



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO SUMERGIDO  
EN POZOS PETROLEROS

T E S I S

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

MARIO SOTO ALVAREZ

MEXICO, D. F.

1982



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

---

## INDICE

	Pág.
RESUMEN	
INTRODUCCION	
Cap. I Descripción del sistema	1
1) Conceptos Generales	1
A) Bombeo Mecánico	1
B) Bombeo Neumático	1
C) Bombeo Hidráulico	2
D) Bombeo Electrocentrífugo	2
E) Carga dinámica total	3
F) Curvas características de las bombas	5
G) Cavitación	6
Cap. II Descripción del equipo	8
1) Componentes del aparejo de bombeo Electrocentrífugo	9
2) Descripción del equipo subsuperficial	10
A) Motor eléctrico	10
B) Protector o sección sellante	11
C) Separador de gas	14
D) Bomba centrífuga sumergida	15
3) Descripción del equipo superficial	22
A) Transformador	22
B) Tablero de control	23
4) Equipo Auxiliar del bombeo electrocentrífugo	25
Cap. III Selección del equipo	27
1) Procedimiento de calculo para el diseño de bombeo- Electrocentrífugo	27
A) Información requerida	27
B) Secuencia del método de calculo	29

CAP. IV	DESCRIPCION DEL METODO DE CALCULO	31
	1) Aplicación del sistema	31
	2) Ejemplos de aplicación	32
CAP. V	APLICACION DEL SISTEMA	56
	1) Conclusiones y recomendaciones	56
	2) Nomenclatura	58
	3) Figuras	
CAP. VI	BIBLIOGRAFIA	59

## RESUMEN

Existe una gran variedad de procesos en donde se utilizan las bombas centrífugas con motor eléctrico; industria, campo comercio, etc. Es por esto que el ingeniero ó técnico, al utilizar esta máquina debe tener conocimientos sobre su construcción y funcionamiento, además de estar al tanto de la forma de controlar su operación.

El objetivo de este trabajo es dar un enfoque de como y en que tiempo debe aplicarse un sistema de bombeo electrocentrífugo para pozos petroleros; es decir, se trata de describir el sistema, el equipo, su selección adecuada, el diseño del aparejo de producción, ventajas y desventajas. A fin de ilustrar el procedimiento de diseño se incluyen ejemplos de aplicación.

Los cálculos se hacen tomando en cuenta que existe flujo multifásico vertical en la tubería de producción. Se toma en consideración que el gas libre que pasa a través de la bomba no altere su funcionamiento.

En el diseño del aparejo se presta especial atención a la profundidad de colocación de la bomba y a la elevación de presión que dicha bomba debe proporcionar a los fluidos del pozo para hacerlos llegar a la superficie.

Este trabajo esta basado en el programa de "Metodos artificiales de Producción", cátedra que se imparte en la Facultad de Ingenieria de la U.N.A.M. y va dirigido principalmente a los-estudiantes del ciclo profesional de ingeniero petrolero.

## INTRODUCCION

La cantidad de fluidos factibles de obtener de un pozo petrolero, depende de las características físicas de la roca almacenadora, de los fluidos y de la energía propia del yacimiento como empuje de gas disuelto, expansión de casquete de gas, empuje hidráulico, etc. Con el avance de la explotación, la presión declina hasta el punto de ser insuficiente para sostener la columna de fluido desde el yacimiento hasta la superficie. Antes de que esto ocurra, se implantan los sistemas de recuperación secundaria, ya sea para incrementar la presión de fondo ó efectuar un barrido de fluidos, prolongando así la vida productora del pozo

Los sistemas artificiales de producción complementan a los métodos de recuperación secundaria, proporcionando la energía necesaria para hacer llegar los fluidos a la superficie. No debe perderse de vista que los métodos de recuperación secundaria consisten en la adición de energía al yacimiento, a diferencia de los sistemas artificiales de producción que son la adición de energía a los fluidos del pozo.

Uno de los sistemas de producción artificial que se emplea actualmente en pozos petroleros es el bombeo electrocentrífugo sumergido, el cual presenta características que le dan venta--

---

jas y desventajas sobre los otros sistemas, para hacer producir a los pozos bajo ciertas condiciones.

Aunque tradicionalmente, la extracción de hidrocarburos por métodos artificiales se ha realizado con sistemas de bombeo neumático y mecánico, el bombeo electrocentrífugo ha cobrado popularidad debido a su eficiencia y capacidad de producir grandes volúmenes de fluidos.

## CAPITULO I DESCRIPSION DEL SISTEMA

### CONCEPTOS GENERALES

A continuación se describen brevemente los síntomas artificiales de producción, de uso común en pozos petroleros y posteriormente se presentan algunos conceptos generales a fin de que el lector se familiarice con los términos utilizados cuando se hace referencia al uso de bombas eletrocentífugas sumergidas.

#### A) Bombeo Mecánico.

Consta de una bomba reciprocante instalada a una profundidad mayor que el nivel de operación del pozo. La energía necesaria para accionar a esta bomba se transmite desde la superficie por medio de varillas de succión, haciendo que el fluido llegue a la superficie.

#### B) Bombeo Neumático

Consiste en inyectar gas comprimido a la tubería de producción, mediante válvulas colocadas a profundidades estratégicas, con la finalidad de aligerar la columna de fluido en el pozo. La inyección de gas puede hacerse en forma continua ó intermiten-

te, dependiendo de las características del pozo y del yacimiento.

C) Bombeo Hidráulico.

Se fundamenta en hacer llegar la energía a los fluidos, desde la superficie hasta una bomba subsuperficial, mediante un fluido a presión el cual acciona un pistón coaxial, impulsando a la superficie al fluido motor y a los hidrocarburos del pozo.

D) Bombeo electrocentrífugo.

Es el sistema que se describe detalladamente en este trabajo, consta de una bomba centrífuga vertical accionada por un motor eléctrico, que recibe la energía por medio de un cable conductor desde la superficie. Todo el aparejo se coloca dentro de la tubería de revestimiento y abajo del nivel de operación del pozo.

A continuación se presentan algunas de sus ventajas y -- desventajas:

Ventajas:

- i) Producción de altos volúmenes.
- ii) El espacio superficial que ocupa es mínimo.
- iii) Se utiliza en proyectos de inyección de agua.
- iv) Factible de instalarse en pozos desviados.
- v) No le afectan las parafinas.

Desventajas:

- i) Alto costo inicial
- ii) Posibilidad de dañarse con fluidos corrosivos ó con formaciones delesnables.
- iii) Para inspección ó reparación es necesario extraer todo el --  
aparejo del pozo.
- iv) La vida del cable es relativamente corto.
- v) Poco tiempo efectivo de úso.
- vi) Disponibilidad de energía eléctrica.

E) Carga dinámica Total:

Es la carga que se requiere que la bomba produzca cuando está bombeando al gasto deseado. Es la diferencia entre la carga requerida en la descarga de la bomba para impulsar a los fluidos-- hasta la superficie y la carga existente en la succión de la bomba.

Al referirse a la carga dinámica total, cuando se bombea unicamente fase líquida sin gas, se define como:

$$C.D.T. = H_c + H_f + H_d \quad E_c (I)$$

en donde:

CDT: Carga dinámico Total en pies.

$H_c$ : Es la altura de elevación a partir del nivel del fluido a bombear hasta la superficie, en pies.

$H_f$ : Es la carga por fricción en la Tubería de producción y líneas superficiales, en pies (FIG N° 14)

$H_d$ : Es la carga por pérdida en la línea de descarga debido a válvulas, separador, tubo superficial, etc., en pies.

Lo anterior se puede calcular en Términos de carga como-  
unidad de presión, ya que la densidad del fluido no cambia a tra-  
vés del sistema de bombeo, de la siguiente manera:

$$\text{Carga} = \frac{K \times \text{Presión}}{\text{S.G.}} \quad \text{Ec (II)}$$

Donde:

$K$  = Constante de proporcionalidad = 2.31 pies/lb/plg<sup>2</sup>

S.G. = Gravedad específica del fluido.

Presión en lb/plg<sup>2</sup>

Carga en pies.

F) Curvas características de las bombas.

Las curvas características de una bomba centrífuga muestran las interrelaciones entre capacidad volumétrica, capacidad de carga, fuerza y eficiencia; ya que la carga total generada por la bomba, la fuerza requerida para moverla y la eficiencia resultante varían con la capacidad volumétrica.

La carga, fuerza y eficiencia generalmente se trazan contra la capacidad volumétrica a velocidad constante, como se muestra en la FIG Nº 9

La curva H-Q en la fig no. 9, que muestra la relación -- entre la capacidad y la carga total, se le llama curva de carga - capacidad.

La curva P-Q, muestra la relación entre la potencia requerida y la capacidad de la bomba, es la curva fuera-capacidad, pero se le conoce comúnmente como curva de potencia al freno - - (BHP) contra gasto.

La curva  $\eta$ -Q, que muestra la relación entre la eficiencia y la capacidad se le llama curva de eficiencia.

La importancia que tienen éstas es que de ahí se determina: 1) el número de etapas de la bomba y 2) la potencia neces-

ria para impulsar a está.

1). La elevación de presión suministrada por cada etapa se obtiene de la curva H-Q de la curva característica de la bomba seleccionada. El tamaño de la bomba está en función del gasto requerido en la superficie; es decir, a mayor capacidad mayor número de etapas, éstas se obtienen dividiendo la carga dinámica total requerida entre la carga por etapa:

$$\text{NUMERO DE ETAPAS} = \frac{\text{CARGA DINAMICA TOTAL}}{\text{CARGA / UNA ETAPA}} \quad \text{Ec (III)}$$

2). La potencia requerida por etapa de la bomba se obtiene de la curva potencial al freno - capacidad de las curvas características de la bomba seleccionada. la potencia necesaria para impulsar a la bomba se determina multiplicando, la potencia requerida para impulsar una etapa por el número de etapas de la bomba:

$$\text{BHP} = (\text{HP}_e) (\text{Nro ETAPAS}) (\text{S.G.}) \quad \text{Ec (IV)}$$

#### G) Cavitación.

La cavitación se define como la vaporización local del fluido, debido a las reducciones locales de presión, por la ac-ción dinámica del fluido. La condición física general para que ocurra la cavitación es cuando la presión en un punto vaya del va

lor de la presión de saturación del fluido, formándose burbujas de gas que inmediatamente pasan a regiones de presión mayor que la de evaporación. En este sitio, las burbujas se condensan viol lentamente originando presiones locales de gran intensidad. Debido a esta impresión, las aspas del impulsor vibran a todo lo largo y se puede producir un alto grado de erosión.

La cavitación es un efecto significativo en el funcionamiento de la bomba, tanto la capacidad como la eficiencia de bombeo se ven severamente reducidas.

## CAPITULO II

### DESCRIPCION DEL EQUIPO

#### DESCRIPCION DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO SUMERGIDO

El aparejo de bombeo electrocentrifugo sumergido se muestra instalado en su forma típica en la fig. No. 1. La aplicación común consiste en que el aparejo quede suspendido de la tubería de producción, dentro de la tubería de revestimiento y sumergido en el fluido por extraer. De la figura se aprecia que mediante un cable de potencia, flejado en el exterior de la tubería de producción, se conduce la energía eléctrica desde la superficie hasta el extremo inferior del aparejo, para impulsar la flecha del motor, que a su vez impulsa a las flechas del protector, del separador de gas y de la bomba, la cual descarga en la tubería de producción el fluido que bombea. El cable puede ser redondo ó plano, según se requiera a lo largo del aparejo y su diseño debe soportar el ambiente interior del pozo.

El protector impide que el lubricante del motor se contamine con los fluidos del pozo. Además, es posible que la instalación requiera de un separador de gas, cuando sea necesario separar una cantidad sustancial de gas libre que podría dañar a la bomba, ya que ésta no trabaja como un compresor.

Cuando se tiene un fluido con alta relación gas-aceite deben tomarse en cuenta los efectos benéficos del gas que se libera a lo largo de la tubería de producción, ya que al reducir la densidad de la mezcla, la potencia para el motor es menor y por consiguiente el número de etapas de la bomba.

#### II.1). COMPONENTES DEL APAREJO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

El aparejo de bombeo electrocentrífugo sumergido consta de siete partes principales:

- i) Motor eléctrico.
- ii) Protector ó sección sellante.
- iii) Separador de gas.
- iv) Bomba centrífuga
- v) Cable conductor.
- vi) Transformador.
- vii) Tablero de control.

Además existe equipo auxiliar como válvulas, flejes, guardacables, cabezal de producción, dispositivos eléctricos de control y medición, etc., que se utilizan a fin de asegurar un buen acoplamiento y funcionamiento del equipo.

## 11.2). DESCRIPCION DEL EQUIPO SUBSUPERFICIAL

11.2.a). Motor Eléctrico.

En las operaciones del bombeo electrocentrífugo, la fuerza impulsora que hace girar a la flecha de la bomba, es el motor. Los motores eléctricos utilizados para este fin (figura No. 2) son del tipo de inducción, bipolar, trifásico, trabajan a una velocidad aproximadamente constante de 3500 RPM a 60 ciclos por segundo y con 200 a 2300 Volts de energía. Consta de dos partes principales: Estator y Rotor. El estator es la carcasa de acero del motor, en cuyo interior se instala firmemente un núcleo laminado con ranuras, en las cuales se coloca un devanado formado por grupos de bobinas. El rotor es del tipo "Jaula de Ardilla", formado por un conjunto de láminas con estructura cilíndrica y ranuras oblicuas montadas en la flecha. Cuando se conectan los devanados del estator a una fuente polifásica de corriente alterna, se crea un campo magnético cuya velocidad se expresa:

$$N = \frac{120 F}{p} \dots\dots\dots \text{Ec. (V)}$$

Donde:

N : Velocidad en RPM

F : Frecuencia del voltaje de operación en Ciclos por Segundo.

P : Número de polos.

La lubricación del motor se logra mediante un aceite mineral refinado dieléctrico que fluye al rededor y a través de los cojinetes radiales. El enfriamiento se obtiene por transferencia de calor de la carcasa a los fluidos del pozo que pasan por la superficie exterior del motor, de aquí la importancia de colocar la unidad de bombeo en un punto superior a los disparos de la tubería de revestimiento.

La profundidad a que se coloca la unidad debe ser tal que, las pérdidas de voltaje a lo largo del cable no sean demasiado altas. Si esto sucede, se requiere de la selección de un motor de mayor voltaje y menor amperaje con el que se puede usar un cable mas pequeño, sin embargo será necesario utilizar un tablero de control de mas alto voltaje.

