



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

***SIMULADOR DE BOMBEO  
ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO***

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO                      PETROLERO**

**P R E S E N T A :**

**CASTILLO      CASTILLO      OSCAR**

**DIRECTOR: M. I. JOSE ANGEL GOMEZ CABRERA**



MÉXICO, D. F., CD. UNIVERSITARIA NOVIEMBRE 2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
60-I-1232

**SR. OSCAR CASTILLO CASTILLO**  
**Presente**

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. en I. José Ángel Gómez Cabrera y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

**SIMULADOR DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO**

	<b>INTRODUCCIÓN</b>
<b>I</b>	<b>GENERALIDADES</b>
<b>II</b>	<b>EQUIPO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO</b>
<b>III</b>	<b>DISEÑO</b>
<b>IV</b>	<b>PROGRAMA DE CÓMPUTO</b>
<b>V</b>	<b>APLICACIONES</b>
<b>VI</b>	<b>CONCLUSIONES</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>

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

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

Atentamente

**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**

Cd. Universitaria, D.F., a 12 de noviembre de 2004

EL DIRECTOR

**M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO**

GFB\*JAGC\*gtg

---

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**“SIMULADOR DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO”**

TESIS PRESENTADA POR:

CASTILLO CASTILLO OSCAR

DIRIGIDA POR:

M. I. JOSÉ ÁNGEL GOMÉZ CABRERA

JURADO DEL EXAMEN PROFESIONAL:

PRESIDENTE: ING. MANUEL VILLAMAR VIGUERAS  
VOCAL: M. I. JOSÉ ÁNGEL GOMÉZ CABRERA  
SECRETARIO: ING. MARTÍN TERRAZAS ROMERO  
1ER SUPLENTE: ING. MARTÍN CARLOS VELÁZQUEZ FRANCO  
2DO. SUPLENTE: M. C. JAIME ORTIZ RAMÍREZ

Handwritten signatures and dates of the jury members. The signatures are written over horizontal lines. One signature includes the date "17 nov 84".

## **AGREDECIMIENTOS**

A Dios que siempre ha estado conmigo.

A mi madre, todo lo que soy te lo debo a ti, gracias a tu valor, cariño y energía inquebrantable.

A la madre Paz, madre Cuquita y madre Adela por haber estado en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi mamá Sabina y papá Pino, no lo hubiera logrado sin ustedes.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que es parte vital de mi formación y de mis valores.

A mi hermano

A mi tío Abel que siempre me apoyo y motivo para seguir.

A Evia del Puerto Olivos Lizbeth Aviu, que es la persona más especial para mí, siempre estás en mis pensamientos, te amo.

A Eva Lilia Acosta Samperio, Fernando Alfonso García Luna Flores, Javier Ortega Molina, José Martín Santana Arroyo, Luis Chacón Muños por ser mis mejores amigos, los quiero mucho.

A Claudia (abuelita), Ricardo V., Pancho, Ricardo Montoya, Oscar D., Agustín, Lidia, Ramiro R, con los que pase momentos inolvidables en el transcurso de la carrera.

A los ingenieros José A. Gómez Cabrera, Manuel Villamar, Jaime Ortiz, Martín Terrazas, Martín Velázquez, por la atención prestada a este trabajo.

A la ingeniera Eva Sánchez Olea por su apoyo invaluable a este trabajo, por su amistad, gracias por los consejos y regaños oportunos.

---

# ÍNDICE

Introducción	1
--------------	---

## 1 GENERALIDADES

1.1 Propiedades de los fluidos	2
1.2 Fundamentos de flujo de fluidos	10
1.2.1 Velocidad de un fluido	10
1.2.2 Número de Reynolds	11
1.2.3 Análisis de flujo estacionario-conservación de la masa, momento, y energía.	12
1.2.4 Flujo de líquidos en conductos	13
1.3 Flujo multifásico en tuberías	15
1.3.1 Descripción de patrones flujo	17
1.3.2 Colgamiento	18
1.3.3 Flujo multifásico vertical	19
1.4 Fundamentos en bombas	21
1.4.1 Clasificación	21
1.4.2 Propiedades de una bomba centrífuga	22
1.4.3 Funcionamiento de las bombas centrífugas	23
1.5 Comportamiento de pozos	25
1.5.1 Índice de productividad	25
1.5.2 Ecuación de Vogel	26
1.5.3 Curva generalizada	27

**2 EQUIPO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO SUMERGIDO**

2.1 Historia	29
2.2 Ventajas y desventajas	30
2.3 Equipo de bombeo electrocentrífugo	31
2.4 Componentes subsuperficiales	31
2.4.1 Guía o centralizador	31
2.4.2 Sensor de fondo	31
2.4.3 Motor	32
2.4.4 Protector o sello	35
2.4.4.1 Ciclos de operación del protector	36
2.4.5 Separador de gas	38
2.4.5.1 Separador estático	38
2.4.5.2 Separadores dinámicos	39
2.4.6 Bomba centrífuga	41
2.4.6.1 Curvas características	43
2.4.6.2 Selección de la bomba	45
2.4.6.3 Ventana de operación	45
2.4.6.3 Leyes de afinidad	46
2.4.7 Cable	53
2.4.8 Conexión del motor (mufa)	55
2.5 Componentes superficiales	56
2.5.1 Transformador primario	56
2.5.2 Controlador de velocidad variable	56
2.5.3 Caja de venteo	56
2.6 Accesorios	57
2.6.1 Válvula de retención	57
2.6.2 Válvula de drene	58

**3 DISEÑO**

3.1 Recopilación de datos	60
3.2 Capacidad de producción	61

3.3 Determinación del gradiente de presión ascendente	61
3.4 Determinación de la profundidad de colocación de la bomba	61
3.5 Determinación del volumen de gas libre	62
3.6 Determinación del perfil de presión descendente	64
3.7 Determinación de la carga dinámica total	64
3.8 Incrementos de presión $P_i$	66
3.9 Determinación la densidad de la mezcla a cada incremento de presión $P_i$	66
3.10 Cálculo de gradiente promedio	67
3.11 Determinación de la carga	67
3.12 Cálculo de gasto promedio	68
3.13 Selección de bomba	68
3.14 Número total de etapas	70
3.15 Potencia total	70
3.16 Selección del motor	71

#### **4 PROGRAMA DE CÓMPUTO**

4.1 Características del programa	72
4.2 Información necesaria	72
4.3 Programa	74
4.3.1. Orden necesario de introducción de la información para realizar una simulación	74
4.3.1.1. Inicio y ventana principal	74
4.3.1.2. Descripción del pozo en estudio	79
4.3.1.3. Propiedades del fluido	80
4.3.1.4. Propiedades PVT	81
4.3.1.5 Condiciones de trabajo	82
4.3.1.6 Estado mecánico del pozo	82
4.3.1.7 Correlaciones	83
4.3.1.8 Comportamiento del pozo	84
4.3.1.9 Datos del BEC	85
4.3.1.10 Perfil de presiones	86

4.3.1.11 Diseño	87
4.3.1.12 Selección de bomba	88
4.3.1.13 Curvas características	89
4.3.1.14 Selección del motor	90
4.3.1.15 Reporte final	91
<b>5 APLICACIONES</b>	
5.1 Diseño de bombeo electrocentrífugo con datos de campo	93
5.2 Análisis del diseño de bombeo electrocentrífugo variando la presión de succión	107
5.3 Análisis del diseño de bombeo electrocentrífugo variando el gasto	109
<b>6 CONCLUSIONES</b>	112
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	113

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas artificiales de producción fueron introducidos cerca de los años treinta, desde entonces, numerosos desarrollos y avances tecnológicos han sido incorporados, todos dirigidos a maximizar la rentabilidad de los equipos y minimizar los tiempos fuera de operación.

Durante la vida productiva de los yacimientos, la presión tiende a disminuir debido a la explotación del campo a tal grado que los pozos productores dejan de fluir de forma natural, en varias ocasiones estas disminuciones de presión pueden ser originadas por daños en los pozos, ocasionados principalmente por la misma operación, generalmente este daño es removido mediante limpieza y estimulaciones. Cuando no se tiene daño en la formación y los fluidos no tienen la energía suficiente para llegar a las instalaciones superficiales, es necesario implantar un sistema artificial de producción, acorde a las características del campo.

Es necesario efectuar un estudio en el que involucre los diferentes sistemas artificiales, como son: bombeo mecánico, neumático, cavidades progresivas, jet y electrocentrífugo, los cuales permiten mantener el pozo fluyendo para así obtener la producción comprometida.

El bombeo electrocentrífugo sumergido ha probado ser un sistema artificial de producción eficiente. En la actualidad ha cobrado mayor importancia debido al depresionamiento de los yacimientos y a la aplicación de las características de operación de las bombas.

El objetivo de la tesis es realizar un programa de simulación de bombeo electrocentrífugo para poder simular distintos escenarios de instalación del equipo con el fin de analizarlos y seleccionar el mas adecuado para el pozo candidato.

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

En esta sección se definen las propiedades de los fluidos, no está hecho sobre varios conceptos en detalle; sólo los términos operativos necesarios para la aplicación y/o diseño de bombas sumergibles son definidos.

#### **Presión, columna hidrostática, y gradiente de presión**

La presión ejercida por un fluido sobre una superficie es la fuerza por unidad de área y esta dada en PSI en el sistema inglés y  $Kg/cm^2$  en el sistema métrico. En un líquido, la presión en cualquier punto es igual a la acción de la presión en la superficie más la presión por el peso del líquido sobre el punto de referencia. La presión en un punto debido por la columna del fluido es dado por la relación  $\gamma H$  donde  $\gamma$  es el densidad relativa y  $H$  es la altura de la columna del fluido sobre el punto. La altura de la columna del líquido es llamada la columna hidrostática y se expresa en las unidades de longitud (ft, metros).

La presión y la columna representan los mismos valores en diferentes unidades y son relacionados una de otra por la siguiente ecuación:

$$columna = \frac{K \times presión}{\gamma}$$

Donde  $K$  es una constante de proporcionalidad y este valor depende de las unidades de columna y presión. Si la presión se expresa en términos de PSI y altura en pies del líquido, entonces  $K = 2.31$ . En el sistema métrico, si la presión es dada en  $Kg/cm^2$  y la altura en metros,  $K = 10$ .

En ingeniería petrolera, el término de gradiente de presión se usa frecuentemente y es la presión debida a la columna de líquido por unidad de longitud.

### Densidad del gas

La densidad está definida como la cantidad de masa del gas por unidad de volumen, normalmente, para los procesos de cálculo se utiliza la densidad relativa del gas, ésta es la relación entre la densidad de un gas y la del aire, medidos a una misma presión y temperatura.

Cuando se conoce la composición del gas es común obtener la gravedad específica (densidad relativa del gas), haciendo la relación del peso molecular del gas con respecto a la del aire (28.97).

### Factor de volumen del gas

Se define como el volumen de masa de gas medida a las condiciones de presión y temperatura a condiciones de interés, dividido por el volumen de la misma masa de gas expresada a condiciones estándar.

$$Bg = \frac{V_R}{V_{sc}}$$

Donde:

- $B_g$  es el factor de volumen del gas
- $V_R$  volumen de gas a condiciones de interés
- $V_{sc}$  volumen de gas a condiciones estándar

### Viscosidad del gas

Se define como la resistencia del fluido que ofrece al desplazamiento. Usualmente se expresa en centipoise.

La viscosidad del gas decrece conforme la presión del yacimiento decrece, ya que las moléculas se separan cada vez más y el movimiento de éstas es más fácil.

### Densidad del aceite

La densidad está definida como la cantidad de masa del aceite por unidad de volumen, normalmente, para los procesos de cálculo se utiliza la densidad relativa del aceite, ésta es un número adimensional que está dado por la relación del peso del aceite al peso de un volumen igual del agua pura a 4 °C y 1.0 Atm de presión.

El instituto americano del petróleo (API) adoptó una escala especial para expresar la densidad llamada densidad API.

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5$$

Donde:

$\gamma_o$  es la gravedad específica del aceite.

### Factor de volumen del aceite

El volumen del aceite que es medido en la superficie es menor que el volumen de aceite que parte del yacimiento, este cambio en volumen de aceite, acompañado del cambio de la temperatura y presión en el yacimiento a las de las condiciones superficiales, se debe a tres factores; el factor más importante es la liberación de gas del aceite a medida que la presión declina de las condiciones del yacimiento a las condiciones de superficie. Esto causa una disminución relativamente grande en el volumen del aceite, cuando se tiene una gran cantidad de gas disuelto. Los dos factores restantes son, la disminución en la presión, causando que el aceite remanente se expanda ligeramente; pero esto es compensado por la contracción del aceite debido a la disminución en la temperatura.

El cambio de volumen de aceite debido a los tres factores anteriores es normalmente expresado en términos del factor de volumen del aceite,  $B_o$ , el cual se define como el volumen de aceite con el gas disuelto a una presión y temperatura de yacimiento, es decir, medido cualquier presión y temperatura, entre el volumen del aceite sin gas disuelto, también conocido como aceite "muerto".

$$B_o = \frac{\text{(volumen de aceite + gas disuelto) a condiciones de interés}}{\text{volumen de aceite a condiciones estándar}}$$

Existen varias correlaciones para calcular  $B_o$ .

**Standing en 1947.-** Las ecuaciones para calcular el factor de volumen del aceite fueron obtenidas correlacionando la relación gas disuelto-aceite, la temperatura, la densidad relativa del gas y la densidad del aceite, originalmente la correlación se estableció para 22 diferentes aceites producidos en California y 105 mediciones experimentales. El error promedio es del 1.2%.

**M. E. Vázquez y H. D. Beggs (1980).-** Las fórmulas son el resultado de la combinación de propiedades tales como: relación gas disuelto-aceite, temperatura, densidad relativa del gas y densidad del aceite además de unos coeficientes que están en función de la densidad °API del aceite que se trate. El error promedio es de 4.7%.

**Oistein-Glaso en 1980.-** Esta correlación se estableció utilizando muestras de aceite producido en el Mar del Norte, donde predominan los aceites de tipo volátil, se obtuvo como resultado de la combinación de propiedades tales como: la relación gas disuelto-aceite, temperatura, densidad relativa del gas y densidad del aceite, para que finalmente mediante funciones de tipo logarítmico obtener el valor de  $B_o$ . El error promedio es de 0.43%.

### Relación de solubilidad

La relación de solubilidad o la solubilidad del gas en el aceite ( $R_s$ ). Se define como el número de pies cúbicos de gas que pueden disolverse en un barril de aceite, ambos a condiciones estándar (60°F y 14.7 psia), cuando son llevados a las condiciones de presión y temperatura de interés.

Se dice que un aceite está saturado con gas natural cuando tiene en solución la máxima cantidad de gas que le es posible, y en este caso, al reducir un poco la presión ocurre liberación de gas. Si el crudo tiene una cantidad de gas inferior a la que puede admitir a ciertas condiciones de presión y temperatura se dice que el crudo está bajosaturado.

En un aceite, si se dispone de suficiente gas y si el aceite se somete a altas presiones y temperaturas, puede decirse que el gas es infinitamente soluble en el aceite.

Lo que limita la solubilidad del gas en el aceite en el yacimiento, son las condiciones de presión y temperatura y por supuesto la cantidad de gas disponible.

La  $R_s$  aumenta con la presión hasta llegar a la presión de burbujeo, a partir de la cual se mantiene constante. La razón de esto es que al llegar al punto de burbujeo no existe más gas disponible para entrar en solución con el aceite.

Encima de la presión de burbujeo cuando el aceite está bajosaturado ( $R_s$  es constante), ya que una disminución de presión no causa liberación de gas; sin embargo, por debajo de la presión de burbujeo el aceite está saturado, ya que una disminución de presión origina una liberación de gas ( $R_s$  disminuye).

Los siguientes factores afectan la solubilidad del gas en el aceite:

- Presión: Al aumentar la presión aumenta  $R_s$ .
- Temperatura: Al aumentar la temperatura disminuye  $R_s$ .

Existen varias correlaciones para calcular la  $R_s$ :

**M. B. Standing en 1947.-** Presenta una correlación gráfica para determinar la  $R_s$ , donde establece las relaciones empíricas observadas entre la presión de saturación y el factor de volumen del aceite en función de la relación gas disuelto-aceite, las densidades relativas del gas y del aceite, la presión y la temperatura. Esta correlación se estableció para aceites y gases de California y para otros sistemas de crudos, simulando una separación instantánea en dos etapas a 100 °F. La primera etapa a una presión de 250 a 450 psia y la segunda etapa a la presión atmosférica. El error promedio es de 4.8%.

**J. A. Lasater en 1958.-** desarrolló una correlación gráfica para la determinación de  $R_s$  a la presión de burbujeo. Se basó a partir de 158 mediciones experimentales de la presión de burbujeo de 137 sistemas independientes, producidos en Canadá, en el centro y Oeste de los Estados Unidos y América del Sur a temperaturas de 34 a 106 °F, presiones de separación de 15 a 605 psia y para 1, 2 y 3 etapas de separación. Esta correlación presenta mejores resultados para aceites menores a 15 °API. El error máximo obtenido con la correlación fue de 14.7%.

**M. E. Vázquez y H. D. Beggs en 1980.-** presentan una importante correlación empírica para la estimación de  $R_s$ . Para establecer esta correlación se usaron más de 6000 datos de  $R_s$ ,  $B_0$  y  $\mu_o$ , a varias presiones y temperaturas. Como el valor de la densidad relativa del gas es un parámetro de correlación importante, decidió usar un valor normalizado a una presión de separación de 100 psi. Por lo tanto, el primer paso para utilizar esta correlación consiste en obtener el valor de la densidad relativa del gas a dicha presión. El error promedio es de 0.7%.

**Oistein-Glaso en 1980.-** propuso una correlación para la estimación de  $R_s$  como función de la densidad relativa del aceite  $^0$ API, la presión y la temperatura y la gravedad específica del gas. Esta correlación fue establecida utilizando muestras de aceite producido en el Mar del Norte, donde predominan los aceites de tipo volátil. El error promedio es de 1.28%. El error promedio es de 1.28%.

### **Relación gas aceite producida (RGA)**

Es el gasto total de gas (gas libre más gas disuelto) medido a condiciones estándar entre el gasto de aceite muerto (medido a condiciones estándar), para un tiempo dado.

Las condiciones de separación (presión, temperatura y etapas) afectan el valor de dicha relación.

$$RGA = \frac{q_g \text{ total a condiciones estándar}}{q_o \text{ total a condiciones estándar}}$$

Donde:

$q_g$  = gasto de gas

$q_o$  = gasto aceite

RGA = relación gas aceite

### **Relación gas líquido producida**

Es el gasto total de gas (gas libre más gas disuelto) medido a condiciones estándar entre el gasto de aceite muerto más el gasto de agua (medido a condiciones estándar), para un tiempo dado.

Cuando no exista agua en el fluido producido, la relación gas líquido producida es igual a la relación gas aceite producida.

$$RGL = \frac{q_g \text{ total@c.s.}}{(q_o + q_w) \text{ total@c.s.}}$$

*Donde:*

$q_g$  = gasto de gas

$q_o$  = gasto aceite

$q_w$  = gasto agua

RGL = relación gas líquido

### **Presión de saturación**

La presión de saturación, también conocida como presión de burbujeo, se define como la presión a la cual se forma la primera burbuja de gas al pasar un sistema del estado líquido al estado de dos fases, donde la fase líquida está en equilibrio con una cantidad infinitesimal de gas libre.

A presiones por debajo de la presión de burbujeo se forman dos fases en equilibrio, fase líquida (crudo con gas en solución) y fase gaseosa (gas natural).

A continuación se presentan algunas correlaciones:

**Standing en 1947.**- presenta una correlación gráfica para el cálculo de la presión de burbujeo, pero en 1981 expresa la correlación gráfica en forma de una expresión matemática.

**Lasater en 1958.**- presentó una correlación gráfica para el cálculo de la presión de burbujeo, y posteriormente representó su correlación matemática mediante expresiones analíticas.

### Viscosidad del aceite ( $\mu_o$ )

En general, la viscosidad de un fluido es una medida de la fricción interna o resistencia que ofrecen sus moléculas al fluir. En el caso del aceite la viscosidad puede ser clasificada dentro de tres categorías:

*Viscosidad del aceite muerto:* es la viscosidad de un aceite sin gas en solución, a presión atmosférica y temperatura del sistema.

*Viscosidad de un sistema saturado:* es la viscosidad de aceite a la presión de burbujeo y temperatura del yacimiento.

*Viscosidad de un aceite bajosaturado:* es la viscosidad del aceite a una presión arriba de la presión de burbujeo y temperatura del yacimiento.

Existen varias correlaciones para calcular  $\mu_o$ :

**Beal-Chew-Connally.-** Para el desarrollo de la correlación, utilizaron la información disponible de 655 mediciones a 100 °F y 131 mediciones efectuadas por los autores para aceites de USA y otras regiones a temperaturas mayores que 100 °F.

El procedimiento para determinar la viscosidad a un valor dado de presión y temperatura comprende la determinación previa de la viscosidad del aceite muerto a la temperatura de interés, y su ajuste por los efectos de la presión y del gas en solución.

**H. D. Beggs y J. R. Robinson en 1975.-** Para el desarrollo se utilizó la información de más de 2000 mediciones de viscosidades de aceites provenientes de 600 muestras diferentes.

Esta correlación comprende inicialmente el cálculo de la viscosidad del aceite sin su gas disuelto, para que este resultado sea utilizado para la obtención del valor de la viscosidad del aceite saturado.

### Densidad del agua producida

La densidad está definida como la cantidad de masa del agua por unidad de volumen, normalmente, para los procesos de cálculo se utiliza la densidad relativa del agua, ésta es un número adimensional que está dado por la relación del peso del agua producida al peso de un volumen igual del agua pura a 4 °C y 1.0 Atm de presión. Es equivalente tomar la relación entre la densidad o el peso específico del agua producida

con su correspondiente al agua pura, la densidad del agua se incrementa al aumentar la salinidad.

### **Fracción de agua**

Es la cantidad de agua (en fracción) que se tiene presente en la corriente del líquido producido.

### **Factor de volumen del agua (Bw)**

El volumen del agua que es medido en la superficie es ligeramente menor que el volumen de agua que parte del yacimiento. Debido a que el agua es un fluido prácticamente incompresible, para fines normales el factor de volumen del agua producida es igual a la unidad (1.0).

## **1.2 FUNDAMENTOS DE FLUJO DE FLUIDOS**

### **1.2.1 Velocidad de un fluido**

**La velocidad de un fluido** se define con respecto al mismo sistema de ejes de coordenadas el cual es usualmente estacionario. Si la velocidad de un fluido es baja, el movimiento de las partículas es paralelo a la superficie, y la velocidad en cualquier punto es constante en magnitud y dirección. Este tipo de velocidad de fluido es llamado *laminar*.

Por el otro lado, si la velocidad es alta, la velocidad cambia tanto en direcciones como magnitudes, este regimen de flujo se le llama turbulento. La velocidad a la cual el flujo cambia de laminar a turbulento es conocido como velocidad crítica y el flujo correspondiente a esta velocidad es llamado flujo crítico o flujo de transición.

Cuando el flujo es laminar se aplica un esfuerzo cortante, de acuerdo a la ley de viscosidad de Newton, es proporcional del gradiente de velocidad perpendicular a la velocidad, es decir:

$$\tau \propto \frac{dv}{dy}$$

o

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

Donde:

$\tau$  = El esfuerzo aplicado

$\frac{dv}{dy}$  = el gradiente de velocidad

Algunas veces, es más conveniente el uso de viscosidad cinemática el cual es igual a la viscosidad entre densidad de la masa, es decir:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

$\nu$  = viscosidad cinemática

$\rho$  = densidad de la masa.

### 1.2.2 Número de Reynolds

La resistencia del flujo de un fluido se relaciona por un número adimensional conocido como el número de Reynolds ( $N_{Re}$ ):

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

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido

$v$  = velocidad del fluido

$\mu$  = viscosidad del fluido

$d$  = diámetro

Éste se usa para determinar qué tipo de flujo se tiene. El flujo laminar se tiene cuando el número de Reynolds es menor a 2300. Por otro lado, si hay el flujo turbulento el número de Reynolds será mayor a 3100.

### 1.2.3 Análisis de flujo estacionario-conservación de la masa, momento, y energía.

Usando la velocidad promedio del fluido, el flujo puede analizarse aplicando los principios de conservación de masa, momento, y energía. Para el caso de fluidos, estos pueden ser escritos como:

- a) Conservación de masa (La ecuación de continuidad) para un líquido o un flujo incompresible.

$$Q = Av = A_1v_1 = A_2v_2$$

- b) Conservación del momento

$$\sum F_x = \rho Q(V_{x2} - V_{x1})$$

$$\sum F_y = \rho Q(V_{y2} - V_{y1})$$

$$\sum F_z = \rho Q(V_{z2} - V_{z1})$$

- c) Conservación de la energía

$$J_{q12} + W_{12} = J(U_2 - U_1) + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1$$

Donde:

q = proporción del flujo volumétrico

A = área de sección transversal

V = La velocidad del fluido promedio

$\rho$  = densidad del fluido

$v_x, v_y, v_z$  = componente de la velocidad promedio en las direcciones x, y, z.

$F_x, F_y, F_z$  = Componentes de momento con respecto a los ejes x, y, z en eje de las coordenadas de z

J = energía mecánica equivalente de calor

U = Energía interna

p = presión

$\gamma$  = peso específico del fluido

$Z$  = elevación sobre algún dato de referencia

$W$  = trabajo realizado

(Los subíndices 1 y 2 denotan dos secciones de un elemento)

En el caso de un flujo adiabático y para un caso especial en el cual no se realiza trabajo en o por el fluido y no hay cambio en la energía interna, la ecuación de balance de energía puede ser escrita como:

$$\frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1$$

y ésta es conocida como la ecuación de Bernoulli. El término  $\frac{p}{\gamma}$  tiene unidades de longitud y es llamado la presión de columna estática. La componente  $\frac{v^2}{2g}$  y  $Z$ , también tiene dimensiones de longitud, son conocidas como columna de velocidad y columna de potencial respectivamente.

#### 1.2.4 Flujo de líquidos en conductos

Cuando un líquido fluye a través de un conducto, no tiene la misma velocidad en las paredes del conducto que en el centro del conducto. El líquido está sujeto a un esfuerzo cortante en las paredes y la energía perdida debido a los esfuerzos cortantes son conocidas como pérdidas por fricción.

Varias expresiones han sido desarrolladas para calcular la energía perdida debido al flujo de fluidos en el conducto. La más usada frecuentemente es la expresión de Darcy y Weisbach's

$$h = f \frac{L}{4m} \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

$h$  = energía o pérdida de cabeza

$f$  = factor de fricción

- L = longitud del conducto  
 v = velocidad promedio del fluido  
 g = aceleración debido a la gravedad

El componente  $4m$  en la ecuación es el radio hidráulico del conducto y es igual a 4 veces el área de la sección transversal del flujo dividido por el perímetro mojado. En el caso de una tubería circular  $4m = d$ . Por lo tanto,

$$h = f \frac{L v^2}{d 2g}$$

El factor de fricción  $f$  depende de la naturaleza del flujo- laminar o turbulento- y se expresa como una función del número de Reynolds  $N_{Re}$  y rugosidad relativa ( $\epsilon/d$ ).

En el flujo laminar la velocidad es cero en las paredes y es máxima en el centro. La distribución de velocidad sigue un comportamiento parabólico, por lo cual la máxima velocidad es dos veces la velocidad promedio. El factor de fricción en el flujo laminar no depende de la superficie rugosa, como las pérdidas debido a la superficie rugosa son insignificantes comparadas a la energía requerida de las fuerzas cortantes,  $f = 64/N_{Re}$ .

