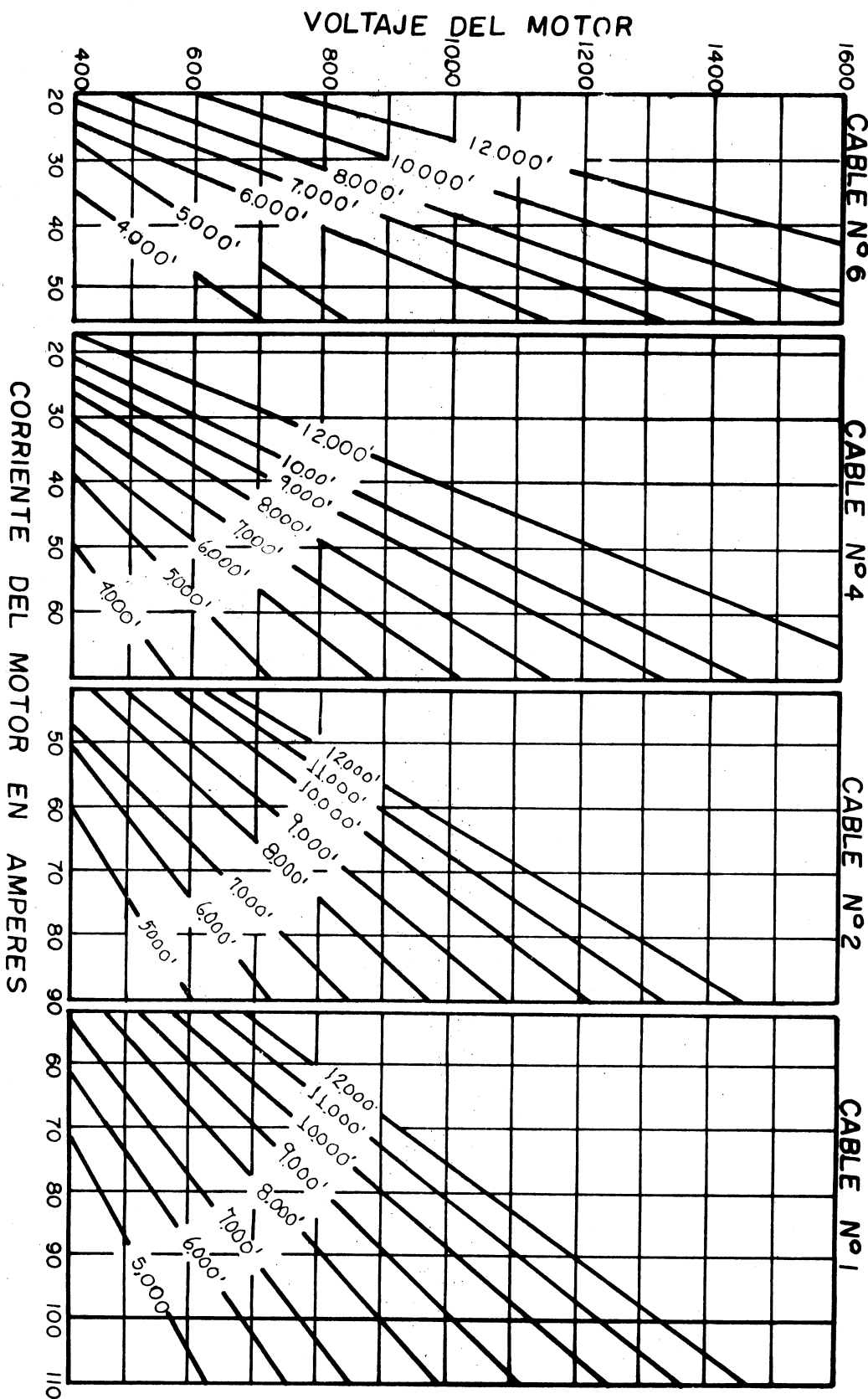
Ejemplo A

Información:

T. R. = 5 1/2 pg
 T. P. = 2 3/8 pg
 Intervalo = 4000 pies
 Nivel estát. = 1000 pies
 Temp. de fondo = 160°F

FIGURA NO. III.-7

Longitudes Maximas De Cable Recomendado Para Motores Con
 Varias Relaciones Volts/Amperes.



J = 1.0 bl/día/pie
 S. G. = 1.1
 Q deseado = 2000 bl/día
 $P_{wh} = 100 \text{ lb/pg}^2$

Selección de la bomba para 2000 b/día

$$P(\text{pies}) = \frac{2000 \text{ bl/día}}{1 \text{ bl/día/pie}} = 2000 \text{ pies}$$

1000 pies (niv. Estat.) + 2000 = 3000 pies de elevación

Colocar la bomba a 3300 pies por seguridad

Para 2000 bl/día la pérdida por fricción en T.P. de 2 3/8 (Diám. int. = 1.992 = 2") es de 72 pies/1000 pies.

Con la bomba colocada a 3300 pies

$$\text{Fricción total} = (72)(3.3) = 237.6 \text{ pies}$$

Gradiente del agua producida

$$0.433 \times 1.1 - 0.476 \text{ lb/pg}^2/\text{pie} = \frac{P}{H} \times \text{S.G.} = \frac{P}{H} \times \frac{\text{agua producida}}{\text{agua}}$$

$$H = 100 \text{ lb/pg}^2 \div 0.476 \text{ lb/pg}^2/\text{pie} = P_{wh} \div \text{Grad. agua prod.} = 210 \text{ pies}$$

$$\text{Carga dinámica total} = 3000 + 237.6 + 210 = 3447.6 \text{ pies}$$

De la Fig. III.8: Bomba: D-55 para T.R. = 5 1/2" Diam. Ext.

Desarrolla 22 pies de carga por etapa a 2000 bl/día

$$\text{No. etapas} = \frac{3447.6}{22} \left(\frac{\text{pies}}{\text{pies/etapa}} \right) = 157 \text{ etapas}$$

$$\text{HP} = 157 \text{ etapas} \times 0.6 \text{ HP/etapa} = 94.2 \text{ HP (agua dulce)}$$

$$\text{HP} \times 1.1 = 103.6 \text{ HP para agua de S.G.} = 1.1$$

Ejemplo B

Información:

T. R. = 7"

T. P. = 2 7/8"

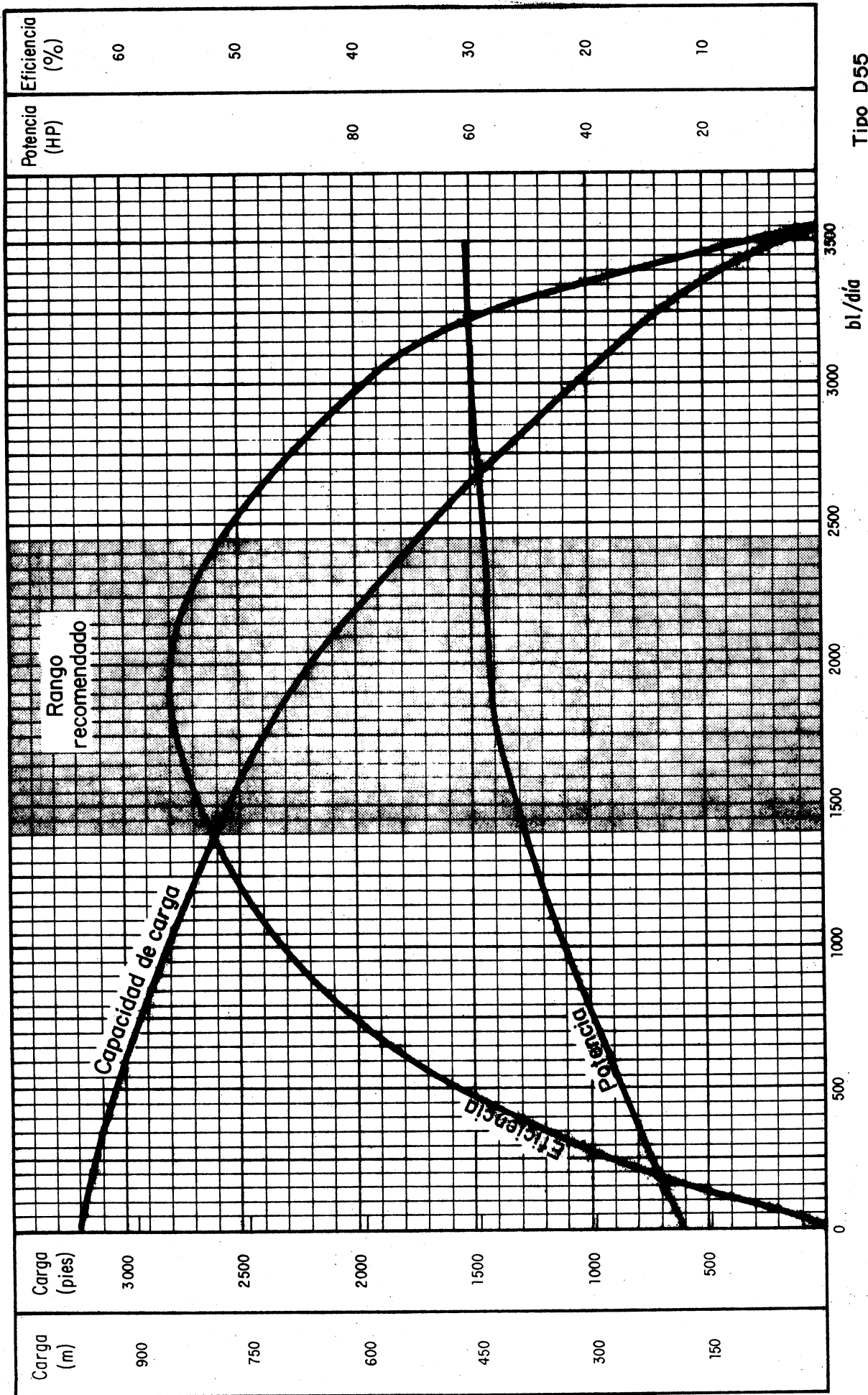
Intervalo = 4000 pies

$P_{ws} = 1428 \text{ lb/pg}^2$

Temp. fondo = 160°F

Curvas de comportamiento bomba Reda
 100 etapas - D55 - 60 Hz
 Serie 400 - 3500 RPM

Tamaño mínimo de
 T.R. 5 1/2" D.E.



Tipo D55

Figura III.8

$$J = 2.10 \text{ bl/día/lb/pg}^2$$

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

LINEA SUPERFICIAL = 3", 2000 pies de long. tubería vieja (old pipe)

Cambio de elevación = 68 pies hacia arriba

$$S.G. = 1.1$$

Seleccionar la bomba para 2000 bl/día

$$\Delta P = \frac{2000 \text{ bl/día}}{2.10 \text{ bl/día/lb/pg}^2} = 952.38 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{wf} = 1428 - 952.38 = 475.62 \text{ lb/pg}^2$$

Gradiente:

$$0.433 \times 1.1 = 0.476 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$H = \frac{475.62 \text{ lb/pg}^2}{0.476 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}} = 999.2 \text{ pies de columna de agua cuando se está bombeando.}$$

$$4000 - 999.2 = 3000.8 \text{ pies de elevación}$$

Colocar la bomba a 3300 pies por seguridad.

La pérdida por fricción en la T.P. ●. 2000 bl/día = 30 pies/
1000 pies.

La pérdida total por fricción:

$$3.3 \times 30 = 99 \text{ pies}$$

La carga requerida en la boca del pozo es:

50 lb/pg², 68 pies de elevación y 2000 pies de línea superficial.

$$50 \div (0.476) = 105.04 \text{ pies}$$

$$68.00 \text{ pies}$$

$$\left. \begin{array}{l} 105.04 \text{ pies} \\ 68.00 \text{ pies} \end{array} \right\} 210.04 \text{ pies}$$

$$2000 \text{ pies en 3" oldpipe} = 37.00 \text{ pies}$$

Carga dinámica total:

$$\text{Elevación} = 3000.8$$

$$\text{Fricción} = 99.0$$

$$\text{Carga Superficial} = 210.04$$

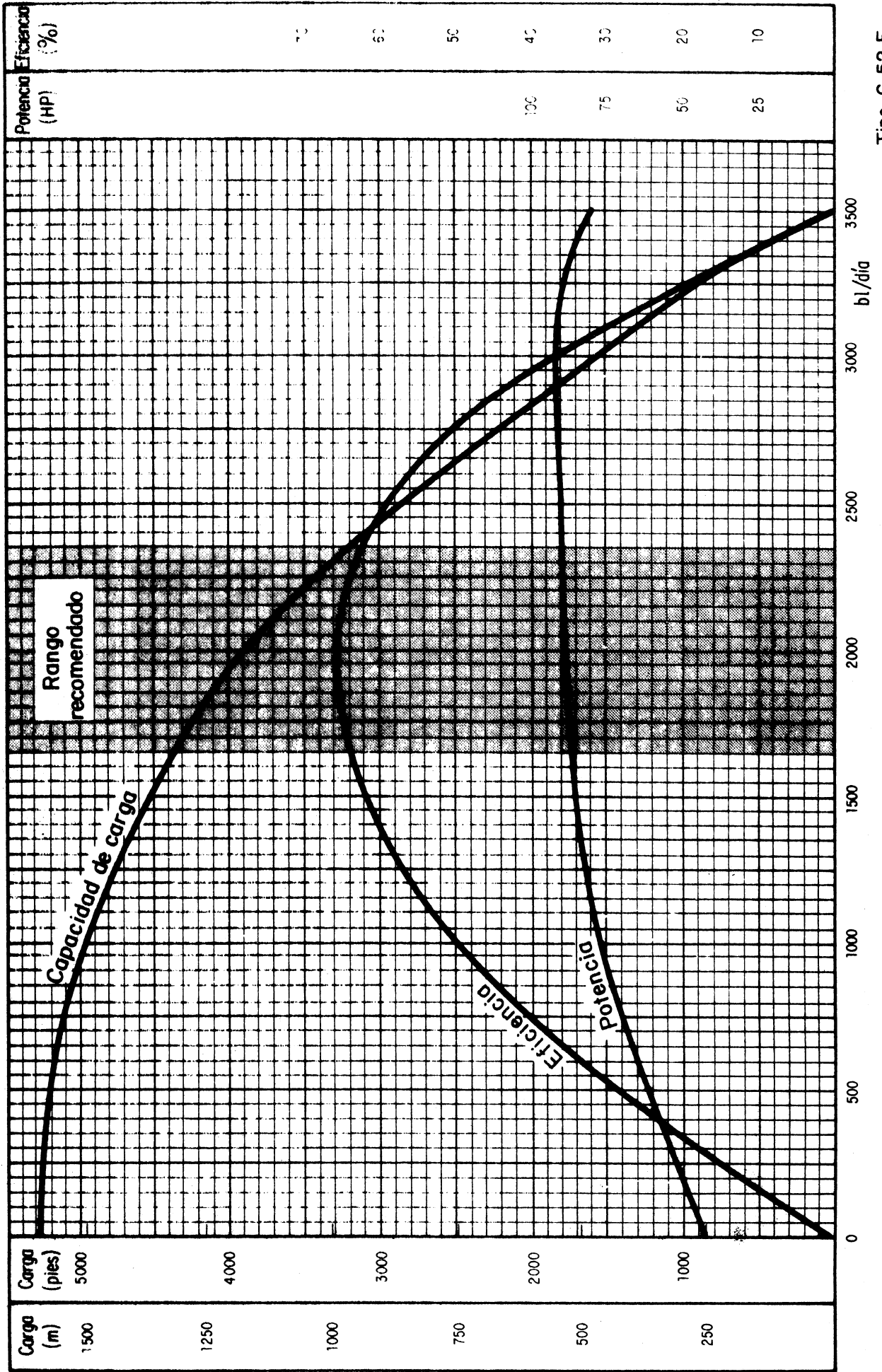
$$\underline{3309.84} \doteq 3310 \text{ pies}$$