La potencia del motor es función de: la carga a levantar, las características del fluido, la producción requerida, la presión requerida en la superficie, etc.

#### 11.2.b). Protector o Sección Sellante

El protector es la parte del sistema que se coloca entre el motor y la bomba, cumple con las siguientes funciones:

- i). Amortigua en los cojinetes del motor, el empuje de las cargas axiales de la bomba.
- ii). Iguala la presión interna del motor con la presión del pozo, evitando que los fluidos del pozo entren al motor.
- iii). Provee el volumen necesario para la expansión y contracción del aceite lubricante del motor, debido al calentamiento y enfriamiento de éste, cuando la unidad esta operando ó se para.

El fluido del pozo tiende a entrar en el motor cuando éste se sumerge dentro del pozo, desde el momento en que existe comunicación entre el fluido del protector y el fluido del pozo, (figura No. 3) la presión interna del motor es igual a la presión de sumergencia. Generalmente el fluido del protector es mas pesado que el agua (1.8 S.G. ó mas) y separa el aceite del motor de los fluidos del pozo, operando como un tubo tipo "U" dentro de dos camaras.

La figura No. 3-A muestra la posición del fluido del protector. durante la operación del motor, el aceite se expande, debido al calentamiento dentro de la carcasa, lo cual impide que el fluido del pozo entre ó contamine al aceite del motor.

Cuando el motor alcanza su temperatura de operación, éste opera a baja presión diferencial relativa al espacio anular y es cuando el fluido protector funciona como tubo en "U".

En la figura No. 3-B se muestra el protector en condiciones estáticas, es decir cuando el motor está parado. El aceite de éste se enfría y el fluido protector evita la contaminación del fluido del motor con los fluidos del pozo.

El límite superior del sello del eje conecta al eje principal de la bomba y el límite inferior conecta con el eje del motor, de tal manera que el peso del eje de la bomba, las cargas hidráulicas longitudinales y otras cargas, son transmitidas de la bomba a los cojinetes de empuje del motor.

La conexión de las flechas del motor, protector y bomba se realizan con acoplamientos, formando así una sola pieza rotatoria, en la que los rotores del motor quedan en un extremo y los impulsores de la bomba en el otro, eliminando el riesgo de perder energía a causa de la transmisión mecánica.

La figura No. 4 ilustra la forma de como está constituido un protector.

### 11.2.c). Separador de Gas.

El separador de gas se coloca entre el protector y la bomba, cuando así lo requieren las condiciones del pozo. -- Además de servir como succión para la bomba, separa el gas libre existente a la profundidad de colocación. Una bomba centrífuga funciona con líquidos y no con gases que podrían dañar su funcionamiento. Así, en pozos con alta relación gas-aceite es necesario un separador de gas en el aparejo de producción.

Separar el gas del líquido no es necesariamente la manera óptima de bombeo de un pozo. A pesar de que el volumen total de succión es reducido, la presión de descarga se incrementa, debido a existe menos gas en la columna de fluido arriba de la bomba.

Existen varios diseños de separadores de gas, pero -- aún no se determina cual es su efectividad para separar el gas libre del fluido.

La figura No. 5 ilustra el separador de gas más usado en el cual el fluido del pozo entra por la sección de toma invirtiendo su dirección al punto de entrada, permitiendo así la separación de gas del líquido. El gas separado se mueve hacia arriba, por el espacio anular hacia el cabezal donde se recolecta.

Esta operación provee a la primera etapa de la bomba con un fluido de mayor densidad, a consecuencia de la reducción en la relación gas-aceite y con cierta presión hidrostática.

Otro tipo de separador de gas, figura No. 6, opera bajo el principio de separación de partículas de diferente densidad por medio de fuerzas centrífugas. En este diseño, el impulsor rotatorio crea un campo de fuerzas centrífugas y como el fluido del pozo, que contiene gas disuelto, pasa a través del impulsor, está sujeto a dichas fuerzas, las partículas de líquido de alta densidad, son lanzadas hacia la periferia del impulsor, mientras que las partículas de gas se acumulan cerca de la flecha desde donde son desalojadas a través del espacio-anular hasta la superficie. Así el fluido libre de gas, entra al primer impulsor de la bomba con su carga hidrostática correspondiente.

El separador de gas ayuda a evitar el candado de gas en la bomba y generalmente aumenta su eficiencia si se utiliza en pozos con alta relación gas-aceite.

#### 11.2.d). Bomba Centrífuga Sumergible

El bombeo se define como la adición de energía a un fluido para moverlo de un punto a otro, en este caso se eleva el fluido a un nivel más alto.

La bomba se coloca comunmente en el extremo inferior de la tubería de producción, cuidando que la succión quede por debajo del nivel dinámico del fluido, a una profundidad que asegure su alimentación continua, previendo posibles variaciones en las condiciones del pozo.

Las bombas centrífugas no pueden succionar ni arrastrar fluido, éste debe llevarse a presión al primer impulsor, de ahí que es necesario mantener permanentemente una carga hidrostática por arriba de la bomba.

Las bombas sumergibles son centrífugas multietapas, las etapas imparten energía al fluido por la fuerza centrífuga el tipo de etapa determina el volumen de fluido a producir, el número de etapas determina la carga total generada y la potencia requerida. Estas pueden funcionar con la válvula de descarga cerrada y la carga hidrostática que genera permanece constante mientras ésta funcione con la misma velocidad.

Cuando el fluido que se bombea es corrosivo ó contiene arena es necesario que la bomba sea capaz de manejarlo, para lo cual los impulsores pueden ser de bronce, los difusores y flecha de acero monel, ó de alguna aleación de metal fabricado especialmente para este fin.

Los impulsores de la bomba pueden ser flotantes, estos producen empuje ascendente ó descendente moviéndose a lo largo de la flecha cuando está en operación. En una bomba de impulsores fijos, estos no se mueven. En ambos casos los empujes desarrollados los amortigua un cojinete en la sección sellante. Por esta razón el motor con flecha ó eje hueco es el que se utiliza.

La figura No.7 muestra la configuración de una bomba utilizada en un aparejo de bombeo electrocentrífugo.

La capacidad de estas bombas esta limitada por el tamaño físico del pozo. Una bomba que trabaja fuera del rango recomendado, el cual se indica en las curvas de comportamiento de las bombas, (figura No. 9), produce empuje ascendente cuando opera a un gasto superior al de su diseño y cuando opera a un gasto inferior produce empuje descendente.

La figura No. 8 muestra configuraciones comunes de impulsores utilizados en bombas centrífugas. Un impulsor que opera a una cierta velocidad genera la misma cantidad de carga, independendiente de la densidad específica del fluido, debido a que dicha carga se expresa en términos de altura de columna de ése fluido si el primer impulsor esta sumergido, no habra problemas de cebado y la bomba podra controlarse sin que alguna vez trabaje en seco.

i) Condiciones de operación y sus efectos en el funcionamiento de la bomba.

Las curvas que se publican usualmente se refieren a un funcionamiento de la bomba con velocidad fija, utilizando como fluido de prueba agua con peso específico de uno, y viscosidad igual a un centipoise. En la práctica, la bomba puede operar en condiciones diferentes, en tales casos es necesario predecir el funcionamiento de la bomba bajo condiciones reales de operación. A continuación se enuncian las características que afectan las condiciones de operación de bombeo.

A) Efecto del Peso Especifico del Fluido.

La carga en  $\text{lb/pg}^2$  desarrollada por la bomba depende de la velocidad periférica del impulsor y del peso específico del fluido a bombear, consecuentemente, la curva carga-capacidad (H-Q) se ve afectada por el peso específico del fluido.

Un ejemplo ilustrativo lo muestra la figura No. 10, en donde se observa que a medida que el peso específico del fluido es mayor, con la carga en pies constante, la presión que debe desarrollar la bomba va en aumento.

La potencia al freno varía directamente y la eficiencia de bombeo se mantiene constante, independiente del peso

específico del fluido.

B) Efecto del Cambio en la Velocidad.

Al cambiar la velocidad de la bomba, la capacidad varía en forma directamente proporcional a dicha velocidad. La carga producida es proporcional al cuadrado de la velocidad y la potencia al freno proporcional al cubo de la velocidad.

La eficiencia de bombeo se mantiene constante al cambio de la velocidad.

C) Efecto de un pequeño cambio en el diámetro del impulsor.

En este caso, la capacidad varía directamente con el diámetro, la carga varía con el cuadrado del diámetro y la potencia al freno varía con el cubo del diámetro. La eficiencia de bombeo no cambia.

D) Efecto de la Viscosidad del Fluido.

Al manejar fluidos viscosos se incrementa la resistencia interna al flujo, las pérdidas por fricción en los impulsores y también la potencia al freno. La viscosidad solo tiene un efecto en pérdidas, reduciendo la capacidad de bombeo. La eficiencia de bombeo cambia con los efectos de la viscosidad.

## ii) Resumen de las Leyes Afines al Bombeo

## 1) Cambio solo del diámetro:

$$Q_2 = Q_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)$$

$$H_2 = H_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2$$

$$BHP_2 = BHP_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3$$

## 2) Cambio solo de la velocidad:

$$Q_2 = Q_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)$$

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

$$BHP_2 = BHP_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^3$$

## 3) Cambio de la velocidad y el diámetro:

$$Q_2 = Q_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \times \frac{N_2}{N_1} \right)$$

$$H_2 = H_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \times \frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

$$BHP_2 = BHP_1 \left( \frac{D_2}{D_1} \times \frac{N_2}{N_1} \right)^3$$

en donde:

$Q_1, H_1, D_1, N_1, BHP_1$  son la capacidad, carga, diámetro, velocidad y potencia al freno iniciales respectivamente.

$Q_2, H_2, D_2, N_2, BHP_2$  son la capacidad, carga, diámetro, velocidad y potencia al freno nuevas respectivamente.

#### II.2.e) Cable Conductor

La energía requerida por el motor se suministra por medio de un cable conductor. Este es de estilo redondo ó plano, aislado de tal manera que soporte las temperaturas de fondo, presiones e impregnaciones del fluido del pozo.

La protección mecánica puede ser de acero, bronce, metal monel ó funda de plomo, dependiendo de los requerimientos y condiciones del pozo, a fin de protegerlo al aceite y al agua bajo condiciones de operación. Además esta protección debe ser flexible para que permita enrollarlo en su carrete, cuando se introduce ó extrae del pozo.

Las propiedades y tamaño del cable son función del emperaje de operación, de la caída de voltaje, del espacio disponible entre las juntas de la tubería de producción y la de revestimiento y de las temperaturas de fondo del pozo.

Es recomendable que las pérdidas de voltaje a lo largo del cable no sean mayores del 20% del voltaje que requiera el motor. Las pérdidas de voltaje por 1000 pies de cable se calculan utilizando las curvas que se ilustran en la fig. No. 12.

La fig. No. 11 muestra configuración del cable conductor.

### 11.3). EQUIPO SUPERFICIAL

#### a). TRANSFORMADOR

Un transformador es una máquina estática de inducción en la cual la energía eléctrica se transforma en sus dos factores: tensión e intensidad, para satisfacer los requerimientos en las instalaciones de corriente alterna destinadas al suministro de energía.

Esta constituido por un núcleo magnético cerrado, formado por planchas delgadas de hierro aisladas entre si y sobre cuyas columnas van montados los arrollamientos primarios y secundario, como lo ilustra la fig. No. 13, también ilustra un transformador conectado a la línea de suministro.

Estas unidades llenas con aceite para autoenfriamiento

to, éstas diseñadas para convertir el voltaje de la línea primaria al voltaje que requiera el motor.

Para evitar los peligros de las sobretensiones se emplean los pararrayos, que sirven para conducir a tierra la amplitud de las sobretensiones. Estos deben conectarse permanentemente a las líneas de suministro, pero han de entrar en funcionamiento únicamente cuando la tensión alcance un valor conveniente y superior a la de servicio.

La capacidad de un transformador se mide en kilovoltamperios (KVA) y su potencia en kilovatios (KV).

#### 11.3.b) Tablero de Control

Es un dispositivo acompañado de accesorios para ajustarse a cualquier instalación de bombeo electrocentrifugo. Funciona en condiciones extremas de medio ambiente, expuesto a la intemperie, puede ser simple con únicamente un botón de arranque y protecciones de sobrecarga o muy complejo con alarmas y controles automáticos de control remoto con interruptor tripolar, relevador tripolar de sobrecarga y baja corriente, fusibles de desconexión, pararrayos, luces, relojes para bombeo intermitente y amperímetros.

Las funciones principales del tablero de control son:

el arranque y la protección del motor. Para el arranque se -- utiliza un dispositivo cuya función es conectar el motor a la línea suministradora de energía, por medio de un botón magnético. La protección al motor durante su funcionamiento se debe a que ocurren diversas alteraciones en la línea de suministro de energía que ocasionan daños a éste y para protegerlo se deben tener dispositivos que aseguren su buen funcionamiento, -- desconectándolo de la línea oportunamente al presentarse una perturbación. Las causas de las alteraciones son: cortocircuitos, sobrecargas y disminución ó desaparición de la tensión.

1) Cortocircuitos.- En cuyo caso para proteger al motor, a los conductores y al circuito de control, se emplean fusibles o interruptores termomagnéticos, los cuales abren el circuito de alimentación del motor, en el instante en que se produce el cortocircuito. Estos dispositivos deben ser capaces de permitir el paso de altas corrientes en el instante de arranque sin desconectar al motor.

2) Sobrecargas.- Una sobrecarga es un aumento en la intensidad de corriente, que si bien no alcanza los valores de un corto circuito, puede calentar excesivamente los devanados del motor. Los dispositivos de control son los relevadores de sobrecarga.

3) Baja tensión.- El empleo de circuitos de dos hilos

en los arrancadores magnéticos desconectan inmediatamente al sistema. En el instante en que las condiciones normales se restauren, el motor se conecta automáticamente. Sin embargo, en algunas condiciones, un arranque súbito puede dañar al motor, para evitarlo se utiliza circuitos de tres hilos que hacen necesario pulsar el botón de arranque para iniciar la operación.

Otras protecciones son, protección contra inversión de rotación, al cruzarse accidentalmente dos de las líneas de alimentación y protección diferencial, que previene fallas en los devanados del motor, sobre todo en motores de gran capacidad.

