

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO INTER ETAPAS DE BOMBAS ELECTROSUMERGIBLES MANEJANDO FLUJO MONOFÁSICO**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Yánez Rodolfo Gregorio  
Para optar al título  
de Ingeniero Mecánico

**Caracas, 2004**

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO INTER ETAPAS DE BOMBAS ELECTROSUMERGIBLES MANEJANDO FLUJO MONOFÁSICO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Frank Pietersz  
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Sergio Caicedo

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Yáñez Rodolfo Gregorio  
Para optar al título  
de Ingeniero Mecánico

**Caracas, 2004**

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller, Yáñez, Rodolfo Gregorio, titulado:

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA PREDECIR EL  
COMPORTAMIENTO INTER ETAPAS DE BOMBAS  
ELECTROSUMERGIBLES MANEJANDO FLUJO  
MONOFÁSICO”**

Considerando que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Cesar Ferrer  
Jurado Principal

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Rodolfo Grullón  
Jurado Principal

\_\_\_\_\_  
Prof. Frank Pietersz  
Tutor académico



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA



Caracas, 17 de noviembre de 2004

Ciudadano:  
Prof. FROILAN LOZADA  
Jefe de Division de Control de Estudios  
Facultad de Ingenieria U.C.V.

Presente.-

Quienes suscriben profesores miembro del Jurado Examinador, designado por el Consejo de la Escuela de Ingenieria Mecanica, nos dirigimos a usted, con la finalidad de informarle la decisi3n de otorgar a los bachilleres: **Yánez Rodolfo C.I. 8.456.320**

### MENCION HONORIFICA

Por la excelencia demostrada en la realizaci3n y defensa del Trabajo Especial de Grado intitulado:

**"ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO INTER ETAPAS DE BOMBAS ELECTROSUMERGIBLE MANEJANDO FLUJO MONOFÁSICO"**

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de Ud.,

Atentamente,

  
Prof. CÉSAR FERRER  
Miembro del Jurado

  
Prof. RODOLFO GRULLON  
Miembro del Jurado

  
Prof. FRANK PIETERSZ  
Coordinador del Jurado

Anexo: lo indicado



## DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

*A la memoria de mi Madre, con quién me hubiese gustado compartir este momento de felicidad. A Ti Madre donde quieras que te encuentres, te dedico este momento de alegría..*

*A mis hijos que son parte esencial de mi ser, por brindarme la inspiración necesaria, para culminar esta meta.*

*A mi esposa por su amor, comprensión, por confiar en mi y esperar pacientemente este momento tan especial para mí.*

## RECONOCIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento:

A Dios por haberme iluminado, llenarme de paciencia, tolerancia y fortaleza, para afrontar las barreras encontradas en la consecución de este trabajo y en todos los logros que he alcanzado en mi vida.

A mis tutores Ing. Sergio Caicedo y Ing. Frank Pietersz, por su gran interés demostrado en mi trabajo, su apoyo académico y valiosos consejos.

A todos mis compañeros de trabajo de Intevp por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y permitir realizar este trabajo en las instalaciones de la empresa.

A todas aquellas personas que aportaron su granito de arena y contribuyeron de una u otra manera en la realización de este trabajo.

A todas mis amistades que reciben con agrado y como suyo, este éxito alcanzado.

**Yáñez Rodolfo G.**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA PREDECIR EL  
COMPORTAMIENTO INTER ETAPAS DE BOMBAS  
ELECTROSUMERGIBLES MANEJANDO FLUJO  
MONOFÁSICO**

**Tutor académico: Prof. Frank Pietersz. Tutor industrial: Ing. Sergio Caicedo. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2004.**

**Palabras claves:** Bomba electrosumergible, bombas multietapas,

El presente trabajo tiene por finalidad, determinar experimentalmente el comportamiento por etapas de las bombas electrosumergibles, con fluido monofásico a diferentes frecuencias de giro. Para la realización de esta experiencia se modificó el circuito de pruebas de Bombeo Multifásico ubicada en el Laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep, el planteamiento de una metodología experimental y la obtención de valores experimentales de las variables relevantes, para generar las curvas características de la bomba como lo son: altura dinámica, potencia al freno y eficiencia.

Se realizaron un conjunto de experiencias, cuyo propósito fue definir el comportamiento de una bomba electrosumergible marca Centrilift, modelo GC2900 de 35 etapas de flujo mixto, empleando agua como fluido de proceso. Estas pruebas se realizaron a tres velocidades, las mas frecuentes utilizada en la industria petrolera 2333, 2916 y 3200 RPM a la frecuencia de 40, 50 y 55 Hertz.

Mediante el estudio realizado se logro construir las curvas características de la bomba y verificar el buen sello entre las etapas instrumentadas.

## INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.....	v
RECONOCIMIENTOS.....	vi
INDICE DE CONTENIDO.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
NOMENCLATURA.....	xiii
SÍMBOLOS GRIEGOS.....	xvi
SUBÍNDICES.....	xvii
1. INTRODUCCIÓN.....	0
1.1 Generalidades.....	0
1.2 Motivación.....	1
1.3 Planteamiento del problema.....	1
1.4 Objetivos.....	1
1.4.1 Objetivo General.....	1
1.4.2 Objetivos Específicos.....	2
2. MARCO TEÓRICO.....	2
2.1 Principios de bombeo monofásico.....	2
2.1.1 Clasificación de las bombas centrífugas.....	3
2.2. Bombeo electrosumergible.....	3
2.2.1 Equipos de subsuelo.....	4
2.2.1.1 Motor.....	4
2.2.1.2 Protector.....	5
2.2.1.3 Bomba Centrífuga.....	5
2.2.1.4 Separador.....	6
2.2.1.5 Sensor de Fondo.....	6
2.2.1.6 Cable.....	7
2.2.1.7 Otros equipos de subsuelo.....	7
2.2.2 Equipos de superficie.....	8
2.2.2.1 Cabezal.....	8
2.2.2.2. Caja de unión o venteo.....	8

2.2.2.3 Tablero de control del motor .....	9
2.2.2.4 Controlador de frecuencia variable .....	9
2.2.2.5 Transformadores secundarios.....	10
2.3 Triángulos de Velocidad.....	10
2.4 Conservación de Masa.....	13
2.5 Ecuación de Energía .....	14
2.6 Ecuación de Momentum.....	15
2.7 Altura de Bombeo Ideal.....	17
2.8 Altura de Bombeo.....	19
2.7.1 Efectos del ángulo del álabe en el desempeño de la bomba.....	20
2.9 Altura de Bombeo no Ideal.....	22
2.9.1 Rendimiento Volumétrico .....	22
2.9.2 Pérdidas en el Disco de Fricción .....	23
2.9.3 Pérdidas Mecánicas .....	23
2.9.4 Pérdidas Hidráulicas.....	24
2.9.4.1 Pérdidas por fricción .....	24
2.9.4.2 Pérdidas por choque .....	24
2.9.4.3 Pérdidas por mezclado.....	26
2.9.4.4 Pérdidas debido al deslizamiento del fluido en el impulsor.....	26
2.10 Leyes de afinidad.....	28
2.11 Potencia al freno .....	29
2.12 Potencia hidráulica .....	30
2.13 Eficiencia.....	31
2.14 Curva característica de una BES .....	31
3. ANTECEDENTES .....	33
4. ENSAYOS EXPERIMENTALES .....	35
4.1 Descripción de las pruebas .....	35
4.2 Descripción del circuito de pruebas BES.....	36
4.2.1. Bomba electrosumergible.....	39
4.3 Sistema de Adquisición de Datos.....	41
4.4. Procedimiento experimental.....	45

4.4.1 Prearranque.....	45
4.4.2 Arranque.....	46
4.4.3 Parada.....	46
4.5 Procesamiento de los datos experimentales.....	47
4.5.1. Datos de entrada.....	47
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
6.1 Conclusiones.....	58
6.2 Recomendaciones.....	59
REFERENCIAS.....	60
APÉNDICE A. Cálculo tipo.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
APÉNDICE B.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
DATA EXPERIMENTAL.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
APÉNDICE C.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
RESUMEN DE VALORES CALCULADOS.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
APÉNDICE D.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
CURVAS CARACTERISTICAS EXPERIMENTALES.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
APÉNDICE C. Curvas características Experimentales.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
APÉNDICE E.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
TABLA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS.	
.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
APÉNDICE F.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
CURVAS DEL FABRICANTE.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
APÉNDICE G.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Ensamblaje característico de un arreglo impulsor – difusor	6
Figura 2	Instalación característica de las BES	8
Figura 3	Nomenclatura del impulsor	11
Figura 4	Triángulo de velocidades ideales a la entrada del impulsor	12
Figura 5	Triángulo de velocidades ideales a la salida del impulsor	12
Figura 6	Trayectoria absoluta y relativa en el impulsor	13
Figura 7	Volumen de control para una bomba	14
Figura 8	Presión de descarga de la bomba vs altura dinámica para diferentes fluidos	20
Figura 9	Curvas teóricas de desempeño para álabes curvados hacia atrás, radiales y curvados hacia adelante	21
Figura 10	Altura total en función del caudal	25
Figura 11	Efecto de la velocidad de deslizamiento en el perfil de velocidades	26
Figura 12	Efecto del deslizamiento en los triángulos de entrada y salida	27
Figura 13	Curva característica de una BES	31
Figura 14	Matriz de pruebas para flujo bifásico viscoso	35
Figura 15	Matriz de pruebas para flujo monofásico	35
Figura 16	Esquema del Circuito de BES	36
Figura 17	Esquema de la ubicación de sensores en la bomba electrosumergible	39
Figura 18	Vista de sensores en la bomba electrosumergible	40
Figura 19	Corte axial de una etapa con los puntos de ubicación de los sensores	41
Figura 20	Tarjetas de adquisición de datos	43
Figura 21	Panel de control del circuito BES parte A	44
Figura 22	Panel de control del circuito BES parte B.	44
Figura 23	Valores medidos y calculados para una frecuencia de 40 Hz y PIP de 3,5 Kg/cm <sup>2</sup> (50 psig)	50

Figura 23	Certificación de curvas experimentales a 40 Hz 50 PIP	52
Figura 24	Certificación de curvas experimentales a 40 Hz 90 PIP	53
Figura 25	Certificación de curvas experimentales a 50 Hz 50 PIP	53
Figura 26	Certificación de curvas experimentales a 50 Hz 90 PIP	54
Figura 27	Curva de $\Delta P$ de la bomba para 2333 RPM y 50 PIP	55
Figura 28	Curva de $\Delta P$ de la bomba para 2333 RPM y 90 PIP	55
Figura 29	Datos experimentales para una frecuencia de 40 Hz y una PIP = 50 psig	56
Figura 30	Curva de $\Delta P$ de la bomba por etapas para 2333 RPM y 50 PIP	57
Figura 31	Curva de $\Delta P$ de la bomba por etapas para 2333 RPM y 90 PIP	57
Figura 32	Curva de $\Delta P$ de la bomba por etapas para 2333 RPM y 50 PIP. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 33	Curva de $\Delta P$ de la bomba por etapas para 2333 RPM y 90 PIP. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 34	Curva de $\Delta P$ de la bomba por etapas para 2333 RPM y 50 PIP. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 35	Curva de $\Delta P$ de la bomba por etapas para 2333 RPM y 90 PIP. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 36	Curva de $\Delta P$ de la bomba por etapas para 3500 RPM y 50 PIP. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 37	Curva de $\Delta P$ de la bomba por etapas para 3500 RPM y 90 PIP. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 38	Curvas de altura dinamica para 40, 50 y 55 Hertz. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 39	Curvas de potencia al freno para 40, 50 y 55 Hertz. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 40	Curvas eficiencia para 40, 50 y 55 Hertz. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	

## NOMENCLATURA

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
$A$	área, mts <sup>2</sup>
$API$	gravedad (°API)
$BCP$	bomba de cavidades progresivas
$BES$	bomba electrosumergible
$c'$	constante de la ecuación de estado
$C$	Coefficiente de masa aparente
$C_D$	Coefficiente de Arrastre
$d$	diámetro, (cms)
$d_m$	diámetro medio de la burbuja, (mm)
$D_H$	diámetro hidráulico (mts)
$E$	energía específica, trabajo específico
$f$	factor de fricción de Moody
$f_{am}$	fuerza debida a masa aparente
$f_b$	factor de fricción de Blasius
$f_{Basset}$	fuerza de Basset
$f_c$	factor de fricción en un canal curvo
$f_{Drag}$	fuerza de arrastre
$f_r$	factor de fricción en un canal en rotación
$\bar{F}_s$	fuerzas superficiales
$g$	constante gravitacional
$GLR$	Relación gas líquido = caudal de gas/caudal de líquido
$GOR$	Relación gas petróleo
$GPMA$	tasa de flujo volumétrica de aire, galones/minuto
$GPMW$	tasa de flujo volumétrica de agua, galones/minuto
$h$	entalpía, pérdida de altura
$HP$	caballos de fuerza
$H$	altura dinámica

Hz	frecuencia (Hertz)
$\Delta H$	pérdidas de altura dinámica
$H_{Euler}$	Altura dinámica de Euler, (mts)
$IP$	índice de productividad
$k$	constante del factor de fricción
$\dot{M}$	flujo másico (Kg/ m <sup>3</sup> )
$\bar{M}$	momentum angular
$M_z$	momentum con respecto al eje vertical
$MW$	peso molecular
$N_{crit}$	número de Reynolds crítico
$N_{Re}$	número de Reynolds
$N_{Re,\Omega}$	número de Reynolds basado en la velocidad angular
$NSTG$	número de etapas
$P$	presión, (Kg/cm <sup>2</sup> , Kpa, psig), Potencia (W, KW,HP)
$PIP$	presión de entrada a la bomba, psig
$PIT$	temperatura de entrada a la bomba, (°F, °C)
$P_s$	presión de inestabilidad
$(\Delta P)_{1\phi,t}$	incremento teórico de presión sólo líquido
$(\Delta P)_{2\phi,t}$	incremento teórico de presión bifásico
$Q$	tasa de flujo (m <sup>3</sup> /s)
$Q_o$	caudal de petróleo (BPD)
$r$	distancia radial desde el centro del eje de la bomba, (cm)
$r_b$	radio de la burbuja, pies, cm o pulgadas
$R$	factor multiplicador del factor de fricción
$RGM$	relación gas mezcla, %
$RGL$	relación gas-líquido
$RPM$	revoluciones por minuto
$s$	radio de deslizamiento
$S$	velocidad de deslizamiento
$T$	temperatura (°F, °C); torque (Nm)
$U$	velocidad periférica, pies/s

$V$	velocidad absoluta, mts/s
$W$	velocidad relativa al impulsor, mts/s
$z$	factor de compresibilidad; coordenadas del impulsor o difusor
$Z$	número de álabes

## SÍMBOLOS GRIEGOS

Símbolo	Descripción
$\alpha$	fracción de vacío, ángulo entre $U$ ideal y $V$
$\alpha'$	ángulo entre trayectoria actual de flujo y $U$
$\beta$	ángulo entre $U$ ideal y $W$
$\beta'$	ángulo entre $U$ actual y $W$
$\sigma$	factor de deslizamiento; tensión superficial
$\gamma$	peso específica; exponente adiabático para el gas
$\epsilon$	relación de los radios del impulsor a la entrada y la salida
$\rho$	densidad, lbm/pies <sup>3</sup>
$\eta$	eficiencia
$\mu$	viscosidad
$\omega$	velocidad angular del impulsor(RPM, rad/seg)
$\lambda$	relación entre holgura y la longitud del canal del impulsor
$\phi$	coeficiente de flujo = (tasa de flujo total ) / ( $A_2 U_2$ ); ángulo de cono del impulsor
$\phi_T$	coeficiente de flujo ideal
$\phi_{T\sigma}$	coeficiente de flujo tomando en cuenta el deslizamiento
$\phi_{T\eta}$	coeficiente de flujo en el punto de mejor eficiencia
$\Psi$	coeficiente de altura = (altura dinámica desarrollada) / ( $U_2^2 / g$ )
“	pulgadas

## SUBÍNDICES

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
1	condiciones a la entrada
2	condiciones a la salida
<i>a</i>	aire
<i>a – w</i>	mezcla agua - aire
<i>bep</i>	punto de mejor eficiencia
<i>B</i>	denotación del factor de fricción de Blasius
<i>c</i>	crítico
<i>d</i>	disco
<i>df</i>	fricción de disco
<i>D</i>	petróleo muerto
<i>eq</i>	equivalente
<i>Euler</i>	Euler
<i>f</i>	fricción
<i>g</i>	gas
<i>i</i>	cualquier punto del impulsor; <i>i</i> = 1 y 2 denotan entrada y salida respectivamente
<i>in</i>	succión, entrada
<i>l</i>	laminar, volumetricas
<i>L</i>	líquido
<i>m</i>	componente meridional; valor medio
<i>M</i>	mezcla
<i>pub</i>	valores publicados
<i>r</i>	componente radial; canal en rotación
<i>s</i>	punto de cero pérdidas por choque; tubería recta
<i>st</i>	condiciones estables
<i>t</i>	flujo turbulento
<i>tp</i>	bifásico
<i>T</i>	total

<i>U</i>	circunferencial
<i>u</i>	componente periférica
<i>v</i>	volumétrico
<i>w</i>	agua

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Generalidades**

Los estimados actuales de las reservas disponibles de crudos pesados y extrapesados en la faja del Orinoco han motivado la búsqueda del mejor método de levantamiento artificial que se traduzca en un mínimo costo y máxima producción. Las características de estos yacimientos entre las que podemos mencionar sus altas permeabilidades (excelente afluencia), altos índice de productividad (IP mayores de 1,5 BPD/Lpc) y su potencial promedio de 500 BPD, (se espera incrementar a 2.500 BPD) presentan un panorama atractivo para la aplicación de la tecnología de perforación horizontal. Sin embargo, desde el punto de vista técnico-económico se presentan dos opciones para la producción de estos pozos: el bombeo por balancín y el bombeo de cavidades progresivas. Al incrementarse los caudales a manejar el bombeo electrosumergible (BES) surge como tercera opción posible no sin antes considerar las características particulares de estos yacimientos.