Curvas de comportamiento bomba Reda

100 etapas - G 52 E - 60 Hz

Serie 540 - 3500 RPM

Tamaño mínimo de
T.R. 6 3/8" D.E.



Tipo G 52 E

Figura III.9

La selección de bombas es: Para T.R. 7"

G - 52E 6 G-62E (Fig. III.-3)

La selección sería la G-52E si el dato de J no es muy confiable o si se predice que la Pws puede declinar en corto tiempo.

La bomba G-52E desarrolla 39 pies/etapa a 2000 bl/día

$$3310 \text{ pies} \div 39 \text{ pies/etapa} = 84.87 = 85 \text{ etapas}$$

$$85 \text{ etapas} \times 0.95 \text{ HP/etapa} = 80.75 \text{ HP}$$

$$80.75 \text{ HP (agua dulce)} \times 1.1 \text{ S.G.} = 88.82 \text{ HP}$$

DISCUSION DE LOS DOS PROBLEMAS ANTERIORES

Nótese que ambos problemas tuvieron la misma elevación y la misma presión en la boca del pozo. En el caso de T.R. de 7" se usó una tubería de producción mas grande para reducir las pérdidas por fricción.

Esta situación permite el uso de una bomba de mayor diámetro, más eficiente y mas económica. La combinación de menores pérdidas por fricción en la tubería de producción y una bomba mas eficiente requiere de 88.82 HP de carga para el motor en la T.R. de 7" mientras que en la T.R. de 5 1/2" se necesitan 94.2 HP.

De aquí la importancia de la terminación inicial debido a que el tamaño de tubería de revestimiento tiene una decidida influencia en la eficiencia del bombeo eléctrico.

EJEMPLO: Pozo productor de aceite sin gas libre.

En este problema el pozo tiene una baja relación gas-aceite y produce 15% de agua. Se supone que no pasa gas libre a través de la bomba.

1) Datos

P	}	T.R.	= 5 1/2" a 6150 pies, 17#
O		T.P.	= 2 3/8"
Z			
O		Intervalo	= 5900 a 5970 y 6000 a 6030 pies
P	}	P_{ws}	= 2000 lb/pg ² a 5950 pies (medido)
R		P_{wf}	= 1500 lb/pg ²
O		Q	= 475 bl/día (400 bl/día de aceite)
D		RGA	= 350 pie ³ /bl
U		T_{wf}	= 170°F
C		P_b	= 2000 lb/pg ² (Yacimiento de empuje por gas en solución)
C			
I			
O			
N			

F	{	API (°)	=	30°
L				
U		S. G.o	=	0.876
I				
D		S. G. w	=	1.02
O				
S		S. G.g	=	0.75

SISTEMA DE POTENCIA: VOLTAJE PRIMARIO 7200/12470

El pozo produce fluidos corrosivos

Se desea producir al máximo gasto posible manteniendo 300 lb/pg² en la succión de la bomba. El problema difiere de los de pozos de agua, en que el volúmen en la bomba es mayor debido al factor de volumen del aceite.

Profundidad de colocación de la bomba = 5850 pies

Presión de succión = 300 lb/pg²

Además se supone que todo el gas va al espacio anular

2) CAPACIDAD DE PRODUCCION DEL POZO.

Se ha decidido probar y crear 300 lb/pg² en la succión de la bomba colocada a 5850 pies (50 pies arriba de las perforaciones). Esto es muy razonable ya que probablemente se requerirán las 300 lb/pg² para desviar el gas al espacio anular. Es un diseño práctico puesto que de la experiencia para este tipo de aplicación se ha encontrado que se requieren aproximadamente 300 lb/pg² en la succión para tener buenas condiciones de bombeo. Los 50 pies por arriba de las perforaciones para colocar la bomba permitirán que el fluido pase por el motor para enfriarlo.

La presión estática se midió a 5950 pies y la bomba colocada 100 pies arriba lo cual reduce ligeramente la presión de fondo medida. Para encontrar esta reducción es necesario conocer la S.G. 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 S.G. del aceite sin gas es de 0.876 y la del agua es 1.02:

$$0.876 \times 85 \% = 0.74$$

$$1.02 \times 15 \% = \underline{0.15}$$

$$0.89 = \text{S. G. promedio (Abajo de la bomba)}$$

Entonces 100 pies representan aproximadamente

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

Se desprecia el efecto del gas libre en la columna.

Entonces la presión estática de fondo en la bomba puede estimarse como:

$$2000 - 40 = 1960 \text{ lb/pg}^2$$

Ahora puede calcularse la capacidad de producción del pozo. Como se trata de un yacimiento con empuje por gas disuelto se puede usar la curva general de I.P.R. (Vogel) para verificar el volumen disponible para bombear.

A continuación se ilustra la curva de I.P.R. generalizada y como calcular el volumen disponible para esta aplicación (Fig. III.-1)

$$\begin{aligned} q_L &= 475 \text{ lb/día} & \frac{475}{q_{\max}} &= 0.40 \\ P_{wf} &= 1500 \text{ lb/pg}^2 & q_{\max} &= 1188 \text{ bl/día} \\ P_{ws} &= 2000 \text{ lb/pg}^2 & P_{wf} &= 300 + 40 = 340 \text{ lb/pg}^2 \\ \frac{P_{wf}}{P_{ws}} &= \frac{1500}{2000} = 0.75 & \frac{P_{wf}}{P_{ws}} &= 0.17 \\ \frac{q}{q_{\max}} &= 0.40 \text{ (De la curva)} & \frac{q}{q_{\max}} &= 0.94 \text{ (De la curva)} \end{aligned}$$

$$q = (0.94) (1188) = 1117 \text{ bl/día}$$

Es el gasto para $P_{wf} = 340 \text{ lb/pg}^2$ a la profundidad de medición (5950 - pies) la cual da 300 lb/pg^2 a la profundidad de succión de la bomba.