#### II.4) EQUIPO AUXILIAR DEL BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

Además de las partes básicas del sistema, para que éste funcione con eficiencia, se necesitan otros componentes, tales como: válvulas, flejes, cabezal de producción, guardacable, herramientas adecuadas para manejar y acoplar todo el equipo, medidores diversos en la superficie, etc.

Para mantener la tubería de producción llena de fluido se usa una válvula de retención, la cual es un dispositivo de purga, para desalojar al fluido cuando es necesario sacar el aparejo de producción.

Los flejes sirven para afianzar el cable firmemente - en toda su longitud. Se recomienda que éstos se coloquen a intervalos de cinco metros en la tubería de producción y que se usen 25 de éstos para sujetar el cable a la bomba y al protector.

Los guardacable sirven para proteger al cable conductor de las posibles averías que pudieran suceder cuando se está introduciendo el aparejo de producción en el pozo.

El cabezal de producción, diseñado especialmente para que permita el paso del cable conductor y de la tubería de producción que se instale en el pozo, y para evitar la fuga de fluidos hacia la superficie.

Debe contener además, sellos y dispositivos de purga para la recolección del gas libre en el espacio anular de la tubería de revestimiento.

Por último, se usara toda una serie de aditamentos -- que faciliten el transporte, instalación y operación del sistema; tales como: carretas para el cable, equipo de superficie - regulador y medidor, cajas metálicas para el traslado de la bomba y el motor, etc.

CAPITULO III  
SELECCION DEL EQUIPO

1). PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA EL DISEÑO DE BOMBEO ELECTO -  
CENTRIFUGO SUMERGIDO.

A). Información requerida.

La aplicación del procedimiento de cálculo requiere -  
de la información siguiente:

1. Información para identificar el pozo
2. Estado mecánico del pozo. (diámetros y profundidad de las tuberías de revestimiento y producción).
3. Profundidad del intervalo disparado.
4. Presión estática a un gasto conocido.
5. Relación gas-aceite producidas.
6. Porcentaje de agua.
7. Densidad del aceite.
8. Temperatura de fondo.
9. Temperatura en el cabezal.
10. Densidad específica del agua.
11. Índice de productividad.

12. Viscosidad del aceite medida a dos temperaturas.
13. Producción deseada.
14. Temperatura ambiente.
15. Profundidad deseada de colocación de la bomba y su presión de succión.
16. Presión requerida en la boca del pozo.
17. Voltaje disponible en la superficie.
18. Eficiencia del separador de gas en el fondo del pozo.
19. Relación gas libre-líquido permisible en la bomba.
20. Problemas existentes, tales como; arena, parafinas, fluidos corrosivos incrustaciones, etc.
21. Datos PVT del fluido.

Respecto a estos se hacen las siguientes aclaraciones:  
Para el punto No. 18 se puede tomar 85% de eficiencia, y para el punto No. 19 se puede considerar 0.1, teniendo en cuenta -- que estos valores pueden cambiar dependiendo del tipo de bomba que se utilice.

B) SECUENCIA DEL METODO DE CALCULO

A continuación se presenta la secuencia del método - cálculo paso a paso,

1.- Determinar la capacidad de producción del pozo - a la profundidad de colocación de la bomba ó determinar la profundidad de colocación de la bomba a partir de la producción - deseada.

2.- Calcular la presión, que la bomba debe suministrar a los fluidos del pozo, para obtener en la superficie el - gasto deseado, la cual se convierte a carga de columna de fluido.

3.- Convertir a carga la columna de fluido. Seleccionar de las curvas características de las bombas aquella cuya eficiencia máxima se obtenga con un gasto igual, ó muy cercano, al gasto deseado y que a su vez corresponda a una bomba - que se pueda introducir en la tubería de revestimiento del pozo.

4.- Calcular el número de etapas de la bomba, para - producir el gasto deseado.

5.- Calcular la potencia del motor, necesaria para impulsar la bomba.

6.- Determinar el tipo, calibre y longitud del cable conductor.

7.- Calcular las pérdidas de voltaje en el cable y determinar el voltaje requerido en la superficie, con lo que se determina el tipo de tablero de control.

8.- En caso de que el voltaje de operación difiera considerablemente del disponible en la superficie, deben de calcularse las dimensiones del transformador necesario.

9.- Seleccionar el tablero de control, teniendo en cuenta que su capacidad debe ser cuando menos la del transformador.

10.- Finalmente, seleccionar el resto del equipo, - tales como;

- I) Tipo y tamaño del cabezal
- II) Flejes y guardacables
- III) El equipo necesario para asegurar la correcta - instalación y operación del aparejo.

CAPITULO IV  
DESCRIPCIÓN DEL METODO DE CALCULO

1) APLICACIONES DEL SISTEMA

Una forma de diseñar este tipo de instalaciones es supe-  
ner:

1). Que la bomba debe estar colocada por debajo del ni-  
vel de operación del fluido, para que la alimentación de ésta no  
se interrumpa, debido a que la cantidad de gas libre que pasa a-  
través de ella puede afectar sustancialmente su comportamiento.

2). Que el flujo en la tubería de producción es de fa-  
se líquida en su totalidad.

Lo anterior es válido cuando se producen pozos con al-  
tas relaciones agua-aceite y volúmenes pequeños de gas de forma-  
ción. Pero en los casos en que el aceite y gas de formación - -  
constituyen una parte considerable de los fluidos a producir, es  
necesario tomar en consideración los efectos del gas que se li-  
bera dentro de la tubería de producción, a medida que se reduce-  
la presión en la misma.

Los aspectos a los que se presta especial atención es -

el diseño de un aparejo de bombeo electrocentrífugo son:

- a) La determinación de la profundidad adecuada de colocación -- de la bomba.
- b) El cálculo de la elevación de presión que dicha bomba debe - suministrar al fluido del pozo, a fin de obtener en la super- ficie el gasto deseado a la presión necesaria.

#### Ejemplos de aplicación.

A fin de ilustrar el procedimiento de selección, a con- tinuación se presentan los siguientes ejemplos hipotéticos.

## 2). EJEMPLOS DE APLICACION

### EJEMPLO No. 1

#### DATOS

Diámetro nominal de T.R.	$5\frac{1}{2}$ pg.; 17 lb/pie
Diámetro nominal de T.P.	2.3/8 pg.
Profundidad del intervalo productor	4148-4158 pies
Profundidad total.	4234 pies.
Presión estática	900 lb/pg <sup>2</sup>
Presión de fondo fluyendo.	550 lb/pg <sup>2</sup>

Gasto que corresponde a esta presión	625 bl/día (30 bl/día ac).
Relación gas líquido.	15 pies <sup>3</sup> /bl
Densidad del aceite.	36° API
Temperatura de fondo fluyendo.	98 °F
Densidad del agua producida.	1.02
Presión requerida en la superficie.	50 lb/pg <sup>2</sup>
Gasto deseado.	300 bl/día.

#### 1. DETERMINAR LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DEL POZO

El gasto a producir se determina por medio del índice de productividad del pozo. Para el caso en que el pozo opere arriba de la presión de saturación, el comportamiento del índice de productividad es lineal, es decir:

$$J = Q / (P_{ws} - P_{wf}) \dots \dots \dots \text{ec (VI)}$$

en donde:

J: Índice de productividad en bl/día/lb/pg<sup>2</sup>

Q: Gasto total deseado en bl/día

$P_{ws}$ : Presión estática en lb/pg<sup>2</sup>

$P_{wf}$ : Presión de fondo fluyendo en lb/pg<sup>2</sup>

Para el caso en que la presión de fondo fluyendo está por debajo de la presión de saturación, el comportamiento de la relación gasto-presión no es una función lineal, por lo tanto -- para predecir el gasto en función de la presión se utiliza el método propuesto por J.V. Vogel, con el cual se construyó la fig.- No. 15 y a la que se le relacionó la siguiente ecuación

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2 \quad \text{--- Ec (VII)}$$

en donde:

$Q$  : es el gasto propuesto ó real.

$Q_{\max}$  : es el gasto total máximo.

$P_{wf}$  : es la presión de fondo fluyendo ó real

$P_{ws}$  : es la presión estática ó máxima.

FORMA DE UTILIZAR LA CURVA DE VOGEL.- Conociendo un -- gasto y la presión de fondo fluyendo correspondiente y su pre--- sión estática ó máxima, se procede de la siguiente manera:

- 1.- Determinar el valor de  $P_{wf}/P_{ws} = P$ .
- 2.- Con este valor entrar a la curva de Vogel, moverse horizontalmente hasta encontrar la curva, luego moverse verticalmente para determinar el valor de la relación  $Q/Q_{max}$ ,  $Q/Q_{max} = q$ .
- 3.- Determinar el valor de  $Q_{max}$ , con el valor de  $Q$  correspondiente a la presión de fondo fluyendo:

$$Q_{max} = Q / q \dots \dots \dots \text{ec (VIII)}$$

que es el gasto máximo que el pozo puede aportar.

Para este caso se desean 800 b1/día.

2. CALCULAR LA PRESION QUE LA BOMBA DEBE SUMINISTRAR A LOS FLUIDOS DEL POZO

Calculando el índice de productividad:

$$J = \frac{Q}{P_{ws} - P_{wf}} = \frac{625 \text{ b1/día}}{(900-550) \text{ lb/pg}^2} = 1.786 \text{ b1/día/lb/pg}^2.$$

La presión que corresponde al gasto deseado:

$$P_{wf} = P_{ws} - \frac{Q_t}{J} = 900 - \frac{800}{1.786} = 452.0 \text{ lb/pg}^2$$

$$J = \frac{800}{900 - 452} = 1.786 \text{ bl/día/lb/pg}^2$$

$$S.G. (o) = \frac{141.5}{131.5 + 36} = 0.8447 \quad ; \quad S.G. (w) = 1.02$$

$$S.G. (prom.) = \frac{0.8447 + 1.02}{2} = 0.9324$$

$$= 62.4 \text{ lb/pies}^3 \quad ; \quad \frac{P(\text{lb/pg}^2)}{H(\text{pies})} = \frac{62.4 \text{ lb/pie}^3}{144 \frac{\text{pg}^2}{\text{pie}^2}} = 0.433 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

$$\text{Grad. Fluido} = 0.433 \times 0.9324 = 0.4037 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

Por lo tanto, la elevación efectiva de la bomba es:

$$H_c = 4234 \text{ (pies)} - \frac{452 \text{ lb/pg}^2}{0.4037 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}} = 3114.36 \text{ pies}$$

La bomba se coloca a 3250 pies, por seguridad, para que tenga una sumergencia de 135.64 pies (3250 - 3114.36).

Las pérdidas por fricción en la tubería de producción - se determinan en la figura No. 14 para T.R. 2.3/8" y el gasto re requerida de 800 bl/día:

$$H_f = 3250 \text{ pies} \times \frac{17 \text{ pies}}{1000 \text{ pies}} = 55.25 \text{ pies}$$

La presión requerida en la superficie, convertida a - - pies de columna de fluido es:

$$H_d = \frac{50 \text{ lb/pg}^2}{0.4037 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}} = 123.85 \text{ pies}$$

Entonces, la carga dinámica total es:

$$CDT = H_c + H_f + H_d$$

$$CDT = 3114.36 + 55.25 + 123.85 = 3293.46 \text{ pies}$$

$$CDT = 3293.46 \text{ pies}$$

Conocidos el gasto deseado y la carga dinámica total, - se procede a escoger la bomba en tablas proporcionadas por los - fabricantes, en las que indican el equipo más apropiado para pro fundidades y capacidades específicas. Para más precisión estú- diense y compárense las curvas de rendimiento de varias bombas-- y escogáse aquella cuya eficiencia máxima se obtenga con un gas-

to igual o muy cercano al gasto deseado.

### 3. SELECCION DEL TIPO DE BOMBA

De las bombas disponibles, para introducirse en tubería de revestimiento de 5 1/2 pulgadas de diámetro exterior, la que opera con la eficiencia máxima al gasto deseado (800 bl/día), -- tiene las curvas características que se muestran en la siguiente figura, de las que se obtiene la siguiente información:

Tipo.....	D - 950
Serie.....	400
Ciclos por segundo.....	60 Hz
Velocidad.....	3500 RPM
Eficiencia.....	61.5 %
Potencia al Freno.....	23 HP/100 etapas
Capacidad de carga.....	24.15 pies/100 etapas
Rango de capacidad.....	600 - 1160 bl/día
Diámetro mínimo de T.R. ....	5 1/2 pulg.

### 4. CALCULO DEL NUMERO DE ETAPAS DE LA BOMBA

$$\text{Ne.} = \frac{\text{CARGA DINAMICA TOTAL}}{\text{CARGA (pies) / 100 etapas}}$$

$$N_e = \frac{3293.46 \text{ (pies)}}{2415 \text{ (pies)} / 100 \text{ etapas}} = 136.26 \text{ etapas}$$

##### 5. CALCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR, NECESARIA PARA IMPULSAR LA BOMBA.

El motor sumergible se esoge en base a la potencia necesaria pra elevar el fluido a la superficie a través de la tubería de producción, su voltaje depende tanto de los voltajes en que se fabrique, como de la fuente y tensión eléctrica disponible en la superficie.

Generalmente se selecciona un motor estándar que se aproxime lo más posible a la potencia requerida, siempre que la sobrecarga no exeda al 10% y la caída de voltaje a través de todo el cable no exeda al 20% del voltaje nominal del motor, también debe tomarse en cuenta que su diámetro exterior sea tal, que permita introducirlo en la tubería de revestimiento que exista en el pozo.

La potencia requerida es:

$$BHP = N_e \times POTENCIA/100 \text{ etapas} \times S.G. \text{ del fluido}$$

$$BHP = (136.26 \text{ etapas}) \times (23 \text{ HP}/100 \text{ etapas}) \times (0.9324) = 29.22$$

$$POTENCIA = 29.22 \text{ HP}$$

De tablas se seleccionó el siguiente motor para T.R. 5 1/2":

Serie.....	375
Diámetro exterior.....	3.75 pulg.
Ciclaje.....	60 Hz
Potencia.....	30 HP
Voltaje.....	630 Volts
Corriente.....	35.5 Amperes

Una vez que se tienen el tamaño de la bomba y el tipo de motor, se selecciona un protector, con un diámetro adecuado al resto de la instalación, éste es estándar y no tiene más parámetros que determinar. También se escoge un separador de gas, sólo en caso de que las condiciones del fluido lo requiera.