El bombeo por balancín es el método de levantamiento más antiguo y el más utilizado mundialmente. Dada la simplicidad y lo robusto del sistema, es posible su aplicación en casi todos los tipos de pozos que requieren de un método artificial de levantamiento. Sin embargo, existen límites físicos para su aplicación como la profundidad y los caudales.

Las bombas de cavidades progresivas (BCP) son máquinas rotativas de desplazamiento positivo, que funcionan bajo el principio de Moinea. Gracias a sus características de funcionamiento, la bomba suministra el caudal de manera uniforme. Los principales elementos de una BCP, son el rotor metálico y el estator, que generalmente es fabricado en elastómero. Tanto el rotor como el estator poseen geometría helicoidales. Al colocar el rotor dentro del estator se forman espacios vacíos que constituyen las cavidades independientes. Al girar el rotor, las cavidades describen un movimiento helicoidal que permite el traslado del fluido de la succión a la descarga.

## **1.2 Motivación**

Las bombas electrosumergibles (BES) se han utilizado en la industria petrolera desde 1928 como método de levantamiento artificial [1]. Estas bombas de subsuelo pueden manejar tasas de flujo de 300 hasta 25.000 barriles por día (BPD). La aplicación de este método está limitada por las altas temperaturas, altas relaciones gas-líquido (RGL), manejo de arenas y la capacidad de transmitir suficiente energía a la bomba. Entre las ventajas principales de las BES se incluyen la fácil aplicación en pozos desviados, horizontales y bajo costo de operación en altos volúmenes de producción.

## **1.3 Planteamiento del problema**

Uno de los problemas del uso de BES en crudos pesados es la falta de información sobre el comportamiento de la BES con fluidos viscosos. Actualmente, los fabricantes a nivel mundial, se limitan a proveer las curvas de comportamiento de BES para frecuencias de rotación de 60 Hz ó 50 Hz con agua como fluido de trabajo. Con estas especificaciones se puede estimar las curvas de comportamiento para otra frecuencia de rotación y con fluidos de baja viscosidad a la presión y temperatura in situ.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

El objetivo del presente trabajo es realizar las modificaciones y adaptaciones generales del circuito de levantamiento, para la ejecución de las pruebas con bombas

electrosumergibles inter-etapas, utilizando fluido monofásico. Esto como fase inicial para posteriores trabajos de investigación con fluidos bifásico viscoso.

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Revisión bibliográfica de los trabajos previos asociados a las bombas electrosumergibles.
- Instrumentación de sección principal de la bomba modelo GC2900 de la firma Centrilift.
- Adecuación del circuito y equipos de medición.
- Planificar y ejecutar ensayos de laboratorio con una bomba electrocentrífuga de flujo mixto (GC2900 de 35 etapas) y generar las curvas de altura dinámica, potencia al freno y eficiencia en función del caudal.
- Análisis de datos experimentales, emisión de conclusiones y recomendaciones.
- Elaboración de informe final.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Principios de bombeo monofásico

Antes de entrar en materia, es importante tener un conocimiento básico del funcionamiento de las turbomáquinas. Por lo tanto, se dedicará un capítulo en hacer un repaso breve de los principios básicos que rigen el funcionamiento de estas máquinas. Las bombas centrífugas son un subgrupo de las turbomáquinas. Su función es transformar la energía mecánica en hidráulica. Las bombas están diseñadas para manejar líquido y por lo general manejan sólo líquido. Cuando manejan una mezcla bifásica (líquido - sólido o líquido - gas), se hace difícil conocer su desempeño. El modelaje del desempeño bifásico en una bomba se basa en el entendimiento del comportamiento en condiciones de flujo monofásico con sus respectivas modificaciones para ajustar la condición bifásica. Se hará un resumen de los fundamentos del bombeo centrífugo monofásico aplicados a las BES.

La turbobomba consta de dos partes principales: un impulsor, que imparte un movimiento giratorio al líquido, y el alojamiento o carcasa de la bomba, que dirige el líquido hacia la región del impulsor y lo transporta hacia la salida a alta presión. El impulsor está montado sobre un eje y en la mayoría de los casos recibe su energía de un motor eléctrico. El alojamiento incluye las toberas de succión y de descarga y contiene la unidad impulsora. La porción del alojamiento que rodea al impulsor se denomina caja espiral. El líquido entra por la boquilla de succión al ojo del impulsor y viaja a lo largo del cárter, adquiriendo un movimiento de rotación a causa de los álabes del impulsor. El líquido sale por la periferia de la caja espiral del alojamiento a una presión más alta hacia la tobera de descarga. Algunos impulsores de succión única son abiertos, sin el cárter frontal. En los impulsores de doble succión el líquido entra por ambos lados.

### 2.1.1 Clasificación de las bombas centrífugas

Las bombas pueden clasificarse según la curvatura de los álabes y la dirección a la cual sale el flujo del impulsor. En general, las turbobombas se clasifican en bombas de flujo radial, mixto y axial

En las bombas de flujo radial, el fluido entra en dirección paralela al eje y sale en dirección perpendicular al mismo. En el caso de las bombas de flujo mixto, a medida que el impulsor se ensancha, los álabes adquieren una doble curvatura, torciéndose en el extremo de succión. Estas bombas empujan líquidos con un menor aumento de presión que las de flujo radial. Las bombas de flujo axial se caracterizan porque el flujo entra y sale de la región del impulsor en dirección paralela al eje de la flecha. Comúnmente, estas bombas suministran fluido con un aumento de presión relativamente bajo.

## **2.2. Bombeo electrosumergible.**

El bombeo electrocentrífugo es un sistema de levantamiento artificial que consta básicamente de una bomba centrífuga de varias etapas, cuyo eje esta conectado

directamente, a través de una sección protectora, a un motor eléctrico sumergible que por lo general, es de dos polos, trifásico, de jaula de ardilla tipo inducción con velocidad relativamente constante de  $3600 \pm 100$  RPM a una frecuencia de 60 Hertz.

Generalmente, este sistema de levantamiento, a pesar de no tener limitación en la profundidad de asentamiento, es considerado para volúmenes relativamente altos, aplicables a yacimientos cuyo mecanismo de producción es el empuje hidráulico con baja relación gas petróleo (GOR). El éxito del buen funcionamiento de estos equipos dependen de un buen diseño y de las operaciones de instalación y arranque.

## 2.2.1 Equipos de subsuelo

### 2.2.1.1 Motor

Los motores eléctricos usados por el sistema de bombeo electrosumergible son de dos polos, tres fases, tienen jaula de ardilla y son del tipo de inducción. La velocidad de estos motores es de 3500 RPM a una frecuencia de 60 Hertz. Los motores se llenan con un aceite mineral de elevada resistencia dieléctrica y que ha sido altamente refinado, el cual también actúa como lubricante de los cojinetes. El motor está compuesto por un estator bobinado con alambre de cobre, del tipo “Jaula de Ardilla”, el cual va conectado al suministro eléctrico y un conjunto de rotores de longitudes de 30 a 46 cm (12 a 18 pulgadas), los cuales se montan dentro del estator del motor. La potencia requerida se alcanza simplemente incrementando la longitud del motor. La potencia máxima de un arreglo es de 1000 HP. La velocidad de operación es de 3500 RPM a 60 Hertz y 2915 RPM a 50 Hertz. Están disponibles en una amplia gama de voltajes (230 a 4000 V) y consumo de corriente (15 a 143 A). Los montajes en serie alcanzan longitudes hasta 30 mts (100 pies).

La unidad se encuentra suspendida de la tubería de producción, sumergida en el fluido del pozo y conectada hasta la superficie a través de un cable trifásico que le suministra la energía eléctrica al motor. El cable conductor es sujetado al equipo y a la tubería de producción mediante flejes metálicos flexibles.

### 2.2.1.2 Protector

El conjunto motor-protector-bomba, tiene un acoplamiento continuo que se logra mediante ejes de conexión estriados, los cuales tienen como finalidad hacer rotar el protector y la bomba al girar el eje del motor. El protector cuya función principal es aislar al motor del fluido del yacimiento, también hace la función de un reservorio de aceite y sirve de cámara de equilibrio, permitiendo la expansión y contracción del aceite del motor debido a calentamiento y enfriamiento durante el arranque y la parada. De esta manera, logra equilibrar la presión interna del motor con la del fondo del pozo. En el protector se alojan los cojinetes de empuje, los cuales absorben las cargas axiales de la bomba impidiendo que estas se reflejen en el motor, ocasionándole daño. Existen dos tipos principales de protector: el tipo laberinto y el tipo positivo con bolsa.

### 2.2.1.3 Bomba Centrífuga

Las bombas del sistema de bombeo electrosumergible, son del tipo centrífugo y multietapas. Cada etapa de una bomba consta de un impulsor rotatorio y de un difusor estacionario (figura 1). La transferencia de energía al fluido se lleva a cabo cuando el impulsor está rotando y le imparte al líquido un movimiento de rotación. En realidad, el movimiento transmitido por el impulsor al fluido, tiene dos componentes: una es en dirección radial desde el centro del impulsor hacia fuera (fuerza centrífuga) y la otra es en dirección tangencial al diámetro externo del impulsor. La dirección real que tendrá el flujo del fluido, será la resultante entre estas dos componentes. Entre las características más importantes de las BES, destacan: amplia gama de tasas de flujo (300 a 25.000 barriles/día para agua); longitudes entre 1 y 7 mts (3 y 24 pies); para aplicaciones a gran profundidad, los impulsores son del tipo flotante o balanceado; el número de etapas determina la potencia requerida por la bomba, la presión máxima que soporta la carcasa, la capacidad de carga del cojinete de empuje axial y el torque máximo del eje. Los difusores usados en las bombas de aplicaciones petroleras son ineficientes en convertir la energía cinética en

presión estática. Sin embargo, sí ayudan a minimizar las pérdidas al guiar el fluido a la siguiente etapa.

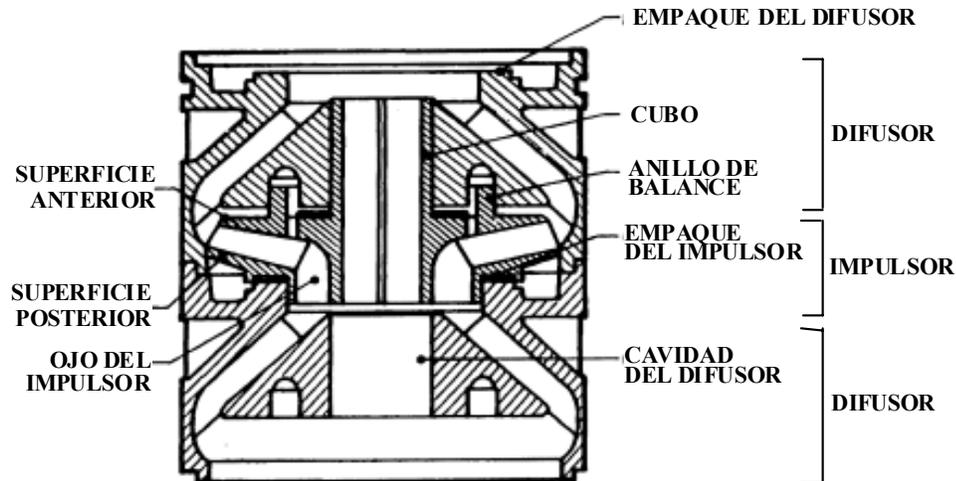


Figura 1 Ensamblaje característico de un arreglo impulsor – difusor

#### 2.2.1.4 Separador

La función del separador, es la de desgasificar los fluidos de la formación antes de la succión de la bomba, para que la bomba maneje menor cantidad de gas libre. Existen tres tipos de separadores: estático, de flujo inverso y centrífugo o rotatorio.

#### 2.2.1.5 Sensor de Fondo

El sensor de presión, es un equipo que se coloca acoplado en la parte final del motor; esta constituido internamente por circuitos que permiten enviar señales a la superficie, a través del cable de voltaje primario de alimentación al motor, esta señal es registrada mediante un instrumento instalado en el panel de superficie, convirtiéndose estas en señales de presión de fondo a la profundidad de operación de la bomba.

### 2.2.1.6 Cable

La potencia es suministrada al motor eléctrico a través del cable eléctrico. El cable puede ser redondo o plano, de cobre o de aluminio con aislamiento y protección contra golpes y rozaduras. Algunos están provistos de armaduras de acero o bronce. En general, se prefiere el cable de cobre por presentar mejores características de resistencia a la corrosión y de conductividad a la electricidad. Comercialmente se dispone de tipos de cable eléctrico: el de sección transversa redonda y el plano. Generalmente, se prefiere usar el cable redondo debido a que ofrece mayor resistencia mecánica y química. Adicionalmente, el cable plano puede producir perturbación del amperaje del sistema, lo cual no se presenta en el caso del cable redondo, motivado a su simetría. El cable plano se utiliza preferiblemente cuando el espacio entre el revestidor y la tubería de producción no permite usar el cable redondo. Su selección depende del consumo de corriente, la caída de voltaje, el espacio disponible en el anular formado entre la tubería de producción y el revestidor y la temperatura en fondo de pozo. Entre las características más importante de los cables, se encuentran: amplia gama de conductores de acuerdo a los requerimientos del motor y son resistentes a altas temperaturas (200 °C).

### 2.2.1.7 Otros equipos de subsuelo

Otros equipos de subsuelo se muestran en la figura 2, incluyen la válvula de retención, la válvula de drenaje y los centralizadores. Los centralizadores, como su nombre lo indica, permiten centrar la bomba y el motor en el pozo, de manera que haya enfriamiento uniforme alrededor de este último y también evitar el daño al cable. La válvula de retención, localizada entre 23 y 27 mts (75 y 90 pies) encima de la bomba, evita que el fluido que está en la tubería de producción regrese a la bomba cuando se apaga haciendo que gire en reverso. Si la bomba se acciona cuando gira en reverso puede causar recalentamiento del cable o rotura del eje. La válvula de drenaje se coloca a unos 9 mts (30 pies) encima de la válvula de retención y permite purgar la tubería de producción cuando se saca del pozo.