En el flujo turbulento hay una mezcla violenta en el fluido, el cual es la principal causa de pérdidas de energía debido a las fuerzas moleculares. El factor de fricción en este caso depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa de la tubería.

Varias correlaciones han sido desarrolladas para determinar el valor del factor de fricción en la región turbulenta:

- Drew, Koo y McAdams
- Nikuradse
- Colebrook
- Jain

### 1.3 FLUJO MULTIFÁSICO EN TUBERÍAS

La habilidad de predecir analíticamente la presión en cualquier punto en una secuencia de flujo es esencial en la determinación de las dimensiones óptimas de instalaciones de producción. Aunque este problema no es nuevo en la industria, no ha sido de ninguna manera totalmente solucionado en todos los tipos de condiciones del flujo.

Es evidente que al fluir dos fases simultáneamente lo pueden hacer en formas diversas, cada una de estas formas presenta una distribución relativa de una fase con respecto a la otra constituyendo un patrón de flujo. Las figuras siguientes muestran los diferentes patrones de flujo observados en tuberías verticales y horizontales, por Orkiszewski y Beggs, respectivamente, de sus trabajos experimentales.

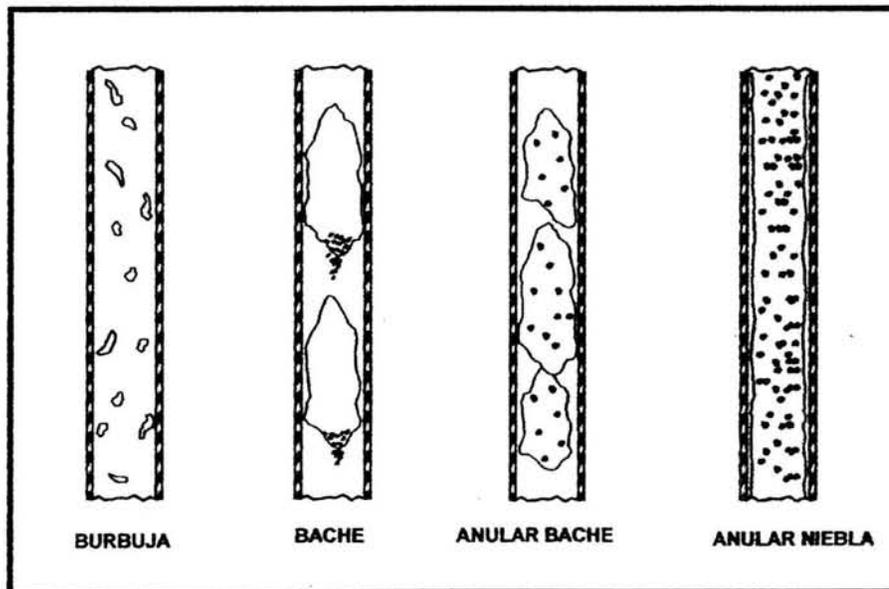


Figura 1.1 Patrones de flujo en tuberías verticales

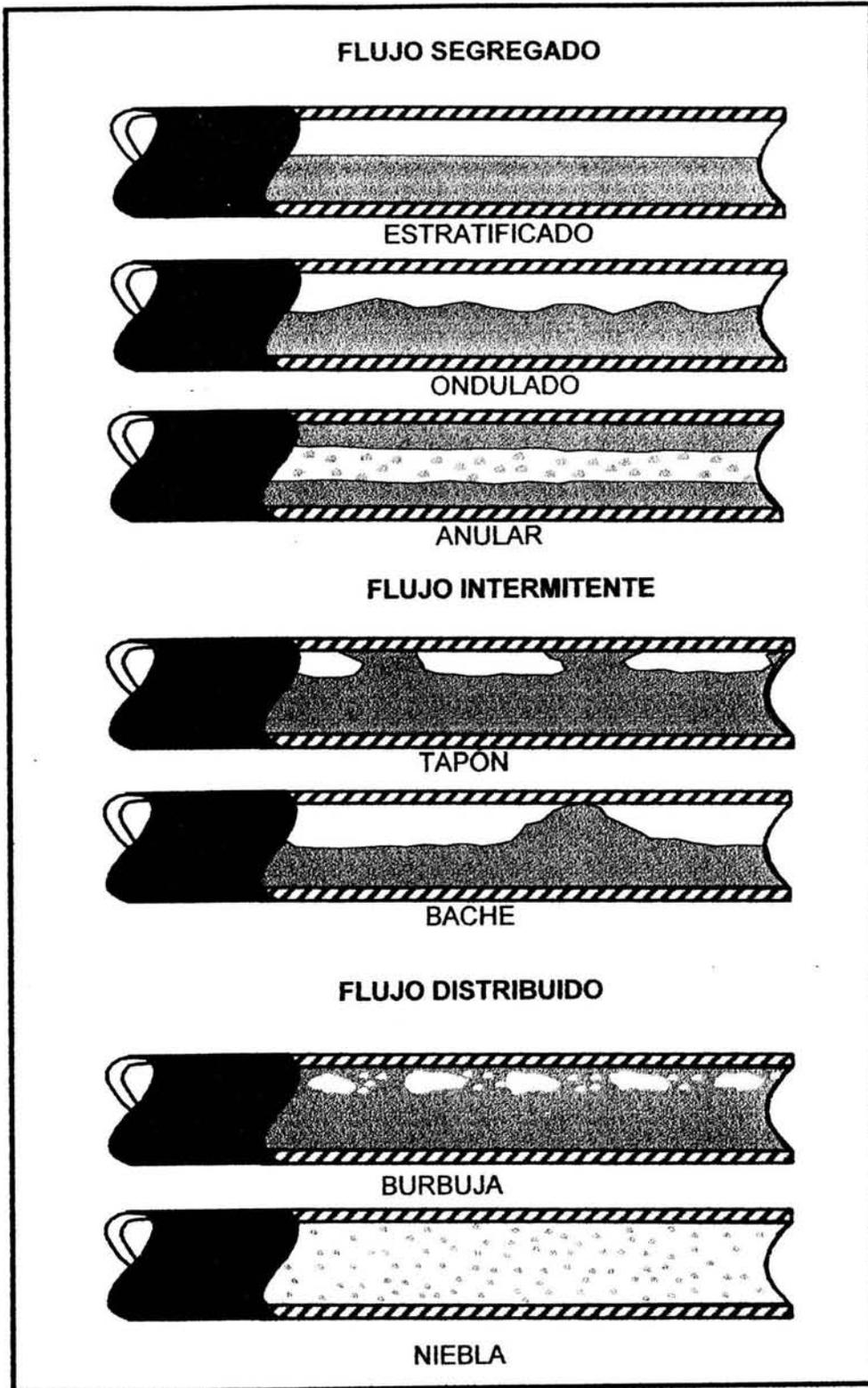


Figura 1.2 Patrones de flujo en tuberías horizontales

### 1.3.1 Descripción de patrones flujo

Cuando mezclas de gas-líquido fluyen hacia arriba en un tubo vertical, las dos fases pueden distribuirse en varios patrones, cada uno caracterizando la distribución radial y/o axial de líquido y gas. El flujo es normalmente bastante caótico y estas distribuciones de las fases son difíciles de describir. Seguiremos el principio de Hewitt y Hall-Taylor (1970) quién designa cuatro patrones básicos para el flujo ascendente como sigue:

- **Flujo Burbuja:** La fase gaseosa se distribuye aproximadamente de forma uniforme en la forma de burbujas discretas en una fase líquida continua.
- **Flujo Bache:** La mayoría del gas se localiza en una bala grande formada por burbujas que tienen un diámetro casi igual al diámetro de la tubería. Ellas se mueven uniformemente hacia arriba y son algunas veces designadas como “burbujas Taylor”. Las burbujas Taylor están separadas por baches de líquido continuo, que se extiende a través de la tubería y contiene las burbujas pequeñas de gas. Entre las burbujas Taylor y la pared de la tubería, flujos de líquido se extienden hacia abajo en forma de una película descendente delgada. (Este patrón se ha designado por otros como el tapón, o pistón, flujo dónde se definen bien el límite gas líquido a bajos gastos y dónde los límites están menos claros con flujo bache a gastos altos.)
- **Flujo anular bache:** El flujo anular bache es algo similar al flujo bache. Este, sin embargo, es mucho más caótico, espumoso y desordenado. La bala formada (burbuja Taylor) se pone estrecha, y su forma se tuerce. La continuidad del líquido en el bache entre sucesivas burbujas Taylor se destruye repetidamente por una concentración local de gas alta en el bache. Cuando esto pasa y el bache líquido cae. Este líquido se incrementa, se extiende y se levanta de nuevo por el gas. Típico de flujo transición es este movimiento oscilatorio o alternativo de la dirección del líquido. (Algunos observadores se refieren a un patrón de flujo espumoso para altos gasto de gas-líquido donde el sistema aparece finamente más disperso.)
- **Flujo Anular niebla:** El flujo anular niebla es caracterizado por la continuidad en el centro de la fase gaseosa a lo largo de la tubería. La fase líquida se mueve parcialmente hacia arriba como una película de líquido ondulada y parcialmente en forma de gotas arrastradas en el gas.

Para los patrones de flujo horizontales:

- **Flujo estratificado:** el líquido fluye por el fondo de la tubería y el gas se desplaza sobre la interfase gas líquido.
- **Flujo ondulado:** es similar al estratificado; pero el gas se mueve a mayor velocidad que el aceite y la interfase está formada por ondas que se desplazan en dirección del flujo.
- **Flujo anular:** el líquido forma una película alrededor del interior de la tubería y el gas fluye a alta velocidad en su parte central.
- **Flujo tapón:** flujo en el cual se alternan tapones de líquido y de gas en la parte superior de la tubería.
- **Flujo bache:** impulsadas por la mayor velocidad del gas, las ondas se elevan periódicamente, hasta tocar la parte superior de la tubería, formando espuma.
- **Flujo burbuja:** en este tipo de flujo las burbujas de gas se desplazan por la parte superior de la tubería a la misma velocidad que el líquido.
- **Flujo niebla:** la mayor parte del líquido fluye disperso en forma de niebla

### 1.3.2 Colgamiento

Se define como la relación entre el volumen de líquido existente en una sección de tubería a las condiciones de flujo, y el volumen de la sección aludida. Esta relación de volúmenes depende de la cantidad de líquido y gas que fluyen simultáneamente en la tubería. Generalmente la velocidad con la que fluye el gas es diferente de la velocidad con que fluye el líquido, propiciando un resbalamiento entre las fases.

El termino resbalamiento se usa para describir el fenómeno natural de flujo a mayor velocidad de una de las dos fase, las causas de este fenómeno son diversas, la resistencia al flujo por fricción es mucho menor en la fase gaseosa que en la fase líquida, la diferencia de compresibilidades entre el gas y el líquido hace que el gas en expansión viaje a mayor velocidad que el líquido. Cuando el flujo es ascendente o descendente actúa la segregación gravitacional ocasionando que el líquido viaje a menor velocidad del gas, para el primer caso y a mayor velocidad para el segundo caso.

Para calcular las pérdidas de presión por elevación (carga hidrostática), es necesario predecir con precisión el colgamiento considerando el resbalamiento entre las fases.

### 1.3.3 Flujo multifásico vertical

Al pasar los fluidos del yacimiento a través de la tubería de producción se consume la mayor parte de presión disponible para llevarlos del yacimiento a las baterías de separación. Por lo que es de suma importancia realizar una evaluación precisa de la distribución de presión a lo largo de dichas tuberías. Al hacerlo conjuntamente con un análisis integral del sistema de producción, es posible:

- Diseñar las TP y líneas de descarga.
- Proyectar los aparejos de producción artificial (neumático, electrocentrifugo, mecánico, etc.)
- Obtener la  $P_{wf}$  sin intervenir los pozos
- Calcular el efecto de los estranguladores sobre el gasto.
- Determinar la vida fluyente de los pozos
- Corroborar los datos de las correlaciones para su ajuste

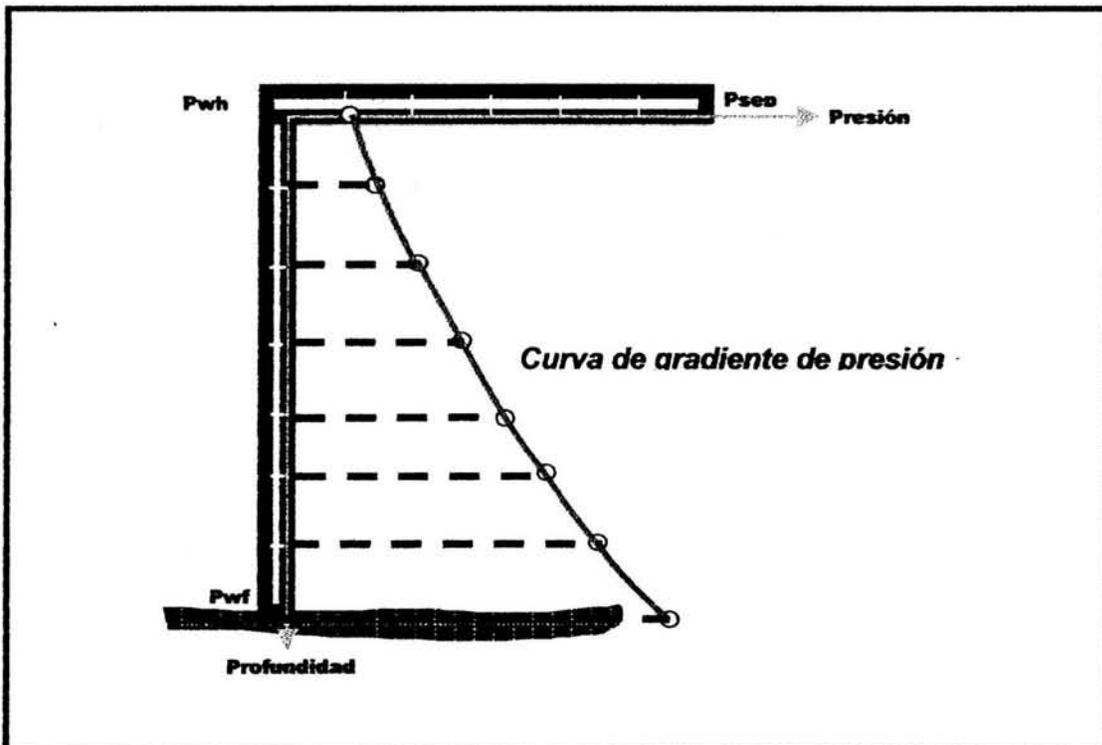


Figura 1.3 Perfil de presiones

Se desarrollaron varias correlaciones para flujo multifásico vertical, pueden clasificarse en tres grupos dependiendo de los parámetros que se toman en cuenta.

**GRUPO 1.-** no se considera el resbalamiento entre las fases, la densidad de la mezcla se obtiene en función de las propiedades de los fluidos, corregidas por presión y temperatura. Las pérdidas por fricción y los efectos de colgamiento se expresan por medio de un factor de fricción correlacionado empíricamente. No se distinguen patrones de flujo. En este grupo están incluidos:

- Poettman y Carpenter
- Fancher y Brown
- Baxendell y Thomas

**GRUPO2.-** se toma en cuenta el resbalamiento entre las fases. La densidad de la mezcla se calcula utilizando el efecto de colgamiento. El factor de fricción se correlaciona con las propiedades combinadas de gas y el líquido. No se distinguen regímenes de flujo. En este grupo está incluido:

- Hagedorn y Brown

**GRUPO3.-** se considera el resbalamiento entre las fases, la densidad de la mezcla se calcula utilizando el efecto del colgamiento. El factor de fricción se correlaciona con las propiedades del fluido en la fase continua. Se distinguen los diferentes patrones de flujo. Las principales correlaciones que caen dentro de este grupo son:

- Duns y Ros
- Orkiszewki
- Beggs y Brill

## 1.4 FUNDAMENTOS EN BOMBAS

Un equipo de bombeo es un transformador de energía. Recibe energía mecánica, que puede proceder de un motor eléctrico, térmico etc., y la convierte en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad.

### 1.4.1 Clasificación

Las bombas se clasifican en varios tipos, sobre su aplicación en el servicio, del material del cual están hechos, del tipo de líquido a manipular, su orientación o el sistema de conducción. Otro tipo de clasificación se basa en el principio de transferencia de energía por el fluido, acorde a este sistema, las bombas se clasifican en dos grupos básicos: bombas dinámicas y bombas de desplazamiento positivo. Estos grupos después pueden clasificarse en varios subgrupos dependiendo las especificaciones de diseño y características. La figura 1.4 muestra la clasificación de bombas dada por el "Hydraulic Institute" de E. U. (1984).

Todas las bombas de desplazamiento positivo producen un flujo pulsátil o periódico. Su mayor ventaja es que pueden manejar cualquier líquido independientemente de su viscosidad.

Las bombas reciprocantes de desplazamiento positivo, presentan una frontera móvil (pistón) que fuerza al fluido a través de cambios de volumen. Se abre una cavidad (cilindro) y el líquido es entonces "comprimido" saliendo de la cavidad por medio de una válvula de salida.

En bombas dinámicas, la energía es continuamente suministrada al fluido y es utilizado para incrementar la velocidad del fluido, las diferentes velocidades son subsecuentemente convertidas en energía de presión. Las bombas centrífugas consisten de una parte móvil, conocido como impulsor y una parte estacionaria, llamada difusor, el cual es una serie de pasajes estacionarios con un incremento gradual del área de la sección transversal.

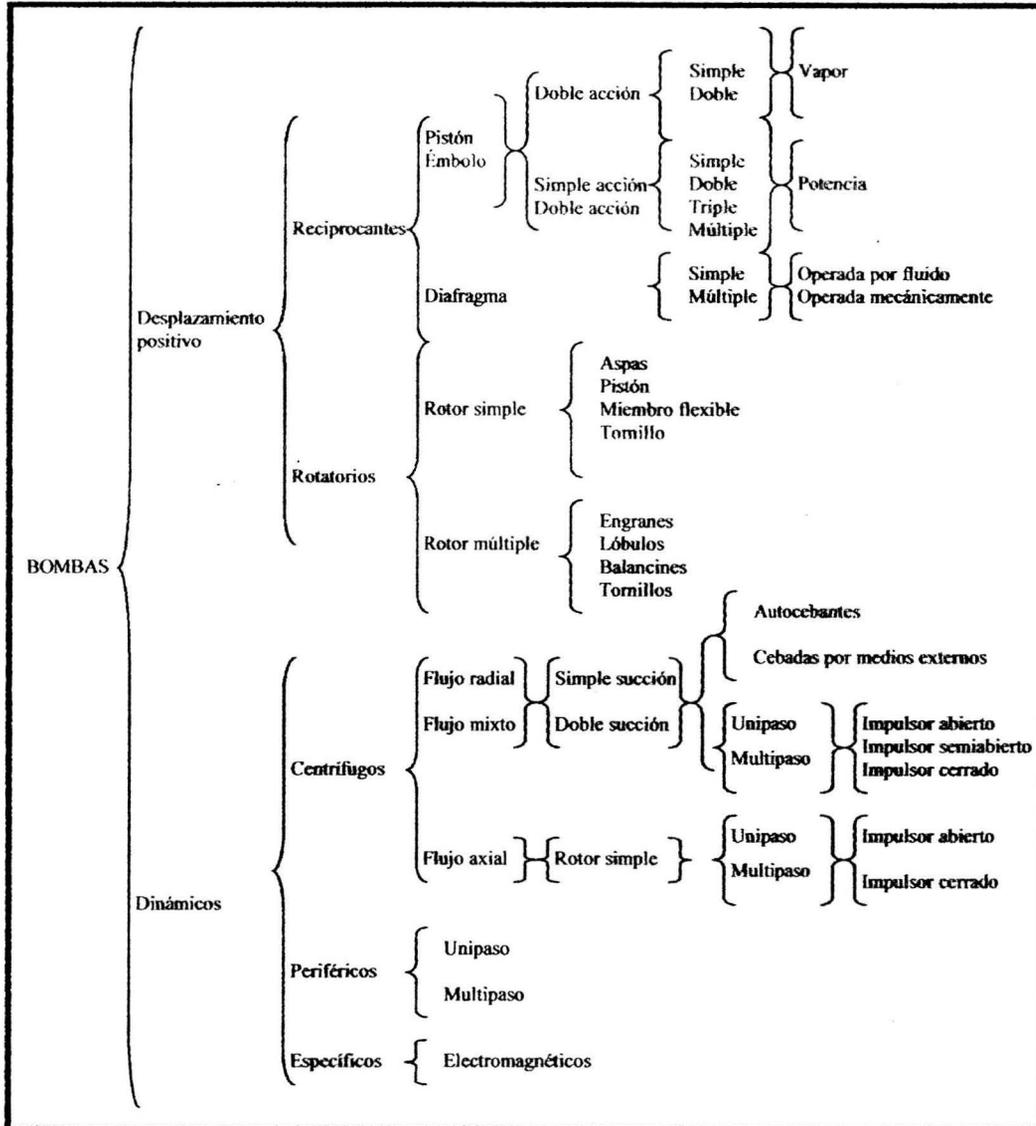


Figura 1.4 Clasificación de bombas

**1.4.2 Propiedades de una bomba centrífuga:**

Dentro del campo normal de aplicación, las propiedades de una bomba centrífuga son:

- a).- Gasto uniforme, sin pulsaciones.
- b).- La presión o altura de elevación disminuye a medida que aumenta el gasto.

c).- La altura, medida en metros de columna de líquido, a la que eleva una bomba es independiente de la naturaleza del líquido y, por tanto, la altura de columna de líquido es la misma, prescindiendo de la influencia que ejerce la viscosidad.

d).- La potencia requerida por la bomba es proporcional al peso específico del líquido elevado.

e).- La potencia requerida durante el funcionamiento es continua y libre de sobrecargas, cuando la altura no varía y no hay perturbaciones ajenas a la bomba en la succión.

### 1.4.3 Funcionamiento de las bombas centrífugas

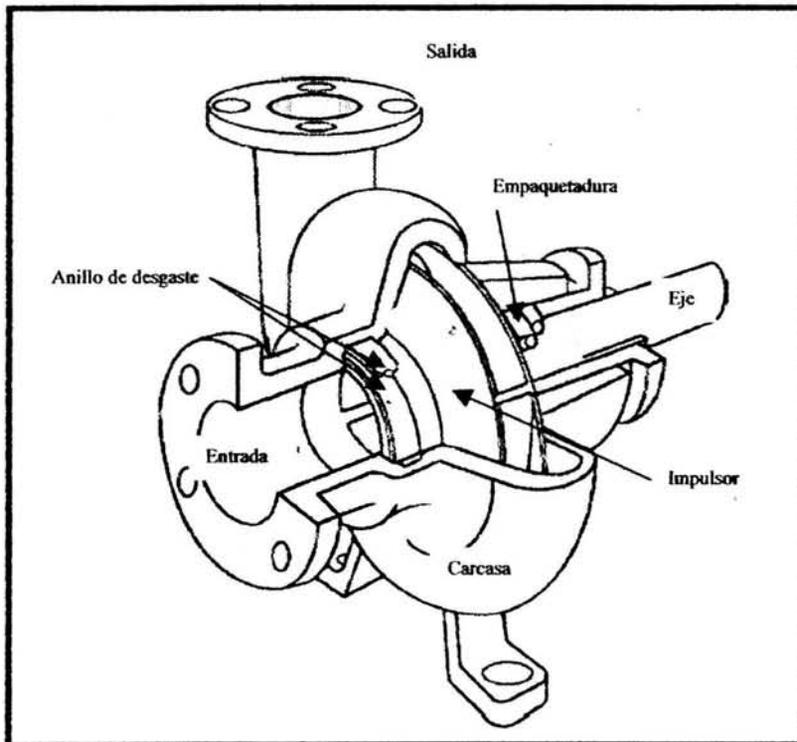


Figura 1.5 Bomba centrífuga

Las bombas centrífugas están constituidas por:

El impulsor, formado por una serie de álabes de diversas formas giran dentro de una carcasa circular. El impulsor va unido al eje y es la parte móvil de la bomba. El líquido penetra axialmente por la tubería de succión hasta el centro del impulsor, que es accionado por un motor, experimentando un cambio de dirección más o menos brusco,

pasando a radial, (en las centrífugas), o permaneciendo axial, (en las axiales), adquiriendo una aceleración.

Los álabes del impulsor someten al líquido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, de forma que van del impulsor hacia la carcasa a gran velocidad, aumentando su presión en el impulsor según la distancia al eje.

La finalidad de la carcasa es la de recoger el líquido a gran velocidad y cambiar la dirección de su movimiento.

La carcasa es también un transformador de energía, ya que disminuye la velocidad (transforma parte de la energía dinámica creada en el impulsor en energía de presión).

Las ventajas principales de las bombas centrífugas son: gasto constante, presión uniforme, sencillez de construcción, tamaño reducido, bajo mantenimiento y flexibilidad de regulación.

**Factores de selección de las bombas.**- En la selección de bombas hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- 1) **Las propiedades físicas del líquido**, como el peso específico, presión de saturación, viscosidad, temperatura, sólidos en suspensión.
- 2) **NPSH (carga neta positiva de succión)**, presión de succión y descarga de la bomba.
- 3) **Tipo y dimensiones de la bomba**, velocidad, diámetro del eje y/o camisa del eje, cliente final, lugar de instalación.
- 4) **Disponibilidad de la bomba.**

## 1.5 COMPORTAMIENTO DE POZOS

Al analizar el comportamiento de un pozo fluyente es necesario considerar el sistema de producción en conjunto.

### 1.5.1 Índice de productividad

Si la presión de fondo fluyendo es mayor a la saturación (yacimientos bajosaturados) se utiliza el **índice de productividad (IP)**, que es el volumen de fluidos que se obtiene por unidad de presión.

Para esta ecuación se supone que el flujo hacia el pozo es directamente proporcional a la diferencia de presión entre el yacimiento y el pozo. Las suposiciones son:

- Régimen permanente
- Propiedades del fluido prácticamente constantes
- Flujo en una sola fase al pozo
- Sistema Homogéneo
- Presión de fondo fluyendo mayor que la presión de saturación.

Para casos en los que tienen estas condiciones, al graficar gasto de aceite contra presión de fondo fluyendo se obtiene una línea recta, en donde el índice de productividad es el inverso de la pendiente de la recta.

$$IP = \frac{\text{gasto}}{P_{ws} - P_{wf}} \dots\dots\dots(A)$$

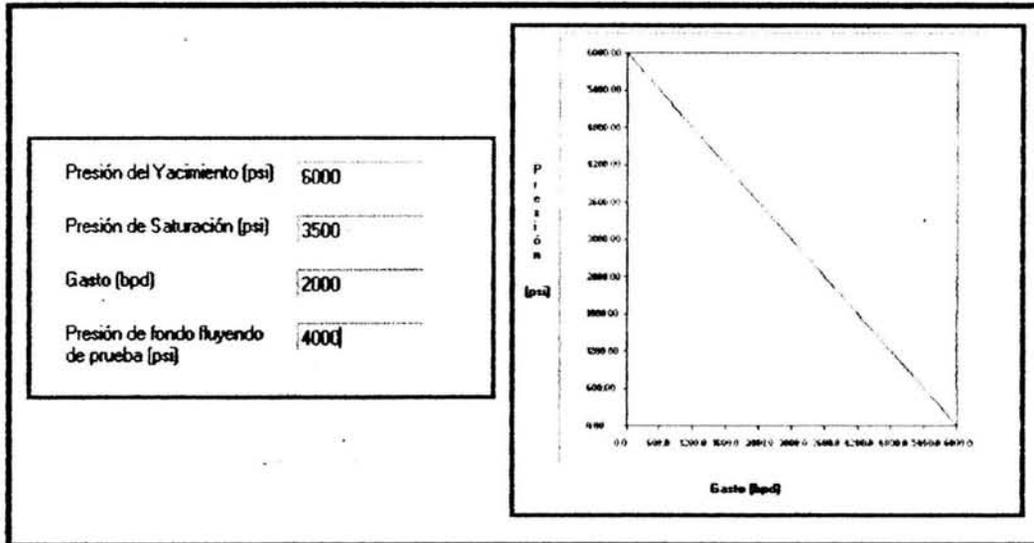


Figura 1.6 Índice de productividad

Si la presión de fondo fluyendo es menor a la presión de saturación (yacimientos saturados, por empuje de gas disuelto liberado) se utiliza la ecuación de Vogel (IPR), al existir dos fases en el yacimiento.