#### 6. LONGITUD Y CALIBRE DEL CABLE CONDUCTOR

La longitud del cable debe ser igual a la profundidad de la bomba, más 150 pies para conexiones superficiales: - - -  
 LONGITUD = 3250 + 150 = 3400 pies. Con éste valor se entra a la fig. No. 16 y se selecciona el cable eléctrico del No. 4 con conductor de cobre.

La selección del cable para transmitir la energía eléctrica al motor, debe llenar ciertos requisitos, a fin de suminis

trarle el voltaje que éste necesita:

- a) Resistente al abuso mecánico.
- b) Alta resistencia a la abrasión.
- c) Resistente a los álcalis, ácidos y ambientes salinos en lugares de alta temperatura.
- d) No debe sufrir deterioro al hacer contacto con atmósferas oxidantes en altas temperaturas.
- e) No debe propagar las llamas.

El principal problema del cable es la temperatura. La diferencia de temperaturas, entre la que resiste el cable y la del pozo, representa el calentamiento permitido al conductor, -- del cual depende la cantidad de calor disipado por convección -- ( $RI^2$ ).

En vista de lo anterior y para facilitar los cálculos respectivos, los fabricantes elaboran nomogramas, que se pueden utilizar para determinar el voltaje del motor, la caída de voltaje a través del mismo y el calibre del cable eléctrico. La figura 16 muestra la forma de obtener las longitudes máximas del cable recomendado para motores con diferentes voltajes, corrientes y calibres.

## 7. CALCULO DE LAS PERDIDAS DE VOLTAJE Y VOLTAJE DE OPERACION

Se obtiene sumando la caída de voltaje a lo largo del cable más el voltaje de operación del motor.

De la figura No. (16) se tiene que la pérdida de voltaje de 20 volts por cada 100 pies, es la lectura correspondiente a 35.5 amp para el cable # 4 Cu.

Por lo tanto la pérdida de voltaje a lo largo del cable es:

$$0.020 \times 3400 = 68 \text{ volts}$$

Cumple con el requisito de que es menor del 20% del voltaje del motor, así pues, el voltaje de operación en la superficie es:

$$V = 630 + 68 = 698 \text{ Volts}$$

## 8. SELECCION DEL TRANSFORMADOR

El transformador es necesario cuando el voltaje de operación del motor difiere considerablemente del voltaje disponible en la línea de suministro. El transformador eleva o reduce el voltaje, proporcionando el adecuado para la operación del motor.

Los autotransformadores trifásicos son generalmente los requeridos para elevar el voltaje del sistema hasta 480 volts. - La siguiente ecuación determina la capacidad del transformador:

$$KVA = \frac{\sqrt{3} \times V_s \times I}{1000} \text{ ----- Ec (IX)}$$

en donde:

KVA : Potencia eléctrica del transformador en kilovoltamperios.

$V_s$  : Voltaje superficial requerido en volts.

I : Corriente eléctrica de operación en amperes.

El voltaje de operación, es el voltaje requerido por el motor más la caída de voltaje a través del cable eléctrico. En pozos donde la unidad de bombeo se proyecta a futuro, es más económica la instalación de un banco de transformadores de mayor tamaño.

La capacidad del transformador

$$\text{KVA} = \frac{V \times I \times \sqrt{3}}{1000}$$

$$\text{KVA} = \frac{698 \times 35.5 \times \sqrt{3}}{1000} = 42.92$$

CAPACIDAD TRANSF. = 42.92 KVA

#### 9. SELECCION DEL TABLERO DE CONTROL

El tablero de control debe seleccionarse para manejar el voltaje de operación del sistema. Su capacidad de operación debe ser cuando menos la capacidad del transformador, con el fin de tener, un mayor rango de seguridad. El tipo de información y control que se desee obtener en la superficie, determina la clase de tablero de control que se instale, éste puede ser sencillo ó demasiado sofisticado, y debe contener los dispositivos requeridos para obtener la información y control deseados.

En este caso, un tablero de control diseñado para 700 volts y 30 HP de capacidad es el adecuado para la instalación.

10. El resto del equipo se selecciona de acuerdo con: Las condiciones del pozo, los resultados de los cálculos ya efectuados y el control e información que se desee obtener sobre la operación del sistema de bombeo.

No existe un criterio único para la selección del equipo de bombeo electrocentrífugo. Cada solución tiene que ser estudiada a la luz de sus propios méritos y dedicando especial - - atención a sus requerimientos específicos o a sus limitaciones. Esto no quiere decir que éste tipo de unidades sea ideal para -- todos los casos que se presentan, pues existen algunos en los -- que son más ventajosos.

Después de tener en cuenta los aspectos técnicos, prácticos y otros, siempre queda supeditada la decisión final, en la selección del equipo, a las condiciones económicas inherentes.

## EJEMPLO No. 2

## DATOS

Diámetro nominal de T.R.	5 1/2 pulgadas
Diámetro nominal de T.P.	2 3/8 pulgadas
Profundidad del intervalo productor.	6000 pies
Presión estática	2200 lb / pg <sup>2</sup>
Gravedad específica del agua (100%)	1.07
Temperatura de fondo fluyendo	160°F
Índice de productividad	1 b <sup>l</sup> /día/lb /pg <sup>2</sup>
Presión requerida en la superficie.	120 lb /pg <sup>2</sup>
Gasto deseado	1500 b <sup>l</sup> /día

1. Determinar la capacidad de producción:

Para este caso se necesitan 1500 b<sup>l</sup>/día

2. Cálculo de la carga dinámica total:

$$\Delta P = \frac{Q}{I.P.} = \frac{1500 \text{ b}^l/\text{día}}{1 \text{ b}^l/\text{día}/\text{lb}/\text{pg}^2} = 1500 \text{ lb}/\text{pg}^2$$

$$P_{wf} = P_{ws} - \Delta P = 2200 - 1500 = 700 \text{ lb}/\text{pg}^2$$

$$\text{GRADIENTE} = 0.433 \frac{\text{lb}/\text{pg}^2}{\text{pie}} \times 1.07 = 0.43 \frac{\text{lb}/\text{pg}^2}{\text{pie}}$$

$$a) H_c = 6000 - \frac{700}{0.4633} = 4489.1 \text{ (pies)}$$

La bomba se colocara por seguridad a 4650 pies, con una sumergencia en el fluído de 160.9 pies (4650 - 4489.1).

b) Pérdidas por fricción en la tubería de producción, en pies:

$$H_f = 4650 \text{ (pies)} \times \frac{475 \text{ (pies)}}{1000 \text{ (pies)}} = 2208.75 \text{ (pies)}$$

c) Presión requerida en la superficie, en pies:

$$H_d = \frac{120 \text{ lb/pg}^2}{0.4633 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}} = 259.01 \text{ (pies)}$$

$$\begin{aligned} \text{CDT} &= H_c + H_f + H_d = 4489.1 + 2208.75 + 259.01 = 6956.89 \\ &= 6956.89 \text{ (pies)} \end{aligned}$$

3. Selección del tipo de bomba.

Se selecciono la siguiente bomba, la cual ajusta en T.R. de 51/2" con capacidad de producción de 1500 BPD. Los datos que se tomaron son los siguientes:

Tipo.....	DN - 1750
Serie.....	400
Fuerza.....	60 Hz
Velocidad.....	3500 RPM
Eficiencia.....	68%
Potencia al freno.....	36 HP
Carga por pie.....	2200
Rango de capacidad.....	1200 - 2050 <sup>b1</sup> /día
Y para 100 etapas con S.G. =	1.0

4. Calculo del número de etapas de la bomba:

$$N_e = \frac{6956.89 \text{ (pies)}}{2200 \text{ pies/100 etapas}} = 316.22$$

$$N_e = 316.22 \text{ ETAPAS}$$

5. Calculo de la potencia necesaria del motor:

$$\text{BHP} = (316.22 \text{ etapas}) \left( \frac{36 \text{ HP}}{100 \text{ etapas}} \right) (1.07) = 121.81$$

$$\text{BHP} = 121.81 \text{ HP}$$

## 6. Longitud y calibre del cable conductor:

De tablas, esta potencia del motor necesita 1850 volts y 51 amp. de corriente, motor serie 375 (3.75" D.E.). Longitud de cable: 4650 pies a la profundidad de la bomba más 150 pies - para conexiones superficiales y sarta, dan un total de 4800 pies de cable.

Con estos valores y la figura No. 17 , se selecciona el cable No. 6 de cobre.

## 7. Voltaje de operación en la superficie.

El cable No. 6 de cobre, tiene una caída de voltaje de 46 volts por cada 1000 ft. Entonces:

$$\text{Pérdida total} = 0.046 \frac{\text{volt}}{\text{pie}} \times 4800 \text{ pie} = 220.8 \text{ Volts.}$$

El voltaje de operación será:

$$V = 1850 + 220.8 = 2070.8 \text{ Volts.}$$

8. Capacidad del transformador.

$$\text{KVA} = \frac{2070.8 \times 51 \times \sqrt{3}}{1000} = 182.92$$

$$\text{CAPACIDAD} = 182.92 \text{ KVA}$$

9. La selección del equipo accesorio sera de acuerdo a las condiciones del pozo y tomando en cuenta los resultados de los calculos efectuados.

Esto, por lo general lo determina la compañía que vende el equipo, aunque con la supervisión del comprador.

## EJEMPLO No. 3

## DATOS

Diámetro nominal de T.R	65/8", 32 lb/pie
Diámetro nominal de T.P.	27/8 pulgadas
Intervalo productor	10600-10650 pies
Profundidad total	11000 pies
Presión estática	2900 lb/pg <sup>2</sup> @ 10000 pies
Presión de fondo fluyendo	2540 lb/pg <sup>2</sup> @ 10000 pies
Presión requerida en la superficie	200 lb/pg <sup>2</sup>
Gasto a la presión de fondo fluyendo	1000 bl/día @ C.S.
Gravedad específica del agua	1.05 (30%)
Gravedad específica del aceite	40 °API
Temperatura superficial	160 °F
Viscosidad del aceite	3.6 @ 100°F
Temperatura de fondo fluyendo	225°F @ 10000 pies
Fuerza disponible	60 H <sub>2</sub>
Gasto deseado	1600 bl/día C.S

La colocación de la bomba sera a la profundidad necesaria.

No hay arena, incrustamiento, parafina ni fluidos corrosivos.

1. Seleccione el sistema que ajuste en T.R de 65/8" con capacidad de producción de 1600 bl/día C.A.
2. Determinación de la altura neta de succión.

$$J = \frac{Q}{P_{ws} - P_{wf}} = \frac{1000 \text{ bl/día}}{2900 - 2450 \text{ lb/pg}^2} \cdot 2.78 \text{ bl/día/lb/pg}^2$$

$P_{wf}$  para 1600 bl/día

$$P_{wf} = P_{ws} - \frac{Q}{J} = 2900 - \frac{1600}{2.78} = 2324.46$$

G.G.w 60°F = 1.05

190°F = 96.7% (1.05)

40°API<sub>(o)</sub> 60°F = 93.4% (0.825)

Agua: (1.05)(0.967)(0.3) = 0.30

Aceite: (0.825)(0.934)(0.7) = 0.54

S.G.prom = 0.84

- a) La elevación efectiva para  $P_{wf} = 2324.46$  :

$$H_c = 10000 - \frac{2324.46}{0.433 \times 0.84} = 3609.20 \text{ pies}$$

La bomba se colocara, por seguridad a 4000 pies.

b) Pérdidas por fricción en la T.P : 19.5 pies/1000 pies

$$\therefore H_f = 4000 \times 19.5/1000 = 78 \text{ pies}$$

c) 
$$H_d = \frac{200}{0.433 \times 0.84} = 549.87 \text{ pies}$$

La carga neta de succión estara dada por:

$$CDT = H_c + H_f + H_d$$

$$CDT = 3609.20 + 78 + 549.87 = 4237.07$$

$$CDT = 4237.07 \text{ pies}$$

d) Sumergencia de la bomba dentro del fluido:

$$4000 - 3609.2 = 290.8 \text{ pies}$$

3. Se seleccionó la siguiente bomba y los datos que se tomaron fueron los siguientes:

Tipo	E-41
Serie	450
Fuerza	60 Hz

Velocidad	3500 RPM
Eficiencia	58%
Potencia al freno	55 HP
Carga por pie	2700
Rango de Capacidad	1100 - 1750 bl/dfa
y para 100 etapas con	S.G. = 1.0

4. Para  $Q = 1600$  bl/dfa la bomba produce 27 pies/etapa

$$N_e = \frac{4237.07}{27} = 156.93 \text{ etapas}$$

5. La E-41 para 1600 bl/dfa requiere 0.55 HP/etapa

$$\text{BHP} = 156.93 \times 0.55 \times 0.84 = 72.50 \text{ HP}$$

Se selecciono:

Motor serie 456 (4.56" O.D) , 80 HP.      1350 Volts  
a 60 Hz      38 AMP.

además cable No. 4 de cobre. Debe resistir a temperaturas mayores de 235°F

caida de voltaje: 22 Volts/1000 pie

6. Voltaje en la superficie requerido:

$$V = 1350 + (4200) (22/1000) = 1442.4 \text{ Volts}$$

7. Transformador:

$$\text{KVA} = \frac{1442.4 \times 38 \times \sqrt{3}}{1000} = 94.94 \text{ Kv}$$

8. Los accesorios estaran abiertos a las condiciones del pozo y al criterio del ingeniero diseñador.

## CAP. V APLICACIONES DEL SISTEMA

## 1). Conclusiones y Recomendaciones

1.- El diseño de unidades de bombeo electrocentrifugo más simple, es el que se realiza para pozos productores de líquidos únicamente, debido a que no pasa gas a través de la bomba que ocasionarían problemas en su eficiencia.

2.- A fin de facilitar el diseño de unidades de este tipo para pozos productores de líquido y gas es necesario utilizar los programas de computo elaborados para éste fin, debido a que las condiciones cambian constantemente a través de la tubería de producción, ya que al considerar correctamente el comportamiento de flujo puede reducir en forma notable el número de etapas de la bomba y la potencia del motor.

-

3.- Este sistema de producción es el más aplicable en plataformas de producción marina, debido a que el espacio que utiliza es mínimo.

4.- Es un sistema aplicable en programas de mantenimiento de presión en métodos de recuperación secundaria, debido a que el agua es tomada de un horizonte más alto al productor o inyector, no teniendo así la necesidad de instalaciones superficiales para el tratamiento del agua.