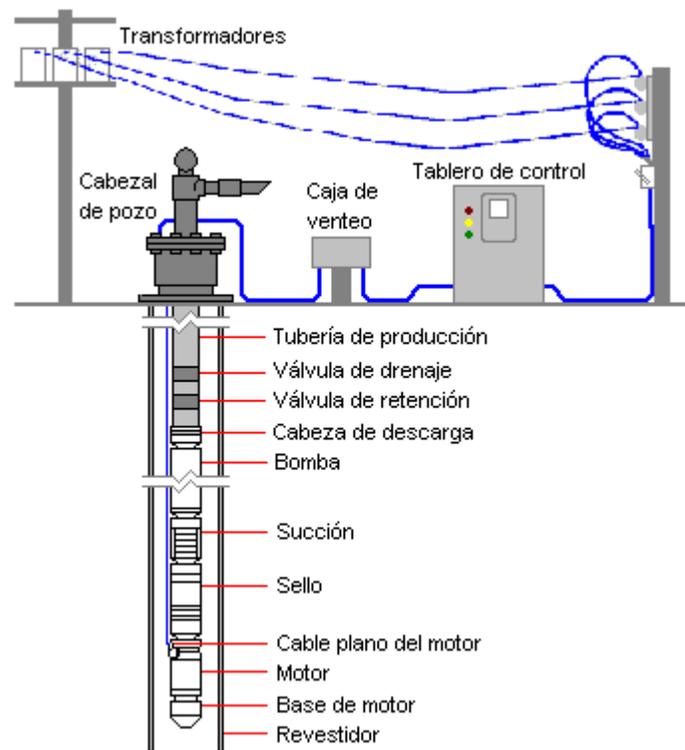


Figura 2 Instalación característica de las BES

## 2.2.2 Equipos de superficie

### 2.2.2.1 Cabezal

Los cabezales usados en los sistemas de bombeo electrosumergible además de cumplir con las funciones de permitir el control del pozo, colgadores de la tubería de producción y conexión para la línea de flujo, debe proveer sello hidráulico eficaz alrededor del cable eléctrico. Los penetradores y cables de conexión especiales son los elementos utilizados para realizar conexiones rápidas y seguras a través del cabezal.

### 2.2.2.2. Caja de unión o venteo.

El gas del pozo puede viajar a la superficie hasta el tablero de control del motor eléctrico o el variador de frecuencia, a través del cable eléctrico, causando peligro de

explosión o fuego. La caja de unión o venteo, elimina este peligro al permitir una conexión segura y ventear el gas que haya podido viajar por el cable.

#### 2.2.2.3 Tablero de control del motor

Provee los medios para la activación/desactivación del motor eléctrico y provee también de protección eléctrica del cable y del motor. Este tipo de sistema no permite variar la velocidad del motor, en sistemas de 60 Hertz esta velocidad es de 3500 RPM. Dependiendo el modelo, un tablero de control del motor eléctrico puede realizar las siguientes funciones:

- Detectar condiciones de sobrecarga o de baja carga y desactivar el motor;
- Activar automáticamente después de una desactivación por baja carga;
- Medición del consumo de corriente del motor;
- Activar o desactivar desde una estación remota;
- Detección de condiciones anormales de tensión de entrada y desactivar del motor;
- Medición y registro de las condiciones funcionales del motor para efectos de diagnóstico de fallas.

#### 2.2.2.4 Controlador de frecuencia variable

La velocidad del motor eléctrico depende directamente de la frecuencia de la tensión de alimentación. Cuando se requiera variar a voluntad la velocidad del motor, es necesario instalar un controlador de frecuencia variable, el cual es de mayor grado de sofisticación que el tablero de control. Este sistema requiere de transformadores secundarios. El controlador de frecuencia variable tiene las mismas funciones que el tablero de control convencional, la diferencia principal entre ellos radica en que este tipo de controlador permite modificar la velocidad del motor por medio de la variación de la frecuencia del voltaje de alimentación, lo que a su vez permite un arranque suave del motor

eléctrico. Los cambios de velocidad ocasionan efectos sustanciales en las curvas características de las bombas y se rigen por las leyes de afinidad. Entre las aplicaciones más frecuentes de los controladores de frecuencia variable, se pueden mencionar las siguientes: pozos nuevos que no poseen data confiable y que requieren pruebas; pozos en condiciones inestables; optimización del sistema de producción; pozos con exceso de gas libre a nivel de la bomba; pozos arenosos; pozos con baja presión.

#### 2.2.2.5 Transformadores secundarios

Los transformadores secundarios solo se requieren cuando el sistema BES está equipado con controladores de frecuencia variable. Son usados para convertir la tensión de salida del controlador al valor requerido por el motor eléctrico y para compensar las pérdidas de tensión debidas a la longitud del cable eléctrico.

### 2.3 Triángulos de Velocidad

El entendimiento de los triángulos de velocidad es esencial para el desarrollo de la curva caudal – altura en una bomba centrífuga. El triángulo lo componen tres velocidades:

1. La velocidad absoluta  $V$  respecto a un eje de referencias fijo.
2. La velocidad relativa al impulsor  $W$ .
3. La velocidad periférica del fluido  $U$ .

La velocidad periférica está definida como:

$$U_i = \omega r_i \quad (2-1)$$

donde,  $i = 1$  y  $2$  para la entrada y salida respectivamente. Las velocidades se relacionan de la siguiente manera:

$$\vec{V} = \vec{U} + \vec{W} \quad (2-2)$$

Es importante señalar que todas estas velocidades son valores promedios de todos los vectores de velocidad contenidos en la sección normal a la dirección del flujo en un punto específico, esto es una aproximación del modelo unidimensional y no ocurre así en flujo de líquidos a través de una bomba. Si estos tres vectores de velocidad se representan gráficamente, formarían un triángulo. Para flujo unidimensional, ideal y monofásico las velocidades del triángulo son función de la geometría del impulsor, velocidad angular y el flujo másico.

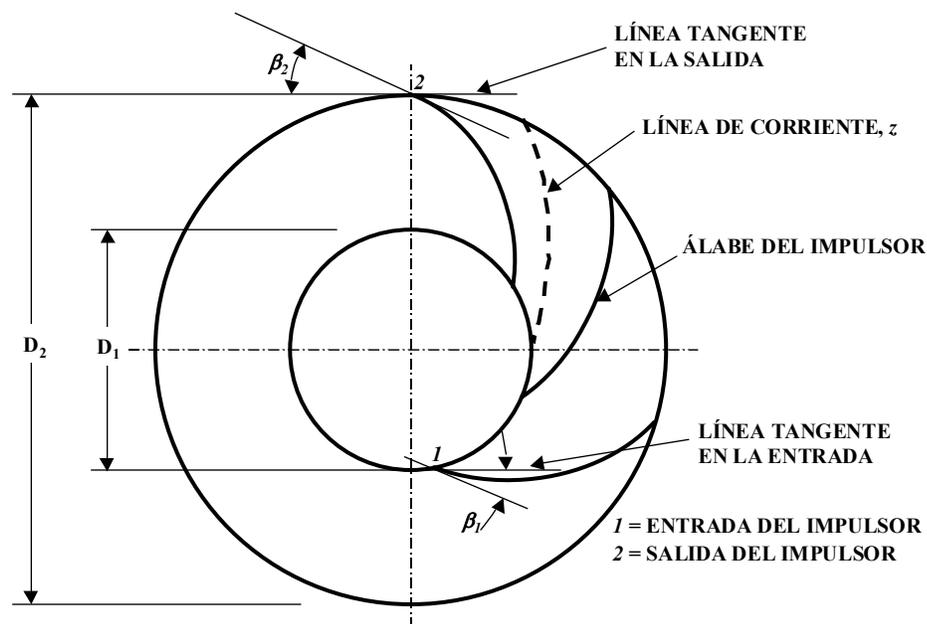


Figura 3 Nomenclatura del impulsor

En la figura 3, se muestra una vista de un impulsor en la que se pueden distinguir las medidas geométricas del impulsor. En la figura 4, se representa el triángulo de velocidades en la entrada del impulsor, mientras que en la figura 5, el de salida. En el caso de flujo ideal, el ángulo  $\beta_1$  comprendido entre la velocidad  $W$  y  $U$  en la figura 4 y 5 es el mismo que forma la tangente al perfil del impulsor y la dirección de la velocidad periférica (perpendicular al radio), como se destaca en la figura 3. La componente radial o meridional de la velocidad absoluta  $V$  es  $V_{r1}$ . De igual manera,  $V_{u1}$  y  $W_{u1}$  son las componentes

tangenciales de  $\vec{V}$  y  $\vec{W}$ , respectivamente. La Figura 6 muestra la trayectoria absoluta del fluido con respecto a la relativa que está determinada por el perfil de los álabes del impulsor.

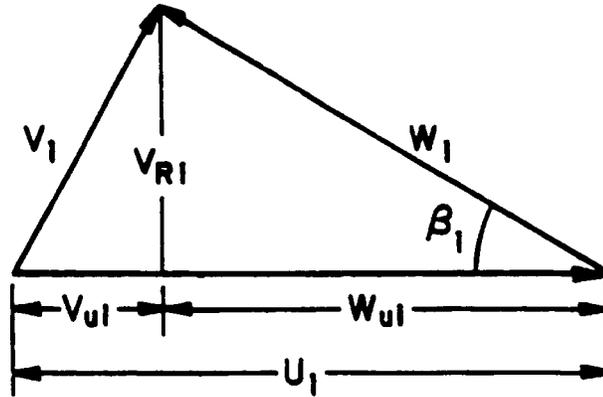


Figura 4 Triángulo de velocidades ideales a la entrada del impulsor

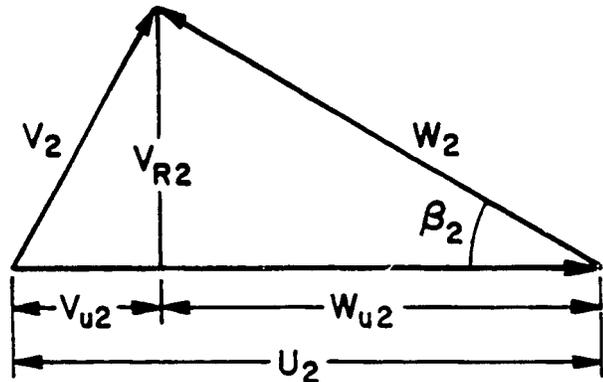


Figura 5 Triángulo de velocidades ideales a la salida del impulsor

En flujo unidimensional se supone que el fluido tiene una dirección y sigue una trayectoria paralela a las líneas de corriente y a su vez son paralelas al perfil del álabe. Por consiguiente, se considera que no hay variación de velocidad en otra dirección, lo que implica que la velocidad es igual para todas las partículas que pertenezcan a una sección transversal a la trayectoria antes descrita. Esto, desde luego, no es cierto, pues el flujo a través del impulsor es mucho más complejo. Se sabe que existe recirculación en el impulsor, pero debido a la falta de conocimiento del fenómeno en dos fases, no es factible el enfoque bidimensional.

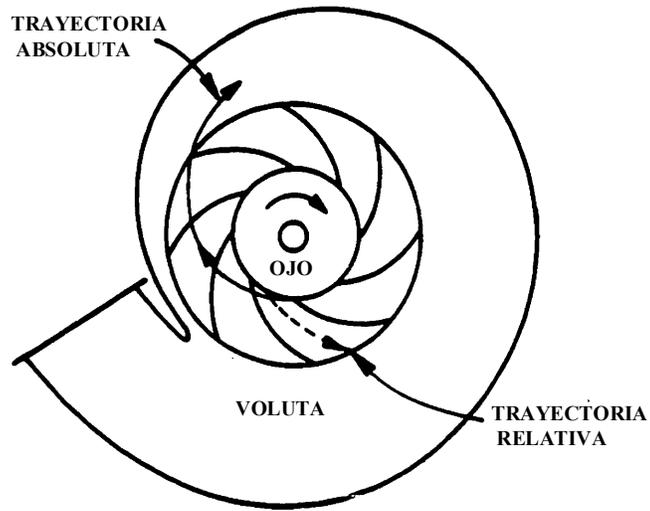


Figura 6 Trayectoria absoluta y relativa en el impulsor

## 2.4 Conservación de Masa

La forma general de la ecuación de continuidad es:

$$\dot{M} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V.C} \rho dV + \int_{S.C} \rho_L \vec{V}_{mi} d\vec{A} \quad (2-3)$$

donde  $i$  representa cualquier punto a lo largo del radio del impulsor. Para flujo estable unidimensional, la ecuación (2-3) se reduce a:

$$\dot{M} = 2 \rho_L \pi r_i h_i V_{mi} \quad (2-4)$$

Esto implica que el flujo se distribuye uniformemente entre los conductos del impulsor, de manera que lo que suceda en un conducto aplica para el resto de los mismos. Las dimensiones  $r_i$  y  $h_i$  se obtienen de la geometría del impulsor, radio del impulsor y la profundidad del alabe, respectivamente. La velocidad periférica se calcula con la ecuación

(2-1). La velocidad absoluta  $V_{mi}$  se halla usando la ecuación (2-2) e introduciendo el caudal de entrada a la bomba.

## 2.5 Ecuación de Energía

El balance de energía para una bomba centrífuga es como se expresa en la ecuación:

$$\begin{array}{rcccl} \text{Energía a} & & \text{Transferencia} & & \text{Energía a} & & \text{Trabajo} \\ \text{la entrada} & + & \text{de calor} & = & \text{la salida} & + & \text{realizado} \\ \text{del impulsor} & & & & \text{del impulsor} & & \end{array}$$

(2-5)

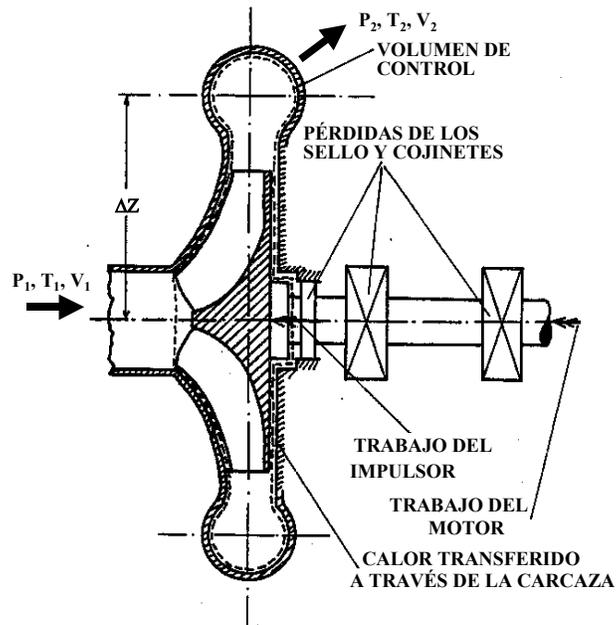


Figura 7 Volumen de control para una bomba

En la figura 7, se muestra el volumen de control para una bomba donde se tiene como condición de entrada un fluido con energía en forma de presión, temperatura, velocidad y altura estática. Luego, se aplica trabajo mecánico al fluido en el volumen de control por medio del arreglo motor – bomba y a su vez ocurre una transferencia de calor de la bomba al fluido y de la bomba al medio ambiente a menor grado. En la salida, se tiene un fluido con más energía. La ecuación de balance de energía para flujo unidimensional es:

$$\frac{V_1^2}{2} + Z_1 g + e_1 + \frac{P_1}{\rho_L} + q = Z_2 g + e_2 + \frac{P_2}{\rho_L} + \frac{V_2^2}{2} + TRABAJO \quad (2-6)$$

donde los subíndices 1 y 2 se refieren a la entrada y salida respectivamente. La ecuación (2-6) se puede escribir en función de la entalpía:

$$\frac{V_1^2}{2} + Z_1 g + h_1 + q = Z_2 g + h_2 + \frac{V_2^2}{2} + TRABAJO \quad (2-7)$$

Para bombas, el término de energía potencial ( $Z_i g$ ,  $i = 1,2$ ) puede ser omitido aunque en el caso de bombas verticales multietapas debe ser considerado. La ecuación (2-7) puede ser escrita en términos de trabajo específico ( $E$ ):

$$\frac{V_1^2}{2} + h_1 + q = h_2 + \frac{V_2^2}{2} + E \quad (2-8)$$

Para las bombas, el término  $E$  es negativo ya que la energía entra al sistema. Sin embargo, en las turbinas este término es positivo.