### 1.5.2 Ecuación de Vogel

En esta ecuación se supone:

- el yacimiento es circular y completamente cerrado en un pozo en el centro y totalmente perforado,
- El medio poroso es uniforme e isotrópico
- Saturación de agua constante en todos los puntos,
- Los efectos gravitacionales se pueden despreciar,
- No se considera compresibilidad de la roca y del agua de formación
- La composición son constantes para aceite y gas,
- Existe la misma presión en las dos fases (agua y líquido).

$$\frac{\text{gasto}}{\text{gastomáx}} = 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2 \dots\dots\dots (B)$$

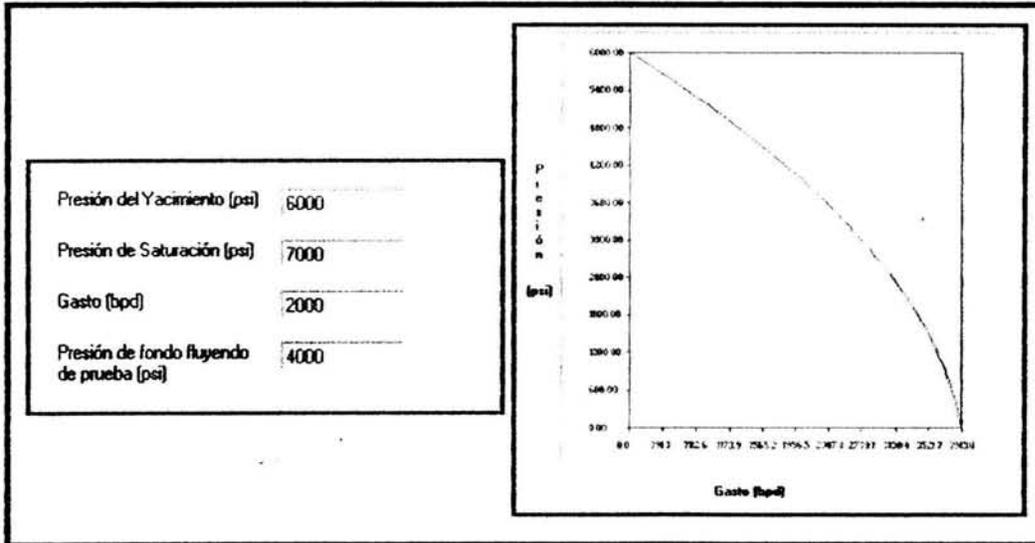


Figura 1.7 Vogel

### 1.5.3 Curva generalizada

Las curvas generalizadas también permiten determinar la capacidad productiva del yacimiento. Considerando que inicialmente la  $P_{yac} > P_{sat}$ , pero en los alrededores del pozo la presión puede ser mayor o menor que la presión de saturación, lo que implica que podría haber 2 fases en esa zona.

#### 1) Para $P_{wf} > P_{sat}$ .

- a) Calcular IP
- b) Calcular el gasto de burbujeo ( $q_b$ )

$$q_b = IP(P_{ws} - P_b)$$

- c) Calcular el gasto crítico ( $q_c$ )

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

d) Para cualquier Pwf menor Pb

$$gasto = qc \left( 1.8 \left( \frac{Pws}{Pb} \right) - 0.8 - 0.2 \left( \frac{Pwf}{Pb} \right) - 0.8 \left( \frac{Pwf}{Pb} \right)^2 \right)$$

e) Para el qmax

$$q_{o,max} = qb + qc$$

2) Para Pwf < Psat

a) Calcular qc

$$qc = \frac{gasto}{1.8 \left( \frac{Pws}{Pb} \right) - 0.8 - 0.2 \left( \frac{Pwf}{Pb} \right) - 0.8 \left( \frac{Pwf}{Pb} \right)^2}$$

b) Para cualquier Pwf menor Pb

$$gasto = qc \left( 1.8 \left( \frac{Pws}{Pb} \right) - 0.8 - 0.2 \left( \frac{Pwf}{Pb} \right) - 0.8 \left( \frac{Pwf}{Pb} \right)^2 \right)$$

c) Calcular qb

$$qb = 1.8qc \left( \frac{Pws - Pb}{Pb} \right)$$

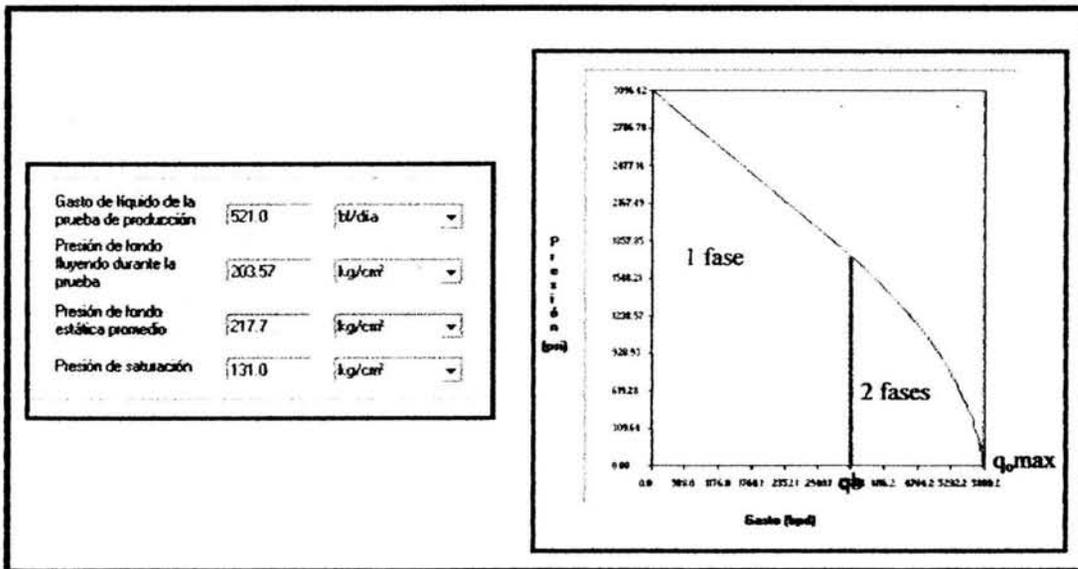


Figura 1.8 Curva generalizada

## CAPÍTULO II

### EQUIPO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO

#### 2.1 HISTORIA

El inventor del motor eléctrico sumergible es Armais Arutunoff (1911). En 1930 Armais Arutunoff estableció la Russian Electrical Dinamo of Arutunoff, esta compañía es conocida como REDA

Originalmente este sistema se hizo para pozos de agua y posteriormente fue adaptado para pozos petroleros, siendo en 1927 cuando se instaló el primer equipo de Bombeo Electrocentrífugo en el campo de El Dorado, cerca de Kansas, U.S.A.

Hoy varias compañías subministran equipos y servicios de ESP:

- REDA (Schlumberger)
- CENTRILIFT
- ESP
- ODI



Figura 2.1 Compañía REDA

## 2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

### Ventajas

- ESP es un método flexible para producir en el rango de bajos a altos gastos de producción.
- Puede manejar altos gastos y altas proporciones de agua. Normalmente el costo de bombeo por barril decrece cuando se incrementa el gasto.
- Mínimo equipo requerido en superficie.
- La ausencia de ruido en superficie, produce un bajo impacto ambiental
- Es fácil la automatización supervisión y control
- Es aplicable en pozos horizontales y desviados (dependiendo del ángulo de construcción. Normalmente  $<9^{\circ}/100$  pies)

APLICACIÓN	RANGO TÍPICO	MÁXIMO
Profundidad de operación (ft)	1000-10,000 TVD	15,000 TVD
Volúmenes de operación (Bpd)	200-20,000	35,000
Temperatura de operación (°F)	100-275	400
Desviación del pozo	10 grados	horizontales

TVD.- profundidad vertical verdadera

### Desventajas

- El costo inicial del sistema es relativamente alto
- Esta aplicación está limitada principalmente por la degradación del aislante del cable y limitaciones de temperatura que afectan al motor.
- El desempeño de la bomba es afectada significativamente por gas libre.
- Para reparar cualquier componente del equipo del fondo del pozo, se requiere sacar el equipo completo.
- La expectativa de vida es severamente afectada por la producción y tamaño de la arena.

## 2.3 EQUIPO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO

El equipo que constituye al sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido está dividido en dos categorías:

- **Componentes superficiales:** transformador primario, controlador de velocidad variable, transformador variable, caja de venteo, cabezal del pozo.
- **Componentes subsuperficiales:** sensor de fondo (opcional), motor, sección sellante, separador de gas (opcional), bomba.

## 2.4 COMPONENTES SUBSUPERFICIALES

### 2.4.1 Guía o centralizador

Se utiliza para evitar que el equipo se vaya golpeando con las paredes de la tubería de revestimiento durante la instalación o cuando entre a un liner. Si existiera una obstrucción primero golpearía a la guía protegiendo así al sensor de fondo

### 2.4.2 Sensor de fondo

Se coloca en la parte inferior del equipo, envía la información de los parámetros de operación del equipo y del pozo como son temperaturas y presiones, para determinar en que condiciones opera el equipo y así poder realizar alguna acción correctiva para mejorar la operación del sistema.

La información se envía a través del cable de potencia como una señal digital, se decodifica en superficie por una computadora para mostrar los valores y tendencias. Los parámetros que registra el sensor son:

- Presión de entrada del fluido a la bomba.
- Temperatura de entrada del fluido a la bomba.
- Temperatura del Motor.

### 2.4.3 Motor

Se coloca en la parte inferior del aparejo, y recibe la energía a través del cable de una fuente de energía que se localiza en la superficie.

Los principios básicos de diseño y operación de los motores de bombeo electrocentrífugo sumergido son los mismos que los motores eléctricos normales de superficie.

El motor debe instalarse en el interior de la tubería de revestimiento. Los motores son llenados completamente con un aceite mineral altamente refinado o con aceite sintético para lubricar los cojinetes y proveer resistencia dieléctrica y conductividad térmica para disipar el calor generado por el motor hacia su carcasa, el calor es luego transferido al fluido que pasa por la superficie externa del motor.

El motor puede ser utilizado con corriente alterna de 60 Hz ó 50 Hz.. Cada tipo de motor tiene sus curvas de rendimiento de velocidad, potencia, eficiencia y amperaje en función del porcentaje de carga.

Los factores que se consideran en el proceso de selección del motor incluyen:

- Serie y tipo del motor
- Configuración del motor, voltaje, amperaje, y características especiales de operación.
- Características de operación a las condiciones de diseño y máxima temperatura de operación del motor.

En general, al igual que con las bombas, el principio básico es seleccionar el motor de mayor diámetro que pueda ser instalado libremente dentro de la tubería de revestimiento. Los motores de mayor diámetro normalmente son menos costosos. Mientras mayor es el diámetro del motor, mayor es la potencia que puede entregar por unidad de longitud.

Ahora debemos seleccionar el voltaje del motor. En principio podría parecer confuso ver que para el mismo tipo de motor se tienen varios motores de la misma potencia pero de diferente voltaje y amperaje.

La razón por la cual se tienen varios voltajes en motores de la misma potencia está en el balanceo de pérdidas en el cable de potencia. Bajo voltaje implica alto amperaje resultando en una mayor caída de voltaje en el cable de potencia. Aunque la eficiencia del motor no cambia, la eficiencia global del sistema disminuirá con mayor amperaje. Si el amperaje es demasiado alto, es posible que el motor no arranque debido a la caída de voltaje transitoria que ocurre al arrancar.

En general es preferible seleccionar el motor de mayor voltaje, siempre y cuando sea posible considerando las pérdidas en el cable y los equipos de superficie.

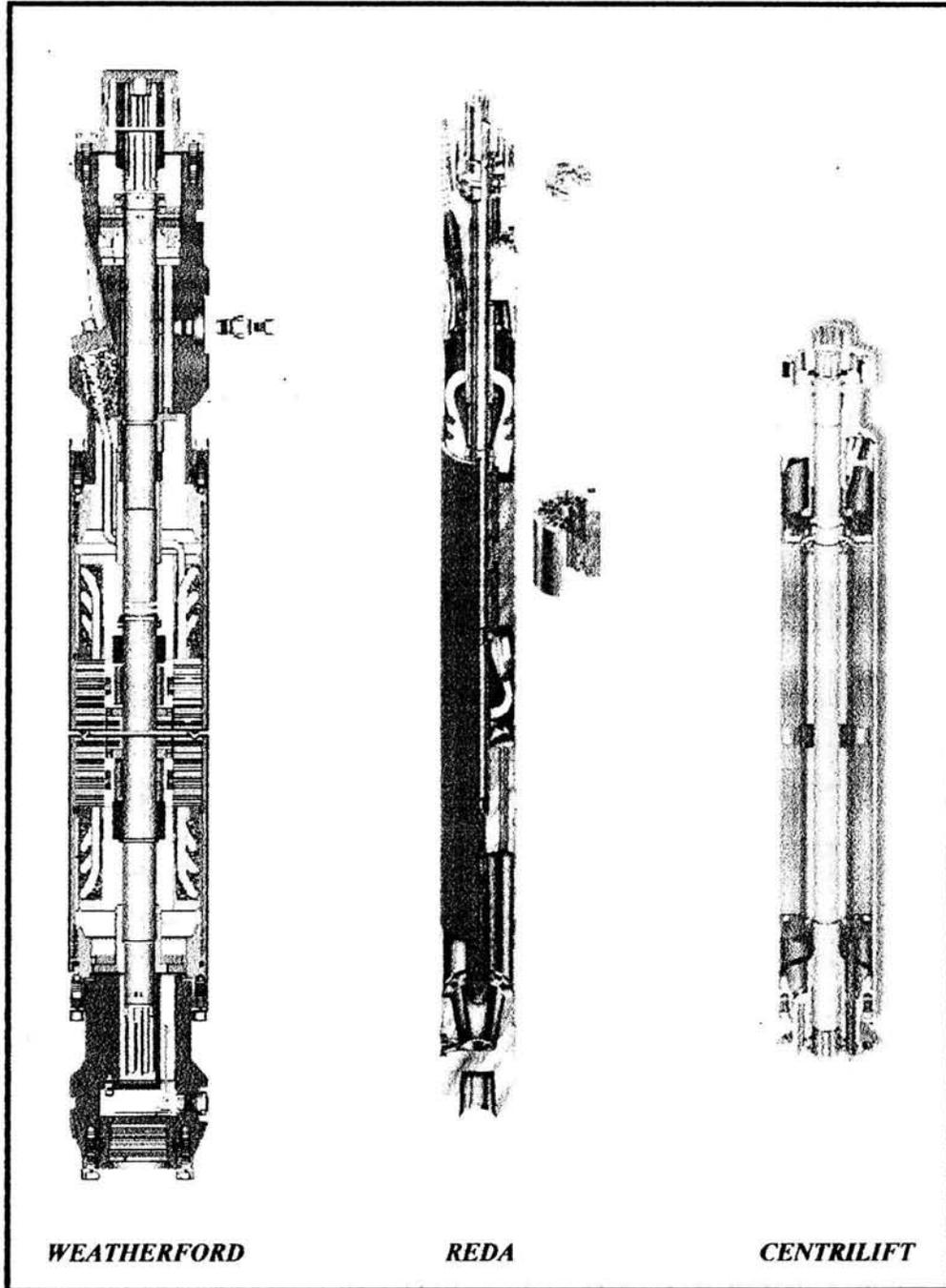


Figura 2.2 Motores eléctricos sumergibles

#### 2.4.4 Protector o sello

El Protector está ubicado entre la bomba y el motor, es una pieza vital en el ensamblaje y si no se selecciona apropiadamente puede reducir la vida útil del equipo.

Las funciones básicas del protector son:

- Evitar que los fluidos del pozo entren en el motor.
- Proporcionar un depósito para la expansión y la contracción del aceite del motor causado por los cambios de la temperatura y presión.
- Igualar la presión interna del motor con la presión externa del fluido del pozo.
- Soportar la carga axial (empuje) desarrollada por la bomba.
- Transmitir el torque desarrollado en el motor hacia la bomba, a través de la flecha del motor.

El protector evita el ingreso del fluido del pozo al motor donde podría causar daños irreparables al sistema. A través de equilibrar la presión en el interior del protector con la presión externa del fluido del pozo, puesto que la base del protector está abierta al motor, la presión en el interior del motor se equilibra con la presión del ambiente externo del fluido que rodea a la unidad. Para lograr esta función, el protector debe permitir de alguna manera que el fluido del pozo se comunique con el aceite en el interior del protector pero tienen que tener distintas densidades para que no se mezclen.

Para absorber el empuje generado por la bomba, el cojinete de carga del protector posee una superficie relativamente grande sobre la cual absorbe el empuje. Además, puesto que el cojinete de carga está operando y absorbe la carga en un entorno de aceite limpio.

Transmite el torque del motor a la bomba, puesto que esta físicamente localizado entre los dos. Aunque esto puede parecer un poco trivial, en el proceso de selección necesitamos estar seguros de que el eje del protector es capaz de transmitir todo el torque requerido sin exceder su resistencia máxima, lo cual podría resultar en un eje roto.

#### 2.4.4.1 Ciclos de Operación del protector

- Asentamiento del bombeo electrocentrífugo a profundidad de asentamiento

A medida que el aparejo es bajado en el pozo el aceite del motor y del protector se va calentando gradualmente hasta llegar hasta la profundidad de asentamiento. El incremento gradual de temperatura originará que el aceite del motor y del protector comience a expandirse hasta que la temperatura se equilibre con la temperatura externa. El volumen expandido del aceite dependerá del diferencial térmico entre la superficie y la temperatura a la profundidad de asentamiento, este aceite nunca será recuperado por el protector.

- Aparejo en Operación

Cuando el sistema se arranca, la temperatura del motor se incrementa a partir de la temperatura de fondo hasta que alcanza la temperatura a la cual se estabiliza para la operación del sistema temperatura del motor operando, este incremento de temperatura provoca una expansión adicional del aceite.

- El motor se para

Después de cierto tiempo de operación se suspende la producción ya sea para realizar mantenimiento de los equipos de superficie, por una falla en el suministro de energía, o cualquier otra razón. En el transcurso de cierto tiempo, generalmente entre 2 a 4 horas, la temperatura del motor disminuye desde la temperatura de operación del motor hasta equilibrarse nuevamente con la temperatura externa del fluido, por lo tanto el aceite se contraerá el mismo volumen que se expandió en el punto anterior.

- Recuperación del aparejo a la superficie.

A medida que se saca la unidad hacia la superficie, el aceite se va enfriando progresivamente hasta llegar nuevamente a la temperatura ambiente.

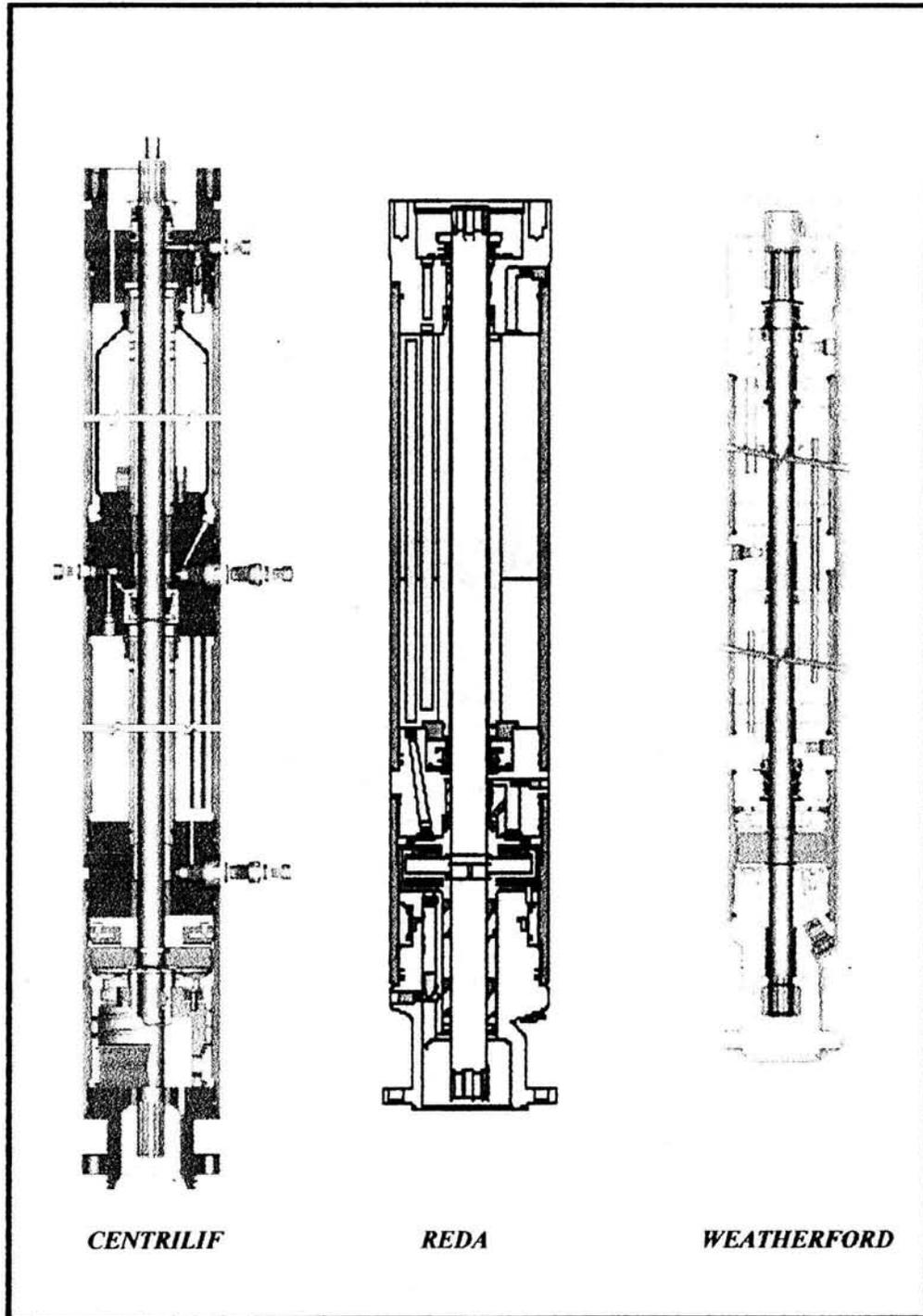


Figura 2.3 Protectores

### 2.4.5 Separador de gas

Un factor que degrada el rendimiento del sistema es la cantidad de gas libre a la entrada de la bomba. Dependiendo de la cantidad de gas esperada en la sección de entrada a la bomba a las condiciones de diseño se determina el separador de gas.

El separador de gas es opcional y se encuentra ubicado entre la sección de sello y la bomba, están diseñados para evitar el paso de gas libre hacia la bomba.

#### 2.4.5.1 Separador estático

Los primeros separadores eran los llamados de flujo inverso (estáticos), y se basa en el incremento de la separación de gas libre por medio de la inversión de la dirección del flujo en la sección de entrada a la bomba.

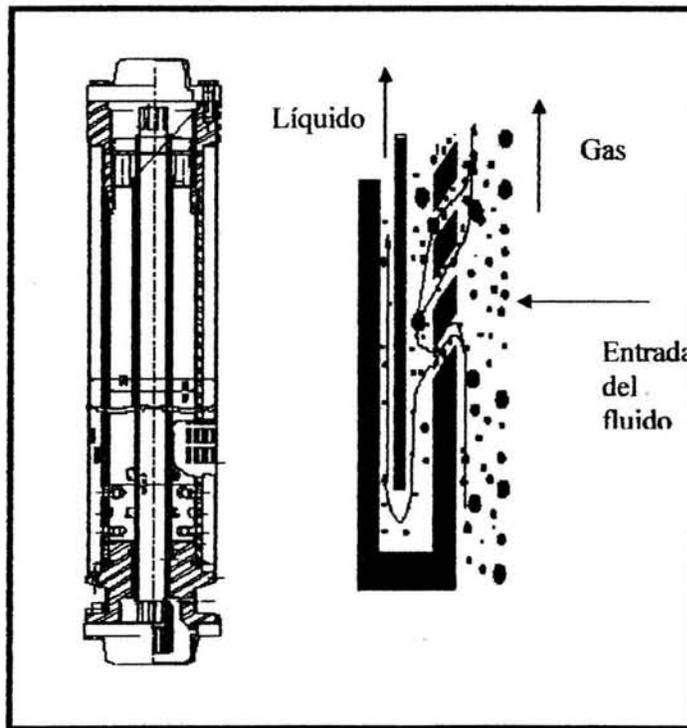


Figura 2.4 Separador estático

Cuando el fluido entra al separador de gas la dirección del flujo se invierte, disminuyendo la cantidad de gas arrastrada por el líquido que entra al separador. Algunas de las burbujas de gas siguen su camino por el espacio anular, otras entran al separador pero se separan en el espacio anular entre el protector y la camisa interna del separador de gas, y finalmente el gas que no se logra separar pasa con el líquido al interior de la bomba.

#### 2.4.5.2 Separadores dinámicos

A diferencia de los separadores estáticos, los separadores de gas “Dinámicos o Rotativos” sí ejercen un trabajo en el fluido para lograr mayor separación de gas dentro del separador.

Para entender el proceso de separación en un separador dinámico, se puede dividir el separador en cuatro secciones: 1) Succión, 2) Cámara de incremento de presión, 3) Cámara de separación 4) By-pass. En la primera sección después de la succión, el inductor aumenta la presión de la mezcla. En la cámara de separación las fases se separan por medio de centrifugación. Puesto que la fase líquida es más pesada, ésta es expulsada hacia afuera (contra la pared interna) y la fase gaseosa se concentra en el centro por ser más liviana. En la parte superior del separador los fluidos son redireccionados, el gas que venía por la parte central es desviado al espacio anular y la fase líquida desde el exterior es dirigida hacia la bomba por la parte interior del by-pass.

La eficiencia de separación no es fácil de predecir debido a la cantidad de variables que intervienen como las características del fluido, velocidades, gasto, tipo de flujo, dimensiones de los equipos, velocidad de rotación, etc.