5.- Se recomienda la instalación de dispositivos en la superficie que registren datos e indiquen las condiciones que existan en el fondo del pozo.

6.- Se recomienda un programa de inspección visual y localización de dificultades, a fin de que los paros en la producción puedan prevenirse. Distintos factores pueden afectar los mandos del sistema, incluyendo la temperatura, la humedad y la calidad del ambiente. Una aplicación errónea es la causa principal de los problemas en los controles.

## 2).- NOMENCLATURA

SIMBOLO	DESCRIPCION	UNIDADES
BHP	Potencia necesaria para impulsar la bomba	HP
C	Carga	PIES
C.D.T.	Carga dinámica total	PIES
F	Frecuencia de voltaje de operación	ciclos/Seg
H <sub>c</sub>	Altura de elevación a partir del nivel del fluido a bombear	PIES
H <sub>d</sub>	Carga por perdida en la línea de descarga.	PIES
H <sub>f</sub>	Carga por fricción en la tubería de producción y líneas superficiales	PIES
HP <sub>e</sub>	Potencia requerida para impulsar una etapa	HP
I	Corriente eléctrica	AMPERES
J	Índice de productividad	bl/día/lb/pq <sup>2</sup>
K	Constante de proporcionalidad	pies/lb/pg <sup>2</sup>
KVA	Potencia eléctrica del transformador	(Kilovolamp.)
N	Velocidad de bomba	RPM.
Ne	Número de etapas.	
P	Número de polos	
P <sub>wf</sub>	Presión de fondo fluyendo ó real	lb/pg <sup>2</sup>
P <sub>ws</sub>	Presión Estática ó máxima	lb/pg <sup>2</sup>
Q <sub>max</sub>	Gasto total máximo	bl/día
Q	Gasto real ó deseado	bl/día
q	Relación entre gastos real y máximo	
S.G.	Gravedad Espécífica del fluido	
V <sub>s</sub>	Voltaje superficial requerido	Volts.

FIGURA Nº 1

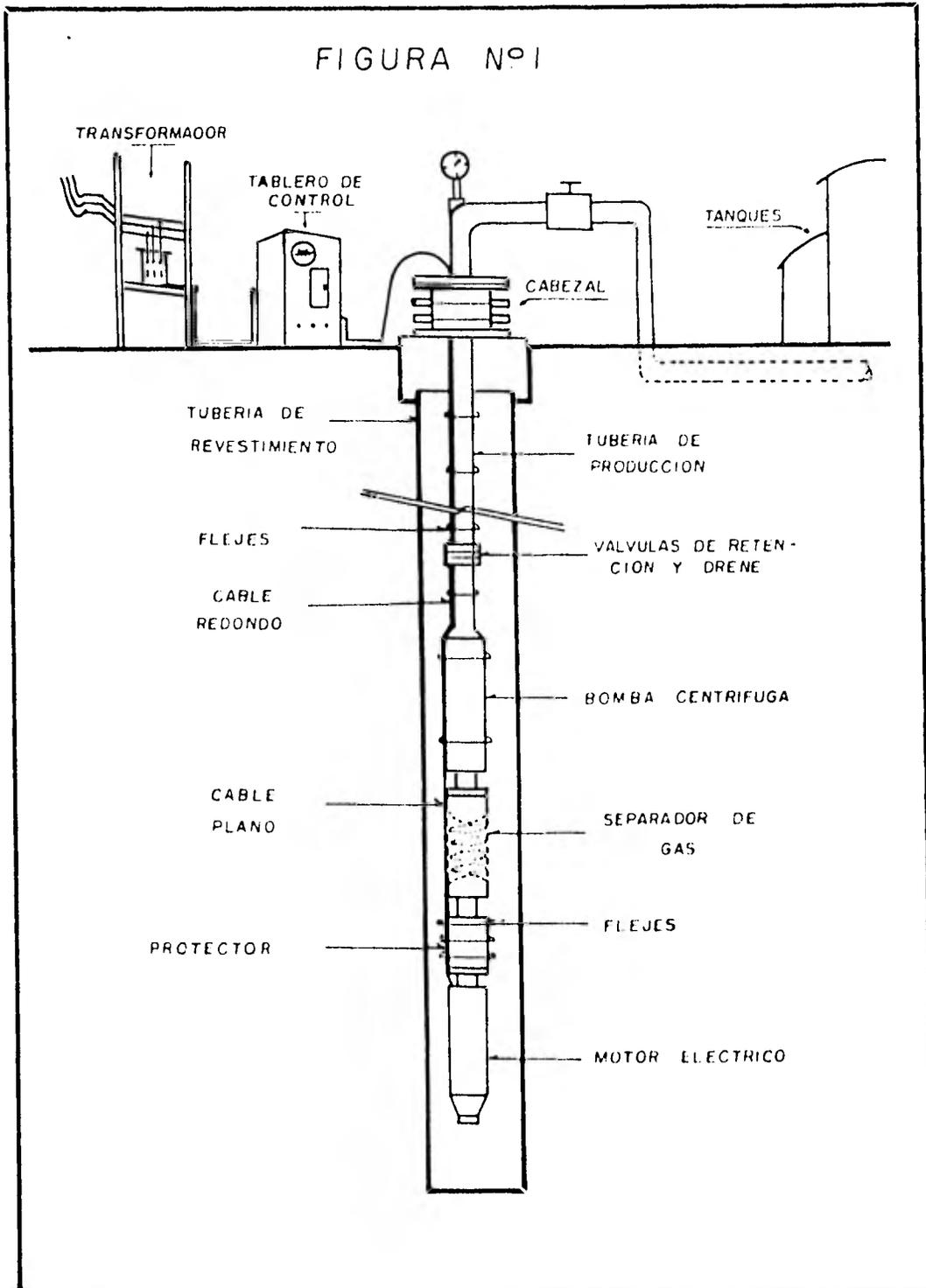


FIGURA Nº 2

MOTOR ELECTRICO SUMERGIBLE

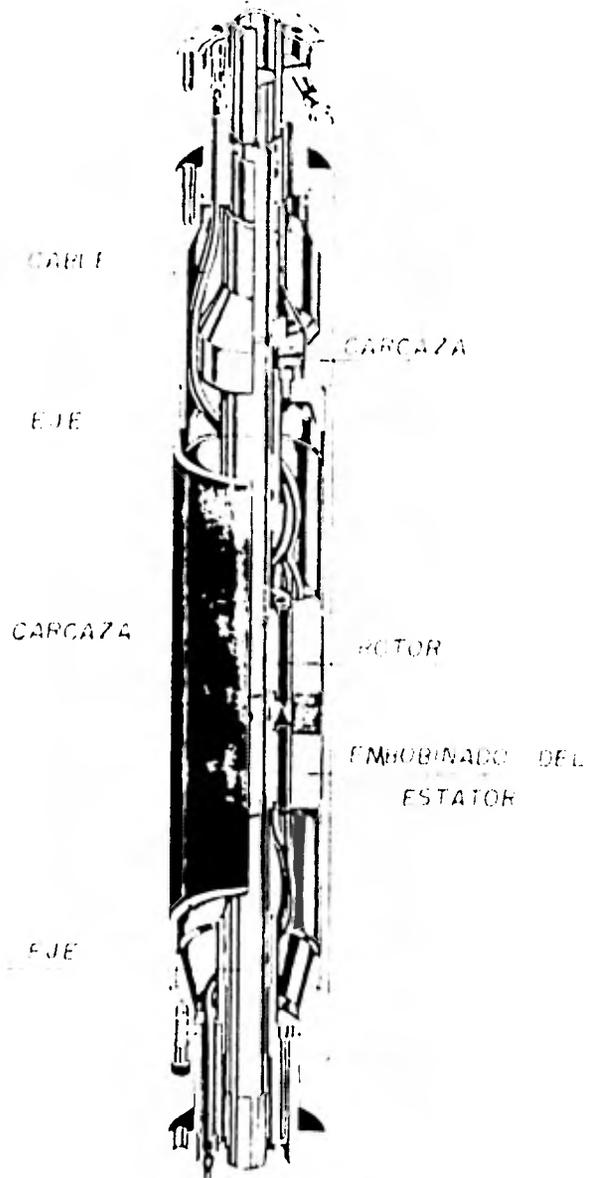
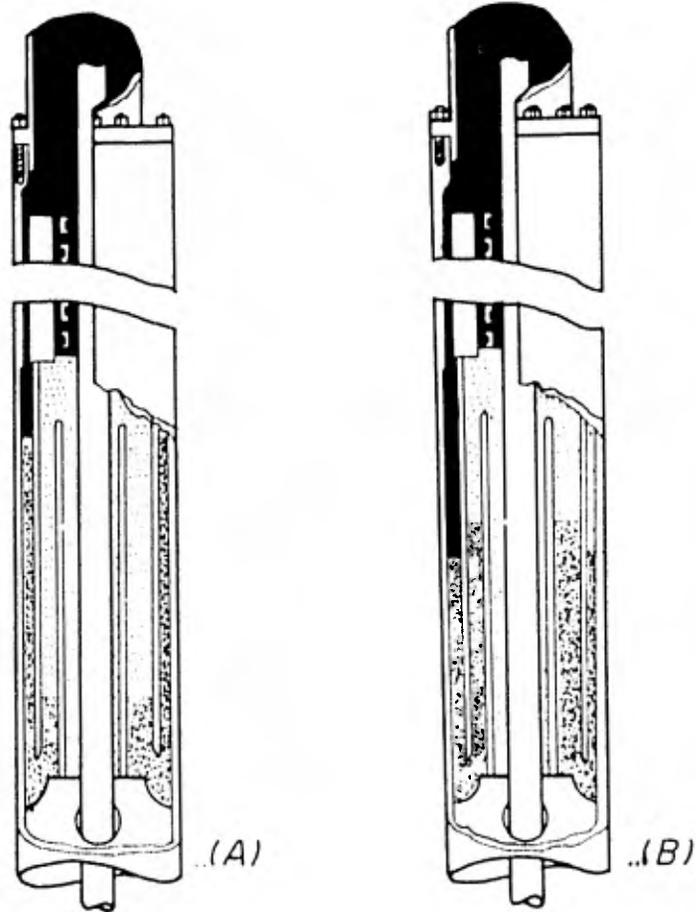