## 2.6 Ecuación de Momemtum

Las ecuaciones de cantidad movimiento se usan en aplicaciones de turbomáquinas. La ecuación de cantidad de movimiento expresa que la suma de todos los momentos de torsión que actúan sobre el volumen de control (vc) es igual a la rapidez con que cambia el momento angular dentro del volumen de control más la rapidez con que fluye el momento angular a través del volumen de control. Se expresa en la siguiente ecuación:

$$\vec{r} \vec{F}_s + \int_{vc} \vec{r} \vec{g} \rho dV + \vec{T}_{flecha} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \vec{r} \vec{V} \rho dV + \int_{sc} \vec{r} \vec{V} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (2-9)$$

donde,  $SC$  es la superficie de control para flujo estacionario, unidimensional e incompresible. Para el estudio de una bomba centrífuga, conviene tomar como  $VC$  fijo el rotor. Como aproximación, los momentos de torsión debido a fuerzas superficiales pueden despreciarse. La contribución a fuerza volumétrica también puede despreciarse por simetría. De este modo, para flujo estacionario, la ecuación (2-9) se reduce a:

$$\vec{T}_{eje} = \int_{SC} (\vec{r} \times \vec{V}) \rho \vec{V}_{xyz} d\vec{A} \quad (2-10)$$

El sistema de coordenadas más conveniente es aquel cuyo eje  $z$  se alinea con el eje de rotación de la máquina. El lado derecho de la ecuación (2-10) es la suma de los productos de  $\vec{r} \times \vec{V}$  por los gastos másicos correspondientes en cada sección. Para un flujo uniforme que entra al rotor en 1 y sale en 2, la ecuación (2-10) se reduce a:

$$\vec{T}_{eje} \hat{k} = (r_2 V_{U_2} - r_1 V_{U_1}) \dot{m} \hat{k} \quad (2-11)$$

y, finalmente, en forma escalar:

$$T_{eje} = (r_2 V_{U_2} - r_1 V_{U_1}) \dot{m} \quad (2-12)$$

Las velocidades que aparecen en la ecuación (2-12) son las componentes tangenciales de la velocidad absoluta que cruza la superficie de control. Esta ecuación permite calcular el par aplicado al volumen de control para conseguir un cambio en el momento angular del flujo. Esta ecuación es la relación básica entre el momento de torsión y la cantidad de movimiento angular para todo tipo de turbomáquinas como las turbinas, bombas y compresores. La potencia en el eje está determinada por la siguiente ecuación:

$$P_{eje} = T \omega \quad (2-13)$$

Las ecuaciones (2-12), (2-13) y (2-1) se combinan para obtener:

$$P = \dot{m} (V_{U_1} U_1 - V_{U_2} U_2) \quad (2-14)$$

Si se divide la ecuación (2-14) entre el flujo másico, se obtiene la energía específica entregada al fluido.

$$E = V_{U_1} U_1 - V_{U_2} U_2 \quad (2-15)$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación de Euler de las turbomáquinas.

## 2.7 Altura de Bombeo Ideal

La energía transferida al fluido cuando atraviesa el impulsor es obtenida de la ecuación (2-15):

$$gH_{Euler} = -E = (U_2 V_{u2} - U_1 V_{u1}) \quad (2-16)$$

La altura  $H$  es la altura ideal que no toma en cuenta las pérdidas. Es común suponer que el fluido entra sin pre-rotación, por lo tanto,  $V_{u1} = 0$ . La ecuación de Euler se reduce a:

$$H_{Euler} = \frac{U_2 V_{u2}}{g} \quad (2-17)$$

Usando las relaciones geométricas de los triángulos de velocidades:

$$W_2^2 = V_2^2 + U_2^2 - 2U_2 V_2 \cos \alpha_2 \quad (2-18)$$

y

$$W_1^2 = V_1^2 + U_1^2 - 2U_1 V_1 \cos \alpha_1 \quad (2-19)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2-18) y (2-19) en la ecuación (2-17), se obtiene:

$$H_{Euler} = \frac{1}{2g} \{ (V_2^2 - V_1^2) + (U_2^2 - U_1^2) + (W_2^2 - W_1^2) \} \quad \dots(2-20)$$

Stephanoff explica el significado de los términos de la ecuación (2-20). El primer término representa el aumento de energía cinética del fluido que atraviesa el impulsor. El segundo y tercero representan el incremento de la presión estática ideal del fluido.

La ecuación para el cambio de entropía ( $s$ ) es:

$$ds = dh - \frac{dP}{\rho} \quad \dots(2-21)$$

Para un proceso isentrópico e incompresible, se integra la ecuación (2-21) obteniéndose:

$$h_2 - h_1 = \frac{P_2 - P_1}{\rho_L} \quad \dots(2-22)$$

Combinando las ecuaciones (2-22) y (2-8):

$$H_{Euler} = \frac{1}{g} \left\{ \frac{P_2 - P_1}{\rho_L} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right\} + U_2 - U_1 - q \quad \dots(2-23)$$

Al comparar la ecuación (2-23) con la (2-20), se aclara el significado de los términos en la ecuación (2-20). Es interesante destacar que para la mayoría de las bombas, a cero caudal, el aumento de presión estática expresado en altura dinámica está a menos del 5% de error del valor  $U_2^2/g$ .

## 2.8 Altura de Bombeo

Considerando el Teorema de Bernoulli para describir el cambio de energía de un fluido incompresible que fluye a través de dos puntos (2-24):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2-24)$$

Multiplicando la ecuación (2-24) por el peso del fluido. La ecuación de Bernoulli puede ser escrita como:

$$m g Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2} = m g Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2} \quad (2-25)$$

El primer término no es mas que la energía potencial del fluido y el segundo término la energía cinética.

$$\gamma = g \rho \quad (2-26)$$

y

$$ge = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (2-27)$$

Utilizando la ecuación de energía y sustituyendo las ecuaciones (2-26) y (2-27) en la ecuación (2-25), se obtiene:

$$H = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (2-28)$$

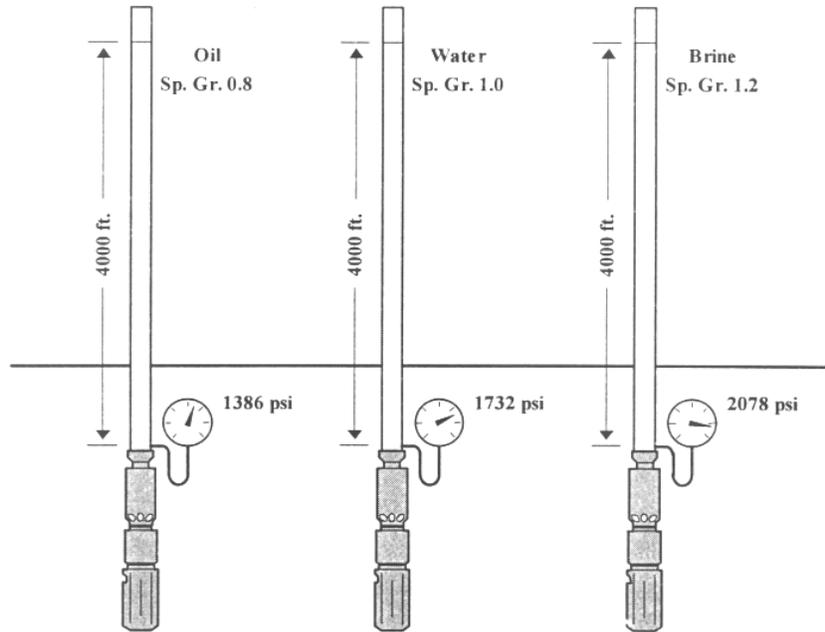


Figura 8 Presión de descarga de la bomba vs altura dinámica para diferentes fluidos

En el caso de bombas centrífugas el parámetro  $H$  se conoce como altura dinámica y tiene la gran ventaja de ser constante independientemente de la densidad del líquido como se desprende de la ecuación (2-28). Debido a que las bombas electrosumergibles son multietapa, la altura dinámica se expresa por etapa y finalmente la ecuación (2-28) toma la forma:

$$H = \frac{\Delta P}{n \gamma} \quad (2-29)$$

### 2.7.1 Efectos del ángulo del álabe en el desempeño de la bomba

El ángulo de salida del álabe influye en el desempeño de la bomba. La pendiente de la curva de altura versus caudal depende del valor de  $\beta_2$ . En aplicaciones petroleras, se usan impulsores con álaves curvados hacia atrás.

Partiendo de la forma más sencilla de la ecuación de Euler, ecuación (2-15), y usando la relación del triángulo de velocidades de la salida en la figura 5, se obtiene la siguiente relación geométrica:

$$V_{U_2} = U_2 - V_{r2} c \operatorname{tg} \beta_2 \quad (2-30)$$

sustituyendo en la ecuación (2-17), se obtiene:

$$H_{Euler} = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2 V_{r2}}{g \tan \beta_2} \quad (2-31)$$

En la ecuación (2-31),  $V_{r2}$  es proporcional al caudal, ya que éste es igual al producto de  $V_{r2}$  y el área perpendicular a la velocidad. Por lo tanto, la ecuación (2-31) representa una línea que intercepta el eje de altura de bombeo en  $U_2^2/g$  en una representación gráfica de la altura versus caudal. La pendiente de esta recta depende del valor de  $\beta_2$ . Cuando  $\beta_2 = 90^\circ$ , la curva de desempeño es una línea paralela al eje de caudal, y  $H_{Euler} = U_2^2/g = \text{constante}$ . Para  $\beta_2 < 90^\circ$ , la altura de bombeo disminuye a medida que aumenta el caudal manejado por la bomba. Con  $\beta_2 > 90^\circ$ , la altura de bombeo aumenta a medida que aumenta el caudal manejado por la bomba. En la figura 9, se muestran las curvas características de los casos mencionados. En la figura 3, se mostró un impulsor con álabes curvados hacia atrás,  $\beta_2 < 90^\circ$ , como los que se usan en la industria petrolera.

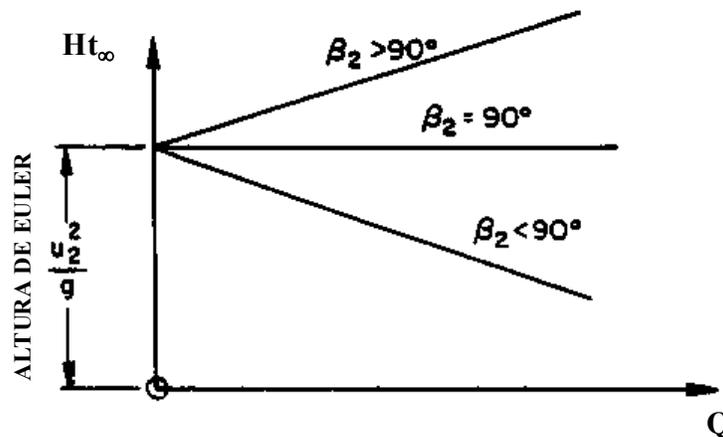


Figura 9 Curvas teóricas de desempeño para álabes curvados hacia atrás, radiales y curvados hacia adelante

## 2.9 Altura de Bombeo no Ideal

Las curvas reales de desempeño de una bomba son distintas a las que se muestran en la figura 9. La desviación del comportamiento ideal es debido a las pérdidas sufridas por el fluido y la bomba. En esta sección, se discutirán los distintos tipos de pérdidas. Los fabricantes, basados en su experiencia y ensayos específicos, han diseñado bombas cada vez más eficientes. La eficiencia de estos equipos ha mejorado desde 55% en los años 50 hasta 65 - 70% en los 80. A menudo, un enfoque unidimensional conlleva el mismo orden de exactitud que algunas técnicas multidimensionales más sofisticadas. Asimismo, se sabe que el fenómeno de bombeo bifásico es mucho más complejo que el monofásico. Estas razones son las que sugieren el desarrollo de un modelo unidimensional. Por consiguiente, en esta sección se repasarán las pérdidas que ocurren en la bomba.

Las distintas pérdidas en la bomba no han sido cuantificadas teóricamente. Todos los fabricantes de bombas de uso petrolero publican las curvas de altura versus caudal basados en ensayos experimentales. Sin embargo, a continuación se citarán algunas reseñas en las que se estudian la naturaleza y magnitudes relativas de algunas de estas pérdidas.

### 2.9.1 Rendimiento Volumétrico

Staphanoff define estas pérdidas como una pérdida de caudal a través del juego que existe entre los elementos rotantes y las partes estacionarias de la bomba. Estas pérdidas se atribuyen a:

- a) las pérdidas entre dos etapas adjuntas en bombeo multietapas;
- b) las pérdidas en el sello;
- c) las pérdidas a causa de los dispositivos de balance del empuje axial;
- d) las pérdidas debido al drenaje de alivio que tenga el sello para disminuir el empuje axial;
- e) las pérdidas al atravesar los álabes en un impulsor abierto;

f) las pérdidas debido a drenajes para enfriar cojinetes y el sello.

Debido a estas pérdidas volumétricas, la cantidad actual de líquido que fluye a través de una etapa de la bomba es la cantidad medida más las fugas ( $Q_L$ ). Si las fugas volumétricas ( $Q_L$ ) se cuantifican, entonces el rendimiento volumétrico ( $\eta_v$ ) se define como:

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + Q_L} \quad (2-32)$$

donde  $Q$  es la tasa de flujo medida en el impulsor. En la referencia de Stephanoff, se tienen unas expresiones muy aproximadas para determinar las pérdidas volumétricas causadas por fricción, pérdidas en la entrada, pérdidas de altura de bombeo debido a fugas a través del anillo de desgaste y la merma de potencia debido a pérdidas volumétricas, todas en función de la velocidad específica de la bomba.

### 2.9.2 Pérdidas en el Disco de Fricción

Estas son el resultado de la potencia adicional que se disipa en el disco de fricción y es correlacionada por Staphanoff:

$$(HP)_{df} = k \omega^3 r_d^5 \quad (2-33)$$

donde  $r_d$  es el radio del disco y  $k$  es una constante que se determina experimentalmente.

### 2.9.3 Pérdidas Mecánicas

Estas incluyen las pérdidas en el prensaestopas y los cojinetes. Se consideran pequeñas comparadas con otras pérdidas según Stephanoff y son función de la velocidad de rotación, tamaño del prensaestopas y lubricación del cojinete.

#### 2.9.4 Pérdidas Hidráulicas

Según Stephanoff, éstas se pueden tratar con un enfoque unidimensional. Son las menos conocidas y las más importantes. La naturaleza compleja del paso del flujo a lo largo de los pasajes del impulsor es el principal impedimento para comprender mejor este fenómeno. La presencia de dos fases en los canales agrava la situación. Las pérdidas hidráulicas se pueden clasificar en pérdidas por fricción, mezclado y pérdidas por separación causadas por cambios en dirección y magnitud de la velocidad del flujo (esto incluye pérdidas por difusión y choque). Las pérdidas de altura dinámica ocurren en el impulsor y en el difusor, y serán discutidas a continuación.

##### 2.9.4.1 Pérdidas por fricción

La fricción entre el fluido y las paredes del impulsor disipan energía. Estas pérdidas por fricción se suponen igual a las que ocurrirían en un flujo totalmente desarrollado en una tubería circular con un diámetro y longitud igual al promedio del diámetro hidráulico y promedio de la longitud del pasaje del impulsor. Sin embargo, este método es aplicable a flujo monofásico y no toma en cuenta la curvatura del pasaje.