Algunos valores promedio comúnmente usados para eficiencia de separación son:

	<i>Eficiencia de separación</i>	<i>Porcentaje de gas libre que entra a la bomba</i>
<i>Flujo Inverso(estáticos)</i>	25 - 50%	50- 75%
<i>Rotativo(dinámicos)</i>	80 - 95%	5-20%

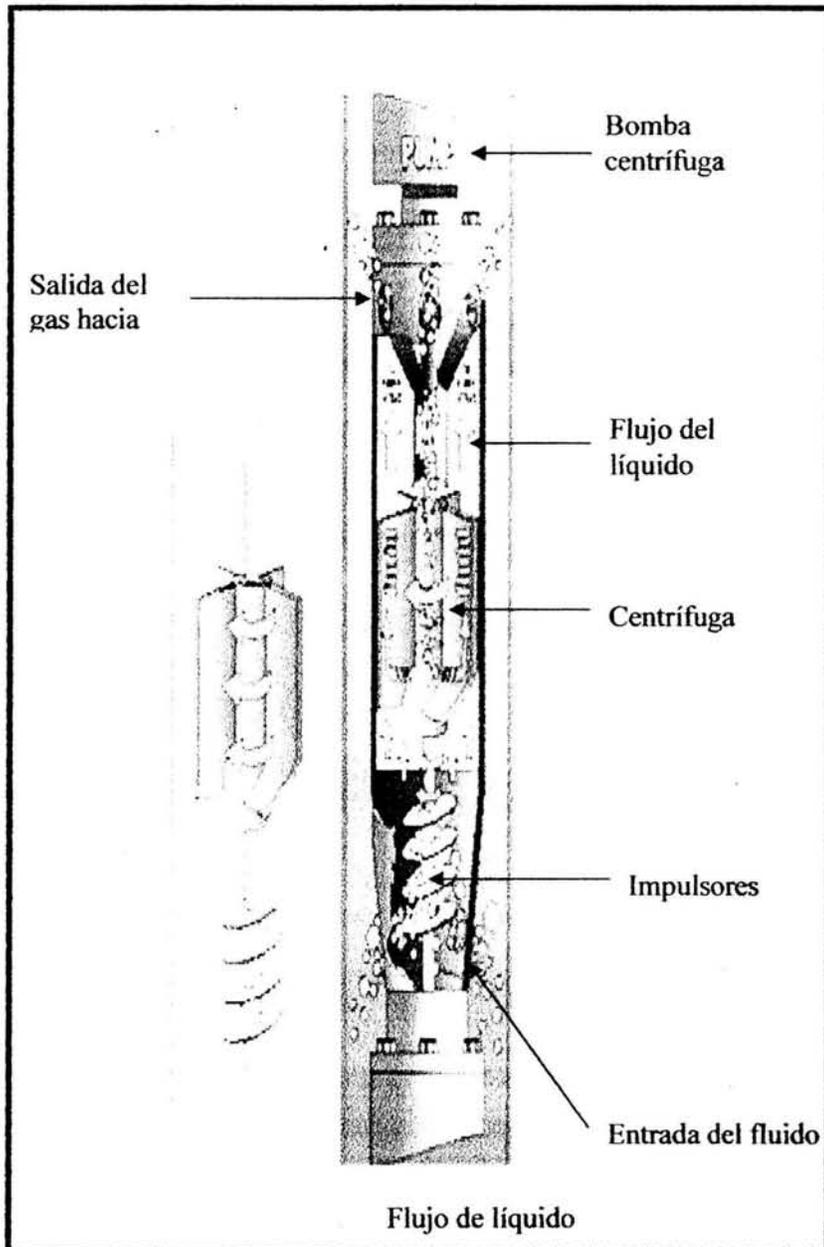


Figura 2.5 Separador dinámico rotativo centrífugo

### 2.4.6 Bomba centrífuga

Es el corazón del sistema y su función principal será transformar la energía mecánica en energía cinética, generando velocidad en el fluido y presión.



Figura 2.6 Instalación de bomba centrífuga

Las bombas sumergibles son bombas centrífugas de etapas múltiples, el tipo o geometría de la etapa determina el volumen de fluido que la bomba puede manejar, mientras que el número de etapas de la bomba determina la carga dinámica total (CDT).

La carga es la conversión equivalente de presión en columna hidráulica, la carga dinámica total es la carga que necesita generar la bomba a la profundidad de colocación para que los fluidos lleguen a la superficie al gasto y presión de cabeza deseado.

Cada etapa de una bomba centrífuga consiste en un impulsor que rota y un difusor estacionario. El impulsor agrega velocidad a la corriente del fluido por la fuerza centrífuga, el difusor estacionario convierte esta energía de alta velocidad a energía de presión mientras que vuelve a dirigir el flujo al impulsor siguiente.

En general, se debe escoger la bomba de mayor diámetro que pueda ser instalada libremente en la tubería de revestimiento, para manejar el gasto de diseño previsto. En general las bombas de mayor diámetro serán más eficientes y menos costosas. Adicionalmente las etapas más grandes podrían tener mejor comportamiento con fluidos viscosos o con alto contenido de gas.

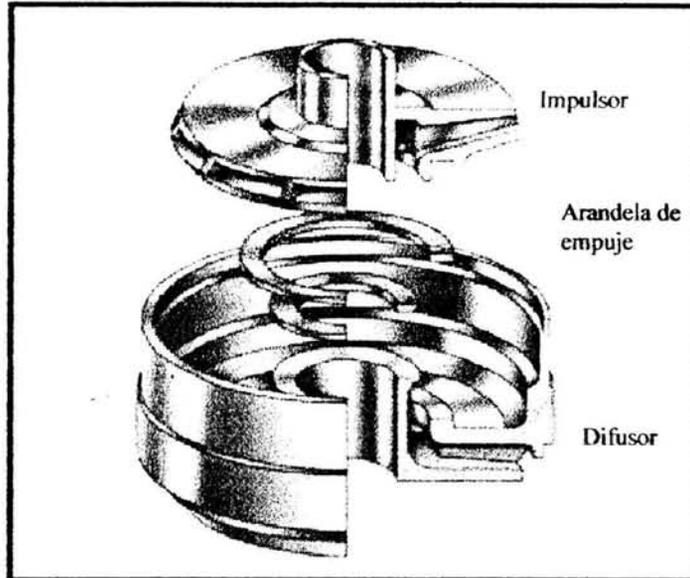


Figura 2.7 Bomba centrífuga una etapa

Una vez que se define el tamaño o Serie de la bomba se debe considerar la eficiencia de la bomba al gasto de diseño esperado a la succión de la bomba y a las condiciones de operación esperadas durante el tiempo de trabajo. Se debe evitar seleccionar las bombas para operaciones fuera del rango operativo recomendado. Cuando la bomba opera en “**up-thrust**” pierde eficiencia y el fluido recircula por el faldón inferior del impulsor. Si el fluido contiene abrasivos se produce la erosión de las arandelas y eventualmente del mismo material de las etapas.

La presión desarrollada por una bomba centrífuga depende de la velocidad periférica del impulsor y es independiente del líquido bombeado. La presión desarrollada convertida a la longitud de columna hidráulica que levanta la bomba, es la misma cuando la bomba maneja diferentes densidades, no así la potencia requerida.

#### 2.4.6.1 *Curvas características*

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

El desempeño de una bomba, para una velocidad de rotación del impulsor involucra tres parámetros básicos:

- Gasto, expresada en unidades de volumen por unidad de tiempo.
- Carga, expresado en unidades de longitud de una columna del líquido a ser bombeado.
- Velocidad a la cual opera la bomba, expresada generalmente en revoluciones por minuto (RPM).

Normalmente, el desempeño o las características de una bomba son presentadas por el fabricante. Estas curvas corresponden siempre a la misma velocidad de la bomba, al mismo impulsor y generalmente son obtenidas con agua a temperatura ambiente y en ellas se muestran relaciones de: carga vs. gasto, potencia al freno vs. gasto y la curva de eficiencia de la bomba vs. gasto. La capacidad a la cual una bomba realiza su función de la manera más eficiente es conocida como el punto de máxima eficiencia o B.E.P. (Best Efficiency Point).

Cada curva representa el comportamiento de la bomba a una velocidad particular para alturas de elevación variables. Las curvas se realizaron usando agua dulce de densidad relativa 1 y viscosidad de 1 cp, sin embargo, las bombas en realidad se utilizan para bombear líquidos de diferentes densidades y viscosidades, operando a distintas velocidades. En estos casos es necesario tomar en cuenta el efecto de algunos parámetros a fin de predecir el comportamiento de la bomba bajo condiciones reales de operación.

Las curvas se obtienen de forma experimental, y son válidas para un diseño específico del difusor e impulsor y para una velocidad rotatoria constante (rpm), la carga y eficiencia son válidas para cualquier líquido independiente de la densidad del fluido, resistencia al freno de las curvas son válidas solamente para el agua y se debe entonces corregir por la gravedad específica del fluido bombeado.

En la figura 2.8 se muestran tres bombas idénticas trabajando a la misma velocidad, pero con diferentes fluidos, se puede ver que las tres bombas levantan la misma carga de fluido, pero la presión de descarga es diferente debido al tipo de fluido en operación.

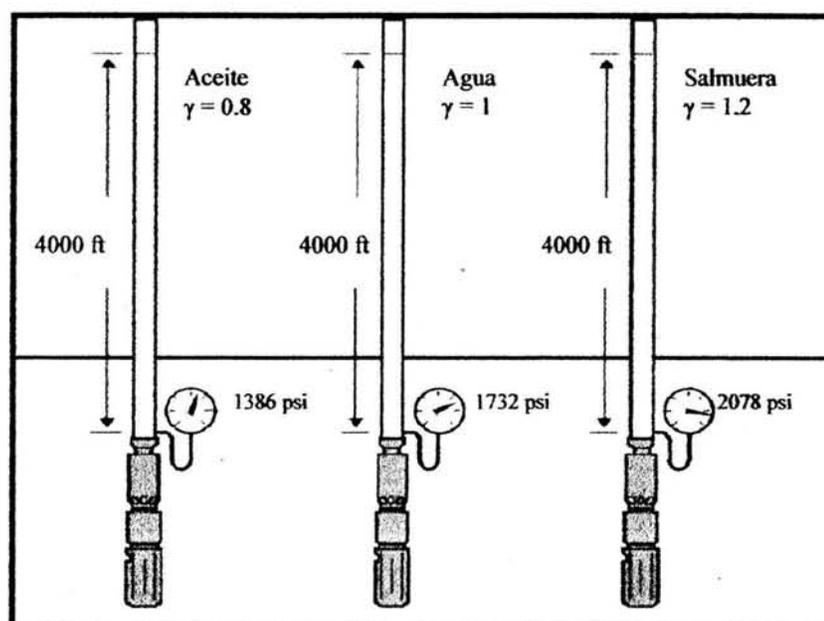


Figura 2.8 Bombas centrífugas operando con diferentes fluidos

En la curva característica figura 2.9 la zona que se encuentra en el rango de operación nos indica el rango recomendado para la bomba por el fabricante. Si la bomba opera muy a la derecha de esta zona se dice que está en "*Up Thrust*" y si está muy a la izquierda en "*Down Thrust*". Cuando se trabaja en estas zonas el equipo puede sufrir desgaste en los impulsores y difusores, ya que cuando trabaja por arriba de su capacidad el impulsor roza con la parte superior del difusor y cuando trabaja por debajo de su capacidad, roza con la parte inferior del difusor.

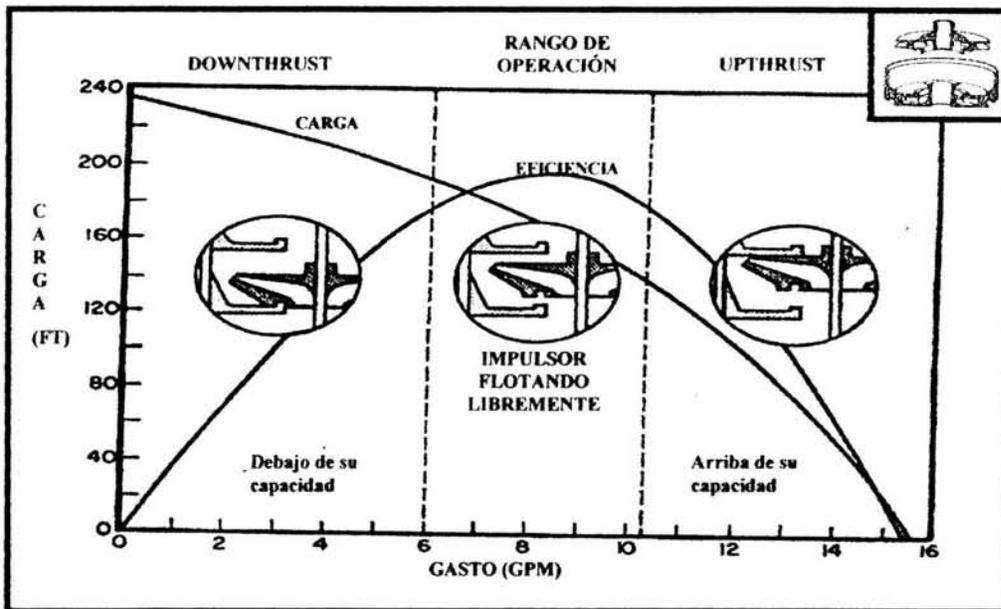


Figura 2.9 Curva característica

#### 2.4.6.2 Selección de la bomba

La selección de una bomba para un uso depende de varios factores

- **El tamaño máximo de la bomba.-** depende del diámetro interno de la tubería de revestimiento.
- **Frecuencia y energía eléctrica disponible**
- **Gasto deseado.-** la bomba seleccionada debe ser la de mayor eficiencia.
- **Condiciones especiales.-** pozos gaseosos, líquidos viscosos, líquidos corrosivos, líquidos abrasivos.

#### 2.4.6.3 Ventana de operación

Los rangos de operación recomendados por los fabricantes, para que trabaje una bomba eficientemente son del 75% a 125% del punto de máxima eficiencia. La intersección de dicho rango con la curva de capacidad genera dos puntos. En una gráfica en la que se representen las diferentes curvas de capacidad de carga (para una misma bomba a diferentes frecuencias) contra gasto, la zona comprendida entre las líneas generadas por dichos puntos es llamada ventana de operación. La zona amarilla de la gráfica, figura 2.10 representa la zona en la cual debe de operar la bomba cuando se realicen los

cambios de velocidad y la que indica el comportamiento de la bomba a su más alta eficiencia.

Para hacer la ventana de operación se usan las leyes de afinidad, con el fin de poder utilizar un controlador de velocidad variable, el cual nos sirve para cambiar la frecuencia suministrada al motor.

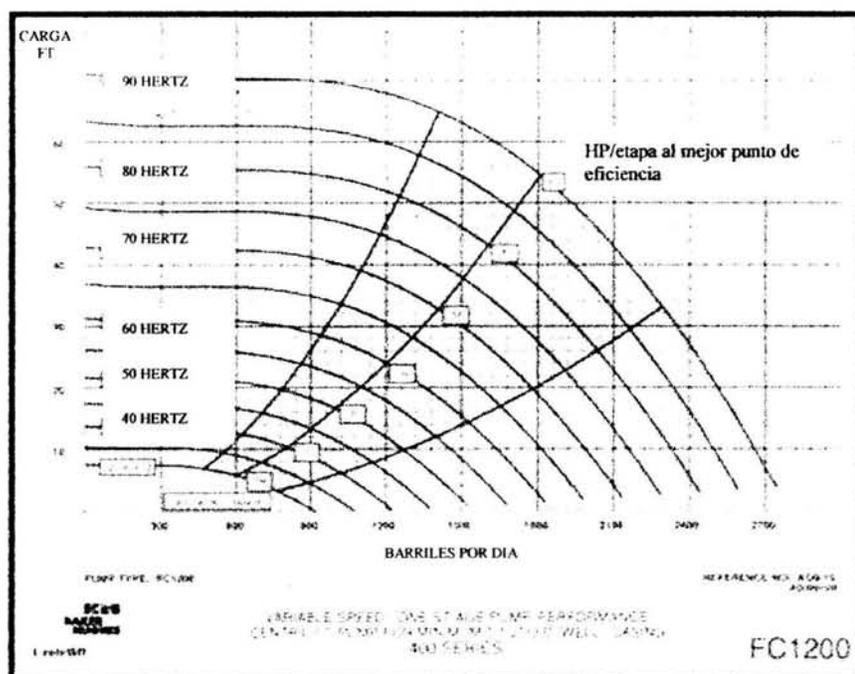


Figura 2.10 Ventana de operación

### 2.4.6.3 Leyes de afinidad

En ocasiones resulta de utilidad contar con algún medio para predecir el comportamiento de una bomba si cambiamos la velocidad o el diámetro del impulsor, este medio lo constituyen las leyes de afinidad.

Son las leyes de afinidad las que permiten la predicción del comportamiento de una máquina operando en condiciones diferentes a las que ha sido sujeta a prueba. Estas leyes de afinidad son el resultado de aplicar el análisis dimensional al sistema. Las variables más importantes que afectan a una bomba son:

- Carga, H.
- Gasto, Q.
- La velocidad angular del impulsor, N.
- El diámetro del impulsor,  $D_i$ .
- La aceleración de la gravedad, g.

La aplicación del Teorema de Buckingham, indica que serán tres grupos adimensionales los que se formen con las 5 variables anteriores. Estos son:

$$\frac{Q}{ND_i^3}$$
$$\frac{g}{N^2 D_i}$$
$$\frac{H}{D_i}$$

Algunas pruebas hechas en laboratorios de investigación permiten demostrar que es posible reducir los tres grupos a los dos siguientes:

$$\frac{Q}{ND_i^3}$$
$$\frac{gH}{N^2 D_i^2}$$

Lo anterior permite proponer la siguiente correlación empírica:

$$\frac{Q}{ND_i^3} = \alpha \frac{gH}{N^2 D_i^2}$$

Para estudiar el efecto de la variación de N, puede considerarse a  $D_i$  como constante y por lo tanto se obtienen valores para  $\alpha$  y Q cambiando solamente N, experimentalmente.

Se puede obtener finalmente que el efecto combinado del diámetro de impulsor ( $D_i$ ) y de la velocidad angular del impulsor (N), está dado por:

$$H = K_1 D_i^2 N^2$$

$$Q = K_2 D_i^3 N$$

$$Hp = K_3 D_i^5 N^3$$

Donde  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  son constantes. De este modo podremos decir que:

$$\begin{aligned} \left[ \begin{array}{c} H \\ D_i^2 N^2 \end{array} \right]_I &= \left[ \begin{array}{c} H \\ D_i^2 N^2 \end{array} \right]_{II} \\ \left[ \begin{array}{c} Q \\ D_i^3 N \end{array} \right]_I &= \left[ \begin{array}{c} Q \\ D_i^3 N \end{array} \right]_{II} \\ \left[ \begin{array}{c} Hp \\ D_i^5 N^3 \end{array} \right]_I &= \left[ \begin{array}{c} Hp \\ D_i^5 N^3 \end{array} \right]_{II} \end{aligned}$$

En las ecuaciones mostradas anteriormente el subíndice I implica que los términos dentro del paréntesis son conocidos, mientras que el subíndice II implica las condiciones que se van a predecir.

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

***Con diámetro de impulsor constante:***

$$Q_1 = D_1$$

$$Q_2 = D_2$$

$$H_1 = (D_1)^2$$

$$H_2 = (D_2)^2$$

$$Hp_1 = (D_1)^3$$

$$Hp_2 = (D_2)^3$$

***Con velocidad constante***

$$Q_1 = N_1$$

$$Q_2 = N_2$$

$$H_1 = (N_1)^2$$

$$H_2 = (N_2)^2$$

$$Hp_1 = (N_1)^3$$

$$Hp_2 = (N_2)^3$$

Estas relaciones pueden manipularse fácilmente con las leyes de afinidad de las bombas. Estas relaciones son utilizadas para configurar el comportamiento de cualquier bomba de una velocidad determinada a otra.

Se pueden generar nuevas relaciones debido al cambio de diámetro del impulsor o la velocidad de rotación del impulsor.

***Cambio de diámetro***

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

***Cambio de velocidad***

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

Donde:

$Q_1, H_1, Hp_1, D_1, N_1$  son el gasto, carga, potencia, diámetro y velocidad de la frecuencia en la cual opera, normalmente a 60 Hz.

$Q_2, H_2, Hp_2, D_2, N_2$  son el gasto, carga, potencia, diámetro y velocidad de la frecuencia que se busca a la nueva frecuencia.

Se puede también hacer de forma simultáneas, cambiando el diámetro y la velocidad al mismo tiempo.

$$\begin{aligned}Q_2 &= Q_1(D_2/D_1) (N_2/ N_1) \\H_2 &= H_1 \{ (D_2/D_1)(N_2/ N_1) \}^2 \\Hp_2 &= Hp_1 \{ (D_2/D_1) (N_2/ N_1) \}^3\end{aligned}$$

***Ejemplo para sistema de velocidad variable aplicando leyes de afinidad***

Los efectos de variar frecuencia pueden ser considerados preparando la ventana de operación para las frecuencias deseadas, basadas en la bomba de 60 hertz. Se utilizan comúnmente para generar cualquier frecuencia entre 30 y 90 hertz.

Las curvas para las frecuencias con excepción de 60 hertz pueden ser generadas usando los leyes de la afinidad de la bomba centrífuga. Las ecuaciones derivadas de estas leyes son:

$$\text{nuevo\_gasto} = \left[ \frac{\text{nueva\_frecuencia}}{60\text{Hz}} \right] * \text{gasto\_a\_60Hz}$$

$$\text{nueva\_carga} = \left[ \frac{\text{nueva\_frecuencia}}{60\text{Hz}} \right]^2 * \text{carga\_a\_60Hz}$$

$$\text{nueva\_potencia} = \left[ \frac{\text{nueva\_frecuencia}}{60\text{Hz}} \right]^3 * \text{potencia\_a\_60Hz}$$

Un sistema de curvas se puede desarrollar para una serie arbitraria de frecuencias con estas ecuaciones. Cada curva representa una serie de puntos derivados de la curva de 60 hertz.

**Ejemplo:**

Suponga que se tienen los datos siguientes en una frecuencia de 60 hertz, para la bomba FC-1,200 .

Gasto = 1,200 bpd

Carga = 24.5 ft (para la bomba FC-1,200 a 1200 bpd)

Potencia = 0.34 H p (para la bomba FC-1,200 a 1200 bpd)

Para el nuevo gasto a 50 Hz

$$\text{nuevo\_gasto} = \left[ \frac{50\text{Hz}}{60\text{Hz}} \right] * 1200\text{BPD} = 1000\text{BPD}$$

$$\text{nueva\_carga} = \left[ \frac{50\text{Hz}}{60\text{Hz}} \right]^2 * 24.5 = 17\text{ft}$$

$$\text{nueva\_potencia} = \left[ \frac{50\text{Hz}}{60\text{Hz}} \right]^3 * 0.34\text{BHP} = 0.20\text{BHP}$$

Realizando estos cálculos en otros rangos de producción, una nueva curva para 50 hertz puede ser trazada.

De la bomba FC-1,200 a 1200 bpd para 60 Hz se tienen los siguientes valores

Gasto (bpd)	0	950	1200	1550	1875
Carga (ft)	32	28.6	24.5	15	0
Eficiencia %	0	63.5	64	49	0

Calculando los valores para 50 Hz

Gasto (bpd)	0	972	1000	1292	1563
Carga (ft)	22.2	19.9	17	10.4	0
Eficiencia	0	63.5	64	49	0

Para rangos de 30 a 90 Hz se muestra en la figura 2.11 la ventana de operación queda como la mostrada, el rango donde la bomba no tendrá problemas será la región amarilla.

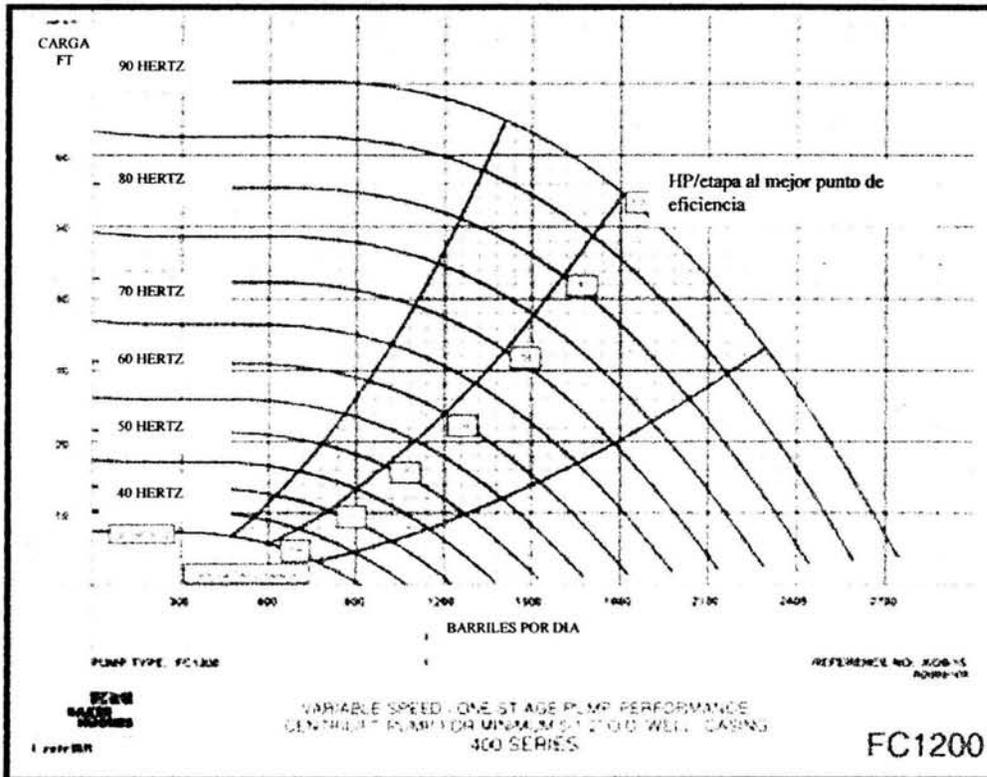


Figura 2.11 Ventana de operación para la bomba FC1200 de la compañía Centrilift

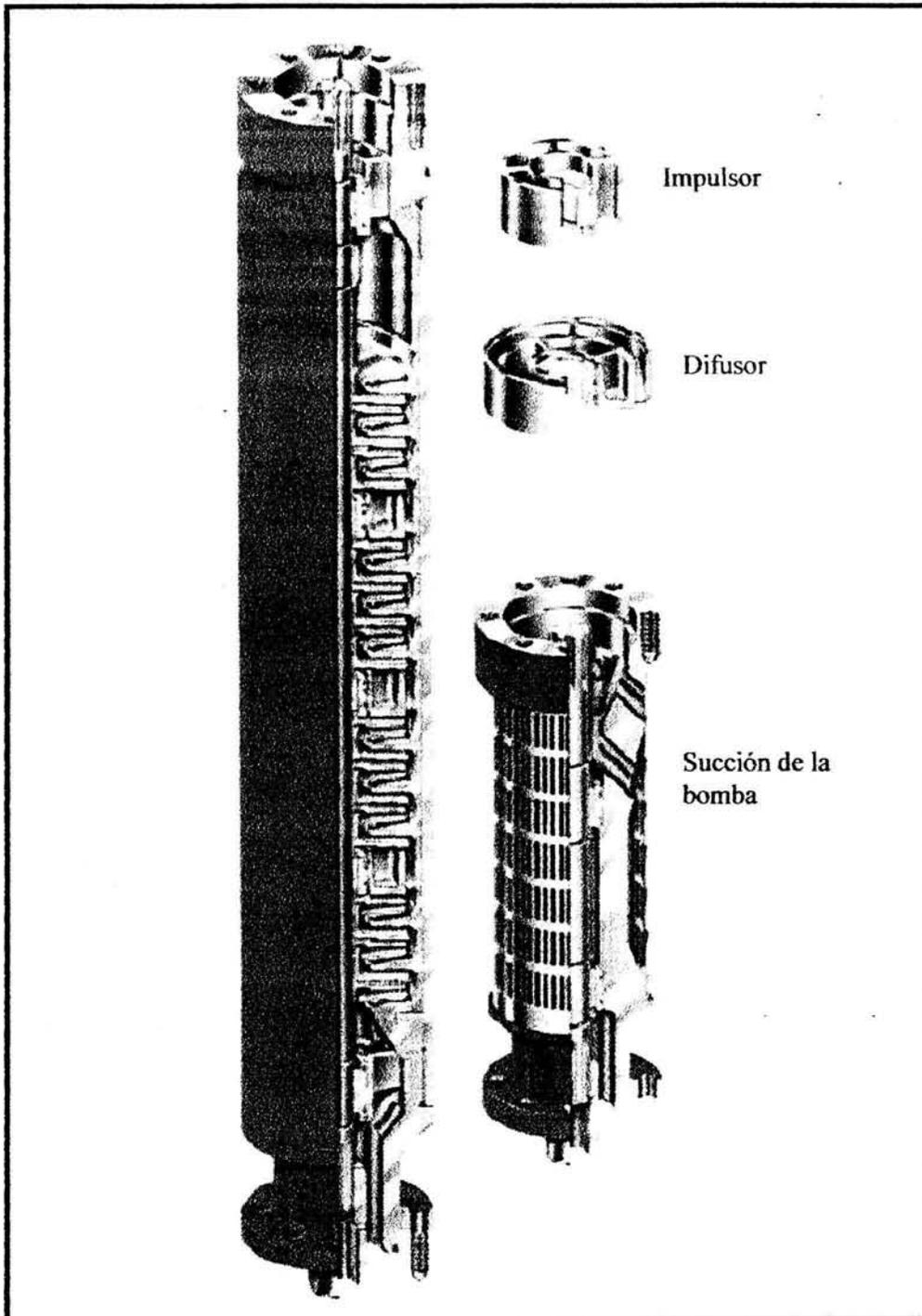


Figura 2.12 Bomba centrífuga REDA

### 2.4.7 Cable

La energía necesaria para impulsar el motor, se lleva desde la superficie por medio de un cable conductor, el cual debe elegirse de manera que satisfaga los requisitos de voltaje y amperaje para el motor en el fondo del pozo, además del tipo de fluido y de la temperatura.