FIGURA N° 3



-  ACEITE DEL MOTOR
-  FLUIDO BLOQUEANTE
-  FLUIDO DEL POZO

FIGURA Nº 4

PROTECTOR DEL  
MOTOR

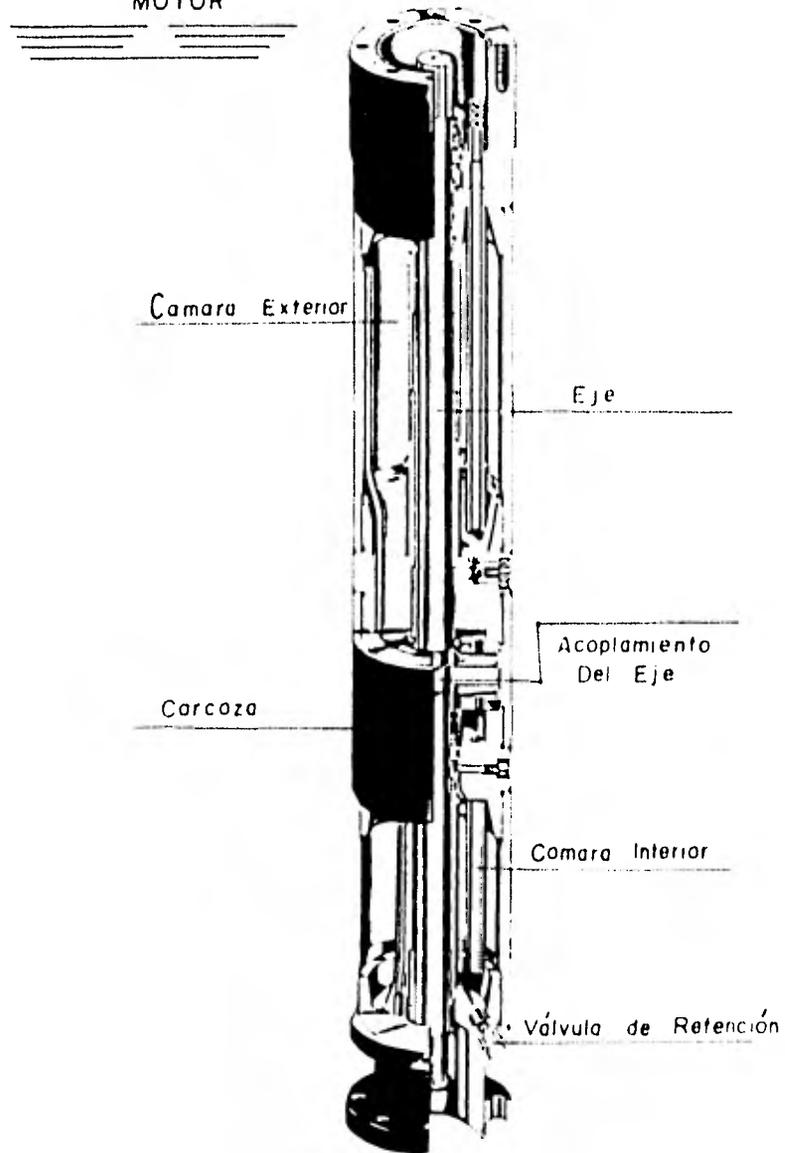


FIGURA Nº 5

SEPARADOR DE  
GAS

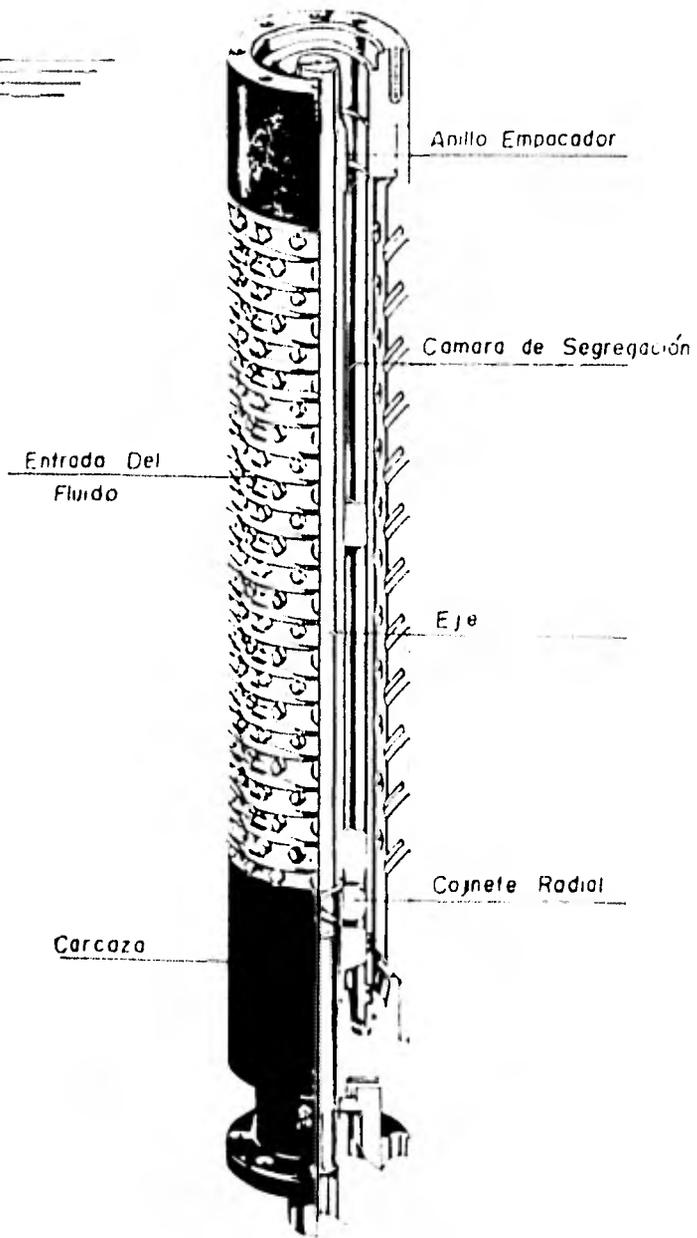
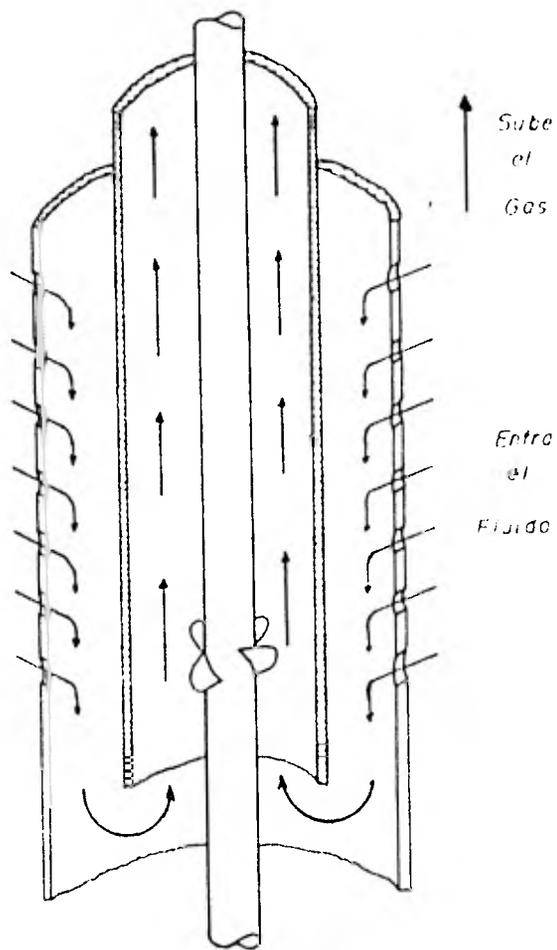


FIGURA N.º 6



SEPARADOR DE GAS

FIGURA N° 7

BOMBA  
CENTRIFUGA  
SUMERGIBLE

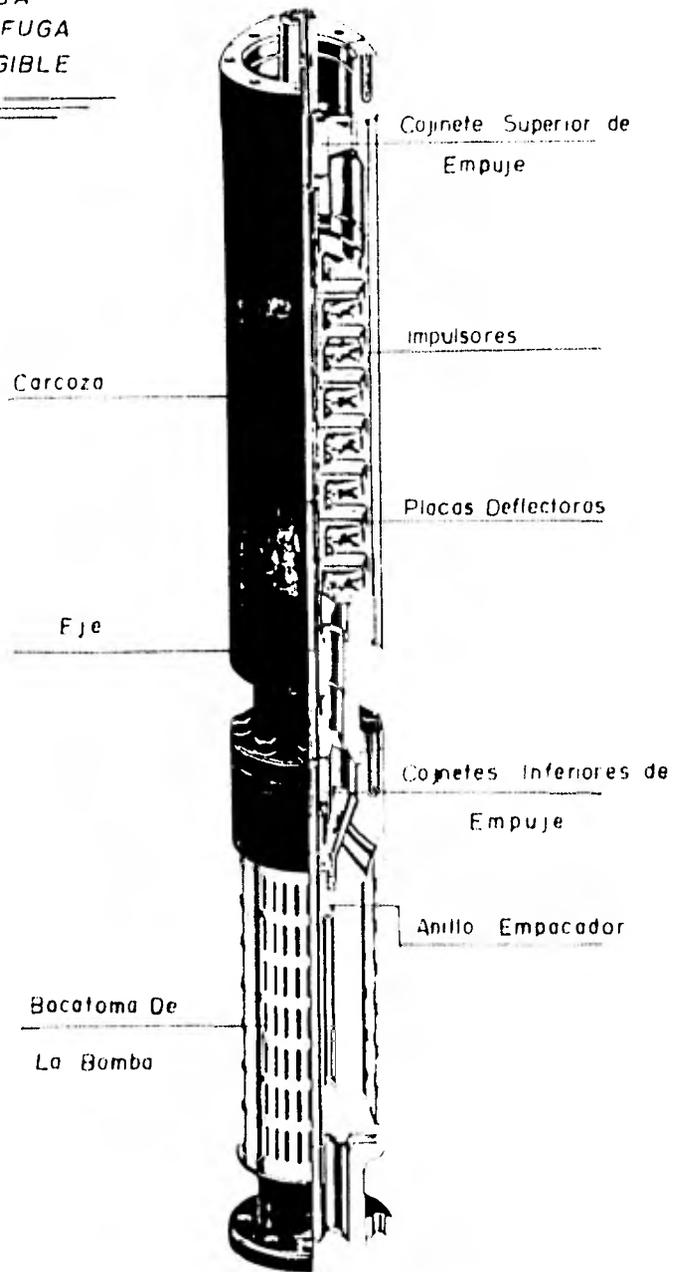


FIGURA N°8

TIPOS DE IMPULSORES



a) DE FLUJO AXIAL.



b) DE DOBLE ADMISION,  
CON ALABES FRANCIS  
CERRADO.



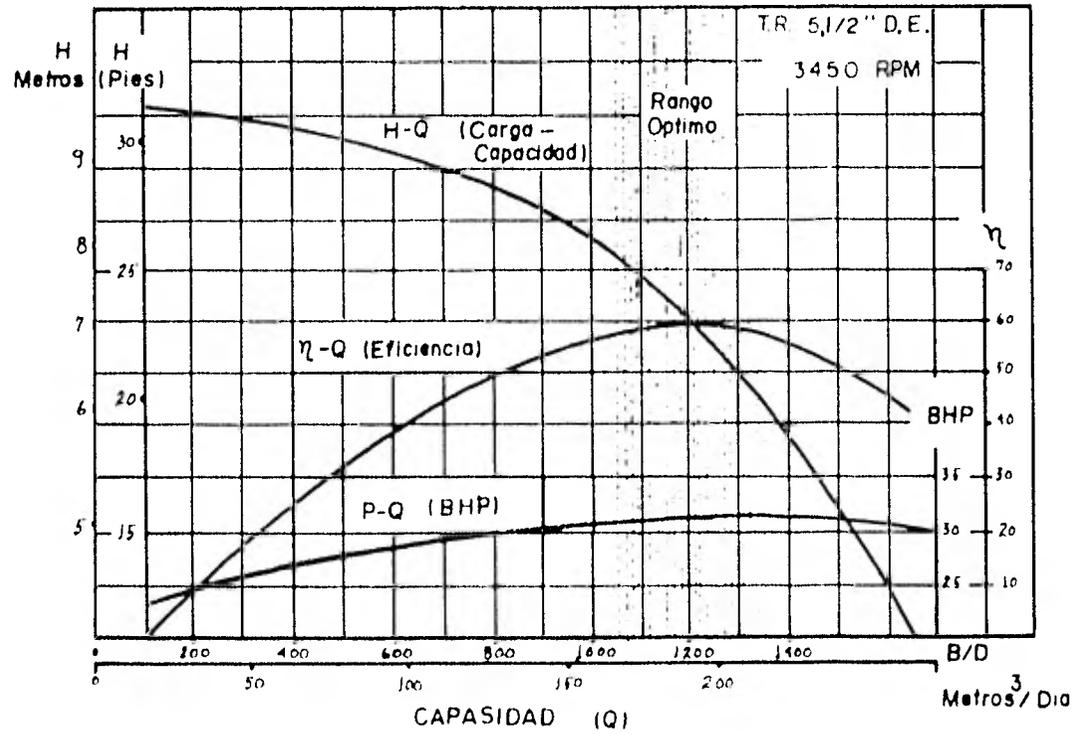
c) SEMIABIERTO.



d) DE ADMISION SEN-  
CILLA CON ALABES  
DERECHOS, CERRADO.

FIGURA N° 9

CURVAS CARACTERISTICAS DE BOMBAS CENTRIFUGAS



# FIGURA N°10

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

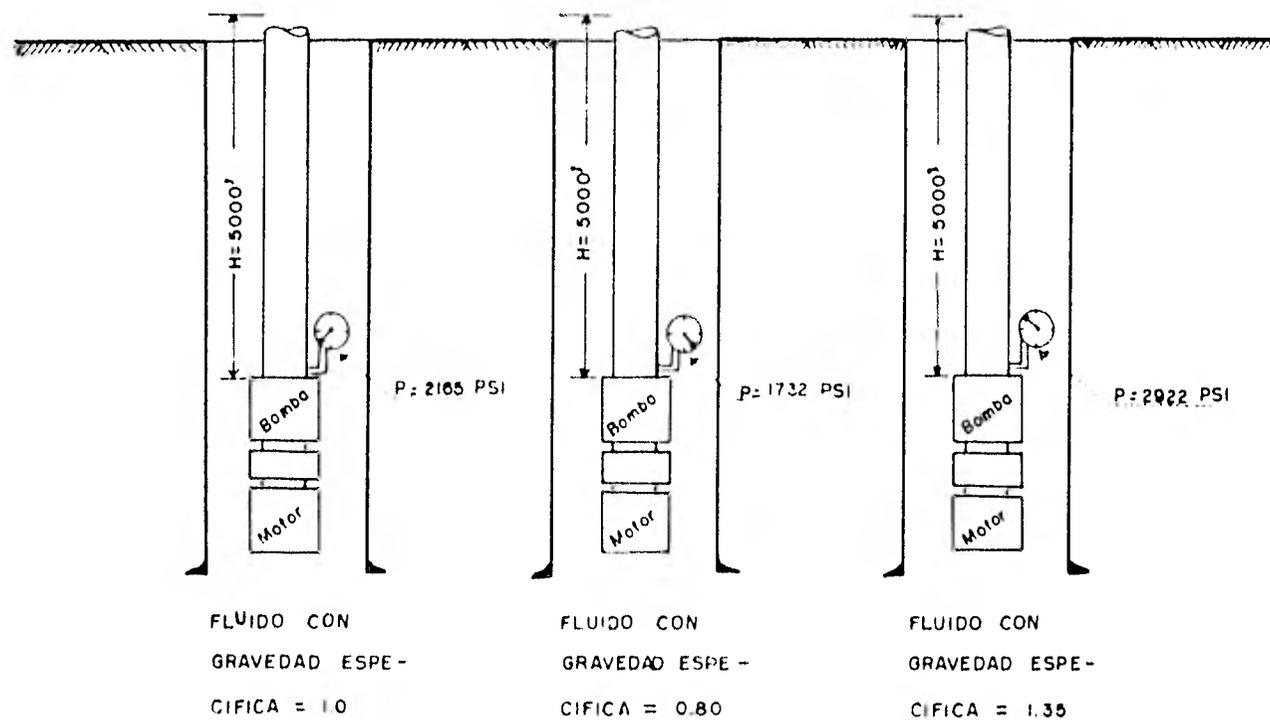
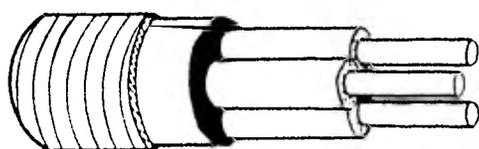


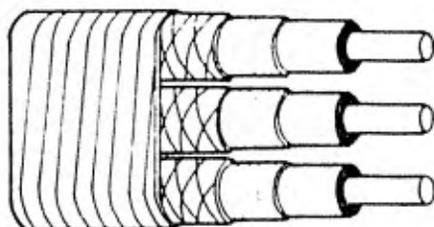
FIGURA N° II

(A)



Cable Redondo

(B)



Cable Plano

(C)