##### 2.9.4.2 Pérdidas por choque

Estas ocurren en la entrada y salida del impulsor. Como lo indica Stephanoff, el término se utiliza erróneamente. Las pérdidas por choque son pérdidas de difusión causadas por cambios repentinos de área. No son causadas por el flujo que está impactando con el canal del impulsor. Por lo tanto, sería distinto ya que las pérdidas por impacto son recuperables si el impacto es en la dirección del flujo por la acción impulsora de las turbomáquinas.

Las bombas están diseñadas para operar cerca de su punto de máxima eficiencia. Esta condición de operación usualmente está cerca de la condición de no choque a una tasa

de flujo  $Q_n$ , como se muestra en la figura 10 donde además se esquematizan las pérdidas por fricción y por deslizamiento.

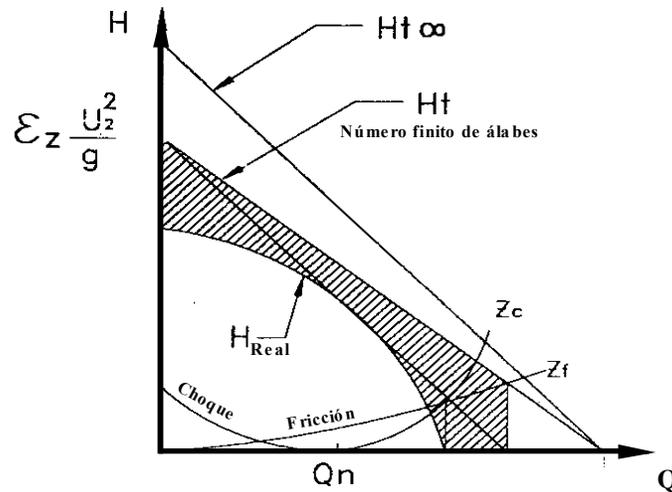


Figura 10 Altura total en función del caudal

Estas pérdidas de altura pueden ser aproximadas a:

$$h_{s1} = k_A \frac{\Delta V_{u1}^2}{2g} \quad (2-34)$$

y

$$h_{s2} = k_B \frac{\Delta V_{u2}^2}{2g} \quad (2-35)$$

donde  $h_{s1}$ ,  $h_{s2}$  son las pérdidas de altura debido a choque en la entrada y la salida del impulsor respectivamente. Las constantes  $k_A$  y  $k_B$  dependen de la geometría de la bomba. Stephanoff mostró que las pérdidas en la entrada y salida pueden ser combinadas:

$$h_s = k_c (Q - Q_s)^2 \quad (2-36)$$

donde  $k_c$  es una constante que depende de la geometría de la bomba. El comportamiento de estas pérdidas con el caudal es parabólico y se hace evidente en la figura 10.

### 2.9.4.3 Pérdidas por mezclado

El mezclado de las estelas y el chorro en la salida del impulsor también causa pérdidas. Estas se han cuantificado con una aproximación suponiendo que el fluido se separa del canal del impulsor cuando la relación entre la velocidad relativa del líquido y la salida a la máxima velocidad relativa del fluido en el canal sea igual a 0,45.

### 2.9.4.4 Pérdidas debido al deslizamiento del fluido en el impulsor

La correlación para un factor de deslizamiento, en cierto sentido, es una correlación para modificar los triángulos de velocidad ideales y así obtener un mejor estimado del rendimiento real de la bomba bajo un enfoque unidimensional. El flujo actual que atraviesa el impulsor es diferente al que pasa en una línea de corriente en el centro del canal del impulsor. Esto se debe a la recirculación. Este fenómeno se manifiesta cuando una partícula de fluido, mientras atraviesa el impulsor con un movimiento traslacional con respecto al eje de rotación, no gira con el impulsor. Por lo tanto, se establece un movimiento circular en el impulsor. Este movimiento contribuye a la llamada velocidad de deslizamiento ( $S$ ) en la entrada o salida del impulsor. En la entrada del impulsor, la contribución de la velocidad de deslizamiento ( $S_1$ ) es sumada a la velocidad periférica ( $U_1$ ). Sin embargo, la contribución de la velocidad de deslizamiento ( $S_2$ ) en la salida es en dirección opuesta a la velocidad periférica ( $U_2$ ). El perfil de la velocidad relativa en un canal del impulsor se ve afectado como se muestra en la figura 11.

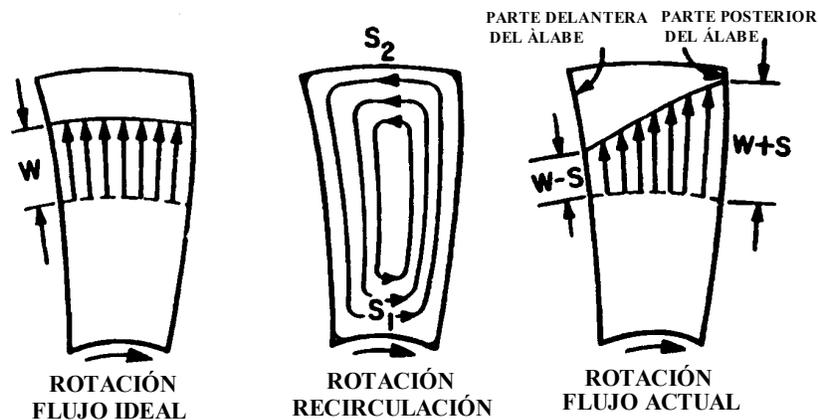


Figura 11 Efecto de la velocidad de deslizamiento en el perfil de velocidades

Esto hace que se reduzca la altura de bombeo de Euler:

$$H_c = \frac{U_2 S_2 + U_1 S_1}{g} \quad (2-37)$$

donde,  $H_c$  es la pérdida de altura de bombeo debido a recirculación.

Es importante notar que esta pérdida no es un gasto de energía, pero sí representa una reducción en la efectividad del impulsor de transferir energía al fluido. El resultado, no obstante, es una menor altura de bombeo desarrollada por la bomba.

Los triángulos resultantes en la entrada y salida se muestran en la figura 12. Generalmente, la contribución del deslizamiento a la salida es mucho más que en la entrada.

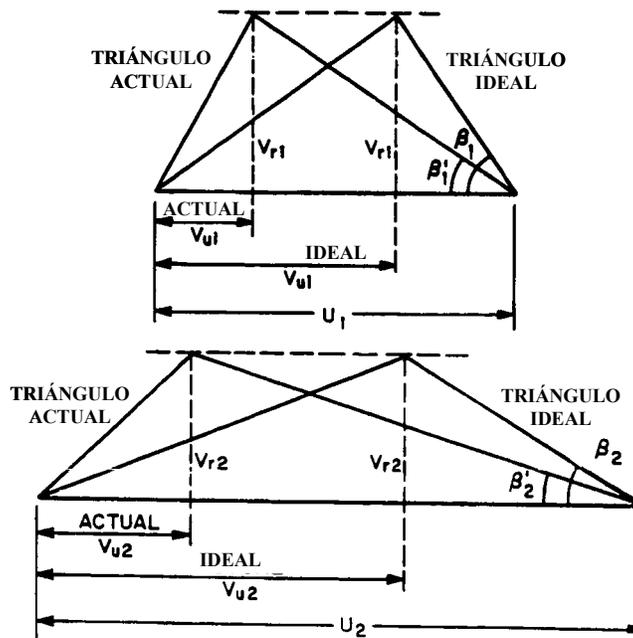


Figura 12 Efecto del deslizamiento en los triángulos de entrada y salida

La mayoría de los modelos desarrollados para bombas centrífugas se concentran en las modificaciones del triángulo de velocidades en la descarga del impulsor como se muestra en la figura 12.

### 2.9.5 Pérdidas en el difusor y voluta

Una etapa en una bomba centrífuga consta del impulsor y la voluta; las pérdidas en la voluta son pequeñas en comparación con las del impulsor. En la BES se utiliza un difusor en lugar de una voluta. Existen muy pocos trabajos que analizan las pérdidas en el difusor de la BES.

### 2.10 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 o de similaridad las que permiten la predicción del comportamiento de una máquina operando en condiciones diferentes a las que han sido sujetas a prueba. Estas leyes de similaridad son el resultado de aplicar el análisis dimensional al sistema. Las variables más importante que afectan una bomba son:

- Altura dinámica total,  $H$
- La descarga,  $Q$
- La velocidad angular del impulsor,  $w$
- El diámetro externo del impulsor,  $D_e$
- La aceleración de la gravedad,  $g$

Una de las principales ventajas del bombeo electrosumergible como método de levantamiento artificial es su capacidad para ser ajustado a las condiciones de productividad de un pozo. Para ello se usa un variador de frecuencia (equipo de superficie) el cual permite cambiar la velocidad de giro del sistema de fondo.

El efecto del cambio de la velocidad de giro sobre las condiciones de producción debe ser estimado para que esta alternativa tenga el impacto deseado. Para flujo monofásico, incompresible y de baja viscosidad existen ecuaciones con este propósito dadas por:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (2-38)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \quad (2-39)$$

$$\frac{P_{f2}}{P_{f1}} = \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^3 \quad (2-40)$$

donde Q es el caudal manejado por la bomba,  $\omega$  la velocidad angular en RPM, H la altura dinámica generada por la bomba,  $P_f$  la potencia requerida para accionar el sistema 1 y 2 representan las condiciones iniciales y posteriores al cambio respectivo.

Las tres ecuaciones anteriores se conocen como leyes de afinidad para diámetro constante. Existen ecuaciones similares que relacionan las mismas variables con el diámetro pero a velocidad constante. Estas son útiles en equipos de superficie pero son de uso limitado para bombeo electrosumergible por lo cual no se presentarán en este trabajo. Conociendo las condiciones de operación de la bomba para una frecuencia dada, las leyes de afinidad permiten predecir el comportamiento de la bomba a otra frecuencia.

## 2.11 Potencia al freno

La curva de potencia al freno corresponde a la potencia consumida por la bomba y se conoce como potencia al freno ( $P_f$ ) o en inglés “Brake Horse Power” (BHP). Es la

potencia suministrada al eje de la bomba y experimentalmente se puede cuantificar midiendo el torque (T) y la velocidad angular ( $\omega$ ):

$$P_f = T \cdot \omega \quad (2-41)$$

Usualmente el fabricante presenta este valor por etapa, lo cual significa que en una bomba electrosumergible multietapas, se asume que cada una de las etapas que la constituyen requiere la misma potencia. La potencia total consumida por la bomba es entonces el producto del número de etapas por la potencia requerida por etapa, a la tasa total de flujo y corregida por la gravedad específica del fluido ( $\gamma$ ).

## 2.12 Potencia hidráulica

De la energía suministrada al eje de la bomba, solo una fracción es absorbida por el fluido como trabajo útil. Esta energía, es conocida como potencia hidráulica y es menor que la potencia al freno por las pérdidas energéticas que ocurre en la bomba debido a fricción, choque, recirculación, etc.

La energía absorbida por el fluido se manifiesta en forma de presión por lo cual la potencia hidráulica se puede expresar como:

$$P_h = Q \cdot \Delta P \quad (2-42)$$

Donde Q representa el caudal de líquido a condiciones de fondo y  $\Delta P$  la diferencia de presión del líquido entre la descarga y la entrada de la bomba o de una etapa. Despejando  $\Delta P$  de la ecuación (2-28) y sustituyendo en (2-42) se tiene:

$$P_h = Q \cdot \gamma \cdot H \quad (2-43)$$

### 2.13 Eficiencia

Este parámetro se define como la relación entre la potencia suministrada al fluido y la potencia suministrada al eje de la bomba. Expresada en porcentaje se tiene que:

$$\eta = \frac{P_h}{P_f} \quad (2-44)$$

Sustituyendo (2-43) en (2-44) se tiene:

$$\eta = \frac{Q^* H^* \gamma}{P_f} \quad (2-45)$$

### 2.14 Curva característica de una BES

La curva característica de una BES es como se muestra en la figura 13. Las curvas de altura y eficiencia contra caudal son de mucho interés a la hora de estudiar una bomba. En cuanto a la curva de altura – caudal, se puede decir que la máxima altura de bombeo se consigue a cero caudal y está en el 5% de error de su valor teórico  $U_2^2/g$ , donde  $U_2$  es la velocidad periférica del impulsor en la descarga. La forma del resto de la curva depende de varios tipos de pérdidas que varían con el diseño de la bomba. Una instalación de bombeo debe operar mas o menos entre 10 – 20% fuera del punto de mejor eficiencia. Las curvas de desempeño para las BES se hacen ensayando la bomba con agua en un banco de pruebas y las publica el fabricante.

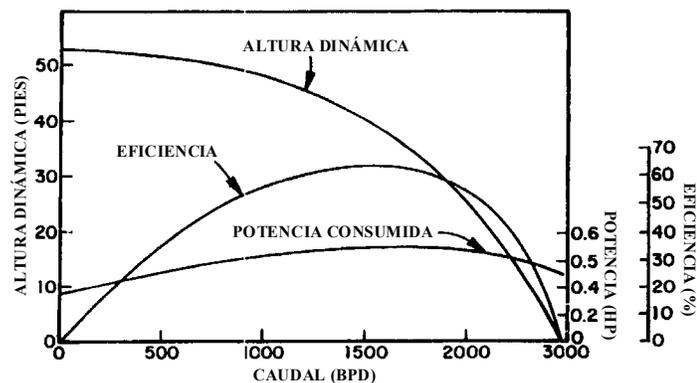


Figura 13 Curva característica de una BES

Aunque las BES se han utilizado para bombear fluido viscoso y mezclas gas-líquido, son más eficientes cuando manejan puro líquido. La presencia de gas libre en el fluido que maneja la bomba hace que se degrade la altura desarrollada y eventualmente puede causar una pérdida total de la acción de bombeo como interferencia por gas. La degradación de la altura de bombeo, como la interferencia por gas, no son bien conocidos. Se conoce como degradación de altura de bombeo por gas a la diferencia entre la altura desarrollada por la bomba cuando maneja flujos monofásico y bifásico. Para evitar los efectos nocivos del gas, los operadores evitan usar las BES en estas condiciones o usan separadores de gas de fondo. La eficiencia de los nuevos separadores centrífugos ha aumentado en comparación con los de flujo en reverso usados anteriormente. Estos separadores, no obstante, operan eficientemente para porcentajes pequeños de gas libre en la succión de la bomba. Con el aumento de la presión y la disminución de la tensión superficial, declina la eficiencia de estos separadores. Cabe señalar que el rendimiento de los separadores de fondo no se ha cuantificado con precisión y es objeto de estudio en el presente. Razón por la cual, es común el uso de separadores menos costosos como el de flujo en reverso u otros separadores menos efectivos. Esto hace que la interferencia por gas en la BES se haya convertido en un tema de interés tanto para los operadores como los fabricantes.

### 3. ANTECEDENTES

En la industria petrolera, se han publicado muy pocos trabajos aplicables a las BES.

En 1980, Lea y Bearden, llevaron a cabo un programa experimental cuyo propósito fue definir el comportamiento de una BES cuando se introducen volúmenes de gas a la entrada de la bomba bajo ciertas condiciones de flujo y presión hasta que la misma deja de generar altura dinámica, es decir hasta obtener una condición de bloqueo por gas. En estas pruebas se utilizaron tres bombas diferentes, la I-42B y C-72 de tipo radial y una bomba de flujo mixto modelo K-70 como fluido de prueba: agua, Diesel y CO<sub>2</sub>. Este fue el primer trabajo experimental controlado, orientado a la industria petrolera.

En 1986, Turpin, Lea y Bearden, publicaron un trabajo, donde usando los datos del estudio de Lea y Bearden, desarrollaron una correlación empírica para predecir la curva de altura-caudal para las BES estudiadas, como una función de la relación vapor-líquido, la presión y el caudal de líquido a condiciones de entrada de la bomba y la altura dinámica para agua obtenida de los catálogos del fabricante.