Los cables utilizan conductores de cobre estañado. Cuenta con tres fases que son aisladas individualmente, el aislamiento es físicamente pegado con adhesivo al conductor. Los conductores pueden tener además una barrera protectora y/o una fibra trenzada sobre el aislamiento. Luego los conductores son encamisados para proveer protección mecánica y química y finalmente, por lo general se envuelven los conductores con armadura metálica.

Se tienen dos configuraciones básicas: plano y redondo.

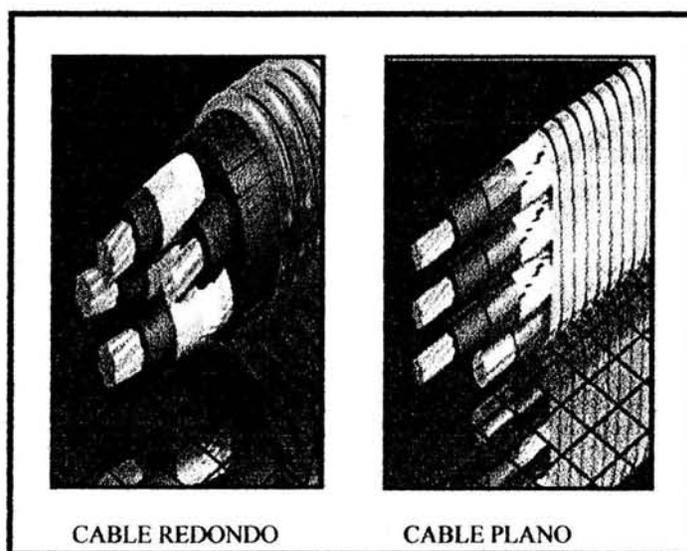


Figura 2.13 Tipos de cables

Una desventaja del cable plano sobre el cable redondo es que en general ofrece menor protección mecánica que su equivalente cable redondo, haciendo que sea más susceptible a daño durante la instalación.

El éxito o fracaso de la instalación depende en gran parte de la adecuada selección del cable de potencia para las condiciones de operación. En pozos muy

profundos que requieren cables especiales, el cable puede ser el componente más costoso del sistema.

El proceso de selección del cable de potencia es básicamente un proceso de dos pasos:

- • Selección del tamaño o calibre del cable
- • Selección de la configuración apropiada, considerando
  - Voltaje requerido en superficie,
  - Temperatura del conductor a las condiciones de operación,
  - Temperatura de superficie,
  - Condiciones especiales de operación, tipo de fluido, tratamientos químicos, gas, nivel de fluido.

En general la selección del calibre del cable se hace balanceando las condiciones de operación y el costo. En lo referente al calibre del cable, el propósito principal es transportar la energía eléctrica desde la superficie al motor. En este sentido se podría decir que el cable de mayor calibre es mejor porque en éste se tendrán menores pérdidas de voltaje, lo que se traduce en mayor eficiencia del sistema. Cables de mayor calibre contribuyen a la mayor eficiencia del sistema, por otro lado, se debe considerar también que los cables de mayor calibre son más costosos. Por lo tanto se debe buscar un punto de equilibrio entre costo inicial y costo de operación.

Para seleccionar el tamaño del cable se debe evaluar la caída de voltaje en los conductores, la cual es función de la intensidad de corriente que pasa por el conductor, la longitud del cable y de la temperatura del conductor.

Otro aspecto que se debe considerar son los problemas que se pueden presentar durante el arranque del equipo. La longitud y calibre del cable son los factores de mayor influencia en las características de arranque del motor sumergible, por lo tanto la selección adecuada del cable y el sistema de arranque son primordiales para el arranque seguro del motor. Un calibre determinado de cable puede ser aceptable para las condiciones de operación pero puede ser muy pequeño para las condiciones de arranque, de tal forma que el motor podría no arrancar, especialmente con motores de alto amperaje.

Cuando el motor arranca se produce un breve pero significativo aumento de corriente que normalmente es alrededor de cinco veces mayor a la corriente con carga normal. Puede llegar a ser ocho veces más alta o a veces más en pozos poco profundos (con longitudes de cable relativamente cortos). Este golpe de corriente de arranque es necesario para magnetizar las laminaciones del motor y cargar el cable, no hay forma de eliminarlo a menos que se use algún tipo de arranque suave que disminuya el tiempo de arranque reduciendo por lo tanto los efectos del golpe de corriente de arranque. Es uno de los factores de mayor riesgo en el equipo BEC.

#### **2.4.8 Conexión del motor (Mufa)**

La mufa conecta el motor y el cable de potencia para el suministro eléctrico, es del tipo Plug-In, el cual va encintado en cada una de sus fases y sujeta al motor como se muestra en la figura 2.14.

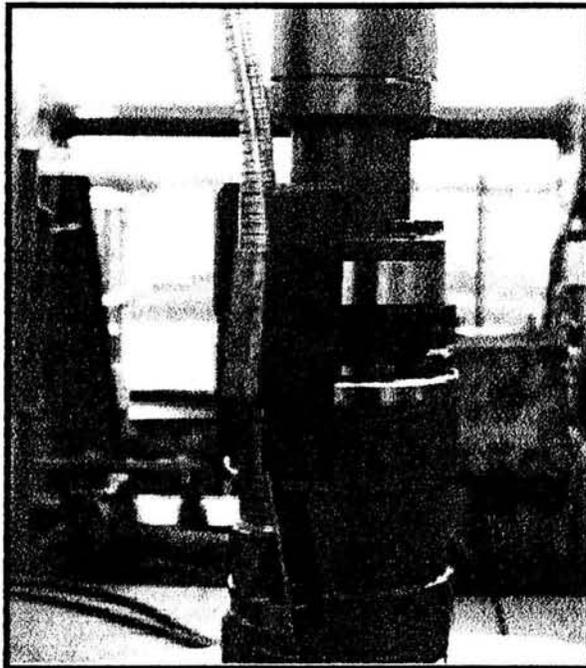


Figura 2.14 Conexión Mufa – Motor.

## **2.5 COMPONENTES SUPERFICIALES**

### **2.5.1 Transformador**

Es usado para reducir el voltaje de la fuente primaria a un voltaje que pueda ser manejado por un controlador de velocidad variable.

Si un controlador de velocidad variable es usado energía e salida de voltaje se requerirá para este equipo y un transformador secundario se necesitara para mayor voltaje en el motor en la superficie.

### **2.5.2 Controlador de velocidad variable**

Se diseña e instala para cambiar la frecuencia de la corriente aplicada al motor controlando la velocidad angular para optimizar su ejecución.

### **2.5.3 Caja de venteo**

Se ubica entre el cabezal y el tablero de control, se instala por razones de seguridad debido a que el gas puede viajar a lo largo del cable y alcanzar la instalación eléctrica, en la caja de venteo los conductores del cable quedan expuestos a la atmósfera evitando esa posibilidad

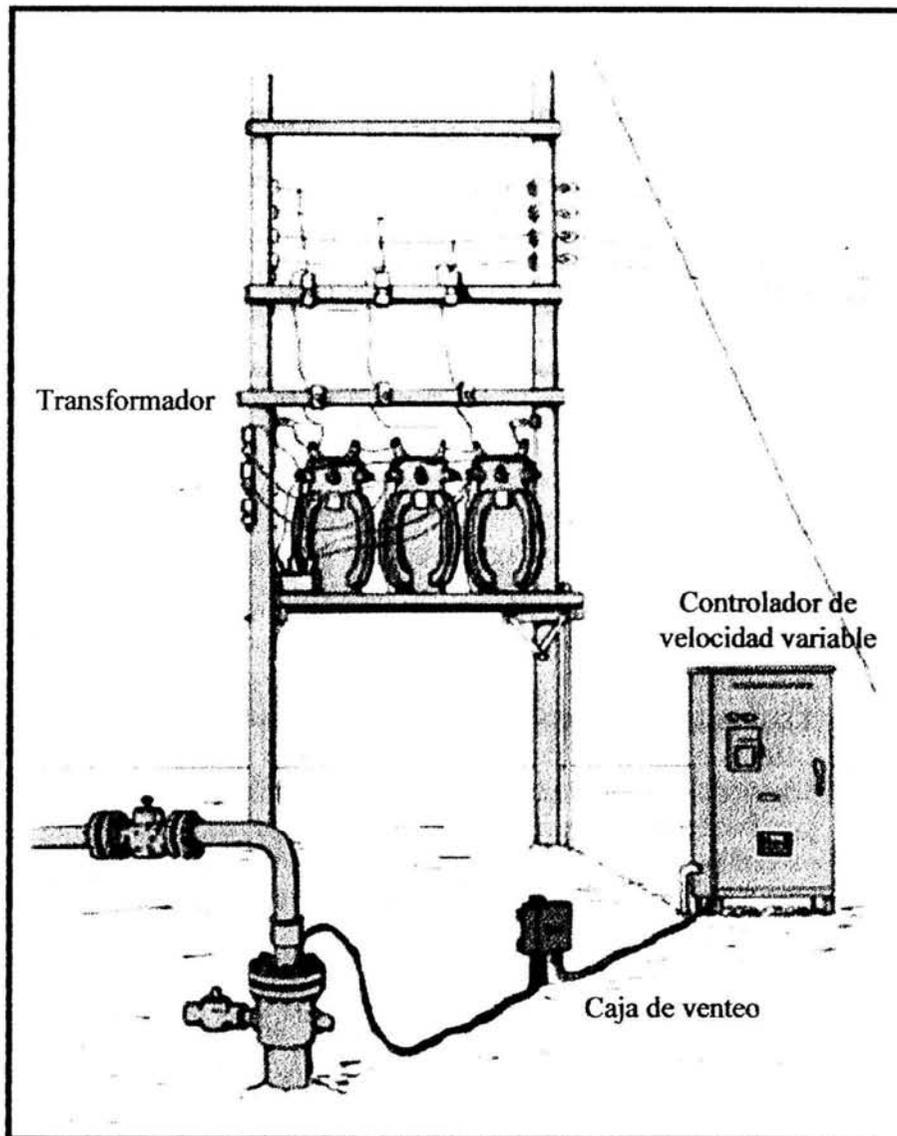


Figura 2.15 Componentes superficiales

## 2.6 ACCESORIOS

### 2.6.1 Válvula de retención

Usualmente se instala a 3' lingadas de tubería sobre la bomba de descarga, impide que el fluido se regrese, de manera de que cuando el motor se pare impide el regreso de los fluidos.

Si la válvula de retención no está instalada se debe esperar a que el fluido de la tubería fluya a través de la bomba antes de reiniciarla.

### 2.6.2 Válvula de drene

Se coloca de una a tres lingadas por arriba de la válvula de retención. Su función es establecer comunicación entre el espacio anular y la tubería de producción, con el propósito de que ésta se vacíe cuando se extrae el aparejo del pozo.



Figura 2.16 Accesorios

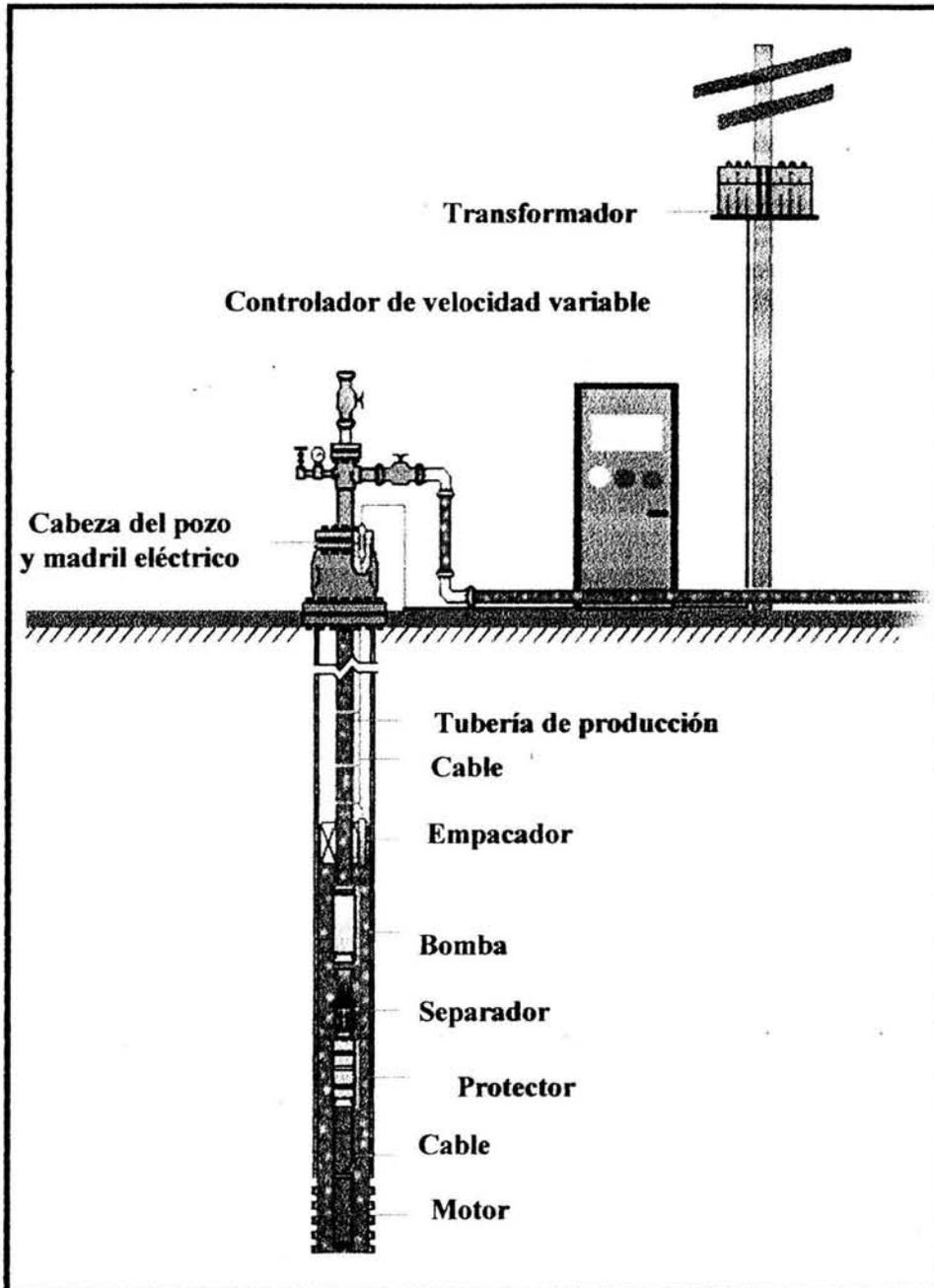


Figura 2.17 Distribución de los componentes del aparejo de bombeo electrocentrífugo

## CAPÍTULO III

### DISEÑO

Un arreglo de BEC se diseña específicamente para cada pozo y bajo ciertas condiciones de operación, enseguida se presenta un procedimiento detallado para un diseño adecuado.

Los pasos a seguir para el diseño son los siguientes:

#### 3.1 Recopilación de datos

El diseño de una unidad de bombeo electrocentrífugo sumergible, no es una tarea difícil, especialmente si los datos confiables y están disponibles. Aunque, si la información, especialmente la que pertenece a la capacidad de producción del pozo, no es confiable, el diseño no será el adecuado. Los datos erróneos nos conducen a un mal diseño, y a una operación costosa, una bomba mal seleccionada puede funcionar fuera del rango de capacidad de producción. En el otro extremo, la bomba no puede tener la fuerza necesaria para la producción deseada.

Cuando no se tienen datos de campo, regularmente los datos de otros pozos en el mismo campo o en un área próxima se utilizan, se asume que los pozos del mismo horizonte que produce tendrán características similares. Desafortunadamente para el ingeniero que clasifica las instalaciones sumergibles, los pozos petroleros son como huellas digitales, es decir, no hay dos absolutamente semejantes.

Los datos son:

- Estado mecánico
  - Tubería de revestimiento y peso, tubería de producción, intervalo disparado, profundidad de la bomba.
  
- De producción
  - Presión de fondo estática, Presión de fondo fluyendo, gasto de líquido, presión en la cabeza del pozo, relación gas-aceite, relación gas líquido, temperatura del fondo-agujero, temperatura en la cabeza del pozo.

- Propiedades del fluido producido
  - Gravedad específica del agua, gravedad específica del aceite, gravedad específica del gas, presión de burbujeo, viscosidad del aceite, datos de PVT
  
- Fuentes de energía
  - Voltaje primario disponible, frecuencia, capacidades de la fuente de energía
  
- Posibles problemas
  - Producción de arena, gran cantidad de gas, alta temperatura, depositación, corrosión, propiedades del fluido como emulsión.

### **3.2 Capacidad de producción**

Con los datos de producción y con el gasto de líquidos que se desea obtener en la superficie, se determinará la presión de fondo fluyendo ( $P_{wf}$ ).

### **3.3 Determinación del gradiente de presión ascendente**

Partiendo desde la presión de fondo fluyendo, calcular el perfil de presión ascendente, se debe de considerar que el flujo es por la tubería de revestimiento y que se utiliza la relación gas aceite natural (RGAN), la que produce el yacimiento.

Existen diferentes métodos que se pueden usar, correlaciones, modelos mecanísticos, hidrodinámicos, etc.

### **3.4 Determinación de la profundidad de colocación de la bomba**

Se calcula la cantidad de gas libre a la profundidad de colocación

Con la presión de succión que necesita la bomba se determina la profundidad de colocación. Teniendo siempre en cuenta que la bomba no puede admitir más que el 10% de gas libre de tal manera que se tiene que calcular el volumen de gas libre a la profundidad de colocación.

Hay que tomar en cuenta que conforme disminuye la presión, la cantidad de gas que se libera aumenta progresivamente después de alcanzar su presión de burbujeo. Por tal razón se debe de poner atención en el porcentaje de gas que entra a la bomba, ya que no debe de pasar más de un 10%, de no ser así el comportamiento de la bomba será muy diferente al de su curva característica, además de presentarse el fenómeno de cavitación y dañar el equipo.

### 3.5 Determinación del volumen de gas libre

Para determinar el volumen de gas que entra a la bomba, necesitamos calcular la  $R_s$ ,  $B_o$  y  $B_g$  a la presión de succión. Existen varias correlaciones para determinar las propiedades de los fluidos

Las correlaciones de Standing para  $R_s$ ,  $B_o$  y  $B_g$ .

Relación de solubilidad ( $R_s$ )

$$R_s = \gamma_g \left( \frac{P_b * 10^{0.0125 * API}}{18 * 10^{0.00091 * T(^{\circ}F)}} \right)^{1.2048}$$

Donde:

$\gamma_g$  = gravedad específica del gas, adimensional

$P_b$  = presión de burbujeo, psi

$T$  = temperatura,  $^{\circ}F$

Factor de volumen de gas ( $B_g$ )

$$B_g = 5.04 \frac{zT}{P}$$

Donde:

$z$  = factor de compresibilidad del gas

$T$  = temperatura, en grados ranking ( $460 + ^{\circ}F$ )

$P$  = presión de succión, psi

Factor de volumen de aceite ( $B_o$ )

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

Donde:

$R_s$  = relación de solubilidad, pie<sup>3</sup>/bl

$\gamma_g$  = gravedad específica del gas, adimensional

$\gamma_o$  = gravedad específica del aceite, adimensional

$T$  = temperatura, °F

Cuando estas tres propiedades son conocidas,  $R_s$ ,  $B_o$ ,  $B_g$ , los volúmenes de aceite, agua y gas libre pueden ser determinados con:

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

$$V_g = (RGA - R_s)(1 - f_w) * PGE * GTD * B_g$$

$$V_w = B_w * GTD * f_w$$

Donde:

$V_o$  = volumen de aceite bpd

$V_g$  = volumen de gas bpd

$V_w$  = volumen de agua bpd

$RGA$  = relación gas aceite pie<sup>3</sup>/bl

$PGE$  = porcentaje de gas libre que entra a la bomba

$GTD$  = gasto total de diseño

El porcentaje de gas libre que entra en la bomba se obtiene del fabricante, dependiendo del tipo de separador que se instale, si no se instala separador el PGE será uno.

El porcentaje de gas libre del fluido se calcula como:

$$\%_{gas\_libre} = \frac{V_g}{V_o + V_g + V_w}$$

Si el % de gas libre es menor al 10% continuaremos al siguiente paso, en caso opuesto determinaremos otra profundidad.

### 3.6 Determinación del perfil de presión descendente

Con la misma correlación que se utilizó para flujo ascendente calcular el perfil de presión descendente, partiendo desde la presión de la cabeza ( $P_{wh}$ ) que se necesita para transportarlo a los separadores hasta el punto de colocación de la bomba. En el perfil de presión se debe de considerar que el flujo es por la tubería de producción y que opcionalmente se utiliza un separador por lo tanto a la relación gas líquido se le resta el gas que fue enviado al espacio anular por el separador.

### 3.7 Determinación de la carga dinámica total

Determinar la carga dinámica total que requiere la bomba para poder desplazar el fluido a la presión requerida en la cabeza del pozo.

La carga dinámica es simplemente la carga total que la bomba genera cuando está bombeando el gasto deseado. Dicho de otra forma es la diferencia entre la presión de succión y la presión de descarga de la bomba.

$$\text{CDT} = \text{presión de descarga} - \text{presión de succión}$$

Gráficamente la CDT es la diferencial entre el perfil de presión descendente y ascendente a la profundidad de colocación de la bomba, ver figura 3.1.

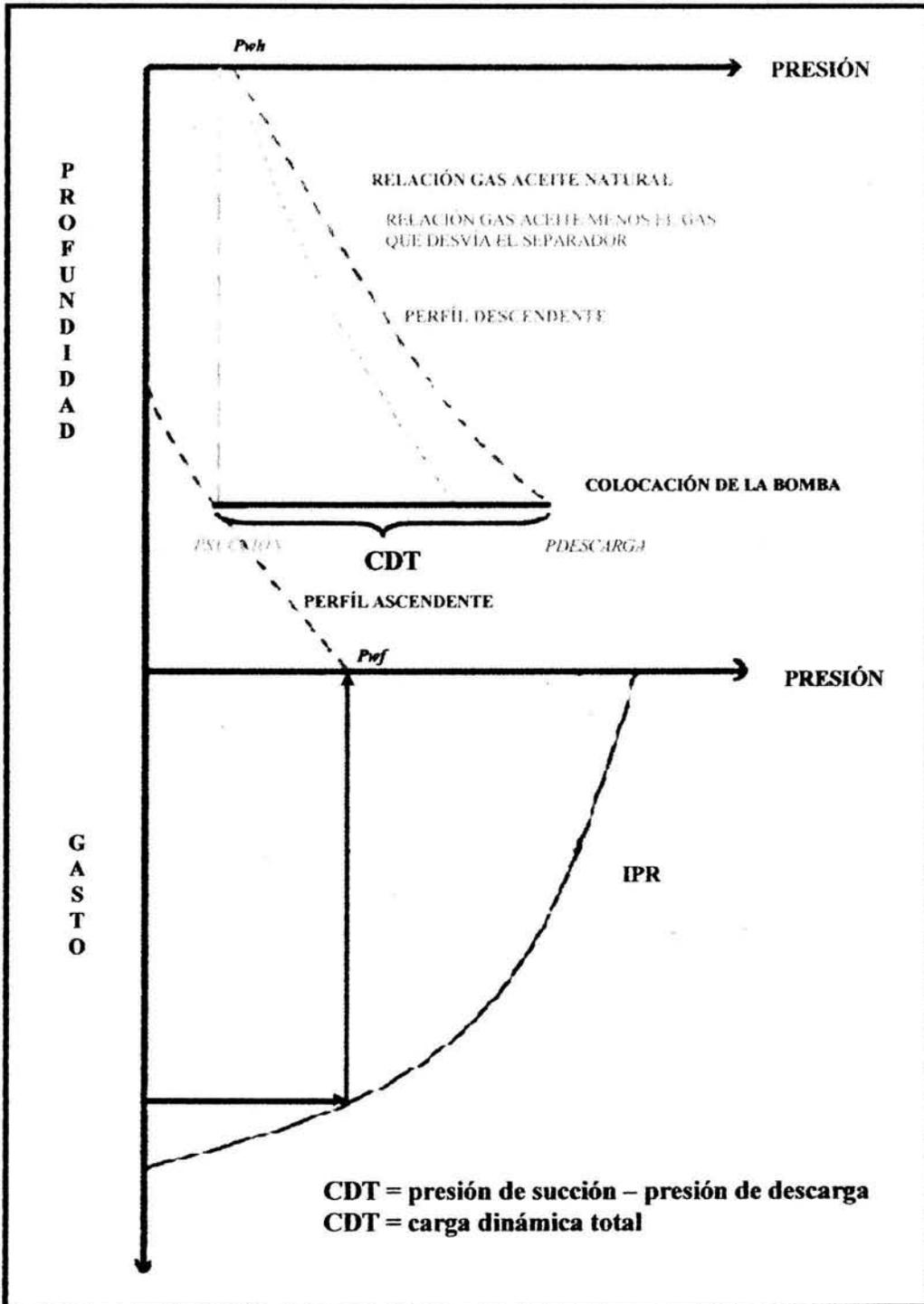


Figura 3.1 Carga dinámica Total

### 3.8 Incrementos de presión $P_i$

Dividir la CDT de presión entre un número “n” de presiones iguales.

$$\frac{CDT}{n} = P_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

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

A fin de determinar los cambios de volumen y establecer la necesidad de cambiar o no la capacidad volumétrica de las etapas, el incremento total de presión se divide en n incrementos, “n” depende del tipo de fluido, valores entre 10 y 20 se ha encontrado que se obtienen resultados satisfactorios, pero no es una limitación ya que “n” puede tener el valor de 1.

A los incrementos de  $P_i$  determinar el factor de volumen de aceite, el factor de volumen de gas y la relación de solubilidad.

### 3.9 Determinar la densidad de la mezcla a cada $P_i$

Para calcular la densidad de la mezcla a cada  $P_i$  debemos conocer la densidad del agua, aceite y gas.