Como comparación entre el método de I.P.R. y el de línea recta en un yacimiento con empuje por gas disuelto a continuación se calcula la capacidad del pozo usando el método de línea recta:

$$J = \frac{\text{bl/día}}{P_{ws} - P_{wf}} = \frac{475}{2000 - 1500}$$

$$J = 0.95 \text{ bl/día/lb/pg}^2$$

ΔP para tener 300 lb/pg^2 en la succión de la bomba:

$$2000 - 40 - 300 = 1660 \text{ lb/pg}^2$$

$$q = \Delta P \times J = 1660 \text{ lb/pg}^2 \times 0.95 \text{ bl/día/lb/pg}^2 = 1577 \text{ bl/día}$$

Si se hubiera usado este método, la capacidad de producción del pozo sería optimista y posiblemente resultaría una unidad sobrediseñada. La productividad del pozo se verificaría después de que la unidad hubiera operado algún tiempo. Si la capacidad del pozo resulta mayor que la anticipada, una unidad de mas alto volumen puede instalarse.

Nótese que el volumen de 1117 = 1125 bl/día está medido a condiciones de almacenamiento (a c.atm.) y por lo tanto es necesario determinar el volumen que debe bombearse 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/pg². (Correlación de Standing)

$$B_o = 1.075 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

El gasto de líquido del yacimiento será:

$$1125 \text{ bl/día} \times 0.85 \times 1.075 = 1028 \text{ blo/día.}$$

$$1125 \text{ b/d} \times 0.15 \text{ agua} = \underline{199 \text{ blw/día}}$$

$$1227 \text{ bl/día}$$

Supuestamente no pasa gas libre a través de la bomba.

3) CARGA DINAMICA TOTAL.

Esta determinada por:

A) Elevación vertical:

Se calcula con el nivel dinámico de fluido cuando se tienen 300 lb/pg² en la succión de la bomba. Esta presión convertida a pies de columna de líquido se resta de la profundidad de colocación de la bomba:

Suponiendo que las 300 lb/pg² serán un gradiente de aceite, despreciando el gas

$$H = \frac{300 \text{ lb/pg}^2 \times 2.31 \text{ pies/lb/pg}^2}{0.876 \text{ (S.G.)}} = 790 \text{ pies}$$

(Sumergencia de la bomba)

$$H_v = 5850 \text{ pies} - 790 \text{ pies} = 5060 \text{ pies}$$

B) Pérdidas por fricción:

Dados: 5850 pies de T.P., 2 3/8" a 1227 bl/día

Las pérdidas por fricción (Fig. III.-3) son de:

$$40 \text{ pies/1000 pies}$$

$$F_t = 40 \times 5.85 = 234 \text{ pies}$$

Usese 250 pies de pérdidas por fricción para incluir la válvula de contra presión y el niple de circulación.

NOTA: Las pérdidas en estos dispositivos son pequeñas comparadas con la carga total y pueden despreciarse, sin embargo considerar de 5 a 10 pies de pérdida en cada uno, es adecuado.

C) La presión superficial:

Dada: Una presión en la boca del pozo de 200 lb/pg² usando una densidad específica promedio de 0.890 y convertida a pies de carga:

$$\text{Carga en pies} = \frac{200 \text{ lb/pg}^2 \times 2.31 \text{ pies/lb/pg}^2}{0.89 \text{ (S.G.)}} = 520 \text{ pies}$$

La carga dinámica total será:

$$\text{CDT} = 5060 (H_v) + 250 (F_t) + 520 (P_{wh}) = 5830 \text{ pies}$$

4) Tamaño y Tipo de Bomba.-

La unidad debe instalarse en T.R. de 5 1/2 pg. Diam. Ext. entonces una bomba de la serie 400 (4 pg. Diam.Ext.) es adecuada.

Para el gasto de 1227 bl/día la D-40 (Fig. III.10) de Reda es la mas eficiente y de Centrilift la M-34 o G-48.

5) Número de Etapas necesario.

La carga por etapa de la bomba D-40 es de aproximadamente 23 pies. Entonces

$$\text{No. etapas} = \frac{\text{C D T}}{\text{pies/etapa}} = \frac{5830}{23} = 254 \text{ etapas}$$

6) Potencia del motor.

$$\text{HP} = \text{Netapas} \times \text{HP/etapa} \times \text{S. G.}$$

$$\text{HP} = 254 \times 0.35 \times 0.89 \text{ (Usando el máximo HP)}$$

$$\text{HP} = 79$$

NOTA: Este requerimiento de potencia es para el pozo en condiciones de operación.

Un motor serie 456 (4.56 pg O.D.) se puede usar en el diámetro interior de la tubería de revestimiento. Un motor de 90 HP está disponible y se considera una buena selección para esta aplicación. (Fig. III.6)

NOTA: Si el pozo está controlado con salmuera o un fluido mas pesado el motor de 90 HP estará sobrecargado aproximadamente un 10% mientras se expulsa el fluido de control. Esto tendrá que tomarse en cuenta en el arranque inicial del pozo.

7) Cable

El tamaño del cable, voltaje y amperaje del motor para una operación mas económica deben seleccionarse.

Para seleccionar el cable se toma en cuenta la temperatura de fondo de -170°F y la longitud de 5850 pies mas 100 pies para conexiones superficiales, es decir 5950 pies de cable.

Para esta instalación se selecciona el motor de 1250v y 45 amps (Fig. III.6) utilizando el cable No. 4 conductor de cobre. Los 45 amps. ajustan en el rango de la capacidad de conducción del cable No. 4 (Es el tamaño más grande que puede usarse en la T.R. de 5 1/2 pg). El cable Redalane es la mejor elección para 170°F. También se puede usar el tablero de control de 1500 v.

Si se hubiera seleccionado el motor de 57 amps. la capacidad de conducción del cable No. 4 se aproxima a su límite. Si se seleccionara el motor de 1500v, se requeriría un tablero de control de 2400v a un mayor costo.

El motor de 2000 v podría seleccionarse usando el cable No. 6 con el motor de 29 amps pero tendría que usarse el tablero de 2400 volts y el cable No. 6 necesitaría cambiarse posteriormente.

8) Pérdida de voltaje en el cable y voltaje superficial

Dados: Cable: 5950 pies, No. 4, cobre

Motor: 45 amps, 1260 volts

Se encuentra que la pérdida de voltaje para 45 amps con cable No. 4 a -170°F es de 24 v/1000 pies de cable, entonces el voltaje superficial requerido es:

$$V_s = (24 \times 5.95) + 1260 \times 1.025\% = 1438 \text{ volts}$$

Donde el 2.5% se considera pérdida en el transformador.

Un voltaje superficial de 1425 a 1450 volts será el apropiado para esta aplicación.