En 1995, Pessoa R, Escalante S, Caicedo S y Yáñez R., evaluaron experimentalmente una bomba electrosumergible modelo GC2900 de 35 etapas. La experiencia consistió en determinar las curvas de comportamiento de altura dinámica, potencia al freno y eficiencia en función del caudal con y sin inyección de diluyente. Los fluidos de utilizados fueron: agua, crudo Uracoa de 16,1 °API y kerosene de 32 °API. Las diferentes viscosidades de trabajo se lograron diluyendo el crudo con diferentes porcentajes de kerosene obteniendo viscosidades desde 49,69 centipoise (cp) a 1596,43 cP a 20 °C. Los resultados obtenidos muestran degradamiento del comportamiento de la bomba al incrementar la viscosidad.

En 1998, Cirilo, evaluó el comportamiento de tres bombas electrosumergibles de la serie 540, dos de ellas de flujo mixto, la GN4000 con 18 etapas y la GN7000 con 13 etapas, y una de flujo radial, la GN2000 con 35 etapas. Todas ellas manejando flujo bifásico (agua-

aire), con el objeto de caracterizar su comportamiento de altura dinámica. Otra contribución de este trabajo fue una correlación sencilla para determinar la máxima fracción de gas libre para la operación estable de bombas electrocentrífugas de flujo mixto.

En (2000), Añez D, realizó el estudio del comportamiento de una BES de 35 etapas, marca Centrilift, modelo GC2900, de flujo mixto, manejando flujo bifásico viscoso (1400 cP), con dos presiones de estudio a la succión de la bomba que fueron 50 y 90 lpc. Como resultado más importante, presentó un método de cálculo para predecir el comportamiento de esta bomba en particular. De esta manera logro verificar sus resultados experimentales.

En 2000, Pessoa, R., realiza un estudio experimental, evaluando el comportamiento de una BES modelo GC6100 de 22 etapas, fue instrumentada de forma particular para medir la presión y la temperatura en el espacio inter-etapas. El objetivo de este estudio fue recopilar datos experimentales para determinar el comportamiento de una bomba electrosumergible que a diferencia de los trabajos anteriores, radicó en la medición del incremento de presión por etapas en vez de determinarlo como un promedio entre las etapas de la bomba. Este trabajo fue pionero en el estudio de las BES por etapa. Se demostró la diferencia entre el comportamiento promedio y el real de cada etapa soportando la falta de generalidad de las correlaciones basadas en datos promedio.

#### 4. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Como parte de la agenda de proyectos que tiene PDVSA INTEVEP, se requiere realizar la investigación sobre el comportamiento inter-etapas de la BES, empleando fluido viscosos bifásico en condición real (ver figura 14). Este circuito sirve al proyecto “Bombeo Electrosumergible” que forma parte de una gran agenda de proyectos llevados a cabo por este centro de investigación. Este proyecto está orientado al conocimiento del comportamiento de las bombas electrosumergibles en situaciones reales de campo.

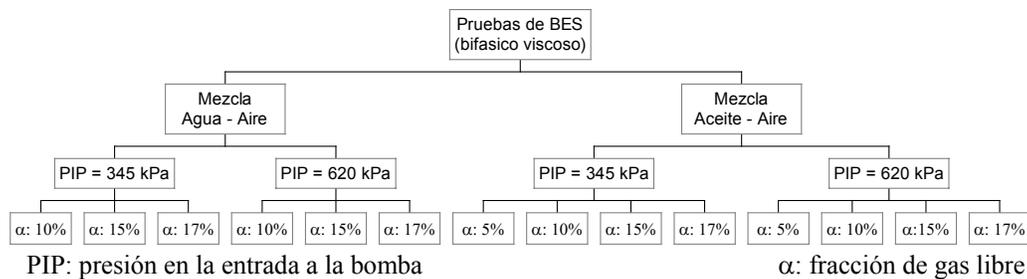
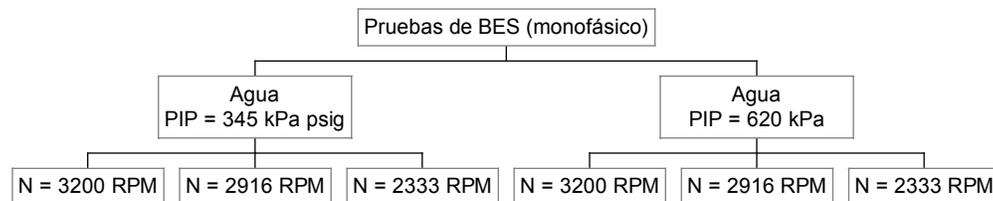


Figura 14 Matriz de pruebas para flujo bifásico viscoso

#### 4.1 Descripción de las pruebas

Las pruebas consistieron en ensayar la bomba empleando fluido monofásico (agua), con el objetivo de verificar el buen funcionamiento de la bomba (marca Centrilift, modelo GC2900 de 35 etapas) y asegurar el buen sello entre las etapas instrumentadas. Para ello, se comparó las curvas experimentales con las curvas del fabricante. En la figura 15, se muestra la matriz experimental donde se puede visualizar la presión de trabajo en la entrada de la bomba (PIP). Estos valores de presión se consideraron tomando en cuenta la limitación de la presión que generan los compresores de aire que existen en el laboratorio.



PIP: presión de entrada a la bomba.

Figura 15 Matriz de pruebas para flujo monofásico

## 4.2 Descripción del circuito de pruebas BES.

En la figura 16, se muestra un diagrama esquemático del circuito de prueba para BES. Este circuito tiene la ventaja de operar de una manera dual (con fluido monofásico o con fluido bifásico). Una limitación que tiene este circuito es que el estudio inter-etapas solo se hará con respecto a  $\Delta P$  y no con la potencia al freno, porque en el montaje no es posible medir el torque inter etapas, ya que se requiere de medición de deformación para turbomáquinas que por la falta de espacio es tarea difícil de instalar. A continuación, se hará una breve descripción del recorrido del fluido de proceso, así como de los equipos.

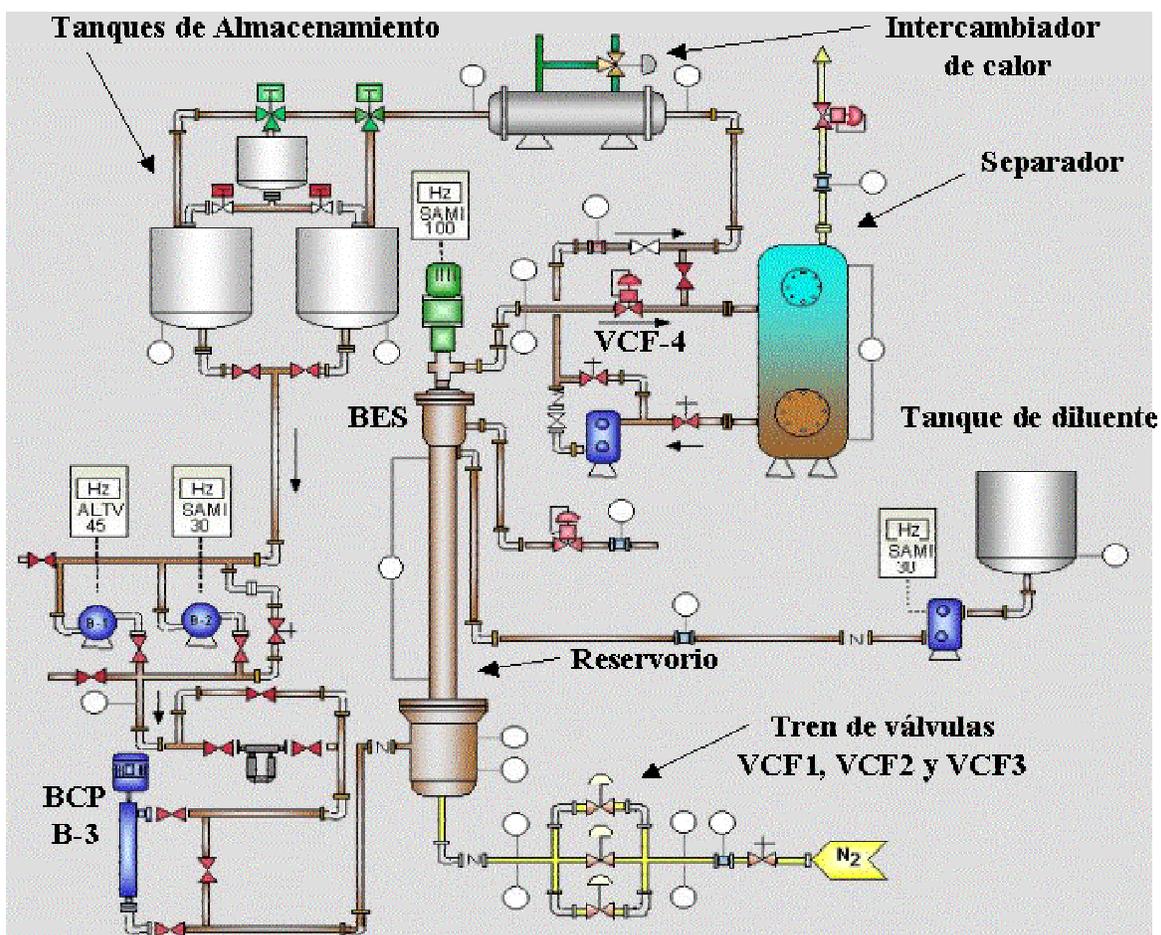


Figura 16 Esquema del Circuito de BES

El recorrido del líquido es como sigue:

Para las pruebas con fluido monofásico:

- El fluido se encuentra almacenado en condiciones atmosféricas en dos tanques con capacidad de 3.000 lts cada uno.
- El fluido es succionado y elevado a la presión requerida de entrada de la BES por cualesquiera de las tres bombas de alimentación. Cada uno de estos equipos dispone de un variador de frecuencia que permite manipular la velocidad de giro del motor desde una sala de control. Las bombas son las siguientes:
  - B-1: bomba centrífuga Eta 40-200 marca KSB cap. 27 m<sup>3</sup>/h a 3.600 RPM con un motor eléctrico de 18 kW.
  - B-2: bomba centrífuga Movi 165/4 marca KSB cap. 100 m<sup>3</sup>/h a 3.500 RPM con un motor eléctrico de 56 kW.
  - B-3: bomba de cavidades progresivas cap. 2.000 BPD, presión máxima 7.600 kPa a 1.750 RPM.
- El fluido entra en el reservorio que es un recipiente a presión con cap. para 328 lts y una presión máxima de prueba 10350 kPa.
- Luego, el fluido sube por el revestidor de producción de  $\phi$  9-5/8 pulgadas y 5,7 mts de longitud.
- Dentro del revestidor, se encuentra la bomba electrosumergible multietapas Centrilift GC2900 de 35 etapas, impulsor tipo mixto, con difusor manejada por un motor eléctrico de 75 kW que gira a 3.500 RPM. El motor es manipulado por un variador de frecuencia que permite controlar la velocidad del motor por consola.
- A la descarga de la bomba, se encuentra la válvula de estrangulamiento VCF-4 que permite regular el caudal por consola y reducir la presión del fluido a la descarga de la bomba.

- Existe un juego de válvulas (by-pass) que permite cambiar el curso del fluido, para impedir su llegada al separador.
- Luego, el líquido, en su recorrido de regreso antes de llegar a los tanques de almacenamiento, pasa por un intercambiador de calor de carcasa de 16 pulgadas de diámetro; 2,5 mts de longitud; capacidad de 283.500 Btu/h y un coeficiente de transferencia de calor de  $9,33 \text{ Btu/h-pie}^2 \text{ }^\circ\text{F}$ .
- Entonces el fluido regresa al tanque de almacenamiento y se repite el proceso.

Para el caso bifásico el recorrido del gas (aire comprimido) es como sigue:

- El aire es comprimido por el compresor marca Atlas Copco con capacidad 1420  $\text{m}^3/\text{D}$  y una presión máxima de 860 kPa.
- El aire pasa por un tren de válvulas que consta de tres válvulas en paralelo con diferentes coeficiente volumétrico ( $C_v$ ) que permiten regular la tasa de flujo de aire inyectado en un intervalo amplio de caudales.
  - VCF-1: Válvula tipo aguja marca Masoneilan Dresser tipo Varipack  
 $C_v = 0,16 \text{ lts-h/kPa}$  accionada desde la consola.
  - VCF-2: Válvula tipo aguja marca Masoneilan Dresser tipo Varipack  
 $C_v = 0,80 \text{ lts-h/kPa}$  accionada desde la consola.
  - VCF-3: Válvula tipo aguja marca Masoneilan Dresser tipo Varipack  
 $C_v = 1,95 \text{ lts-h/kPa}$  accionada desde la consola.
- El aire entra al reservorio y se mezcla con el líquido.
- Esta mezcla sube a través del revestidor de producción donde es succionada por la BES.
- A la descarga de la bomba, la mezcla bifásica pasa por la válvula de choque VCF-4 descrita anteriormente.

- Aguas abajo de la válvula VCF-4, la mezcla líquido - gas a baja presión entra en el separador estático donde el aire es separado y venteado a la atmósfera.

#### 4.2.1. Bomba electrosumergible.

Por no disponer de suficiente espacio en el revestidor de la tubería de producción (9-5/8 pulgadas de diámetro) y tomando en consideración las observaciones de otros trabajos experimentales donde mencionan, que en las primeras etapas de la bomba es donde ocurren los cambios mas fuertes cuando se trabaja con fluidos viscoso, se decide hacer mas énfasis en estudiar el comportamiento de las primeras etapas sin descuidar las últimas. Por ello, se decide instrumentar las primeras 5 etapas, una intermedia y las 2 últimas. En la figura 17, se muestra el arreglo de los transmisores de presión y temperatura:

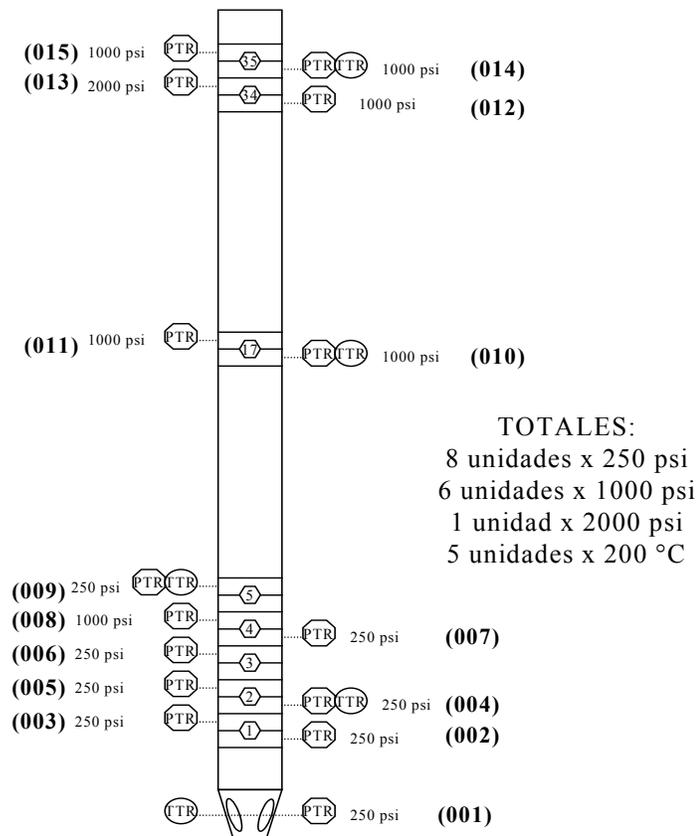


Figura 17 Esquema de la ubicación de sensores en la bomba electrosumergible

En la figura 18 se presenta una vista de la ubicación de los sensores de presión y temperatura instalados en la bomba.



Figura 18 Vista de sensores en la bomba electrosumergible

La figura 19 muestra un corte axial de una etapa de la bomba (impulsor-difusor), en ella podemos apreciar el lugar donde se realizó las perforaciones para tomar los puntos de medición en el impulsor y en el difusor por separado. También, se puede apreciar la zona donde fueron ubicados los empaques (O-Ring) que permiten aislar una zona de medición con respecto a otra. Cabe resaltar que el trabajo de maquinado de las etapas instrumentadas de la bomba, fue realizado por el personal técnico de la empresa fabricante (Centrilift) así como la utilización de sus talleres. La instalación de los sensores fue realizado por el personal técnico de PDVSA-Intevep.