Hay que hacer notar que a cada incremento de presión dentro de la bomba el volumen total disminuirá de tal manera que el volumen de descarga de la bomba será menor que el volumen de succión.

a) Calcular la masa de aceite, gas y agua cada presión  $P_i$

$$\text{masa (M)} = M_o + M_g + M_w$$

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

$$M_w(lb/bl) = 62.4 \left( \frac{lb}{pie^3} \right) * 5.615 \left( \frac{pie^3}{bl} \right) * \gamma_w$$

$$M_g(lb/bl) = \rho_{aire} \left( \frac{lb}{pie^3} \right) * RGA \left( \frac{pie^3}{bl} \right) * \gamma_g$$

b) Calcular la densidad de la mezcla a cada presión

$$\text{densidad mezcla } (\rho_m) \left( \frac{lb_m}{pie^3} \right) = \frac{M(lb_m)}{\text{Volumen}(bl) * 5.615 \left( \frac{pie^3}{bl} \right)}$$

Donde:

$$\text{volumen} = B_o + (RGA - R_s)B_g + f_w * B_w$$

### 3.10 Cálculo del gradiente promedio

Calcular el gradiente en todos los incrementos de presión  $P_i$ , y el gradiente promedio entre los incrementos de presión.

$$\text{Gradiente} \left( \frac{lb}{pg^2 pie} \right) = \frac{\rho_m \left( \frac{lb}{pie^3} \right)}{144 \left( \frac{pg^2}{pie^3} \right)}$$

$$\text{Gradiente}_{\text{promedio}} \left( \frac{lb}{pg^2 pie} \right) = \frac{\text{Gradiente}(P_{i_{n-1}}) + \text{Gradiente}(P_{i_{n+1}})}{2}$$

### 3.11 Determinación de la carga

Convertir los incrementos de presión  $P_i$  en columna hidráulica (carga)

$$\text{carga}(pie) = \frac{P_i \left( \frac{lb}{pg^2} \right)}{\text{gradiente}_{\text{promedio}} \left( \frac{lb}{pg^2 pie} \right)}$$

### 3.12 Cálculo del gasto promedio

Calcular el gasto a cada incremento de presión  $P_i$ , y un gasto promedio entre los puntos de incremento de presión.

$$\text{Gasto}_{P_i} \left( \frac{bl}{dia} \right) = V_o + V_g + V_w$$

$$\text{gasto}_{promedio} \left( \frac{bl}{dia} \right) = \frac{\text{gasto}_{P_{i-1}} + \text{gasto}_{P_i}}{2}$$

### 3.13 Selección de bomba

Con los gastos promedios se entra a la curvas de las distintas bombas, para su selección. Esta se selecciona de acuerdo al rango de operación que da el fabricante y a su máxima eficiencia.

De la misma curva se obtiene la carga por etapa y la potencia requerida para el motor.

#### **Ejemplo:**

Determinar la bomba óptima para una tubería de revestimiento de 5 ½ pulgadas, trabajando a 60 Hz y 3500 RPM para un gasto de entrada en la bomba de 1700 barriles por día.

De la figura 3.2 se puede observar que para un gasto de 1700 Bpd la Curva de comportamiento de la bomba REDA, 100 etapas - D55 - 60 Hz, Series 400 - 3500 RPM se tiene una eficiencia del 55% y 55 Hp.

De la figura 3.3 se puede observar que para un gasto de 1700 Bpd la Curva de comportamiento de la bomba REDA, 100 etapas - D51 - 60 Hz, Series 400 - 3500 RPM se tiene una eficiencia del 66% y 37 Hp.

Se concluye que la bomba a escoger es la D 51 por su mayor eficiencia.

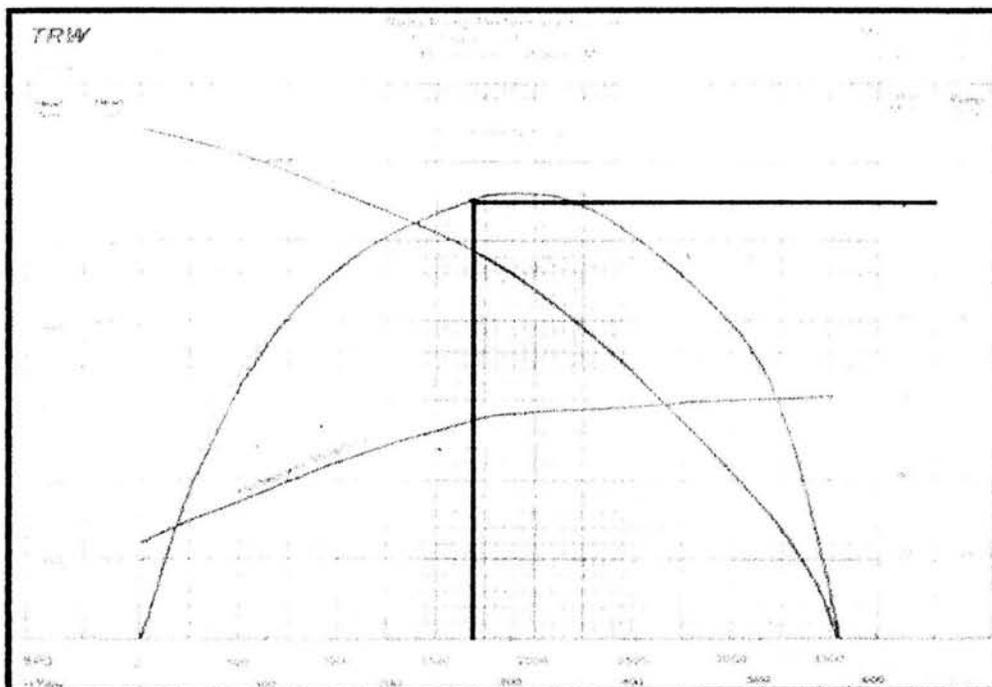


Figura 3.2 Curva de comportamiento de la bomba REDA  
100 etapas - D55 - 60 Hz, Series 400 - 3500 RPM

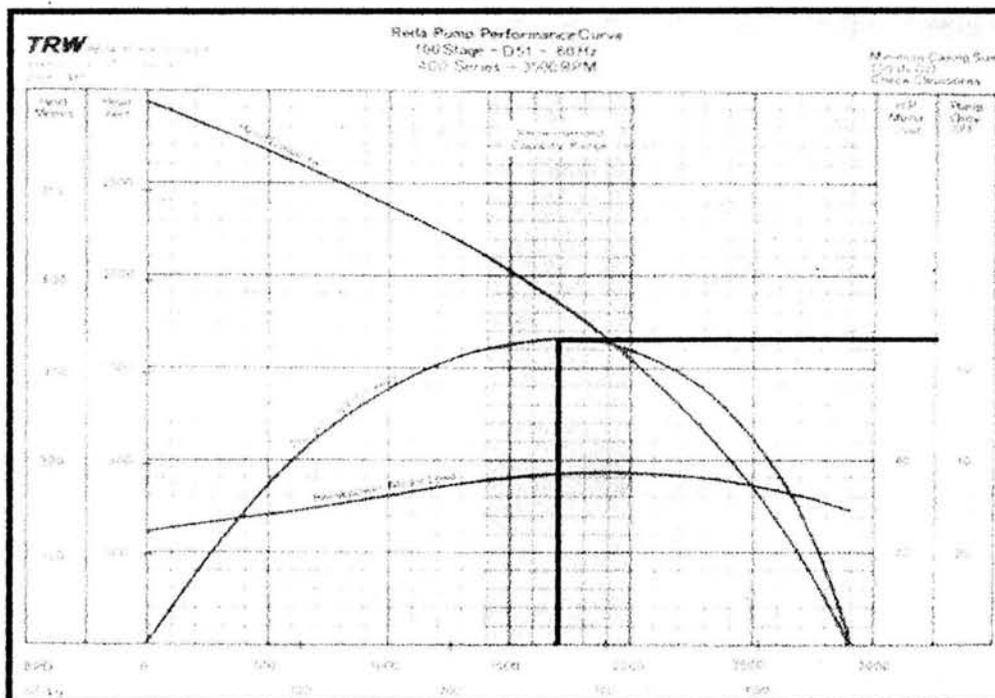


Figura 3.3 Curva de comportamiento de la bomba REDA  
100 etapas - D51 - 60 Hz, Series 400 - 3500 RPM

### 3.14 Número total de etapas

Para determinar el número de etapas para cada incremento de presión, con el valor de la carga dinámica total y de la capacidad de carga leído en la gráfica de curvas de la bomba seleccionada, el número de etapas se calcula con la siguiente fórmula.

$$NE_{n=i} = \frac{P_i \left( \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right)}{\left( \frac{\text{presión} \left( \frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right)}{\text{etapa}} \right)} = \text{etapas}$$

El número total de etapas será la sumatoria de las etapas en cada incremento n

$$NTE = \sum_{i=1}^n NE_i$$

### 3.15 Potencia total

Determinar la potencia que se quiere por etapa para cada incremento de presión. El cálculo de la potencia necesaria para impulsar el número de etapas calculado, se determina multiplicando el número de etapas, por el valor leído de HP por etapa en la curva de comportamiento de la bomba. El resultado de este producto, es válido únicamente si el fluido es agua dulce. En caso contrario, dicho producto debe afectarse por la densidad relativa promedio.

$$\text{potencia}_i(\text{Hp}) = NE_i * \frac{\text{HP}}{\text{etapa}} * \gamma_m$$

La potencia total será la sumatoria de la potencia en cada incremento n

$$\text{potencia\_total}(\text{Hp}) = \sum_{i=1}^n \text{potencia}_i$$

### 3.16 Selección del Motor

Una vez que se ha determinado la potencia requerida por el motor se tendrá que seleccionar de acuerdo a las siguientes condiciones:

- Diámetro de la tubería de revestimiento
- Ciclaje manejado
- Potencia total requerida
- Amperaje.

## CAPÍTULO IV

### PROGRAMA DE CÓMPUTO

Como se vio anteriormente, el diseño de bombeo electrocentrifugo es una tarea laboriosa, por tal motivo el uso de programas de cómputo es una herramienta valiosa que facilita la tarea al ingeniero, y representa un ahorro de tiempo en el diseño, además de poder diseñar instalaciones ante distintos escenarios de producción, y poder seleccionar el más apropiado.

El programa de cómputo se desarrolló en dos lenguajes de programación, una parte se programó en FORTRAN 95, debido a su exactitud y rapidez que presenta este lenguaje al realizar operaciones matemáticas, mientras que la segunda parte relativa a la interfaz del usuario así como ciertas operaciones matemáticas se programó en Visual Basic 6.0, con lo que se le da al programa una fortaleza en su interfaz gráfica, además de representarle un ambiente amigable y familiar para el usuario. La comunicación entre estos dos lenguajes se realiza mediante la librería dinámica (dll), lo que le da al programa una gran velocidad de procesamiento de información.

Los perfiles ascendente y descendente así como la selección de la bomba, determinación de volúmenes de succión y descarga se programaron en fortran 95, mientras que la profundidad de colocación, selección del motor, el cálculo de la presión de fondo fluyendo y curvas IPR se programaron en Visual Basic 6.0.

El programa que se desarrolla en este trabajo, emplea distintas correlaciones de flujo multifásico para predecir el comportamiento de los fluidos a través de las tuberías, (cabe mencionar que las correlaciones originalmente se programaron para el diseño de pozo fluyente y de bombeo neumático), determina la profundidad de colocación de la bomba o presión de succión de esta, selecciona la mejor bomba, motor y si es necesario utilizar separador de gas, además de generar la ventana de operación de la bomba por si desea cambiar el gasto.

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA

El programa tiene tres opciones principales de cálculo:

1. Bombeo electrocentrífugo.
2. Bombeo neumático continuo.
3. Pozo fluyente.

La primera opción es el motivo de este trabajo, por lo que sólo se describirá esta parte, las opciones de bombeo neumático continuo y pozo fluyente no serán abordadas por esta tesis ya que se desarrollaron en la tesis de “Simulador de bombeo Neumático”.

Para la primera opción el programa permite diseñar y analizar aparejos de bombeo electrocentrífugo, esto es, en base al estado mecánico, propiedades de los fluidos, la profundidad de colocación de la misma, o la presión de succión que se requiere en la bomba.

Los criterios de selección de la bomba son:

- Máxima eficiencia
- Rango de gasto deseado

Para la selección de los componentes del sistema solo se consideró el fabricante Centrilift.

#### 4.2 INFORMACIÓN NECESARIA

Para poder diseñar las instalaciones de bombeo electrocentrífugo es necesario predecir el comportamiento de los fluidos a través de la tubería de producción, por lo que se requiere de la siguiente información:

- Información obtenida de los instrumentos instalados en el campo, para medir presiones, temperaturas y gastos, así como la información obtenida de pruebas de producción.
- Características mecánicas del sistema, (condiciones de operación) como son diámetros de la TP y de la TR, longitudes de las mismas, así como las

secciones de desviación dentro del pozo.

- Propiedades de los fluidos producidos, las cuales se obtienen en el laboratorio mediante el análisis de los mismos.
- Las características propias del sistema de bombeo electrocentrífugo, como son los gastos deseados, profundidad de colocación o presión de succión de la bomba, etc.
- Las correlaciones PVT, así como las correlaciones de flujo multifásico.

La exactitud en los resultados obtenidos dependerá de la calidad de los datos con los que se alimente al programa.

## **4.3 PROGRAMA**

### **4.3.1. Introducción de la información en el orden necesario para realizar una simulación**

Para facilidad del usuario, los botones de comando que le permiten a éste introducir la información necesaria al programa se irán habilitando en el orden apropiado de acuerdo a la opción de cálculo que se haya seleccionado, pero para una mayor comprensión del orden para introducir la información a continuación se describe el procedimiento que se debe seguir.

#### **4.3.1.1. Inicio y ventana principal**

La primera ventana que aparece al ejecutarse el programa (ventana de inicio, Figura 4.1) muestra la información referente al programa, después de unos segundos esta ventana se cierra y se muestra la ventana principal del programa, Figura 4.2.



Figura 4.1 Ventana de inicio

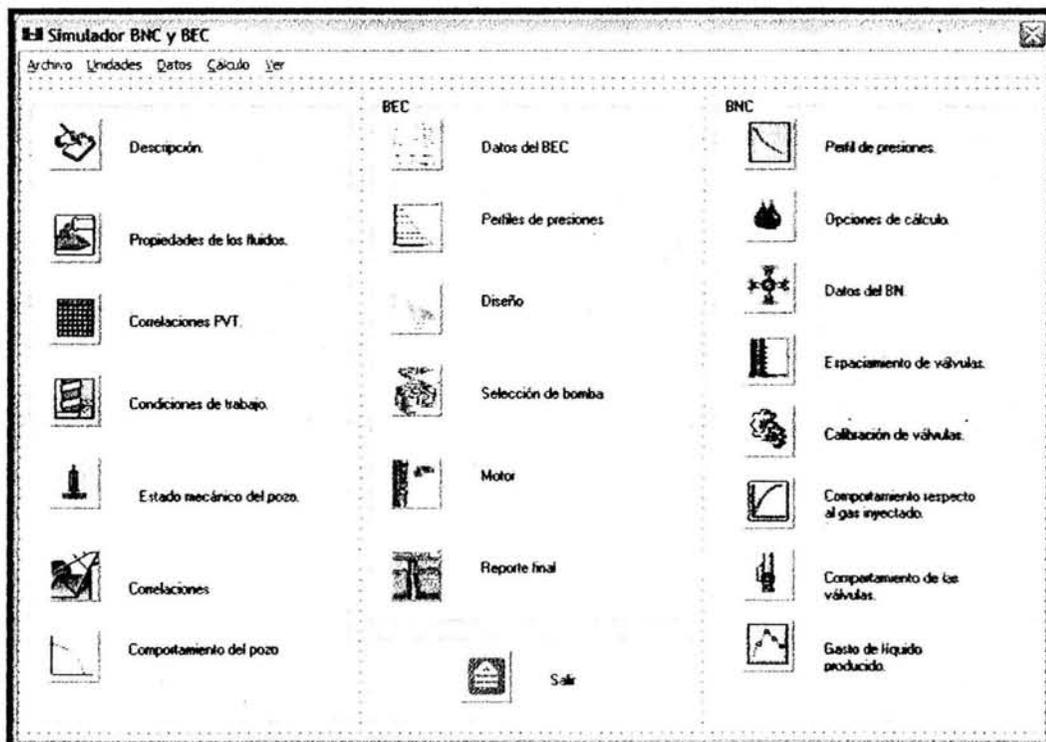


Figura 4.2 Ventana principal

En esta ventana se encuentra la barra de menús así como los botones de comando, los cuales permiten el acceso a las distintas aplicaciones que componen el programa. En la barra de menús se encuentran los menús de Archivo, Unidades, Datos, Cálculo, y Ver.

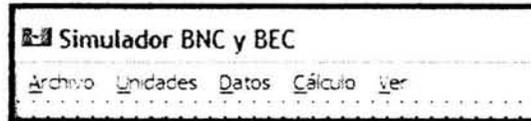


Figura 4.3 Barra de menús

Para iniciar un nuevo proyecto es necesario hacer click en el menú Archivo, Nuevo. Fig. 4.4, si se desea abrir un archivo ya existente se puede hacer click en el menú Archivo, Abrir o también se puede abrir un archivo ya existente si éste se encuentra en la lista de últimos archivos consultados.

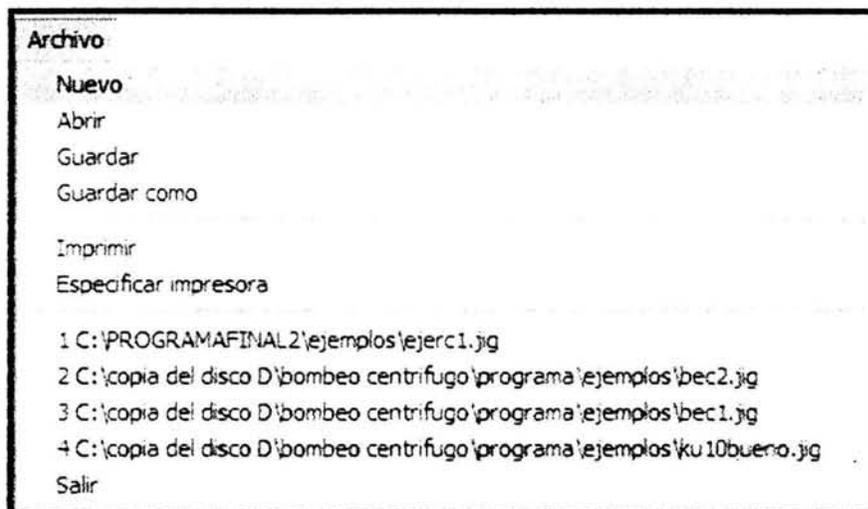


Figura 4.4 Menú archivo

Las demás opciones que se tienen en el menú archivo no se explican ya que estas funcionan de la misma forma en que lo hacen en los demás programas basados en el ambiente Windows.

En el menú de las unidades se selecciona el tipo de unidades a emplearse durante el estudio, figura 4.5.

El programa ofrece la facilidad de escoger un SISTEMA DE UNIDADES para los datos que se van a introducir, si las unidades requeridas no están dentro de un sistema establecido, el usuario tiene la posibilidad de elaborar un sistema de unidades personalizado.

Los datos similares (presiones, temperaturas, etc.) cambiarán a la unidad elegida; pero en caso de que se requiera un dato con diferente unidad a la especificada inicialmente, cada pantalla se podrá realizar el cambio a la unidad deseada.

Los sistemas de unidades disponibles son:

- Sistema Petrolero
- Sistema Inglés
- Sistema Métrico
- Sistema Internacional
- Sistema Personalizado

Si se desea una unidad en especial para algún dato, éste debe ser cambiado después de seleccionar el sistema de unidades.

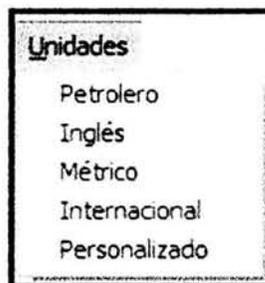


Figura 4.5 Menú del sistema de unidades

El menú Datos nos muestra las mismas opciones para introducir la información que los botones que se encuentran en la pantalla de la ventana principal, estos submenús al igual que los botones de la ventana principal se van habilitando conforme se va introduciendo la información, figura 4.6.

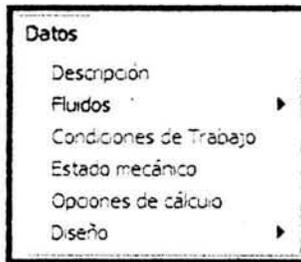


Figura 4.6 Menú datos

El menú Cálculo nos indica los análisis a los que tenemos acceso en función del tipo de estudio que se está realizando, los submenús en este menú se van habilitando conforme se va avanzando en el análisis, figura 4.7.

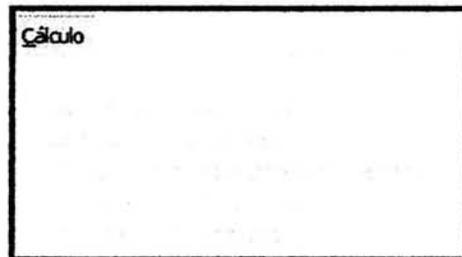


Figura 4.7 Menú cálculo

El menú Ver nos da acceso a los reportes que se elaboran después que se ha realizado un estudio, por lo que estos estarán en función del tipo de estudio que se esté analizando, figura 4.8.

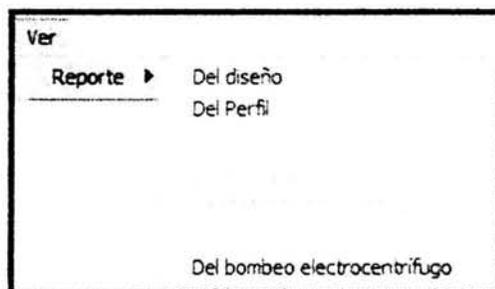


Figura 4.8 Menú ver

## 4.3.1.2. Descripción del pozo en estudio

Una vez que se inicia un estudio se habilita el botón  Descripción correspondiente a la descripción del pozo en estudio, con lo que se tiene acceso a la ventana que se muestra a continuación.

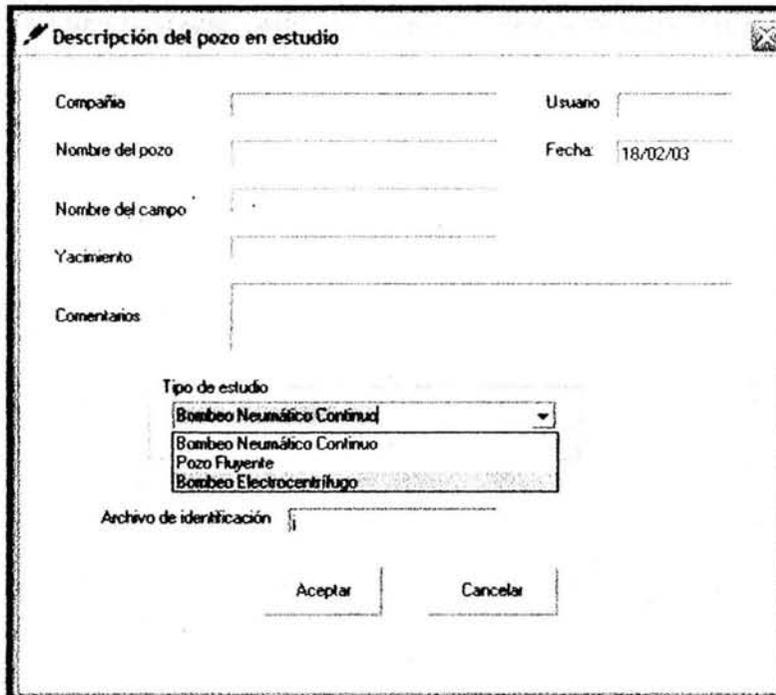


Figura 5.9 Ventana de descripción.

En esta ventana se introduce la información que identificará el estudio realizado, se introduce la información relativa a la compañía para la cual se realiza el estudio, el nombre del pozo que se está estudiando, a que campo pertenece, así como el yacimiento en el que se localiza, además se cuenta con espacios para introducir el nombre del usuario que llevó a cabo el estudio, la fecha será la que tiene internamente la computadora, en caso de editar un archivo ya existente, la fecha será aquella en la cual se creó el archivo de datos.

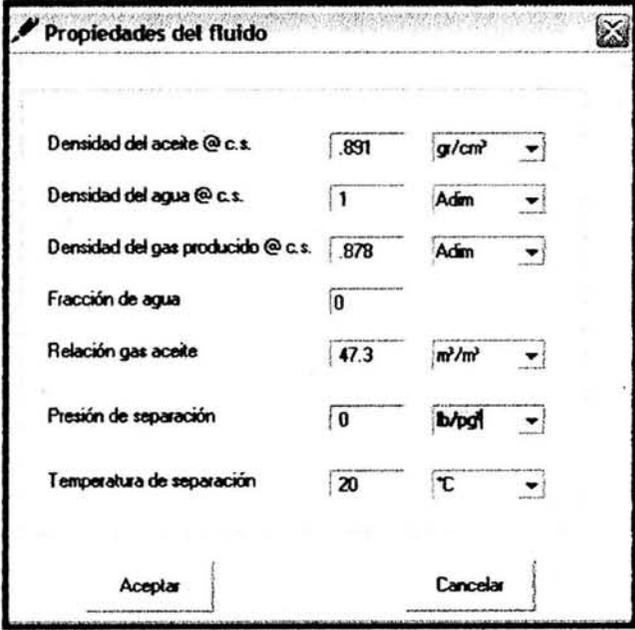
En el espacio correspondiente a los comentarios, el usuario tiene la posibilidad de escribir una nota para identificar su problema rápidamente. Cuando se está creando un archivo nuevo, estos espacios aparecen vacíos, en caso de editar un archivo ya existente, su contenido será el que se ingresó en la última edición.

En esta ventana se selecciona el tipo de estudio que se quiere realizar (bombeo electrocentrífugo), así como el nombre del archivo de identificación.

Al aceptar la información introducida se habilita el botón  Propiedades de los fluidos y el menú correspondiente a las propiedades de los fluidos con lo que se tiene acceso a la siguiente ventana.

#### 4.3.1.3. Propiedades del fluido

La información que necesita esta ventana son: densidad de aceite, densidad del agua, densidad del gas producido, fracción agua, relación gas aceite, presión de separación y temperatura de separación.



Propiedad	Valor	Unidad
Densidad del aceite @ c.s.	.891	gr/cm <sup>3</sup>
Densidad del agua @ c.s.	1	Adm
Densidad del gas producido @ c.s.	.878	Adm
Fracción de agua	0	
Relación gas aceite	47.3	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Presión de separación	0	lb/psf
Temperatura de separación	20	°C

Botones: Aceptar, Cancelar

Figura 5.10 Ventana de propiedades del fluido

Una vez introducidos los datos en esta ventana, se habilita el botón



Correlaciones PVT.

y el menú correspondiente a las correlaciones PVT con lo que se

muestra la ventana de la figura 4.11.

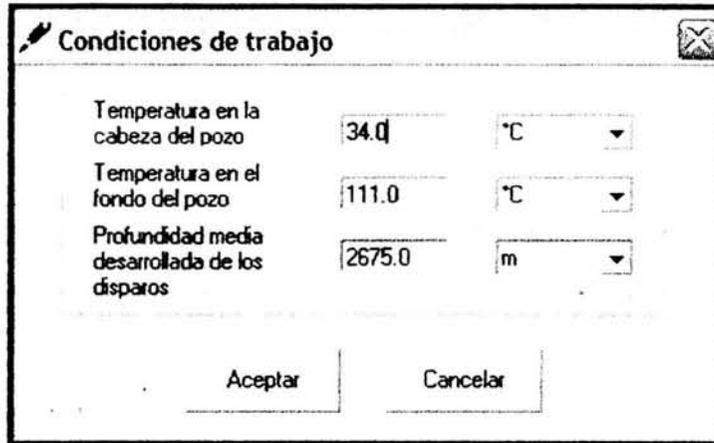
#### 4.3.1.4. Correlaciones PVT

En esta ventana se seleccionan las correlaciones que se desean emplear para determinar las propiedades PVT de los fluidos. En ella se destaca la posibilidad de realizar el cálculo de la relación de solubilidad para la región marina; para el cálculo de la viscosidad del aceite se tiene la posibilidad de obtenerla para datos de laboratorio, una vez que se ha introducido la información necesaria para el cálculo de las

propiedades PVT se habilita el botón  Condiciones de trabajo y el menú correspondientes a las condiciones de trabajo del pozo, con lo que se tiene acceso a la ventana de la Figura 4.12.