9) Cálculo de KVA

Dados: Voltaje superficial = 1450 volts

Amperaje = 45 amps. (Operación normal)

$$K_{va} = \frac{1450 \times 45 \times 1.73}{1000} = 113$$

Se usarán tres transformadores de una fase (operación doméstica estándar)
El valor requerido por transformador es:

$$\frac{113}{3} = 37.67 \text{ cada transformador.}$$

NOTA: Los transformadores de 37.5 Kva son adecuados. Sin embargo, debido a la poca diferencia en el costo entre los transformadores de 37.5 kva y los de 50 kva. y a la futura flexibilidad con los transformadores de 50 kva, la recomendación sería utilizar tres transformadores de 50 kva.

10) ACCESORIOS APROPIADOS

La tubería de producción es de 2 3/8 pg EUE 8RD y no se requerirá extensión de la bomba (madrina) ya que ésta tiene cabezal de 2 3/8 pg EUE 8RD. La válvula de contrapresión y niple de circulación se ordenarán con las mismas especificaciones de diámetro y rosca. Así mismo deberá seleccionarse el cabezal de la tubería de producción (bola colgadora) para la presión de T.R. anticipada.

11) DETERMINACION DE LO NECESARIO PARA ASEGURAR BUENA OPERACION.

El pozo es corrosivo de manera que se toman precauciones para combatir este medio ambiente: 1) Cubiertas plásticas en el equipo, 2) Uso de flejes de acero inoxidable o de monel para fijar el cable, 3) Cable plano con mufa resistente a la corrosión,

EJEMPLO: Pozo productor de aceite y agua sin producción de gas.

Pozo petrolero sin producción de gas, o bien, su cantidad de gas puede ser despreciable:

DATOS:

T. R. = 7 pg D. E. 23 lb/pie

T. P. = 2 7/8 pg.

H_t = 11 000 pies

Intervalo = 10,600 a 10,650 pies

P_{ws} = 2 900 lb/pg² a 10,000 pies

P_{wf} = 2 540 lb/pg² a 10,000 pies, Q = 1000 bl/día a c.atm

% Agua = 30 %

°API aceite = 40°

S. G. agua = 1.05

μ aceite
muerto = 3.6 cp a 100°F

1.6 cp a 200°F

T_{wf} = 225°F a 10,000 pies, T_{wh} = 160°F

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

$$\text{Fuerza} = 60 \text{ Hz}$$

$$Q = 1600 \text{ bl/día e c.atm.}$$

Colocación de la bomba a la profundidad necesaria

No hay arena, incrustaciones, corrosión ni parafinas.

1) Selección de una bomba que ajuste en T.R. de 7 pg D.E. con capacidad de producción de 1600 bl/día a c.atm.

$$2) \quad J = \frac{1000 \text{ bl/día}}{2900-2540} = 2.78 \text{ bl/día/lb/pg}^2$$

$$P_{wf} \text{ para } Q = 1600 \text{ bl/día}$$

$$P_{wf} = 2900 - \frac{1600}{2.78} = 2325 \text{ lb/pg}^2 \text{ a } 10,000 \text{ pies}$$

3) S.G. agua a 60°F = 1.05 ; a 190°F = 96.7% (1.05)

Aceite 40°API a 60°F = 93.4 % (0.825)

$$\text{Agua } (1.05)(0.967)(0.3) = 0.30$$

$$(0.825)(0.934)(0.7) = \underline{0.54}$$

$$\text{S.G. Promedio} = 0.84$$

La elevación efectiva para $P_{wf} = 2325 \text{ lb/pg}^2$

$$H = 10,000 - \frac{2325}{0.433 \times 0.84} = 3,606 \text{ pies}$$

Por seguridad la bomba se puede colocar a 4000 pies

Pérdidas por fricción en T. P. = 20.5 pies/1000 pies

$$F_t = 4 \times 20.5 = 102 \text{ pies}$$

$$H_{Pwh} = \frac{200}{0.433 \times 0.84} = 550 \text{ pies}$$

Sumergencia de la bomba = 4000 pies - 3606 pies = 394 pies

$$\text{CDT} = 3606 + 102 + 550 = 4258 \text{ pies}$$

4) Bomba Serie 513 Tipo I - 42B Centriliift

5) Para $Q = 1600$ bl/día la bomba produce 38.3 pies/etapa

$$\text{etapas} = \frac{4258}{38.3} \doteq 112 \text{ etapas}$$

6) Potencia: A 1600 bl/día la I-42 B requiere 0.69 HP/etapa

$$\text{HP} = 112 \times 0.69 \times 0.84 = 65 \text{ HP}$$

Motor Serie 544; 75 HP; 1350 v/35 amps

7) Cable: Para la combinación.- 1350 v, 35 amps y 4000 pies

Cable No. 4, Conductor de cobre; Caída de 18 v/1000 pies

Debe ser resistente a temperatura de 225°F

8) Voltaje Superficial requerido

$$V_s = 1350 + 18 \times 4 = 1422 \text{ volts}$$

9) Transformador:

$$\text{Kva} = \frac{1422 \times 35 \times 1.73}{1000} = 86 \text{ Kva}$$

Tres transformadores de 29 kva lo cual conduce a los existentes en el mercado de 37.5 kva cada uno.

10) Accesorios: Los necesarios.

DISEÑO PARA POZOS CON PRODUCCION DE GAS DE MEDIA A ALTA:

INTRODUCCION:

Los pozos que se bombean con gas representan una mayor dificultad en el diseño. Aquí se supondrá que todo o un cierto porcentaje del gas se bombea.

En general la solución consiste en determinar primeramente la presión de succión de la bomba (P_{wf} si se coloca en el fondo) y a continuación la presión de descarga de la bomba utilizando una correlación apropiada de flujo multifásico. Así se determina la presión diferencial entre la succión y la descarga de la bomba, que representa la ΔP que la bomba debe desarrollar. Iniciando con la presión de succión se suponen incrementos de presión y se determina el gradiente de presión promedio en dichos incrementos de los que puede determinarse la carga promedio desarrollada. De estos in-

crementos de carga se determinan las etapas requeridas entre los incrementos de presión. El número total de etapas se determina sumando los incrementos de etapas. Finalmente, los requerimientos de HP pueden determinarse y el diseño se termina.

A continuación se presenta un procedimiento suponiendo una mezcla homogénea en la bomba y que la bomba puede desarrollar una carga concordante a calculos 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 (B_o , R_s , etc.) también pueden utilizarse correlaciones como la de Standing.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA POZOS QUE PRODUCEN GAS.