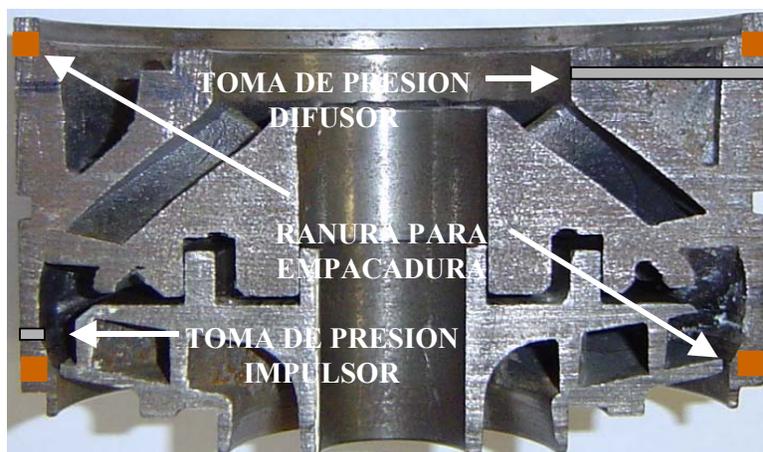


Figura 19 Corte axial de una etapa con los puntos de ubicación de los sensores

### 4.3 Sistema de Adquisición de Datos

El objetivo fundamental del sistema de adquisición de datos asociado al circuito experimental es registrar, monitorear y controlar las señales. Estas señales pueden ser lecturas de temperatura, presión, flujos de gas y líquido. Este también sirve para inspeccionar el desempeño de los equipos involucrados en el proceso como la velocidad de rotación y el torque en las bombas, el caudal de agua de enfriamiento en el intercambiador de calor y el nivel de fluido en el separador y tanques.

Para cumplir con este objetivo, el programa ejecuta las siguientes tareas básicas: adquisición y registro de señales, procesamiento en línea, configuración de instrumentos, interfaz hombre máquina, parada de emergencia y control de algunas válvulas del circuito.

En cuanto a su constitución, el sistema de adquisición de datos está conformado de la siguiente manera:

- Computador Pentium.
- Lenguaje de programación (Labview 5.1 para Windows 95).
- Tarjetas de adquisición de datos instaladas dentro de la computadora.
- Módulo de acondicionamiento de señales de entradas digitales.
- Módulo de acondicionamiento de señales de entradas analógicas.
- Módulo de salida digital.
- Módulo de salida analógica.

La tarjeta de adquisición de datos es la encargada de recibir las señales provenientes de los módulos y convertirlos de analógico a digital para poder ser procesadas por la computadora con el software adecuado. Los módulos de acondicionamiento de señales analógicas y digitales son los encargados de recibir la señal analógica y digital de los instrumentos de medición o equipos y enviarla a la tarjeta de adquisición de datos instaladas dentro de la computadora. Por otra parte, los módulos de salida analógica y digital permiten la comunicación del panel de control con equipos instalados al sistema de adquisición como el variador de frecuencia de las bombas, válvulas, etc.

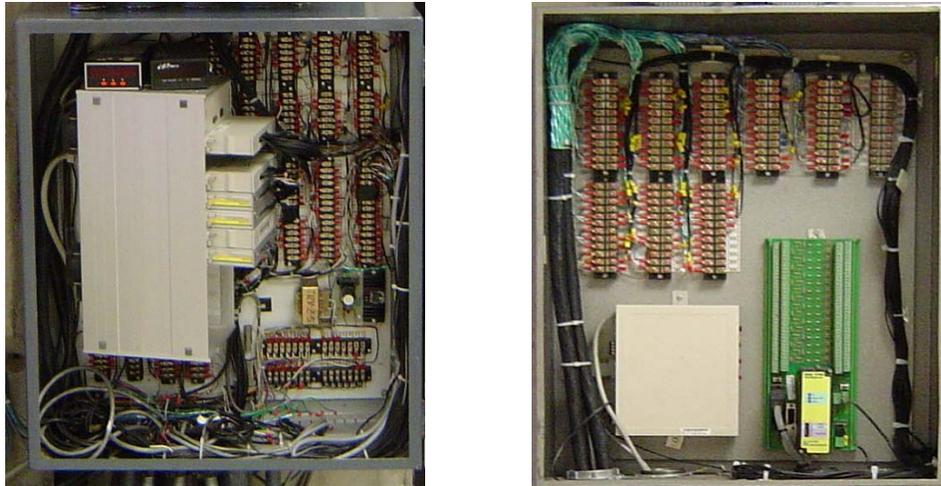


Figura 20 Tarjetas de adquisición de datos

Durante las pruebas, en la pantalla principal se presenta el esquema de instrumentación del circuito y las lecturas de interés de manera continua en puntos estratégicos del circuito, como se muestra en la figuras 21 y 22. Además, proporciona al usuario la opción de poder ver los registros históricos en tiempo real de cada una de las variables que considere, adicionando sus respectivas representaciones gráficas.

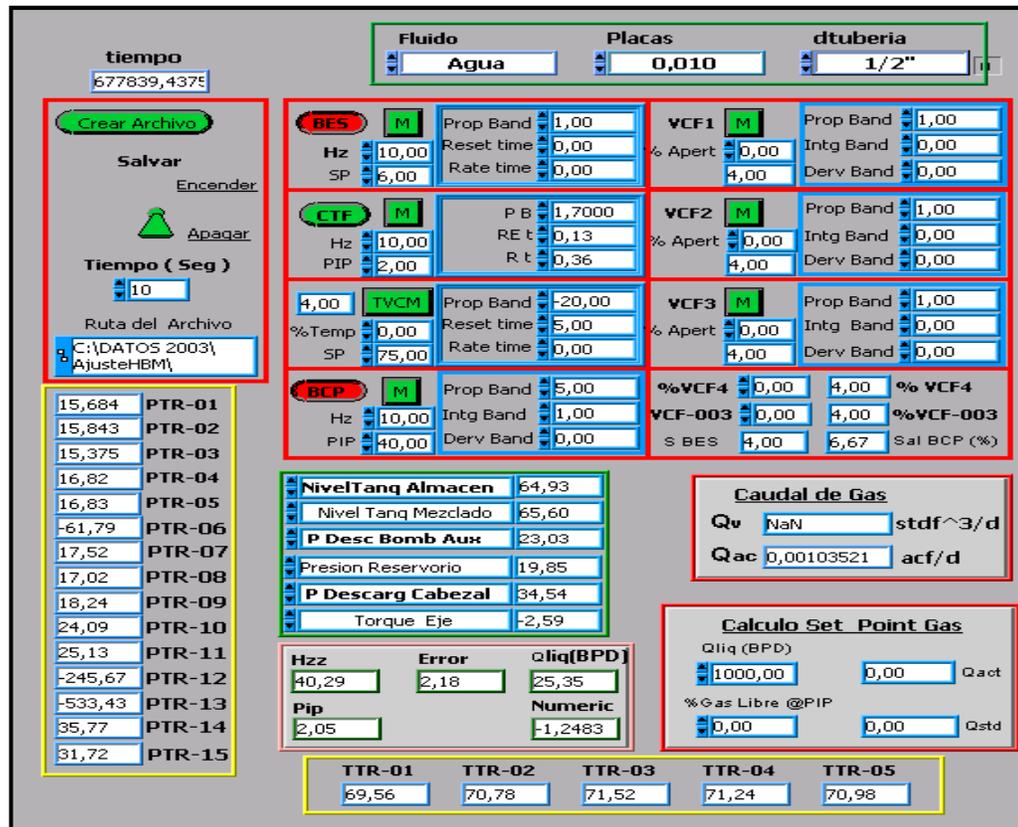


Figura 21 Panel de control del circuito BES parte A

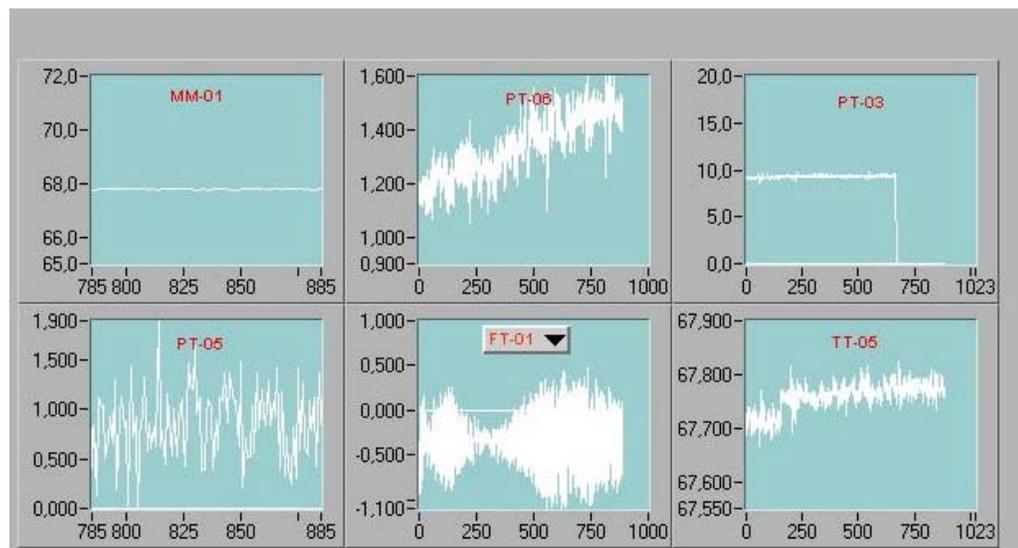


Figura 22 Panel de control del circuito BES parte B.

Por último, las señales son almacenadas en el disco duro de la computadora en forma de un archivo de texto. Este archivo contiene los valores de las señales ya procesadas en

unidades de ingeniería. El tiempo de grabación utilizado es de 60 segundos a razón de 6 mediciones por segundo de todos los parámetros involucrados, lo que permite tener suficientes datos para procesar.

#### **4.4. Procedimiento experimental.**

Para operar apropiadamente el circuito experimental, es necesario tomar en cuenta ciertas pautas. Esto permitirá disminuir el tiempo de pruebas, alargar la vida útil de los equipos que integran el circuito y evitar accidentes.

Existen tres etapas definidas que son prearranque, arranque y parada el cual se describen a continuación:

##### 4.4.1 Prearranque

Esta etapa abarca encender los equipos del circuito para su fase de calentamiento, además de otros equipos que no pertenecen directamente al circuito, pero sirven al mismo.

- Encendido de la computadora y el sistema de adquisición de datos.
- Arranque del compresor de aire para instrumentos al igual que el secador.
- Encendido de los variadores de frecuencia de las bombas.
- Inspección visual y/o por consola del estado de las válvulas automáticas en el circuito.
- Inspección visual del estado de las válvulas manuales en el circuito.

#### 4.4.2 Arranque

Esta etapa comprende la secuencia de puesta en marcha de los equipos del circuito para conseguir una condición de operación determinada por la matriz de prueba. La secuencia de arranque es la siguiente:

- Encendido de la bomba de alimentación del reservorio (B-01, B-02 ó B-03) en su mínima frecuencia e ir aumentando su velocidad hasta alcanzar una presión adecuada en el reservorio.
- En este momento, arrancar la BES a su mínima velocidad de giro. Luego, se empieza a aumentar la velocidad hasta llevarla a la velocidad de la prueba. Al mismo tiempo, manipular la velocidad de la bomba de alimentación para conseguir la presión de reservorio deseada.
- Se verifica en la matriz de prueba la cantidad de líquido requerido para la prueba en particular. Usando la válvula de descarga VCF-4 podemos conseguir el caudal deseado.
- Una vez controlado el punto de operación requerido, es necesario esperar un tiempo para verificar que el punto está estable vigilando las señales de caudal, presión de entrada y salida de la bomba.
- Luego, se procede a grabar el punto. Para estas pruebas se tomó un tiempo de duración de 60 seg.
- Luego se procede con la obtención de otro punto, variando las condiciones que sean necesarias.

#### 4.4.3 Parada

El procedimiento para apagar el circuito es el siguiente:

- Se debe abrir completamente la válvula de descarga (VCF04) para evitar una compresión repentina en el reservorio.
- Luego, se disminuye progresivamente la velocidad de la bomba de alimentación hasta 25% de la velocidad de la prueba.
- En este punto, se disminuye progresivamente la velocidad de la BES hasta un 25% de la velocidad de la prueba. A partir de aquí, se disminuye la velocidad de la bomba de alimentación y la BES hasta apagarlas.
- Una vez desactivadas ambas bombas, se esperan unos minutos hasta que el reservorio alcance la presión estática por la columna de líquido.
- Después, se cierran las válvulas de salida de líquido de los tanques de almacenamiento y se apagan los equipos que se iniciaron en la secuencia de prearranque.

#### **4.5 Procesamiento de los datos experimentales**

Para el procesamiento de los datos obtenidos se realizó un Macro en Excel (Visual Basic), donde básicamente copia los datos obtenidos de una hoja Excel, promediando las variables medidas por el sistema de adquisición de datos (el programa calcula el valor mínimo, el valor máximo y el valor promedio para cada una de las variables), a fin de verificar la estabilidad de la prueba. Una vez verificada la estabilidad se utiliza los datos para calcular las variables principales que caracterizan el comportamiento de la bomba cuando maneja fluido monofásico.

##### 4.5.1. Datos de entrada.

Los datos grabados en los archivos al igual que las unidades son como sigue:

- Nivel del tanque de almacenamiento (pulgadas de H<sub>2</sub>O).

- Nivel del tanque de mezclado (pulgadas de H<sub>2</sub>O).
- Presión de reservorio (psig).
- Nivel del anular (pulgadas de H<sub>2</sub>O).
- Temperatura del líquido a la entrada del reservorio (°F).
- Temperatura del líquido a la descarga del cabezal (°F).
- Temperatura del líquido en la entrada al intercambiador (°F).
- Temperatura del líquido a la salida del intercambiador (°F).
- Caudal de líquido a la descarga del separador (kg/h).
- Densidad del líquido a la descarga del separador (kg/m<sup>3</sup>).
- Frecuencia del motor que maneja la bomba electrosumergible (Hertz).
- Caudal de líquido a la entrada de la bomba (kg/h).
- Densidad del líquido a la entrada de la bomba (kg/m<sup>3</sup>).
- Torque en el eje de la bomba (Nm).
- Velocidad de giro de la bomba (RPM).
- Presión de descarga del cabezal (psig).
- Presión en el anular (psig).
- Temperatura del líquido a la entrada de la bomba (°F).
- Presión del líquido a la entrada de la bomba (psig).
- Temperatura del líquido en la etapa 1 (°F).
- Temperatura del líquido en la etapa 2 (°F).
- Temperatura del líquido en la etapa 3 (°F).
- Temperatura del líquido en la etapa 4 (°F).
- Presión en el impulsor de la etapa 1 (psig).
- Presión en el difusor de la etapa 1 (psig).
- Presión en el impulsor de la etapa 2 (psig).
- Presión en el difusor de la etapa 2 (psig).
- Presión en el difusor de la etapa 3 (psig).
- Presión en el impulsor de la etapa 4 (psig).
- Presión en el difusor de la etapa 4 (psig).
- Presión en el difusor de la etapa 5 (psig).
- Presión en el impulsor de la etapa 17 (psig).

- Presión en el difusor de la etapa 17 (psig).
- Presión en el impulsor de la etapa 34 (psig).
- Presión en el difusor de la etapa 34 (psig).
- Presión en el impulsor de la etapa 35 (psig).
- Presión en el difusor de la etapa 35 (psig).