Figura 4.11 Ventana de Correlaciones PVT

#### 4.3.1.5 Condiciones de trabajo



Variable	Valor	Unidad
Temperatura en la cabeza del pozo	34.0	°C
Temperatura en el fondo del pozo	111.0	°C
Profundidad media desarrollada de los disparos	2675.0	m

Figura 4.12 Ventana de condiciones de trabajo

Una vez introducida la información correspondiente a las condiciones de trabajo, se habilita el botón  Estado mecánico del pozo, y el menú correspondiente al estado mecánico del pozo figura 4.13.

#### 4.3.1.6 Estado mecánico del pozo

En esta ventana se indican las variaciones de profundidad y de diámetro que se tienen en el pozo, tanto para la TP como para la TR; además también se indica la desviación que tiene el pozo, esto se hace al marcar la diferencia entre la profundidad vertical y la profundidad desarrollada. Para facilitar la selección de los diámetros de la tubería, el programa tiene una base de datos con los diámetros de TP, de TR y su peso usados en el campo.

Estado mecánico del pozo

Diámetros en la TP | Diámetros de TR, liners | Secciones de desviación

No. de diámetros: 2

D.E.	Peso	D.I.
1.05	1.2	0.824
1.315	1.8	1.049
1.66	2.4	1.38
1.9	2.9	1.61

TP	D.E.	Peso	D.I.	Prof. Superior	Prof. Inferior
1	4.5	12.75	3.958	0	20.69
2	3.5	9.3	2.992	20.69	2632.82

Tipo de unidades

Diámetro: pg | Peso: lb/pie | Profundidad: m

Aceptar | Cancelar

Figura 4.13 Ventana del estado mecánico del pozo

#### 4.3.1.7 Correlaciones

Cuando ya se ha introducido la información del estado mecánico y si el tipo de estudio que se está realizando es de bombeo electrocentrífugo, entonces se habilita el



botón **Correlaciones**, con lo que se tiene acceso a la ventan de correlaciones.

En la ventana de correlaciones figura 4.14 se decide que correlación de flujo multifásico se va a emplear para calcular el comportamiento de los fluidos a través de la tubería.

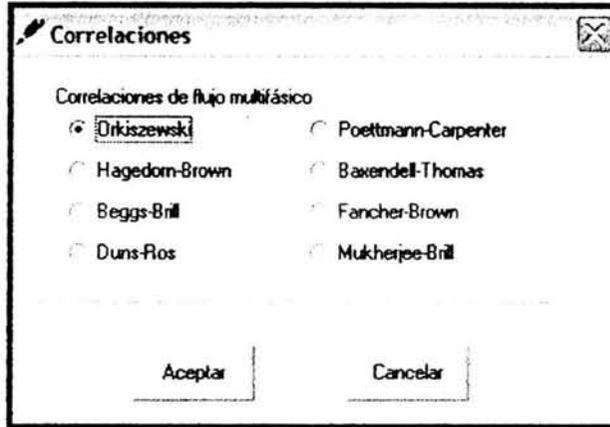


Figura 4.14 ventana de correlaciones

#### 4.3.1.8 Comportamiento del pozo

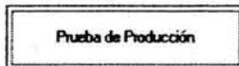
Una vez que se ha seleccionado el tipo de correlación, se habilita el botón



Comportamiento del pozo

, con lo que se tiene acceso a la ventana del comportamiento

del pozo, figura 4.15. En esta ventana se grafica la IPR generalizada y se tabulan los resultados para una mejor comprensión, además de calcular el gasto máximo que el pozo puede aportar, para introducir los valores de la prueba de producción el usuario debe hacer



click en el botón . Los datos que se requieren son: 1) Gasto del líquido de la prueba, 2) Presión de fondo fluyendo, 3) Presión de fondo estática, 4) Presión de saturación.

Figura 4.14 Datos de la prueba de producción

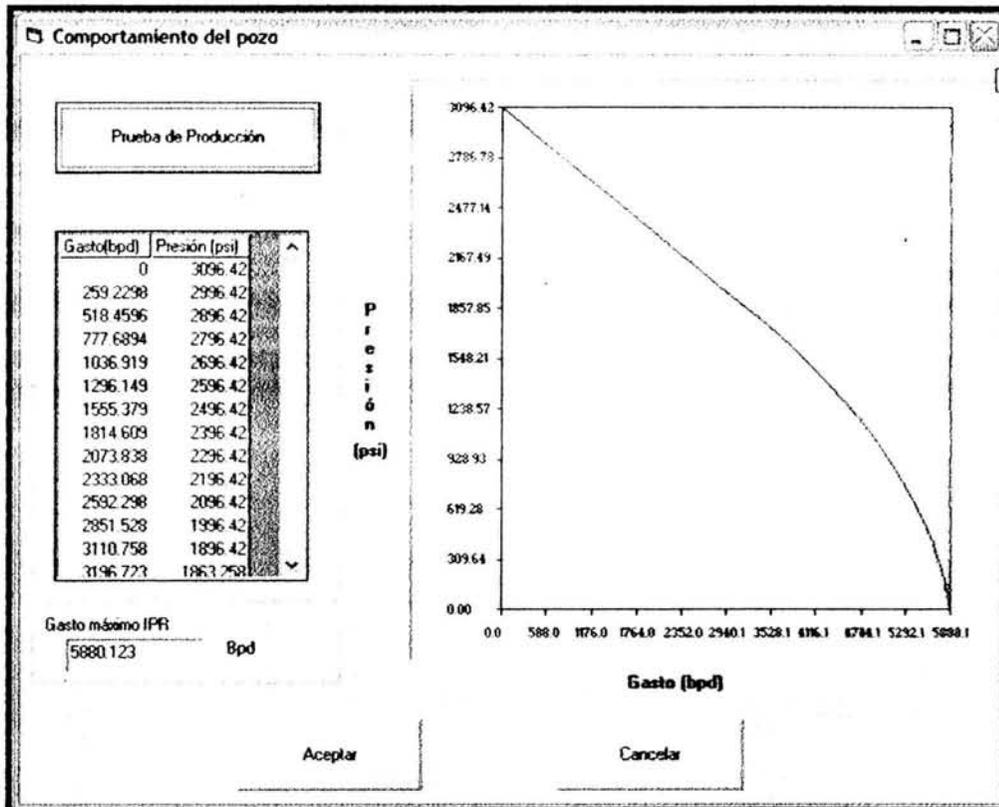


Figura 4.15 Ventana del Comportamiento del pozo

#### 4.3.1.9 Datos del BEC

Una vez que se han realizado los cálculos del comportamiento del pozo se habilita el botón  Datos del BEC, con lo que se tiene acceso a la ventana de datos del BEC figura 4.16. En esta ventana hay dos opciones de cálculo para el diseño del bombeo electrocentrífugo las cuales son:

- Profundidad de colocación
- Presión de succión de la bomba

Para la primera opción los datos que son necesarios introducir son: gasto total de diseño, separador y la profundidad de colocación. En la segunda opción la información requerida es: gasto total de diseño, separador y presión de succión.

Con lo referente al separador se pueden elegir entre tres situaciones, sin separador, con separador estático y separador dinámico. En el separador estático la eficiencia de separación del gas es del 20% y el separador dinámico su eficiencia es el 80%.

Figura 4.16 Ventana de datos del BEC

#### 4.3.1.10 Perfil de presiones

Cuando ya se ha introducido la información de datos del BEC, entonces se habilita el botón  **Perfiles de presiones**, con lo que se tiene acceso a la ventana de perfil de presiones, figura 4.17. en ésta se establece la presión que se tiene en la cabeza del pozo. Para obtener el perfil ascendente y descendente dentro del pozo se hace click en el botón calcular, los resultados de los perfiles se tabulan y grafican para una mejor comprensión del comportamiento del perfil de presión de los fluidos a través de la tubería, además de calcular la presión de fondo fluyendo para el gasto deseado y la carga dinámica total.

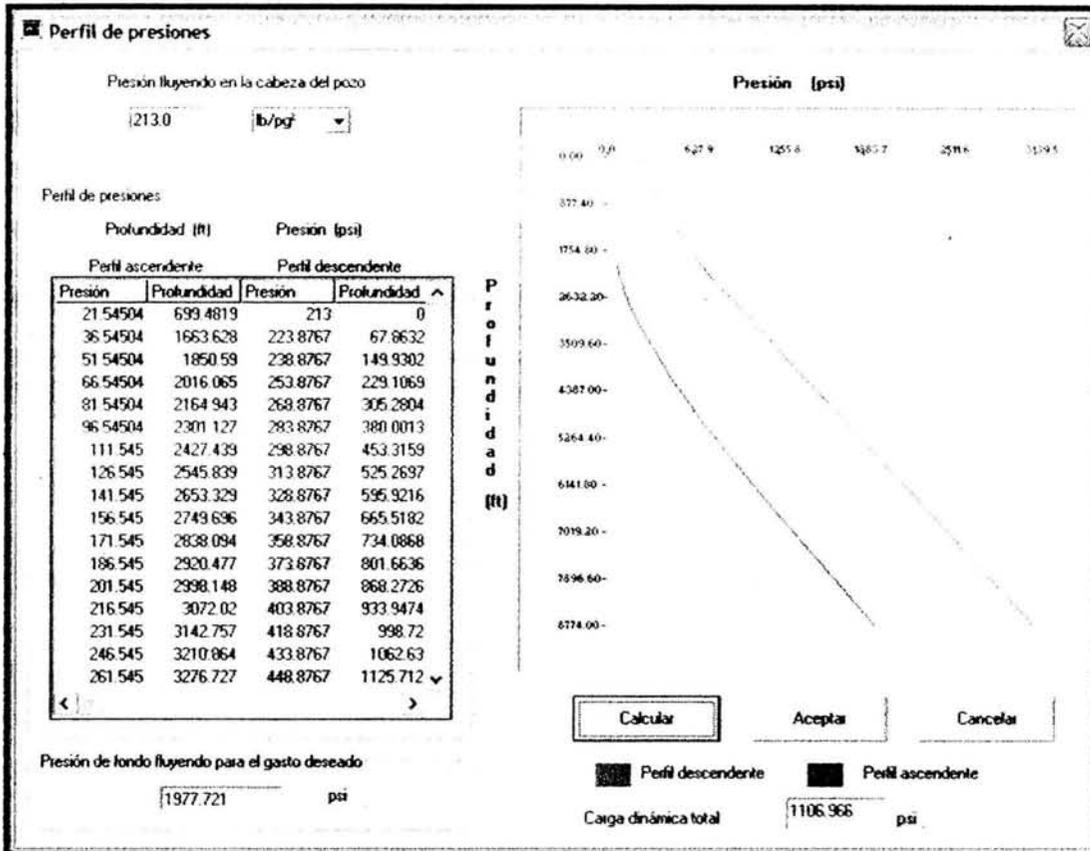


Figura 4.17 Ventana de Perfiles de presiones

#### 4.3.1.11 Diseño

Una vez que se calcularon los perfiles ascendentes y descendentes de presión, se habilita el botón  **Diseño**, con lo que se tiene acceso a la ventana de diseño figura 4.17. Para obtener los valores del diseño se hace click en el botón calcular. Los valores calculados son: profundidad de colocación, presión de succión, presión de descarga, carga dinámica total, gasto total de succión, gasto total de descarga y la presión de fondo fluyendo para el gasto deseado.

Parámetro	Valor	Unidad
Profundidad de colocación	5825.115	ft
Presión de succión	1000	psi
Presión de descarga	2106.966	psi
Carga dinámica total	1106.966	psi
Gasto total de succión	3458.131	bpd
Gasto total de descarga	3446.706	bpd
Presión de fondo fluyendo para el gasto deseado	1977.721	psi
Porcentaje de gas libre que entra a la bomba	3.881323	%

Aceptar

Figura 4.17 Ventana de perfiles de presiones

#### 4.3.1.12 Selección de bomba

Cuando ya se han realizado los cálculos del diseño se habilita el botón



Selección de bomba

, con lo que se tiene acceso a la ventana de selección de bomba figura 4.18. Para la bomba primero tendremos que seleccionar el diámetro de la bomba que se va introducir en la tubería de revestimiento, las bombas son de la compañía centrilift de una etapa trabajando a 60 herzt y 3500 RPM, una vez que se ha seleccionado el tamaño de la bomba se desplegarán las bombas del diámetro requerido que estén en el rango deseado de operación, el límite superior e inferior de gasto en el que trabaja, la eficiencia, los Hp, y la carga que genera cada etapa, además del número total de etapas y la potencia total que necesita la bomba para operar al gasto deseado. Se tendrá que seleccionar una de las bombas, al seleccionarla se habilitara el botón

Curvas características

la cual nos dará acceso a la ventana de curvas características figura 4.19.

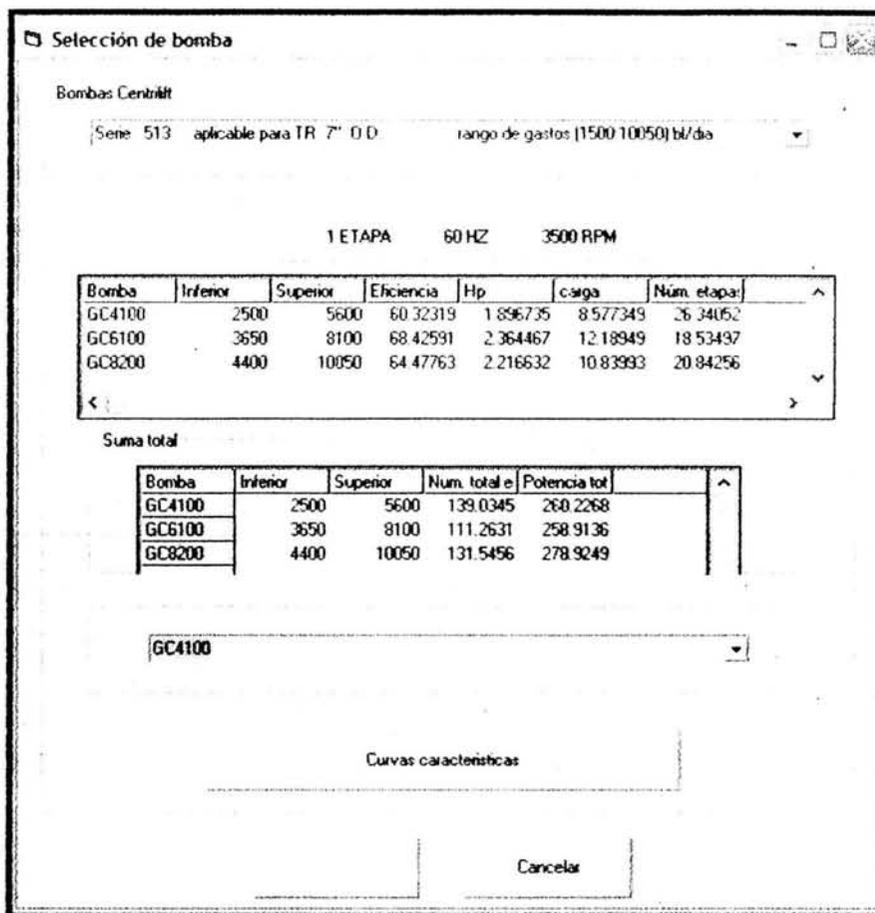


Figura 4.18 Ventana de selección de bombas

#### 4.3.1.13 Curvas características

Para obtener las curvas características de la bomba seleccionada se hace click en el botón calcular, los resultados de las curvas se tabulan y se grafican para una mejor comprensión del comportamiento de la bomba.

Las graficas que se generan varían de 40 a 80 Hertz y son:

- Gasto (Bpd) vs carga (ft)
- Gasto (Bpd) vs potencia (Hp)

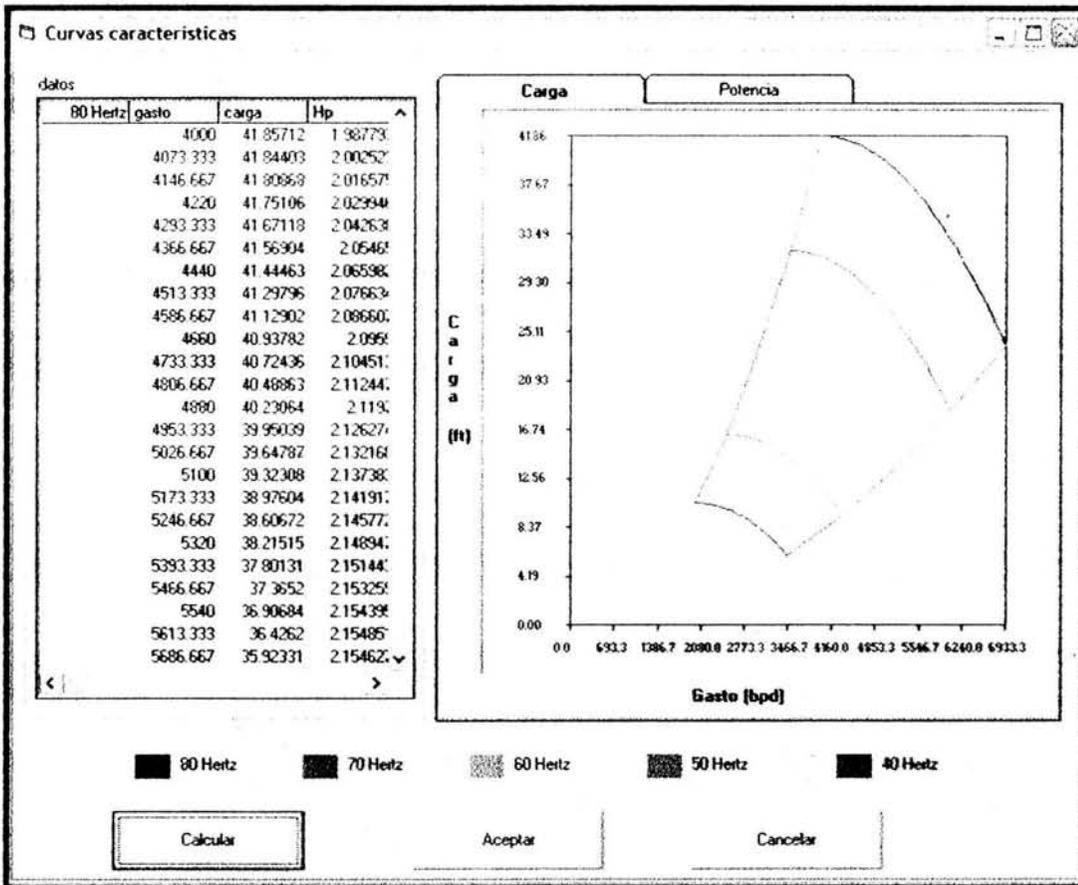


Figura 4.19 Ventana de Curvas características

#### 4.3.1.14 Selección del motor

Cuando ya se han generado las curvas características se habilita el botón  Motor, con lo que se tiene acceso a la ventana de selección del motor figura 4.20. Para el motor tendremos que seleccionar el diámetro que se va introducir en la tubería de revestimiento, después de seleccionar el diámetro se desplegarán los motores del diámetro seleccionado y tendremos que escoger la que satisfaga los requerimientos totales de Hp de la bomba centrífuga.

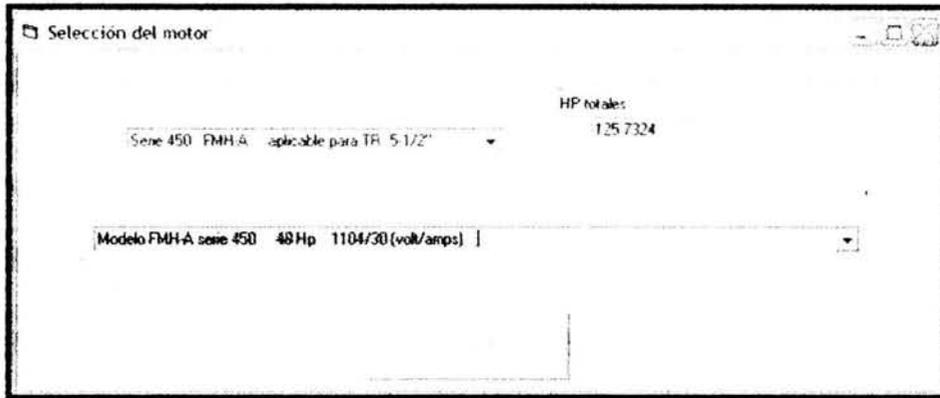


Figura 4.20 Ventana de selección del motor

#### 4.3.1.14 Reporte final

Una vez que se ha seleccionado el motor se habilita el botón  Reporte final, con lo que se tiene acceso a la ventana reporte final figura 4.21, con lo que se tiene acceso a la ventana del reporte final el cual muestra el reporte del diseño final con lo que se termina el diseño del bombeo electrocentrífugo.

Reporte final

Gasto total de diseño	2900	bpd		
Presión de succión	1000	psi	Presión de descarga	2106.966 psi
Carga dinámica total	1106.966	psi	Profundidad de colocación de la bomba	5925.115 ft
Presión de fondo fluyendo para el gasto deseado	1977.721	bpd		
Volumen total de succión	3458.131	bpd	Volumen total de descarga	3446.706 bpd
Bomba	FC4300			
Potencia total del motor	125.7324	Hp	Número total de etapas	142.7554
Motor	Modelo FMH-A serie 450 144 Hp 2112/45 (volt/amps)			

Aceptar

Figura 4.21 Ventana del Reporte final

## CAPÍTULO V

### APLICACIONES

En este capítulo se presenta una simulación realizada en el programa de cómputo, los datos empleados son de pozos reales y se reportan los datos obtenidos de este.

#### 5.1 DISEÑO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO CON DATOS DE CAMPO

Se desea saber cuales son las mejores opciones para producir un pozo con aparejo de bombeo electrocentrífugo, por lo que se realiza la simulación con la finalidad de evaluar el diseño de las instalaciones de bombeo electrocentrífugo. Los datos empleados son de condiciones reales tomadas en campo.

El estudio que se va a realizar es relativo a las mejores condiciones para instalar el aparejo de bombeo electrocentrífugo, para un gasto de 3000 bpd.

A continuación se presentan las ventanas que se observan en el programa al realizar el estudio; estas se presentan de manera secuencial conforme avanza el programa.

Al hacer clic en el botón  Descripción se tiene acceso a la ventana de descripción del pozo en estudio, en donde se introducen los datos que identifican al estudio que se va a realizar y en la que a su vez se elige el tipo de estudio que se desea:



Descripción del pozo en estudio

Compañía UNAM Usuario Oscar

Nombre del pozo Pozo 1 Fecha: 18/09/04

Nombre del campo Campo 1

Yacimiento Yacimiento 1

Comentarios Selección de profundidad por medio de la presión de succión

Tipo de estudio  
Bombeo Electrocentrifugo

Archivo de identificación C:\Tesis\guardados simulado

Aceptar Cancelar

Al hacer click en el botón aceptar en la ventana de descripción del pozo en el estudio se tiene acceso nuevamente a la ventana principal del programa, en la que es necesario hacer click en el botón  Propiedades de los fluidos para poder introducir las propiedades de los fluidos producidos.

**Propiedades del fluido**

Densidad del aceite @ c. s. 0.891 gr/cm<sup>3</sup>

Densidad del agua @ c. s. 1.0 Adm

Densidad del gas producido @ c. s. 0.878 Adm

Fracción de agua 0

Relación gas aceite 47.3 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

Presión de separación 0.0 lb/pg<sup>2</sup>

Temperatura de separación 20.0 °C

Aceptar Cancelar

Nuevamente se hace click en el botón aceptar en la ventana de las propiedades del fluido y se tiene acceso a la ventana principal del programa, en ésta, es necesario hacer click en el botón  Correlaciones PVT. para poder elegir las correlaciones para el cálculo del factor de volumen del aceite, la relación de solubilidad, y la viscosidad del aceite.

**Correlaciones PVT**

**Correlaciones**

**Cálculo de Bo**

- Vázquez-Beggs
- Ostein-Glaso
- Standing
- Zona marina

**Relación de solubilidad**

- Lasater
- Standing
- Vázquez-Beggs
- Ostein-Glaso
- Zona marina

**Viscosidad del aceite**

- Beggs-Robinson
- Beal-Chew-Connally
- Datos de laboratorio
- Akal-Nohoch-Chac
- Abkatun-Pol-Chuc
- Ku

Viscosidad 1 [ ] [ ]

Temperatura 1 [ ] [ ]

Viscosidad 2 [ ] [ ]

Temperatura 2 [ ] [ ]

Aceptar Cancelar

Al hacer click en el botón aceptar en la ventana de correlaciones PVT se habilita nuevamente la ventana principal del programa en la que se tiene que hacer click en el

botón  Condiciones de trabajo. para poder proporcionar las temperaturas en la cabeza, en el fondo del pozo, y a profundidad desarrolladas de los disparos:

Al hacer click en el botón de aceptar en la ventana de las condiciones de trabajo, nuevamente se tiene acceso a la ventana principal del programa en la que es necesario

hacer clic en e botón  Estado mecánico del pozo. para introducir los números de diámetros y las longitudes correspondientes a la TP:

D.E.	Peso	D.I.
1.05	1.2	0.824
1.315	1.8	1.049
1.66	2.4	1.38
1.9	2.9	1.61

TP	D.E.	Peso	D.I.	Prof. Superior	Prof. Inferior
1	4.5	12.75	3.958	0	20.69
2	3.5	9.3	2.992	20.69	2632.82

Para poder introducir los números de diámetros y longitudes correspondientes a la TR es necesario que en la ventana del estado mecánico del pozo se haga click en la pestaña correspondiente a los diámetros de TR, lanners.