- 1). Determinar la presión de succión de la bomba.
- 2). Determinar la presión de descarga de la bomba - De una correlación de flujo multifásico.
- 3). Determinar ΔP entre las presiones de succión y descarga.
- 4). Iniciar con la presión de succión, seleccionar incrementos de presión tales que: $(P_{succ} = P_{wf}) + \sum \Delta P'_s = P_{desc}$.
- 5). Determinar la densidad en cada presión seleccionada:
 - a) Encontrar el volumen de aceite, gas y agua en cada presión.
 - b) Encontrar la masa de aceite, gas y agua en cada presión.
 - c) Densidad: $\rho_{mix} = \text{Masa/Volumen}$
- 6). Encontrar el gradiente de presión en cada presión señalada.
- 7). Encontrar el gradiente de presión promedio entre las presiones señaladas.
- 8). Convertir los gradientes de presión promedio a pies de carga entre los incrementos de presión.
- 9). Encontrar el gasto (bl/día) en cada presión señalada.
- 10). Encontrar los gastos promedio entre las presiones señaladas.
- 11). Seleccionar la bomba para cada gasto promedio y obtener la carga en pies desarrollada en cada caso.
- 12). Determinar la presión desarrollada por etapa ($\text{Grad.prom.} \times \text{pies/etapa}$)
- 13). Determinar el número de etapas necesario por incremento de presión dividiendo $\Delta P / \frac{lb}{pg^2} / \text{etapa}$

14). Determinar el número total de etapas (Σ paso 13)

15). Determinar HP/etapa de las curvas de comportamiento.

16). Determinar el total de HP (Σ paso 15)

Ocurrirá una combinación de bombas, es decir, 120 etapas de una bomba X - 50 y 60 etapas de otra bomba Z - 60

Esta será la bomba para condiciones de operación y se necesitarán más etapas para descargar el pozo.

EJEMPLO: PROBLEMA PARA UN POZO CON BAJA PRODUCCION DE GAS

PROCEDIMIENTO DETALLADO PARA DETERMINAR EL NUMERO DE ETAPAS NECESARIO ENTRE EL INCREMENTO DE 500 A 700 lb/pg²

DATOS:

H_T	= 7000 pies	SG_g	= 0.63
T. R.	= 5 1/2 pg	q_L	= 500 bl/día
T. P.	= 2 3/8 pg	$q_o + q_w$	= 500 bl/día (50% agua)
P_{ws}	= 1000 lb/pg ²	SG_w	= 1.07
P_{wf}	= 500 lb/pg ²	SG_o	= 35° API
P_{wh}	= 200 lb/pg ²	T_{wh}	= 120°F
RGL	= 250 pie ³ /bl	T_{wf}	= 160°F
RGA	= 500 pie ³ /bl	Se bombea el 100% del gas	

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) Encontrar el volumen de aceite, gas y agua asociado con un barril de aceite en tanque de almacenamiento a 500 lb/pg² y 700 lb/pg² (Suponer un incremento de 200 lb/pg²).

$$V_{500} = V_o + V_g + V_w \quad ; \quad B = 1 \text{ bl a cond. tanque}$$

$$V_o = 1 (B_o) = 1 (1.08) = 1.08 \text{ bl. a cond. escurrimiento (a c.e)}$$

$$V_o (\text{pie}^3) = (1.08) (5.61) = 6.059 \text{ pie}^3$$

$$V_g = 500 \text{ pie}^3/\text{bl a cond. atm.}$$

$$B_{g500} = P_{atm} \times Z \times T_e / (T_{atm} \times P_e) = \frac{1}{5.615} \times \frac{14.7}{514.7} \times \frac{620}{520} \times \frac{0.97}{1} = 0.00577 \frac{\text{bl}}{\text{pie}^3}$$

$$B_g = 0.00504 \frac{TZ}{P} \left(\frac{\text{bl}}{\text{pie}^3} \right)$$

$$B_{9700} = 0.00404 \frac{\text{bl}}{\text{pie}^3}$$

$$V_w = 1 (B_w) = 1 \text{ B/B (No hay cambio en el volumen de agua)}$$

$$B_o(500) = 1.08 \quad R_s = 80 \text{ pie}^3/\text{bl a c.atm.}$$

$$B_o(700) = 1.094 \quad R_s = 120 \text{ pie}^3/\text{bl a c.atm.}$$

$$\text{GAS LIBRE (500)} = 500 - 80 = 420 \text{ pie}^3/\text{bl a c.atm.}$$

$$\text{GAS LIBRE (700)} = 500 - 120 = 380 \text{ pie}^3/\text{bl a c.atm.}$$

El volumen de aceite, agua y gas libre a 500 lb/pg² asociado con

$$1 \text{ B} = V_o + V_w + V_g$$

$$1 \text{ B} = (1.08) + (1.0) + 420 (0.00577) = 4.5034 \text{ bl/B}$$

Volumen total producido: (500 lb/pg²)

$$250 (4.5034) = 1125.85 \text{ bl}$$

Significa que por los 250 blo producidos en la superficie se manejan 1125.85 bl de fluidos en el fondo.

Para 700 lb/pg²:

$$1 \text{ B} = (1.094) + (1.0) + (380) (0.00404) = 3.6292 \text{ bl/B}$$

Volumen total producido: (700 lb/pg²)

$$250 (3.6292) = 907.3 \text{ bl}$$

2) Encontrar el gasto total de masa en lb_m/día

A) Masa de aceite:

$$SG_o (62.4) \left(\frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \right) (5.615) \left(\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}} \right) = SG_o (350) \left(\frac{\text{lb}}{\text{bl}} \right)$$

$$SG_o = \frac{141.5}{131.5 + \text{°API}} = \frac{141.5}{131.5 + 35} = 0.8498$$

$$1 \text{ B} = (0.8498) (350) = 297.3 \text{ lbs}$$

B) Masa de agua:

$$SG_w (350) = (1.07) (350) = 374.5 \left(\frac{\text{lb}}{\text{bl}} \right)$$

$$1 \text{ B} = 374.5 \text{ lbs.}$$

c) Masa de gas:

$$SG \cdot g(0.0764) \left(\frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \right) (500) \left(\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}} \right)$$

$$1 \text{ B} = (0.65) (0.0764) (500) = 24.83 \text{ lbs}$$

Masa por 1 B de aceite, agua y gas:

$$(297.3) + (374.5) + (24.83) = 696.63 \text{ lbs}$$

Gasto total de masa:

$$(696.63) \left(\frac{\text{lb}}{\text{bl}} \right) (250) \left(\frac{\text{bl}}{\text{día}} \right) = 174,157.5 \frac{\text{lbm}}{\text{día}}$$

Es un valor constante sin resbalamiento en cada presión señalada.

3) Encontrar el gradiente de presión en $\text{lb/pg}^2/\text{pie}$ a 500 y 700 lb/pg^2

$$\rho_{\text{mezcla}} = \frac{\text{MASA}}{\text{VOL.}}$$

$$\rho_{(500)} = \frac{696.63}{(4.5034)(5.61)} \frac{\text{lbm}}{(\text{bl})(\text{pie}^3/\text{bl})} = 27.55 \frac{\text{lbm}}{\text{pie}^3}$$

$$\text{Gradiente} = \frac{\rho}{144} \left(\frac{\text{lbm}/\text{pie}^3}{144 \text{pg}^2/\text{pie}^2} \right) = \frac{27.55}{144} = 0.1913 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\rho_{(700)} = \frac{696.63}{(3.6292)(5.61)} = 34.185 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$$

$$\text{Gradiente} = \frac{34.185}{144} = 0.2474 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

4) Encontrar el gradiente promedio:

$$\text{Grad. Prom.} = \frac{0.1913 + 0.2474}{2} = 0.2143 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

5) Encontrar el volumen promedio:

$$\frac{V_{(500)} + V_{(700)}}{2} = \frac{1125.85 + 907.3}{2} = 1017 \text{ bl/día}$$

6) Seleccionar la bomba para este gasto promedio

Veanse las bombas: Reda D-40, Centrilift M-34 ODI R9 ó Kobe II SOF.