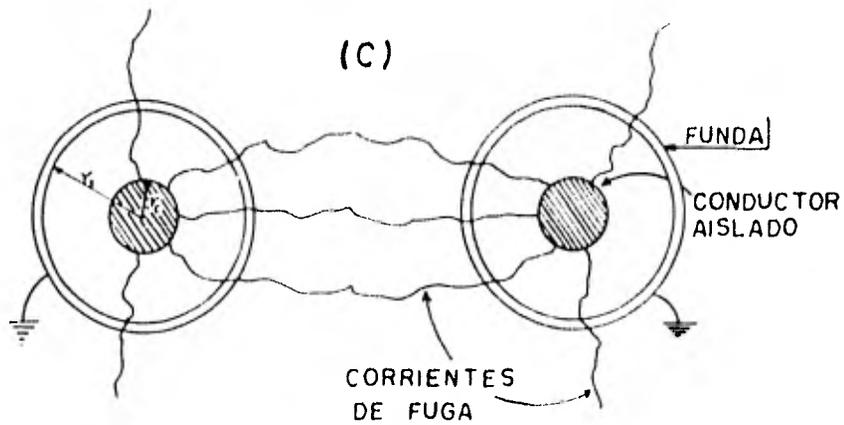
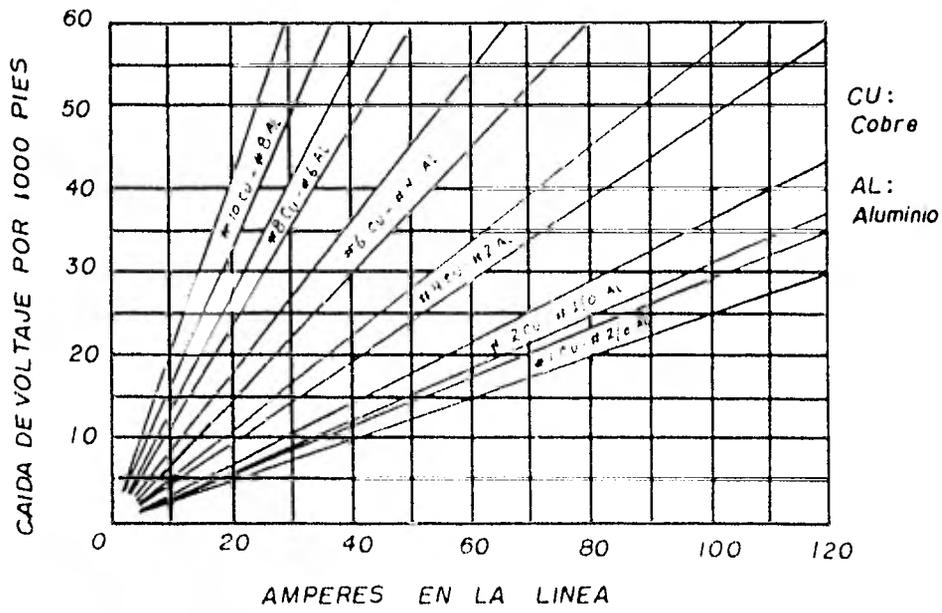


FIGURA N° 12

Pérdida de voltaje a lo largo del cable eléctrico



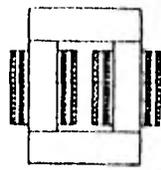
tamaño del cable

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

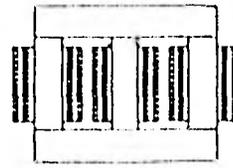
# 12 Cu. ó # 10 Al.	3.907
# 10 " # 8 "	2.447
# 8 " # 6 "	1.553
# 6 " # 4 "	0.998
# 4 " # 2 "	0.624
# 2 " # 1/0 "	0.390
# 1 " # 2/0 "	0.307

FIGURA Nº 13

TRANSFORMADOR



Monofasico



Trifasico

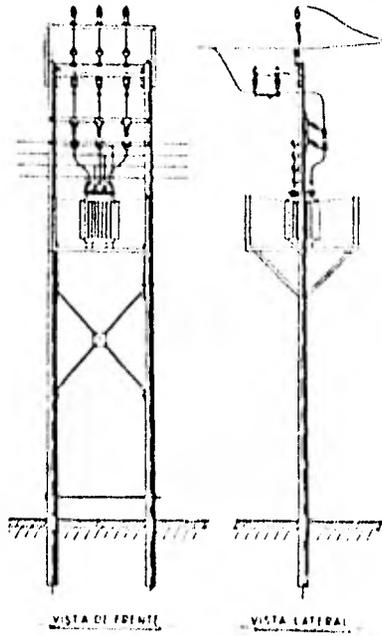


FIGURA Nº 14  
 PERDIDAS DE FLUJO DEBIDO A LA FRICCION EN TUBERIAS API

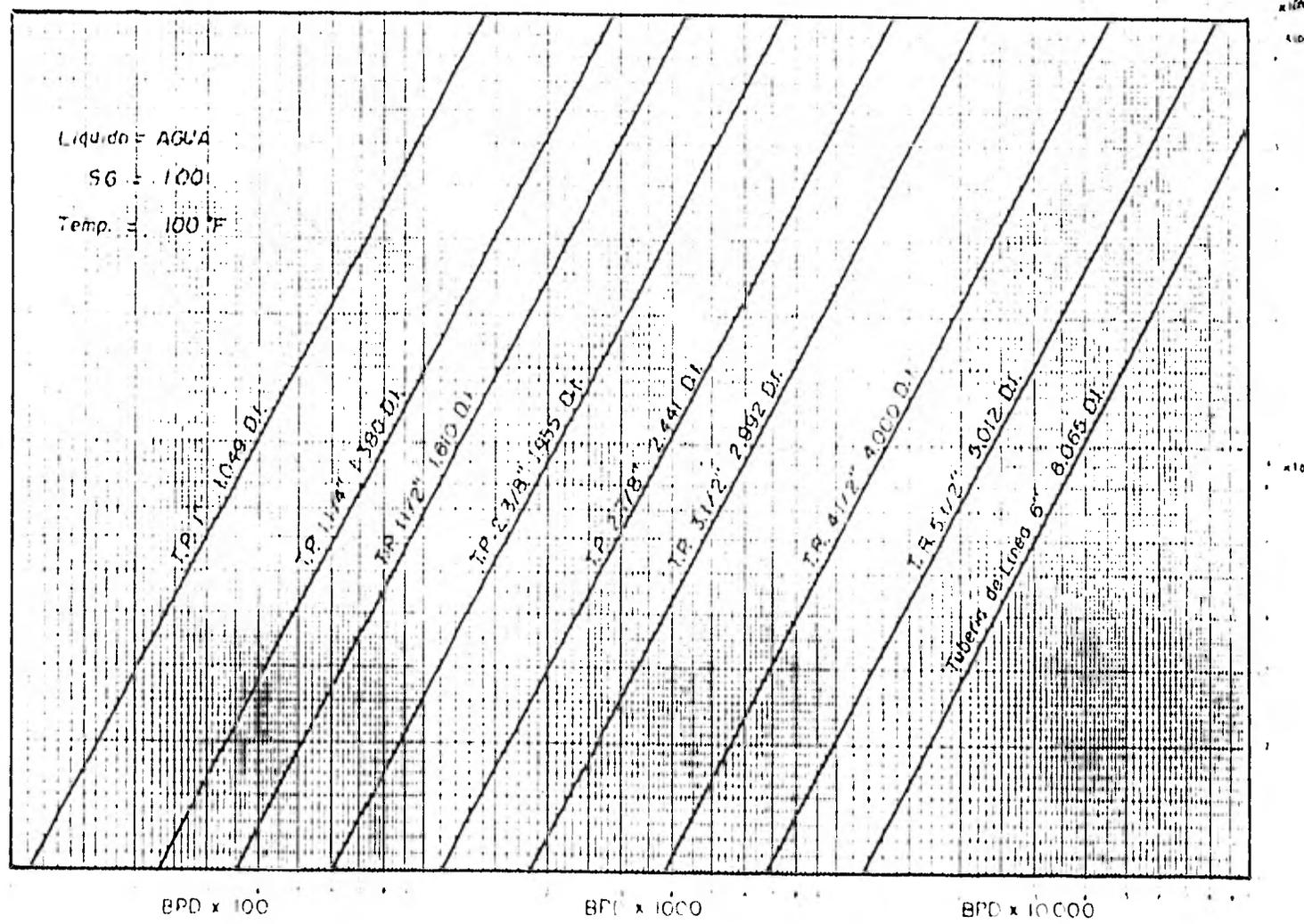
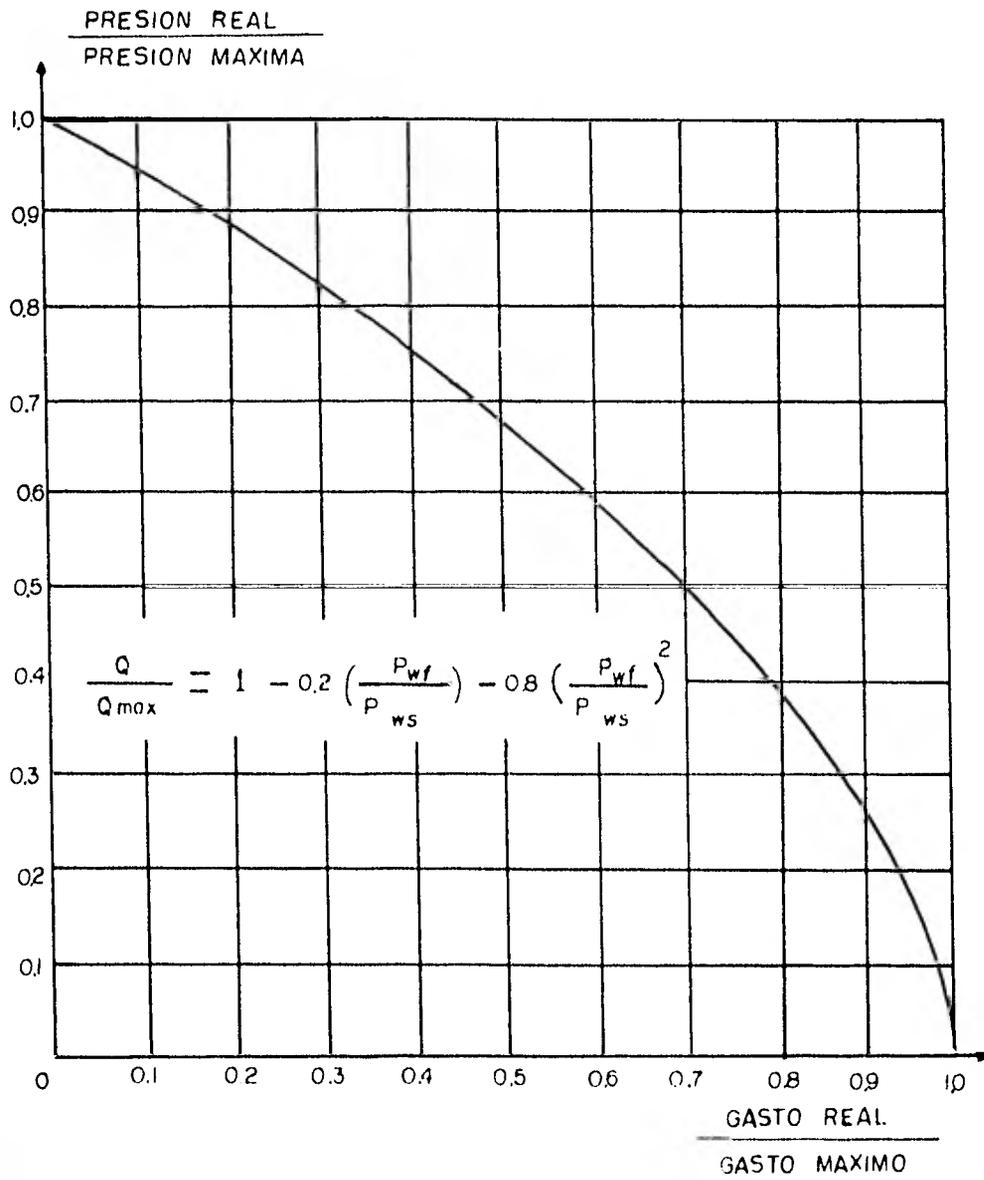


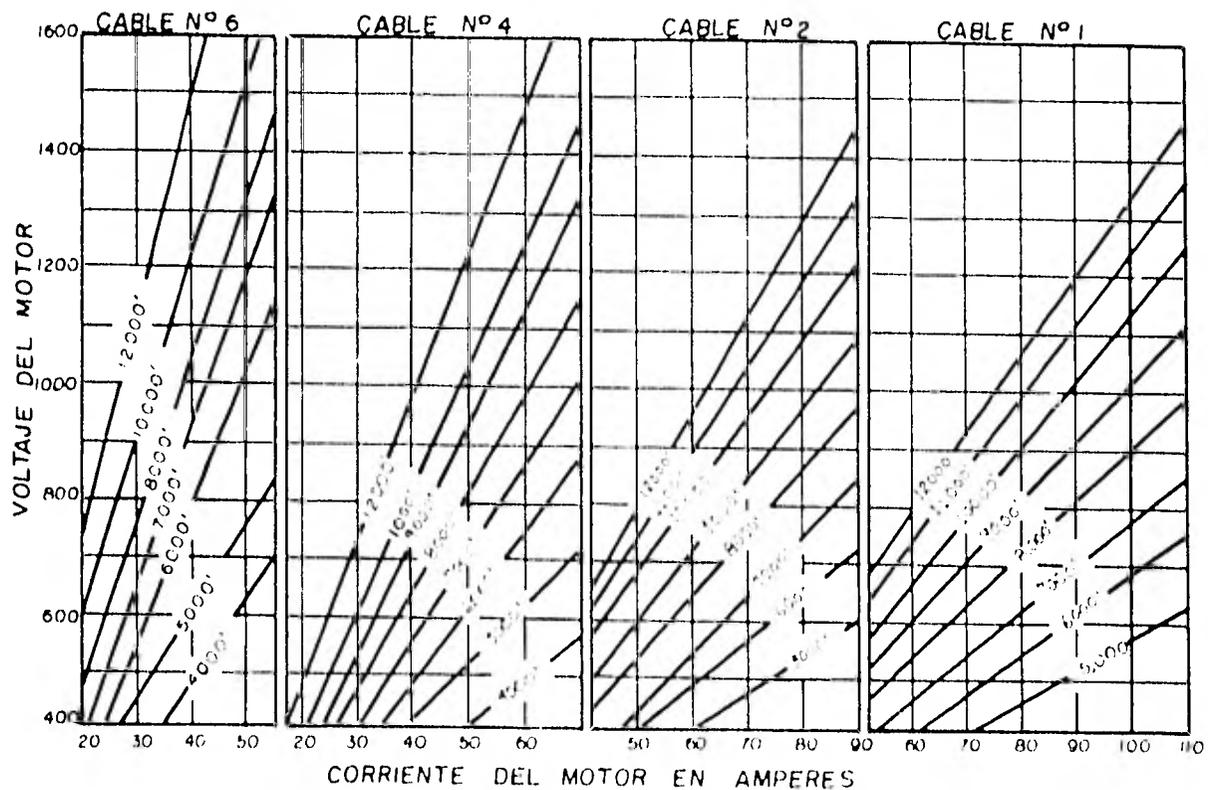
FIGURA Nº 15

CURVA DE J. V. VOGEL



# FIGURA N.º 16

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



TRW REDA Inc.