Estado mecánico del pozo

Diámetros en la TP    Diámetros de TR, lanners    Secciones de desviación

No. de desviaciones: 14

	Profundidad desarrollada	Profundidad Vertical
Sección 9	2062.001	1970.85
Sección 10	2152	2050.19
Sección 11	2412	2280.53
Sección 12	2600	2448.229
Sección 13	2630	2475.409
Sección 14	2675	2516.459

Tipo de unidades:  
 Diámetro: pg    Peso: lb/pe    Profundidad: m

Aceptar    Cancelar

Es necesario introducir el número de secciones de desviación que tiene el pozo y sus profundidades vertical y desarrollada; para poder hacer esto es necesario hacer click en la pestaña relativa a las secciones de desviación que se encuentran en la ventana relativa al estado mecánico del pozo

Estado mecánico del pozo

Diámetros en la TP    Diámetros de TR, lanners    Secciones de desviación

No. de diámetros: 2

D.E.	Peso	D.I.
4.5	9.5	4.09
4.5	10.5	4.052
4.5	11.6	4
4.5	13.5	3.92

TR	D.E.	Peso	D.I.	Prof. Superior	Prof. Inferior
1	9.625	47	8.681	0	1599
2	7	29	6.184	1599	2675

Tipo de unidades:  
 Diámetro: pg    Peso: lb/pe    Profundidad: m

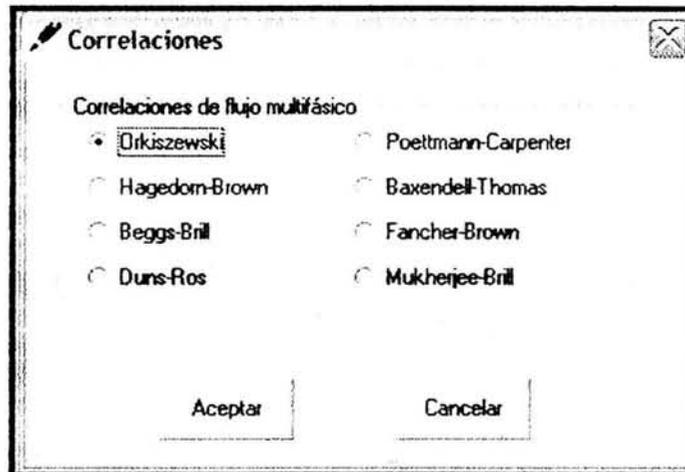
Aceptar    Cancelar

Como en la pantalla anterior no se pueden ver todas las secciones de desviación a continuación se muestran las secciones de desviación correspondiente:

Profundidad desarrollada (m)	Profundidad vertical (m)
852	851.78
1009	1006.38
1188	1179.26
1345	1323.24
1524	1485.52
1638	1589.41
1800	1736.67
1941	1863.69
2062	1907.89
2152	2050.19
2412	2280.53
2600	2448.23
2630	2465.41
2675	2516.5

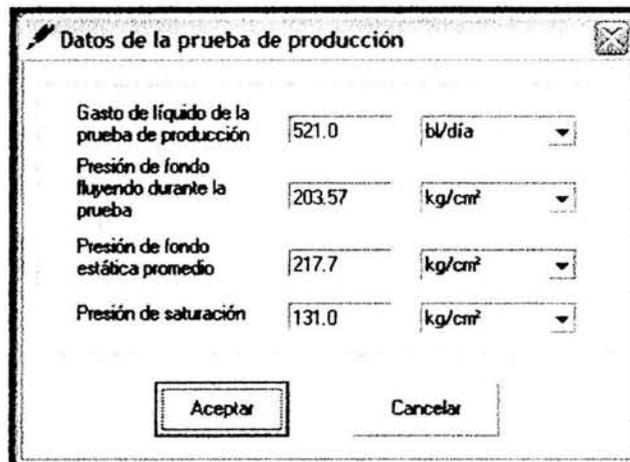
Una vez que se termina de introducir la información relativa al estado mecánico del pozo y se hace click en el botón aceptar, nuevamente se habilita la ventana principal

del programa, en la que es necesario hacer click en el botón  Correlaciones para seleccionar que correlación de flujo multifásico que se desea usar:

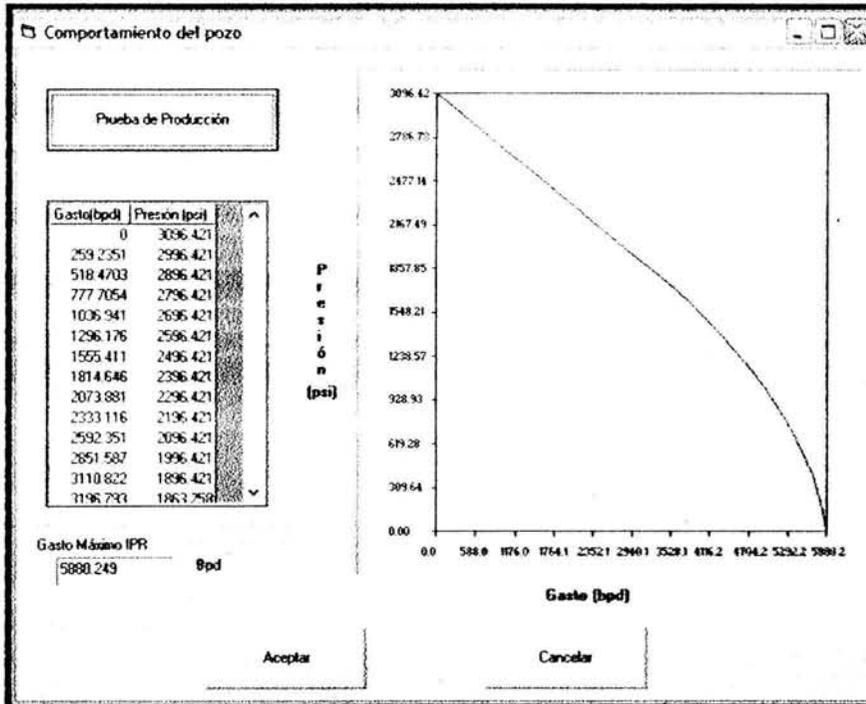


Al hacer click en el botón aceptar en la ventana de correlaciones se habilita nuevamente la ventana principal del programa en la que es necesario hacer click en el

botón  Comportamiento del pozo para poder graficar la IPR es necesario hacer primero click en el botón correspondiente a la prueba de producción en los que se introducen los datos de la prueba.



Al hacer click en el botón aceptar se grafica la IPR generalizada.



Al hacer click en el botón aceptar en la ventana del comportamiento del pozo, se habilita nuevamente la ventana principal del programa, en la que es necesario hacer click en el botón  Datos del BEC para poder introducir los datos del bombeo electrocentrífugo, en nuestro caso el gasto deseado es de 3000 bpd, utilizaremos separador dinámico, la presión de succión es de 800 psi.

Datos del BEC

Diseño

Opciones de calculo

Profundidad de colocación       Presión de succión de la bomba

Gasto total de diseño: 3000 bpd

Separador: Separador dinámico

Presión de succión: 800 Psi

Profundidad de colocación: [ ] Ft

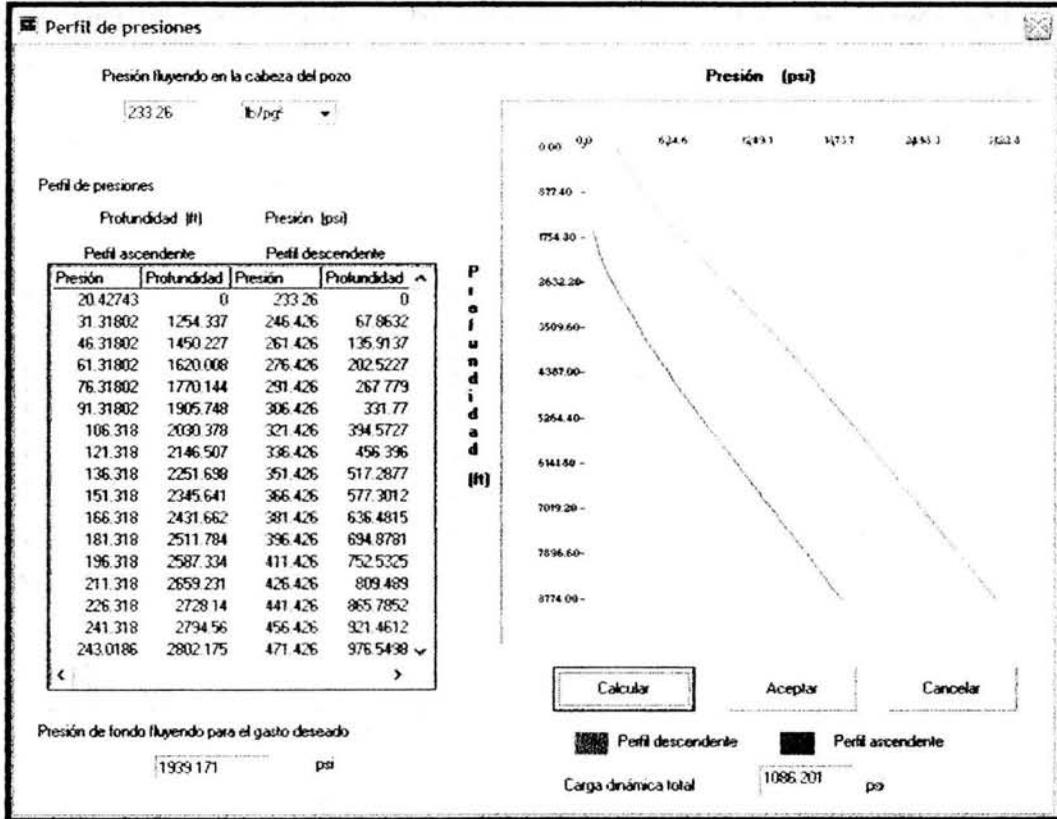
Aceptar      Cancelar

Al hacer click en el botón aceptar en la ventana de datos del BEC, se habilita nuevamente la ventana principal del programa, en la que es necesario hacer click en el



Perfiles de presiones

botón donde introduce la presión en la cabeza del pozo a las condiciones de flujo para poder graficar los perfiles de presión ascendente y descendente.



Al hacer click en el botón aceptar en la ventana de perfil de presiones, se habilita nuevamente la ventana principal del programa, en la que se debe hacer click en el botón



Diseño

The screenshot shows a window titled "Diseño" with the following parameters and values:

Parámetro	Valor	Unidad
Profundidad de colocación	4987.569	ft
Presión de succión	800	psi
Presión de descarga	1886.201	psi
Carga dinámica total	1086.201	psi
Gasto total de succión	3606.267	bpd
Gasto total de descarga	3537.227	bpd
Presión de fondo fluyendo para el gasto deseado	1939.171	psi
Porcentaje de gas libre que entra a la bomba	6.890795	%

At the bottom of the window, there is a button labeled "Aceptar".

Al hacer click en el botón aceptar de la ventana de diseño, se habilita la ventana principal del programa en la cual se debe hacer click en el botón  Selección de bomba, para la selección de la bomba primero tendremos que seleccionar el diámetro de la bomba que se va introducir en la tubería de revestimiento, para nuestro caso seleccionaremos la de 7 pulgadas, podríamos seleccionar la de 5 ½ pulgadas pero a menor diámetro aumenta el costo.

De las bombas que se listan escogeremos la GC4100 ya que es la que tiene mayor eficiencia.

Selección de bomba

Bombas Centrífugas

Serie 513 aplicable para TR 7" O.D. rango de gastos (1500:10050) bl/día

1 ETAPA 60 HZ 3500 RPM

Bomba	Inferior	Superior	Eficiencia	Hp	carga	Núm. etapas
GC3000	2200	3600	56.7158	1.349765	8.520905	25.49498
GC3500	2200	4700	70.88017	1.693087	13.21969	16.43308
GC4100	2500	5600	71.86055	1.748944	13.50779	16.08259

Suma total

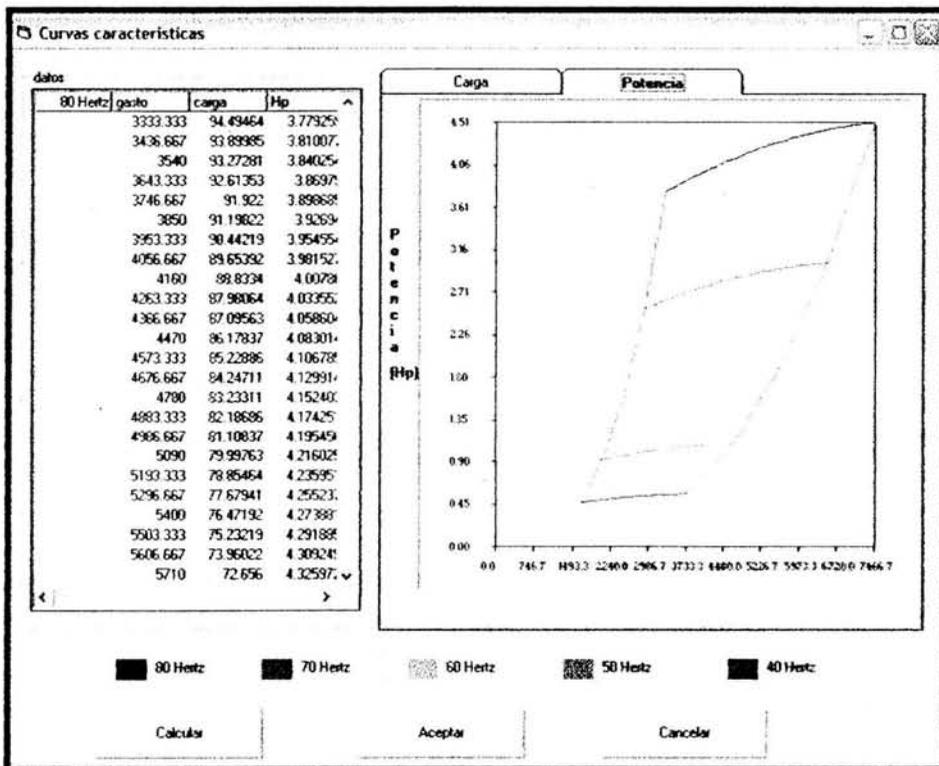
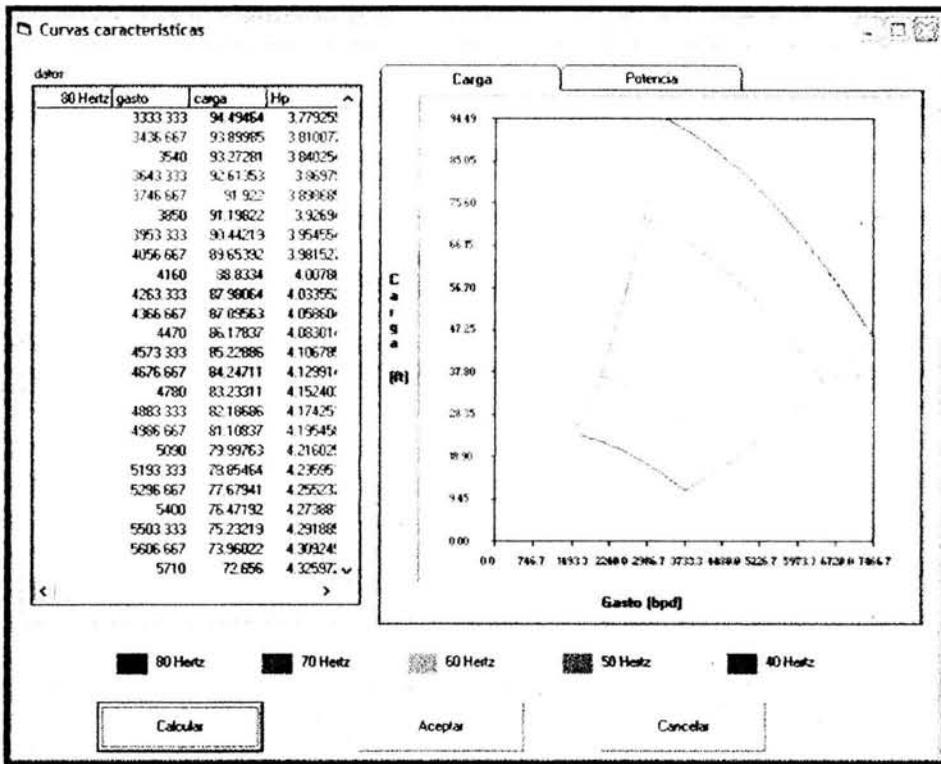
Bomba	Inferior	Superior	Num. total e	Potencia tot
GC3000	2200	3600	108.6396	146.9944
GC3500	2200	4700	71.58176	120.8472
GC4100	2500	5600	70.03648	122.1975

Elección de bomba

GC3000  
GC3500  
GC4100

Cancelar

Después de seleccionar la bomba se hace click en el botón de curvas características para ingresar a la ventana de dicho nombre, dentro de esta ventana se debe hacer click en el botón calcular para graficar el gasto vs carga y gasto vs potencia.



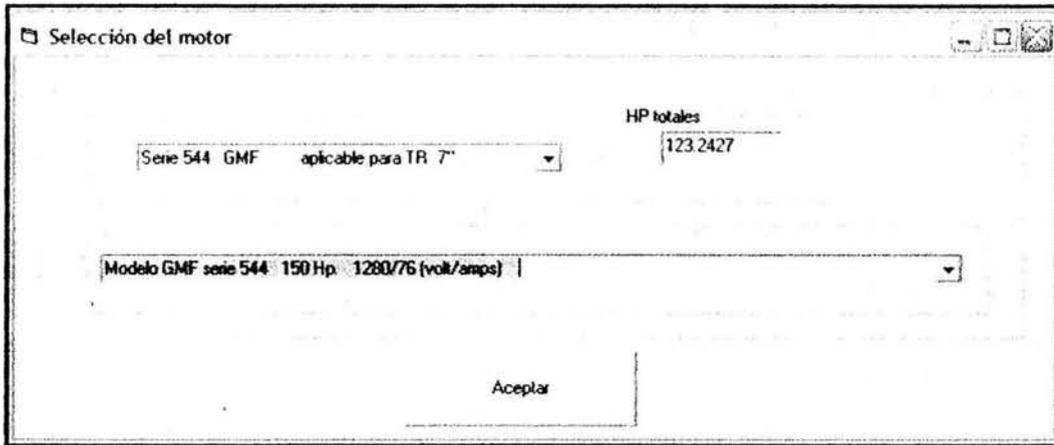
Al hacer click en el botón aceptar de la ventana de curvas características, se habilita la ventana selección de bombas en la cual se debe hacer click en el botón aceptar, para que se habilite de nuevo la ventana principal del programa.

Una vez realizado la selección de la bomba se debe hacer click en el botón



Motor

en el que se elegirá el motor que genere la potencia que necesita la bomba.



Después de seleccionar el motor adecuado se hace click en el botón aceptar, con lo que se habilitara la ventana principal del programa, en la que es necesario hacer click



Reporte final

en el botón donde se habilitara la ventana del reporte final.

Reporte final

Gasto total de diseño	3000	bpd		
Presión de succión	800	psi	Presión de descarga	1886.201 psi
Carga dinámica total	1086.201	psi	Profundidad de colocación de la bomba	4987.569 ft
Presión de fondo fluyendo para el gasto deseado	1939.171	bpd		
Volumen total de succión	3606.267	bpd	Volumen total de descarga	3537.227 bpd
Bomba	GC4100			
Potencia total del motor	123.2427	Hp	Número total de etapas	70.55055
Motor	Modelo GMF serie 544 150 Hp 1280/76 (volt/amps)			

Aceptar

Para terminar el diseño de bombeo electrocentrifugo se tendrá que hacer click en el botón aceptar.

## 5.2 ANÁLISIS DEL DISEÑO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO VARIANDO LA PRESIÓN DE SUCCIÓN

Para este ejemplo utilizaremos el ejemplo anterior pero en distintos escenarios ya que variaremos la presión de succión de la bomba, de 800 a 1100 psi.

### ***Para una presión de succión de 800 psi.***

- La profundidad de colocación será 4987 ft
- CDT 1086 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 6.9%
- Bomba GC4100 (bomba de 7 pulgadas)
- Numero total de etapas 70 y Hp totales 123

### ***Para una presión de succión de 850 psi.***

- La profundidad de colocación será 5158 ft
- CDT 1070 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 5.9%
- Bomba GC4100 (bomba de 7 pulgadas)
- Numero total de etapas 68.4 y Hp totales 119.3

### ***Para una presión de succión de 900 psi.***

- La profundidad de colocación será 5330 ft
- CDT 1053 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 5.17%
- Bomba FC4300 (bomba de 5 ½ pulgadas)
- Numero total de etapas 137.4 y Hp totales 121.8

### ***Para una presión de succión de 950 psi.***

- La profundidad de colocación será 5520 ft
- CDT 1036 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 4.4%
- Bomba FC4300 (bomba de 5 ½ pulgadas)
- Numero total de etapas 134.3 y Hp totales 119.1

**Para una presión de succión de 1000 psi.**

- La profundidad de colocación será 5671 ft
- CDT 1017 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 3.8%
- Bomba FC4300 (bomba de 5 ½ pulgadas)
- Numero total de etapas 131.1 y Hp totales 116.5

**Para una presión de succión de 1050 psi.**

- La profundidad de colocación será 5838 ft
- CDT 996 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 3.18 %
- Bomba FC4300 (bomba de 5 ½ pulgadas)
- Numero total de etapas 128.5 y Hp totales 113.9

**Para una presión de succión de 1100 psi.**

- La profundidad de colocación será 6000 ft
- CDT 975 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 2.6 %
- Bomba FC4300 (bomba de 5 ½ pulgadas)
- Numero total de etapas 125.1 y Hp totales 111

Presión de succión	Profundidad de colocación	CDT	% gas entra bomba	bomba	Núm. total de etapas	HP totales
800	4987	1086	6.9	GC4100	70	122.9
850	5158	1070	5.9	GC4100	68.4	119.3
900	5330	1053	5.17	FC4300	137.4	121.8
950	5200	1036	4.4	FC4300	134.3	119.1
1000	5671	1017	3.8	FC4300	131.1	116.5
1050	5838	996	3.18	FC4300	128.5	113.9
1100	6004	975	2.6	FC4300	125.1	111

La bomba que funcionara mejor será la que esta a una presión de succión de 1100, debido a que entra menos gas libre en la bomba.

De los distintos escenarios se puede observar que a mayor profundidad la carga dinámica total es menor, esto se debe que a mayor profundidad mayor porcentaje de gas disuelto entra en la bomba y al transportarse a la superficie este reduce la pérdidas por fricción.

También se observa que para las presiones de succión de 800 y 850 la bomba que se puede introducir es de 7 pulgadas, mientras que a presiones mayores de succión la profundidad aumenta y entramos a un linner por lo tanto el diámetro disminuye y la bomba que se puede usar es de 5 ½ pulgadas.

### **5.3 ANÁLISIS DEL DISEÑO DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO VARIANDO EL GASTO**

Para este ejemplo utilizaremos el ejemplo anterior pero en distintos escenarios ya que variaremos el gasto de 2000 a 4000 bpd y una profundidad de 5158 ft.

#### ***Para un gasto de 2000***

- Pwf 2324
- CDT 422 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 1.08 %
- Bomba GS2300 (bomba de 7 pulgadas)
- Numero total de etapas 26.7 y Hp totales 31

#### ***Para un gasto de 2500***

- Pwf 2132
- CDT 762 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 3.17 %
- Bomba GC3500 (bomba de 7 pulgadas)
- Numero total de etapas 45.5 y Hp totales 72.2

**Para un gasto de 3000**

- Pwf 1939
- CDT 1070 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 5.9 %
- Bomba GC4100 (bomba de 7 pulgadas)
- Numero total de etapas 68.4 y Hp totales 119.3

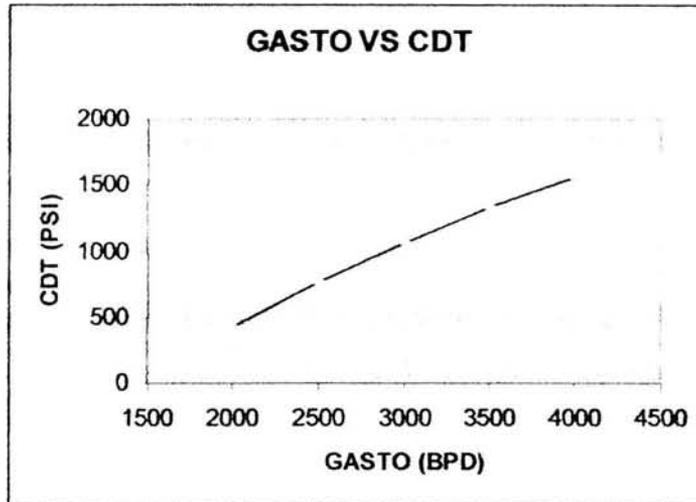
**Para un gasto de 3500**

- Pwf 1742
- CDT 1328 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 9.5 %
- Bomba GC4100 (bomba de 7 pulgadas)
- Numero total de etapas 97.6 y Hp totales 176.8

**Para un gasto de 4000**

- Pwf 1505
- CDT 1565 psi
- Porcentaje de gas libre que entra en la bomba 14.2%
- El porcentaje de gas excede el que soporta la bomba

Gasto	Pwf	CDT	% gas entra bomba	Bomba	Núm. total de etapas	HP totales
Bpd	psi	psi		7 pulg		
2000	2324	422	1.08	GS2300	26.7	31
2500	2132	762	3.17	GC3500	45.5	72.2
3000	1939	1070	5.9	GC4100	68.4	119.3
3500	1742	1328	9.5	GC4100	97	176
4000	1505	1565	14.2	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx



Se puede observar que conforme el gasto aumente la carga dinámica total aumentará, además que para un gasto de 4000 bpd la capacidad de gas que soporta una bomba estará fuera de rango por lo tanto para producir a un gasto de 4000 bpd tendremos que cambiar nuestra profundidad de la bomba.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES

El programa de computo fue desarrollado bajo ambiente Windows lo que lo hace “amigable” ya que se realizó en Visual Basic 6.0, es versátil en su empleo debido a su facilidad para introducir los datos y de manipularlos además de facilitar la comprensión del mismo.

El empleo de un separador de gas prolonga la vida útil de la bomba y nos permite utilizar el sistema en pozos con relaciones altas gas-aceite.

Conforme el gasto aumente la carga dinámica total aumentará ya que se necesitará más energía para poder transportar el fluido, por lo tanto lo más recomendable es siempre escoger el motor de mayor voltaje.

Se debe instalar siempre que sea posible un controlador de velocidad variable, para poder variar el gasto en caso de que sea necesario, o en un caso extremo evitar que ingrese a la bomba más gas del que puede tolerar.

Se recomienda ampliar la aplicación para los demás fabricantes, además de incluir la selección del cable y transformador.

Los programas de computo son una herramienta confiable y rápida para analizar los problemas bajo distintos escenarios, lo que nos permite un mayor análisis del fenómeno.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Brown K. E., The Technology of Artificial Lift Methods., vol. 2a, Petroleum publishing., Tulsa, Oklahoma.
- Díaz Z. H., Bombeo Electrocentrífugo Sumergido., Colegio de Ingenieros Petroleros de México.' A. C. 2003.
- Gary Cornell., Visual Basic 6.0, Manual de referencia., Osborne, Mc. Graw Hill, 2000
- Arturo López García., Guía de Programación en Fortran 90., Instituto Politécnico Nacional., 1998
- Félix Garcia Meayo, Lenguaje de Programación Fortran 90., Paraninfo., 1999
- Garicochea P. F., Transporte de Hidrocarburos por Ductos., Colegio de ingenieros petroleros de México., A. C. 1991
- Fancher F. H and Brown K. E. Prediction of Pressure Gradients for Multiphase Flow in Tubing. SPE. Journal. Marzo 1963
- Poettmann F. H. y Carpenter P. G. The Multiphase Flow of Gas, Oil and Water Through Vertical Flow Strings with Application to the Design of Gas Lift Installations. Drill, and Prod. Prac., APU, 1952
- Baxendel, P. and Thomas R. The Calculations of Pressure Gradients in High-Rate Flowing Wells
- Standing M. B., A General Pressure Volume Temperature Correlation for Mixture of California Oils and Greases., Drill and Pro. Prac. API, 1974
- James P. B. and Beggs H. D., Two-Phase in Pipes., University Tulsa., 1998

- Viejo Zubicaray. M., Bombas, teoría, diseño y aplicaciones., 2ª. Edición.  
Editorial Limusa
  
- Centrilift Electrical Submersible Pump., Equipment Catalog, Feb 1991
  
- Centrilift Electrical Submersible Pump., The Nine Step
  
- Sun, D. and Prado, M.G., Single-Phase Model for ESP's Head Performance.,  
SPE 80925., marzo 2003
  
- Lackner, G.; Doty, D. R.; Shirazi, S. A. and Schmidt, Z., Effect of Viscosity on  
Downhole Gas Separation in a Rotary Gas Separator., SPE 79076., agosto 2002
  
- Sachdeva, R.; Doty, D. R. and Schmidt, Z., Performance of Electric Submersible  
Pumps in Gassy Wells., SPE., febrero 1994
  
- Alhanati, F. J. S.; Schmidt, Z. and Doty, D. R., Bottomhole Gas Separation  
Efficiency in ESP Installations., SPE., abril 2003