- 7) La bomba Reda D-40 entrega una carga de 25 pies/etapa
De donde es necesario determinar la presión/etapa

$$(H/\text{etapa}) \text{ (lb/pg}^2/\text{ft)} = 25 \times 0.2143 = 5.36 \text{ lb/pg}^2/\text{etapa}$$

- 8) Encontrar el número de etapas necesario para el incremento de presión de 200 lb/pg²

$$N_e = \frac{200 \text{ lb/pg}^2}{5.36 \text{ lb/pg}^2/\text{etapa}} = 37.3 \text{ etapas (Usar 38 etapas)}$$

Bomba Reda D-40

EJEMPLO

A fin de determinar la presión de descarga requerida para la bomba en un pozo que produce una gran cantidad de gas se usará alguna de las correlaciones de flujo multifásico siguientes: (*)

- a) Hagedorn y Brown
- b) Orkiszewski
- c) Dun y Ros
- d) Beggs y Brill
- e) Poettmann y Carpenter

Se dispone de los mismos datos del ejemplo anterior excepto que se produce 100% aceite

Todo el gas libre entra a la bomba y se supone que no hay resbalamiento en la bomba. (GIP = 100%)

- 1) Determinar los requerimientos de descarga de la bomba utilizando el método de Hagedorn y Brown.

La presión de descarga requerida para que el pozo fluya es de 1300 lb/pg².

- 2) En tanto que como el volumen de 500 bl/día (aceite a cond. atm.) y su gas asociado es variable con la presión y temperatura, debe hacerse un cálculo del volumen en la succión de la bomba y del volumen conforme se avanza a través de la bomba.

Método de Cálculo del Volumen en la Bomba.

El volumen total que pasa a través de la bomba consiste de aceite, gas y agua a la temperatura y presión prevalecientes pozo abajo. El volumen de los tres se reduce conforme se mueven hacia arriba de la bomba aumentando progresivamente la presión hasta que se desarrolla la presión necesaria para hacer que el pozo fluya. En este caso es de 1300 lb/pg².

(*) Referencias.

Volumen total en la succión = aceite + agua + gas

$$V_{\text{succ}} = q_o (1 - W_c) B_o + q_o (W_c) + q_o (1 - W_c) (R - R_s) (GIP) B_g$$

GIP = Gas que entra a la bomba.

$$V_{\text{succ}} = 500(1-0)B_o + q(o) + 500(1-0)(500-80)(1.0)(0.00577)$$

$$V_{\text{succ}} = 500 (1.08) + 500 (420) (0.00577)$$

$$V_{\text{succ}} = 1751.7 \text{ bl a } 500 \text{ lb/pg}^2$$

W_c = porcentaje de agua

Es decir, 500 bl y el 100% del gas pasando por la bomba

R_s , se obtuvo de la correlación de Standing, entrando a la gráfica con 500 psi y a mano derecha, B_o también se obtuvo de la correlación de Standing.

$$B_g = 0.00504 \frac{ZT}{P} \frac{\text{bl}}{\text{pie}^3} \text{ a c. estándar}$$

Después de calcular el volumen en la succión se usa el mismo método para presiones sucesivamente mas altas con incrementos de 200 lb/pg² hasta obtener el volumen a la presión requerida de 1300 lb/pg².

La densidad específica del líquido a varias presiones puede calcularse fácilmente considerando que la masa que se mueve a través de la bomba, es constante.

$$\rho_g = \frac{28.97 \times SG_g \times P}{Z R T}$$

$$\rho_g = \frac{28.97 \times 0.65 \times 14.7}{1 \times 10.73 \times 520} = 0.0496 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \text{ a c. estándar}$$

$$\text{Peso del gas/bl} = 0.0496 \times 500 = 24.8 \text{ lb}$$

$$\text{Peso del aceite/bl} = 0.8489 \times 350 = \underline{297.0 \text{ lb}}$$

$$\text{Peso de un bl de aceite + gas asociado} = 321.8 \text{ lb}$$

El peso de 500 bl/día a condiciones de tanque y su gas asociado sería de 160,900 lb/día, el volumen en la succión de 1751.7 bl/día x 350 lb/bl (350 = 62.4 $\frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$ x 5.615 $\frac{\text{pie}^3}{\text{bl}}$) daría un peso de 613,095 lb si la S. G.

fuera = 1.0.

160,900 ÷ 613,095 = 0.262 y el gradiente de 0.113 lb/pg²/pie
S.G.

$$\frac{160900}{613095} = 0.262 \text{ Adim. Para } S. G. = 1$$

$$\rho = S. G. \times 62.4 \left(\frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \right) \times \left(\frac{1 \text{ pie}^2}{144 \text{ pg}^2} \right)$$

$$\rho = S. G. \times 0.433 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\text{Gradiente} = 0.262 \times 0.433 = 0.113 \text{ lb/pg}^2/\text{pie.}$$

La S.G. y el gradiente se requerirán en los cálculos para la bomba. Los cálculos para las presiones de 700, 900, 1100 y 1300 lb/pg² se harán en la forma siguiente:

$$a) \quad V_{700} = 500 (1 - W_C) B_O + q(W_C) + q(1 - W_C) (R - R_S) (GIP) B_g$$

$$V_{700} = 500 (1) 1.094 + 500(0) + 500(1) (500 - 120) (1) (0.00404)$$

$$V_{700} = 1314.6 \text{ bl/día}$$

$$S.G. = \frac{160900}{1314.6 \times 350} = 0.3497$$

$$\text{Gradiente} = 0.3497 \times 0.433 = 0.151 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$b) \quad V_{900} = 500(1) 1.11 + 500(0) + 500(1) (500 - 170) (1) (0.00311)$$

$$V_{900} = 1068 \text{ bl/día}$$

$$S.G._{900} = \frac{160900}{1068 \times 350} = 0.430$$

$$\text{Gradiente} = 0.430 \times 0.433 = 0.186 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$c) \quad V_{1100} = 500(1.16) + 500(500 - 225) (0.00249) = 922 \text{ bl/día}$$

$$S. G._{1100} = \frac{160900}{922 \times 350} = 0.4986$$

$$\text{Gradiente}_{1100} = 0.218 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$d) V_{1300} = 500 (1.163) + 500(500 - 240) 0.00224 = 873 \text{ bl/día}$$

$$S. G. = \frac{160900}{873 \times 350} = 0.527$$

$$Gr_{1300} = 0.228 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

Selección de la bomba.-

La curva de la bomba seleccionada para el rango de 1751.7 bl/día de volumen de succión y 873 bl/día de descarga es la bomba D-40. Con el método utilizado se tendrá un error debido al hecho de que se realizó con incrementos de 200 lb/pg², en lugar de otros más pequeños.