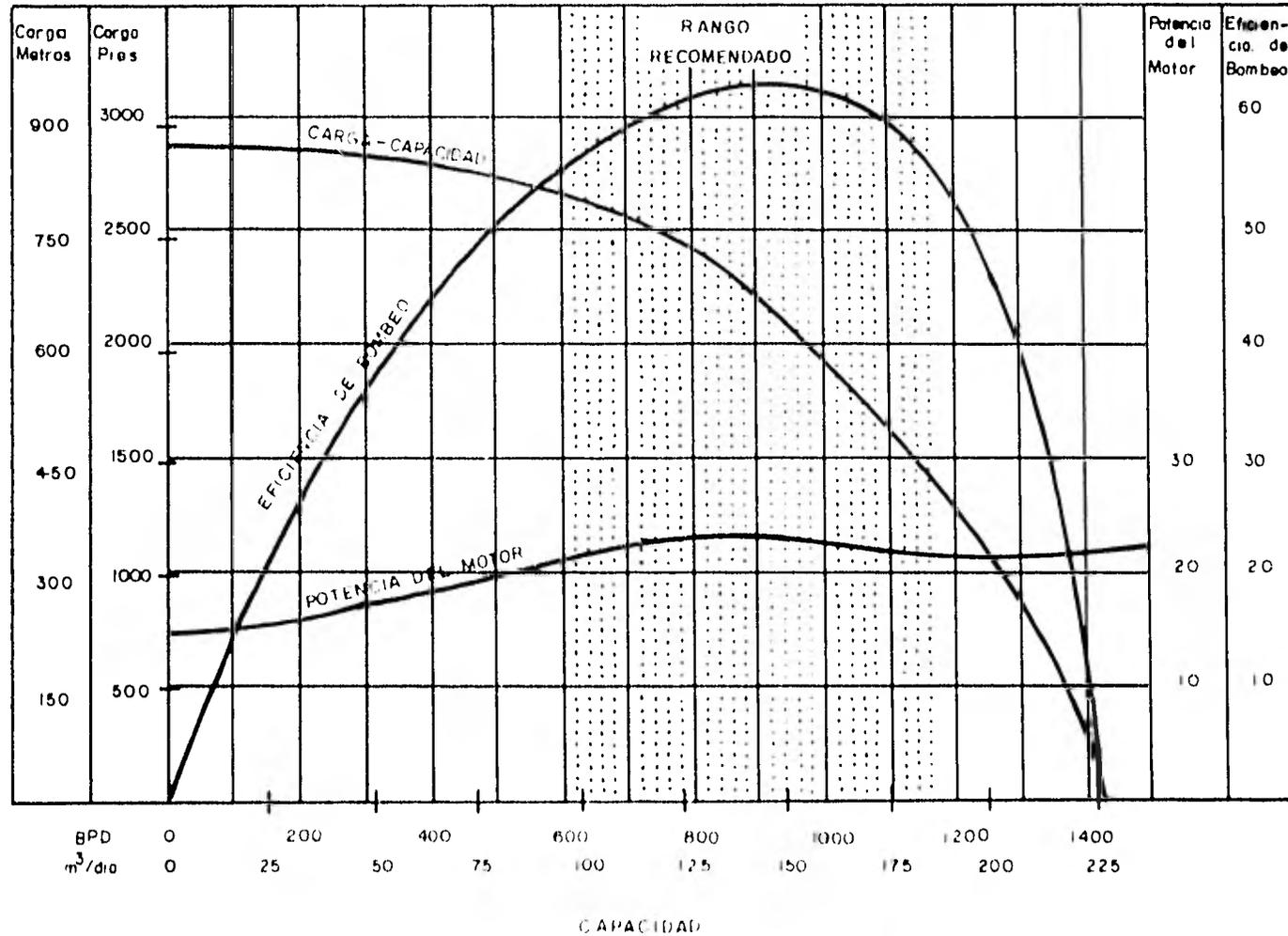
Curvas Caracteristicas de la Bomba

100 Etapas- D 950- 60 Hz

Serie 400 - 3500 RPM

T. R. Minimo

5 1/2" D.E.



**TRW REDA Inc.**

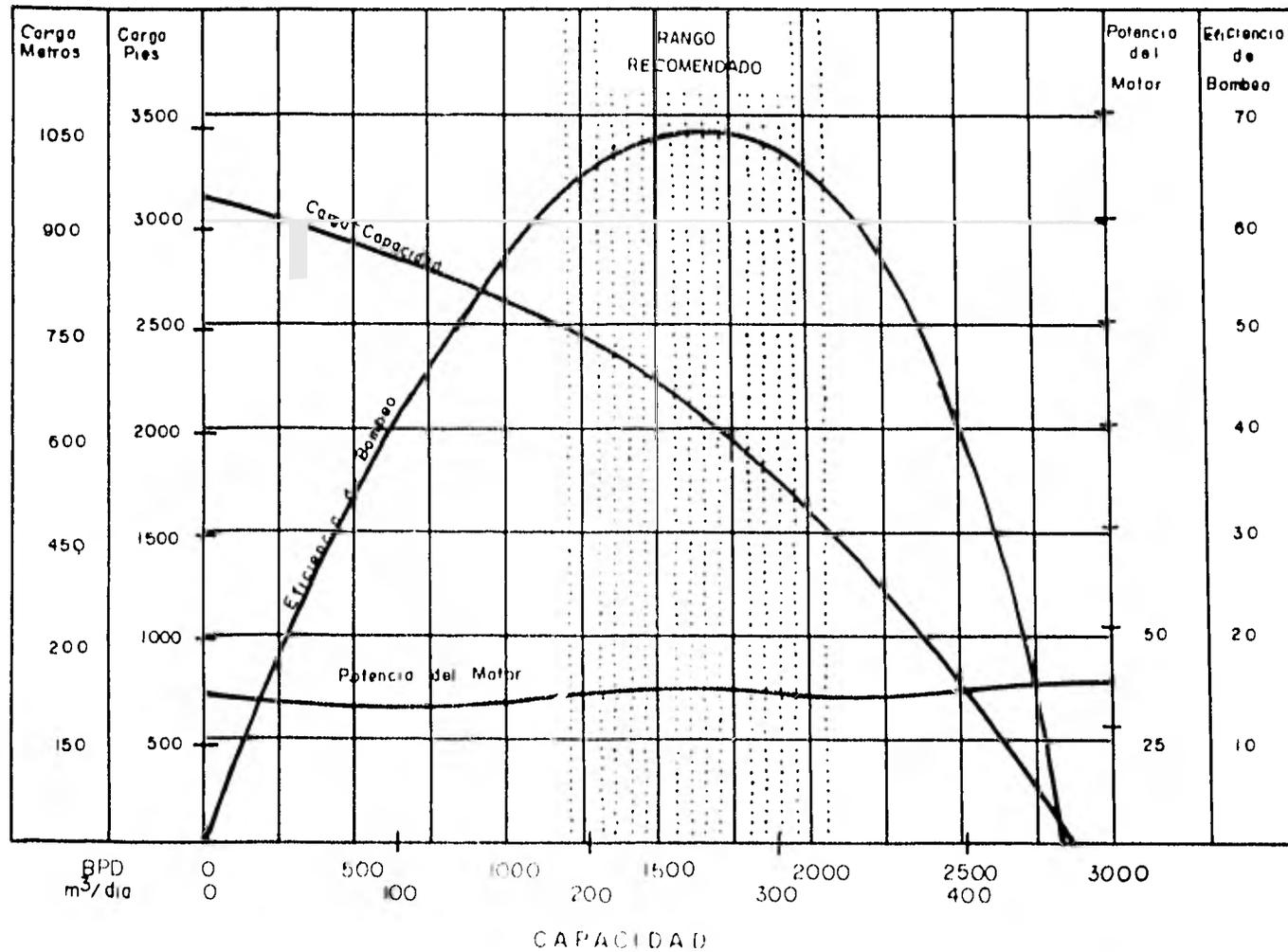
Curvas Características de la Bamba

100 Etapas - DNI750 - 60 Hz

Serie 400 - 3500 RPM

T. R. Mínimo

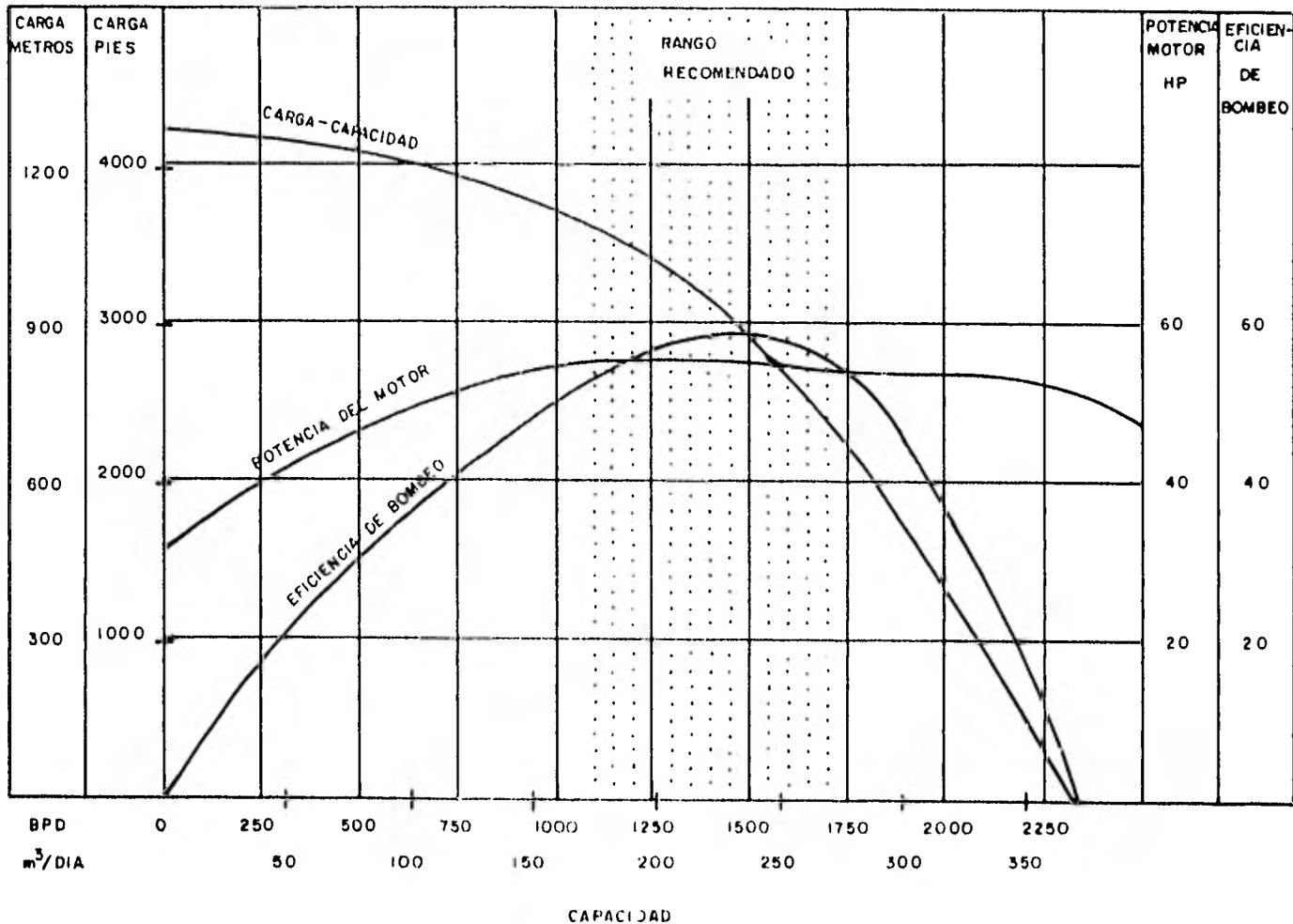
5 1/2" DE.



TRW REDA Inc.

Curvas Caracteristicas de la Bomba  
 100 etapas - E 41 - 60 Hz  
 Serie 450 - 3500 RPM

TR Minimo  
 6.5/8" D.E.



## CAP VI BIBLIOGRAFIA

- 1.- J. Karassik, Igor S Carter R.  
"Bombas Centrifugas"  
Ed. cicsa, México.
- 2.- Sánchez Buitron Horacio  
"Operación, control y protección de Motores Eléctricos"  
Editorial HP <sup>b</sup><sub>s</sub>, 2a. Edición 1977.
- 3.- Luca, Carlos  
"Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica"  
Ed. Libros Tecnicos avance 1969
- 4.- Loppeti, Gaudencio J.  
"Estaciones Transformadoras y de distribución"  
Ed. Gustavo Gili S.A. Barcelona, España. 1972.
- 5.- Grohmann, Martin.  
"Bombas de inductor: mas eficiencia, menor inversión."  
Rev. Petroléo Internacional, octubre 1981.
- 6.- Batchelder, max. I.  
Serie de 6 artículos en REV. Petrole Interamericano.  
Dic. 1965; Ene, Feb, Marzo, Abril y Mayo de 1960
- 7.- V.E. Villa y A.F. Acuña R.  
"Bombeo centrifugo en pozos con flujo multifásico"  
REV. I.M.P. ABril 1971.
- 8.- Divine, David. L.  
"Variable speed submersible pumps find Wider application"  
Rev. Oil S Gas Journal. June 11, 1979.

- 9.- Hoisten bach, Roger Doyle.  
"Large volume/High HP submersible pumping problems in wa  
ter source Wells"  
REV. SPE 10252
- 10.- Smith, Robert. S.  
"Sumergible pump completion in Two Phase Howing Wells"  
REV. Petroleum Enginecring. December 1968.
- 11.- Hall, Lee. V.  
"Oilfield submersible pumps: Selection and application  
for High-volume pumping."  
REV. Petroleum Engeneering.
- 12.- W.N. Moline S Borg-Warner  
"submersible pumps are going popularity"  
REV. affhore. march 1981.
- 13.- B. cline, William and W. Garford David.  
"Artificial lift alternatives for high. volume affhore -  
production  
Rev. Petroleum Engineer International, FEB 1979
- 14.- K. Brown.  
"Gas lift theory and. Practice"  
The petroleum pusblishing Co. 1973.
- 15.- Catalogo "T.R.W. REDA SUBMERSIBLE PUMPS"  
Reda pump Company, a División of TRW Jnc.
- 16.- B.J. Centrilift Catalog  
Byron Jackson Pumps, Inc.
- 17.- Ing. Custavo Benitez Rubio  
Apuntes del curso "Metodos Artificiales de producción"  
Octubre 1980.