$V_{500} = 1751.7$	$S.G._{500} = 0.262$	$Gr_{500} = 0.113$
$V_{700} = 1314.6$	$S.G._{700} = 0.3497$	$Gr_{700} = 0.151$
$V_{avg} = 1533 \text{ bl/día}$	$S.G._{avg} = 0.305$	$Gr_{avg} = 0.132$

De la curva de la bomba D-40, una etapa desarrollará 18.4 pies de carga a 1533 lb/día, el gradiente promedio de 0.132 lb/pg²/pie, da por resultado:

$$18.4 \frac{\text{pies}}{\text{etapa}} \times 0.132 \frac{\text{lb/pg}^2}{\text{pie}} = 2.42 \frac{\text{lb/pg}^2}{\text{etapa}}$$

Para 200 lb/pg² se requieren:

$$\frac{200 \text{ lb/pg}^2}{2.42 \text{ lb/pg}^2/\text{e}} = 83 \text{ etapas}$$

La potencia por etapa cuando se bombea agua de S.G. = 1.0 es de 0.35 HP/etapa. Entonces la potencia por etapa para bombear una mezcla de S.G. = 0.305 será:

$$0.35 \times 0.305 = 0.107 \text{ HP/etapa}$$

Para 83 etapas: 0.107 HP/etapa x 83 etapas = 8.88 HP

Los mismos cálculos se hacen para cada incremento de presión de 200 lb/pg².

$$V_{\text{prom}(700 \text{ a } 900)} = 1191 \text{ bl/día}$$

$$S.G._{\text{prom}} = 0.389$$

Grad. = 0.169 lb/pg²/pie

Carga/etapa 1191 bl/d = 23.3 pies/etapa

23.3 $\frac{\text{pies}}{\text{etapa}}$ x 0.169 $\frac{\text{lb/pg}^2}{\text{pie}}$ = 3.93 lb/pg²/etapa

$\frac{200 \text{ lb/pg}^2}{3.93 \text{ lb/pg}^2/\text{et}}$ = 51 etapas

0.34 HP/et x 0.389 = 0.132 HP/et

51 x 0.132 = 6.745 HP para 51 etapas

Para los dos primeros cálculos se tiene un número total de etapas de 134 = (83 + 51) y un requerimiento de potencia de 15.625 = (8.88 + 6.745)

Para los dos siguientes incrementos se realizan los cálculos en forma similar y se encuentran 40 y 35 etapas con requerimientos de potencia de 5.94 y 5.57 respectivamente. El total de la bomba consiste de (83 + 51 + 40 + 35) = 209 etapas y (8.88 + 6.745 + 5.94 + 5.57) = 27 HP

Resumen (Figs. III.8

Bomba D - 40	= 209 etapas
Potencia	= 27 HP
Volumen de succión	= 1751.7 bl/día
Volumen descarga	= 897.0 bl/día
Presión descarga	= 1300 lb/pg ²
Presión succión	= 500 lb/pg ²
Presión desarrollada	= 800 lb/pg ²

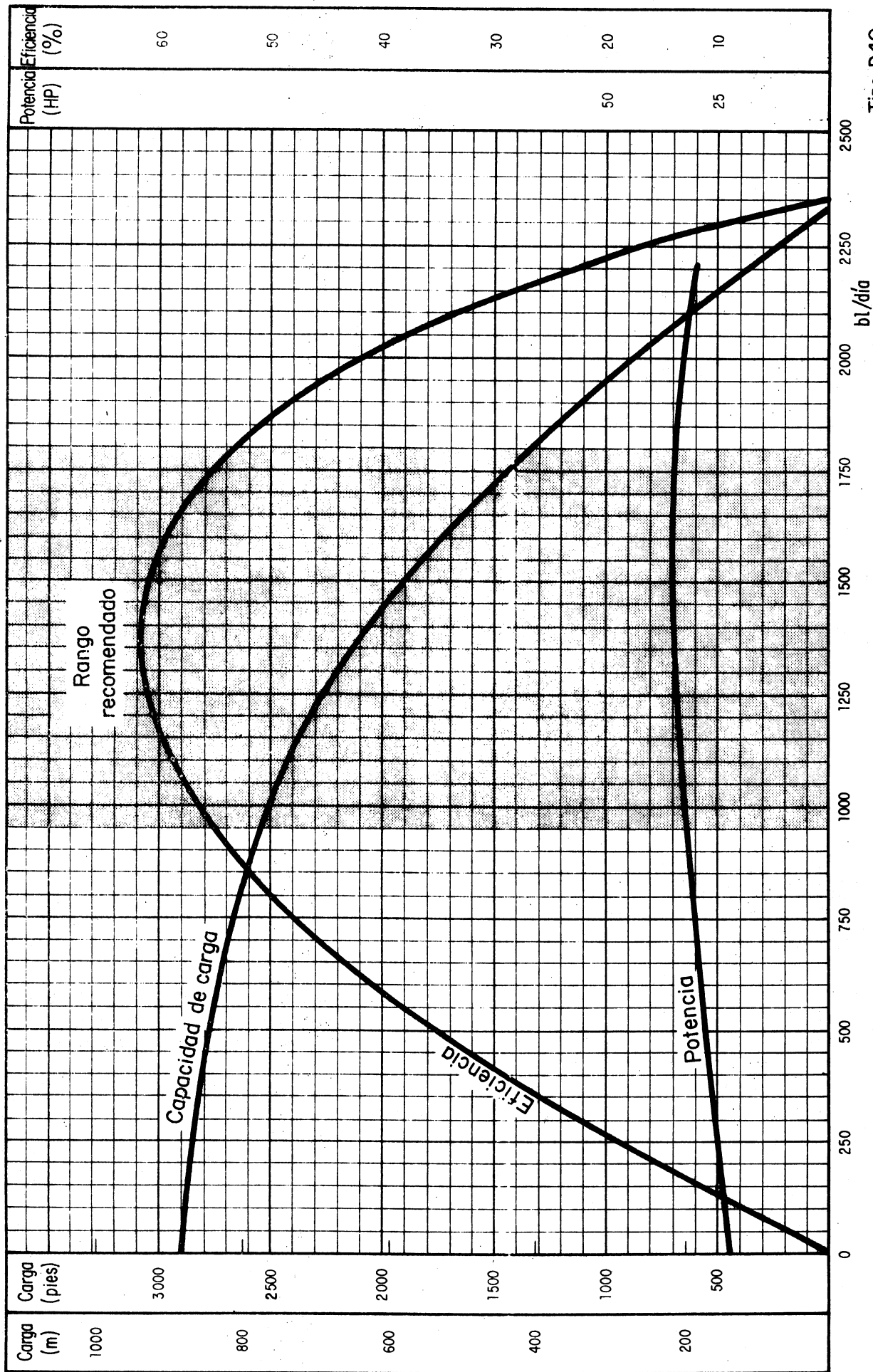
Esta bomba es la que se requiere para las condiciones establecidas, sin embargo pueden necesitarse mas etapas para descargar el pozo si se ha controlado con un fluido pesado. También la potencia requerida mientras se bombea este fluido será mayor.

Curva de comportamiento bomba Reda

100 etapas - D55 - 60 Hz

Serie 400 - 3500 RPM

Tamaño mínimo de
T.R. 5 1/2" D.E.



Tipo D40

Figura III.10