Se utilizó el promedio aritmético de las variables independientes y los errores absolutos máximos y mínimos para determinar la validez de los puntos experimentales. Posteriormente, se utilizó el valor promedio calculado para cada variable independiente en la elaboración de los gráficos y tablas de altura dinámica vs caudal, potencia al freno y eficiencia vs caudal. De la misma manera, se utilizó el promedio aritmético de las variables que intervienen para estos cálculos. También se utilizaron los valores máximos y mínimos de las variables independientes para realizar el análisis de resultados.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó una serie de pruebas en el circuito experimental de Bombeo Multifásico, esto con la intención de hacer un barrido completo por los diferentes caudales y velocidades, para mantener una data almacenada para posteriores trabajos de investigación. En esta serie de pruebas se incluye las pruebas de calibración y repetibilidad. En lo que respecta al trabajo de tesis, se tomó en cuenta 3 velocidades que son las frecuencias más empleadas en la industria petrolera 2333, 2916 y 3200 RPM la cual corresponde a 40, 50 y 55 Hertz respectivamente.

Sin embargo por tratarse de fluido monofásico (agua), se pudo haber realizado una sola prueba y utilizar las leyes de afinidad para hallar el caudal, la altura dinámica y la potencia al freno para las otras frecuencias.

En la tabla 1 se muestran los valores obtenidos en los cálculos de altura dinámica, potencia al freno y eficiencia para una frecuencia de 40 Hertz y una presión de entrada a la bomba de 3,5 Kg/cm<sup>2</sup> (50 psig). En el Apéndice A se presenta los pasos de un cálculo tipo.

1 Etapa		Valores medidos				Valores calculados		
Archivo	Caudal [bpd]	$\Delta P$ 1 etapa [kg/m <sup>2</sup> ]	N BES N [rpm]	Dens Liq [kg/m <sup>3</sup> ]	Torque BES T [N.m]	H [mts]	Pf [W]	Eficiencia [%]
Ag3000_2333_50	2.942,64	0,20	2.302,48	989,64	39,88	0,25	274	48,27
Ag2666_2333_50	2.622,36	0,31	2.302,10	989,33	40,74	0,37	279	62,04
Ag2333_2333_50	2.319,40	0,41	2.301,40	988,79	42,25	0,47	290	68,52
Ag2000_2333_50	1.960,65	0,51	2.301,91	989,30	42,59	0,59	292	71,17
Ag1933_2333_50	1.886,48	0,53	2.301,54	988,74	42,26	0,61	290	71,08
Ag1666_2333_50	1.609,17	0,57	2.301,60	987,70	41,02	0,66	281	67,86
Ag1333_2333_50	1.321,85	0,62	2.301,84	988,61	39,11	0,69	268	61,72
Ag1000_2333_50	974,59	0,65	2.301,80	988,42	35,39	0,73	243	53,06
Ag666_2333_50	633,82	0,68	2.301,34	988,47	32,13	0,75	220	38,85
Ag333_2333_50	312,09	0,72	2.301,91	988,42	29,12	0,78	200	21,90
Ag25_2333_50	8,89	0,75	2.301,91	988,18	26,16	0,80	179	0,72

Tabla 1 Valores medidos y calculados para una frecuencia de 40 Hz y PIP de 3,5 Kg/cm<sup>2</sup> (50 psig)

Los valores de altura dinámica fueron calculados con la ecuación (2-20), para ello se empleo la diferencia de presión por etapa. En los casos de las etapas que no disponía de sensores para la medición de presión, se tomo el promedio de la presión entre ellas, para así poder calcular la altura dinámica. La densidad del agua requerida en esta ecuación, fue tomada del medidor de flujo (Micro Motion MM-01) quien mide el valor de flujo másico y

densidad en línea. En el apéndice C, figura 38 podrán observar el comportamiento de las curvas de altura dinámica resultante de estos cálculos, correspondientes a las 3 frecuencias y las 2 presiones a la entrada de la bomba.

El promedio total de la potencia al freno fue calculado utilizando la ecuación (2-37). Para este calculo se asumió que no existía perdidas en el sello mecánico localizado en la descarga de la bomba, así que la potencia consumida fue atribuida por las etapas de la bomba. En el apéndice C, figura 39 podrán observar las curvas potencia al freno correspondiente a las 3 frecuencias y las 2 presiones a la entrada de la bomba.

Y la eficiencia de las etapas de la bomba, fue calculada mediante la ecuación (2-41). Donde los valores de altura dinámica (H) y potencia al freno ( $P_f$ ) corresponde a los valores antes calculados. En el apéndice C, figura 40, se muestra el comportamiento de la eficiencia para las velocidades en estudio.

Un resumen de los parámetros calculados en las pruebas donde se evalúa la bomba tomando en cuenta las 35 etapas mas el inductor, se encuentra en el apéndice B, tablas B7 a B12. Mientras que en las tablas B13 a B18 se presentan los valores calculados para una sola etapa.

La comparación entre las curvas de altura dinámica y potencia al freno obtenida en la primera serie de experimentos, a una presión de entrada de 50 y 90 psig, para una frecuencia de 40 Hertz, muestran que el comportamiento de la bomba se encuentra dentro de los valores aceptable de la norma American Petroleum Institute (API) “Recommended Practice for Electric Submersible Pump Testing (Recommended Practice 11S2). Allí se establece que los errores aceptables de Altura Dinámica y Caudal deben estar en el orden de  $\pm 5\%$  y los de Potencia al freno aproximadamente en  $\pm 8\%$  comparados con la curvas del fabricante. Para la eficiencia solo es necesario graficar el punto de mejor eficiencia, el cual no debe ser menor al 90 % de la curva del fabricante, (ver figuras 23 a 26).

Las líneas segmentadas representan los límites establecidos por la norma API, tomando en consideración el porcentaje de las curvas del catalogo dentro del rango recomendado de operación de la bomba. Como se puede observar, los valores experimentales se encuentran dentro de estos límites.

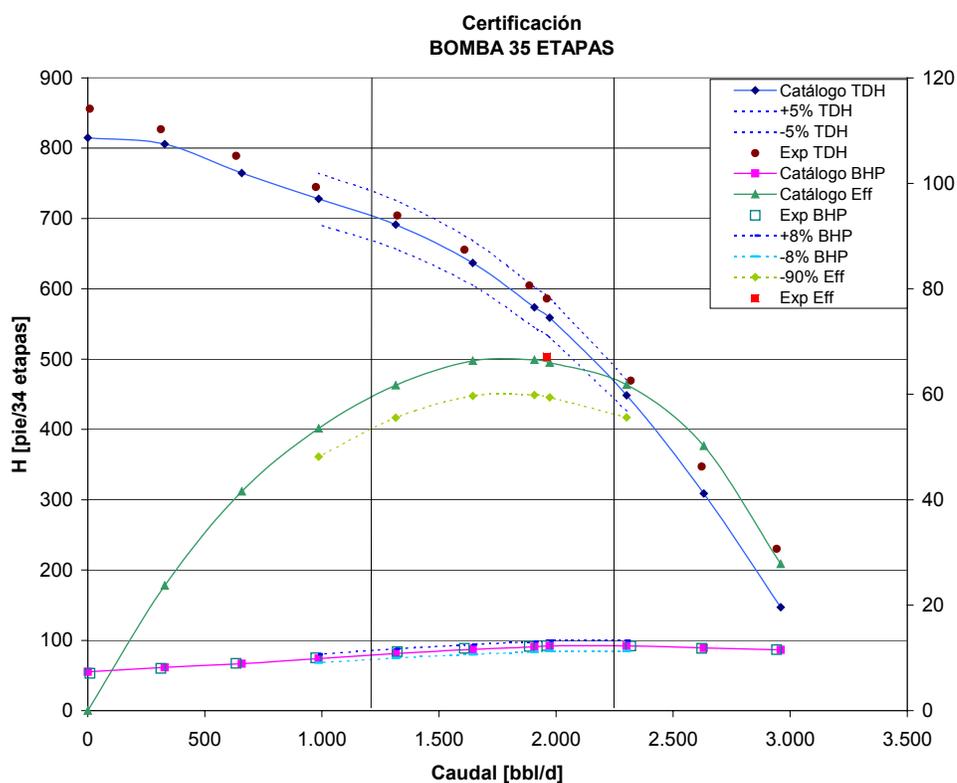


Figura 23 Certificación de curvas experimentales a 40 Hz 50 PIP

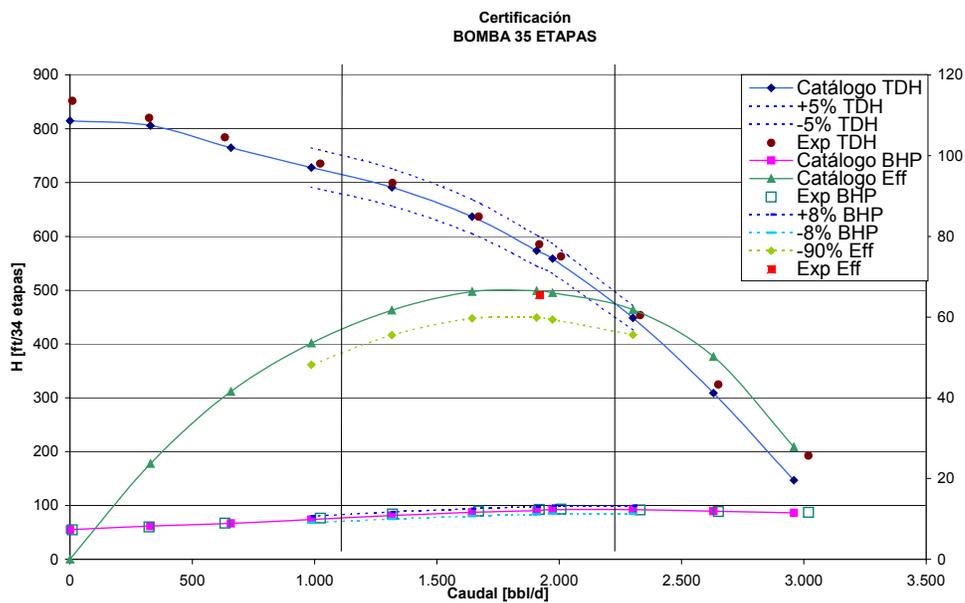


Figura 24 Certificación de curvas experimentales a 40 Hz 90 PIP

En la figura 25 y 26 se muestra la certificación de los valores obtenidos experimentalmente para un caudal de 2.916 BPD con 50 PIP y 2.916 BPD con 90 PIP respectivamente.

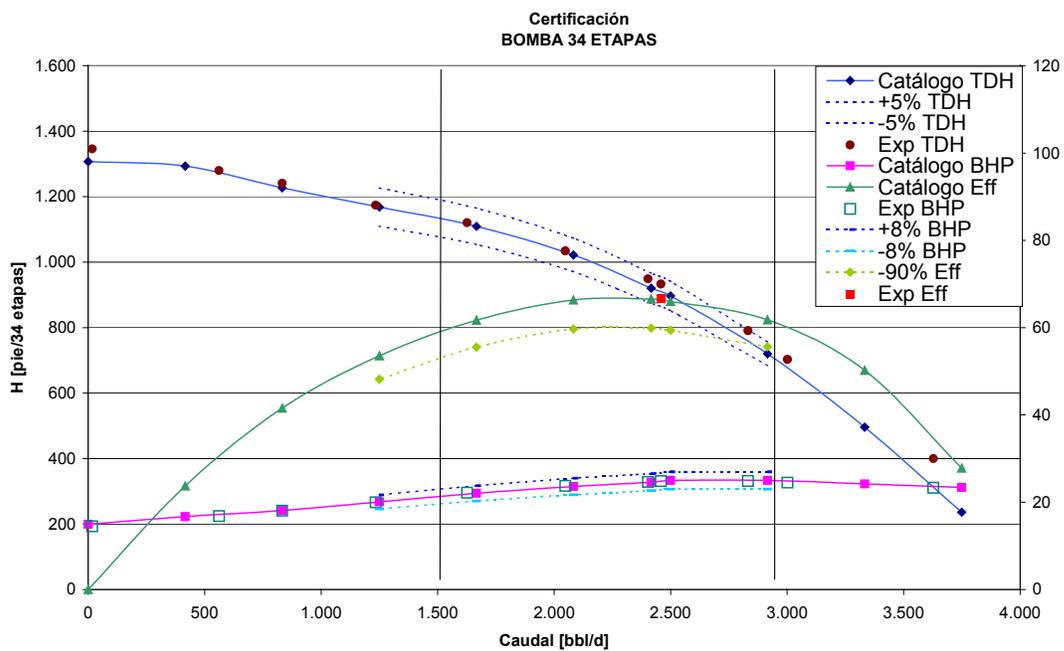


Figura 25 Certificación de curvas experimentales a 50 Hz 50 PIP

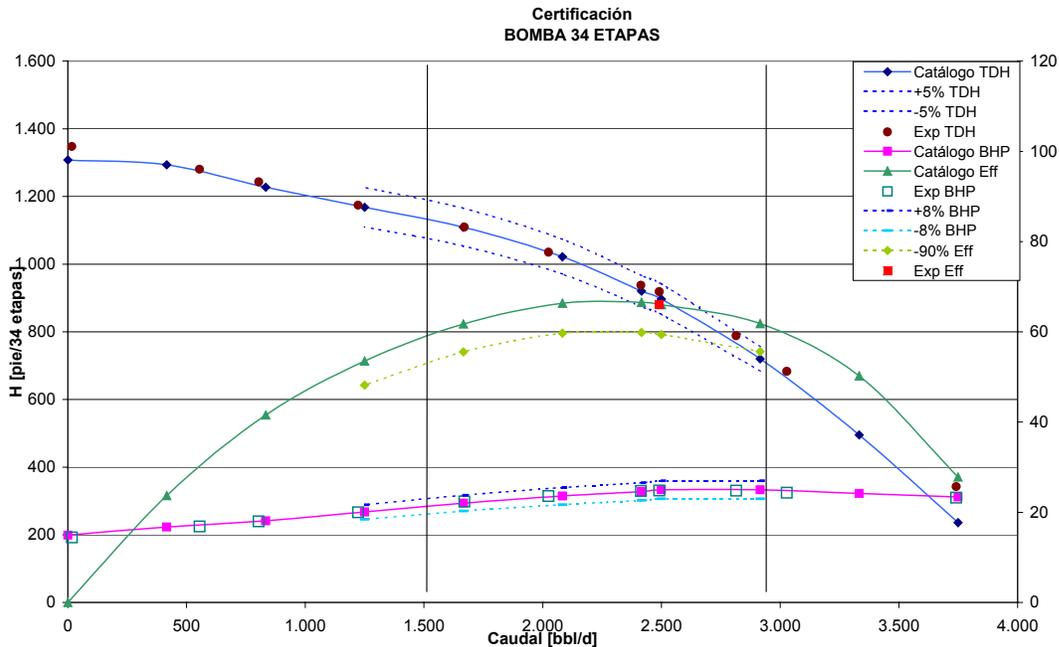


Figura 26 Certificación de curvas experimentales a 50 Hz 90 PIP

En el Apéndice B podrán observar la data experimental correspondiente a la matriz de prueba. Los nombres de los archivos fueron salvados con una nomenclatura que refleja el tipo de fluido, caudal, velocidad de giro y la presión de entrada a la bomba. En las tablas se pueden observar el incremento de presión desarrollado en cada una de las etapas instrumentada,

Cuando se realizaron las primeras pruebas se pudo observar, que todos los sensores de presión colocados en las etapas de la bomba funcionaban correctamente, a excepción de los sensores colocados en el impulsor 34, difusor 3 y difusor 34. Estos sensores dieron lectura con valores de presión negativos.

En la figura 27 se puede apreciar el comportamiento de la presión que presentaron las etapas de la bomba para una frecuencia de 40 Hertz y una PIP de 50 psig, mientras que en la figura 28 se visualiza el mismo comportamiento para una misma frecuencia y una presión de entrada de 90 psig. Cuando comparamos ambas gráficas se puede apreciar el incremento de la presión a medida que aumenta el número de etapas, pero no se evidencia ninguna variación considerable de presión en una misma etapa.

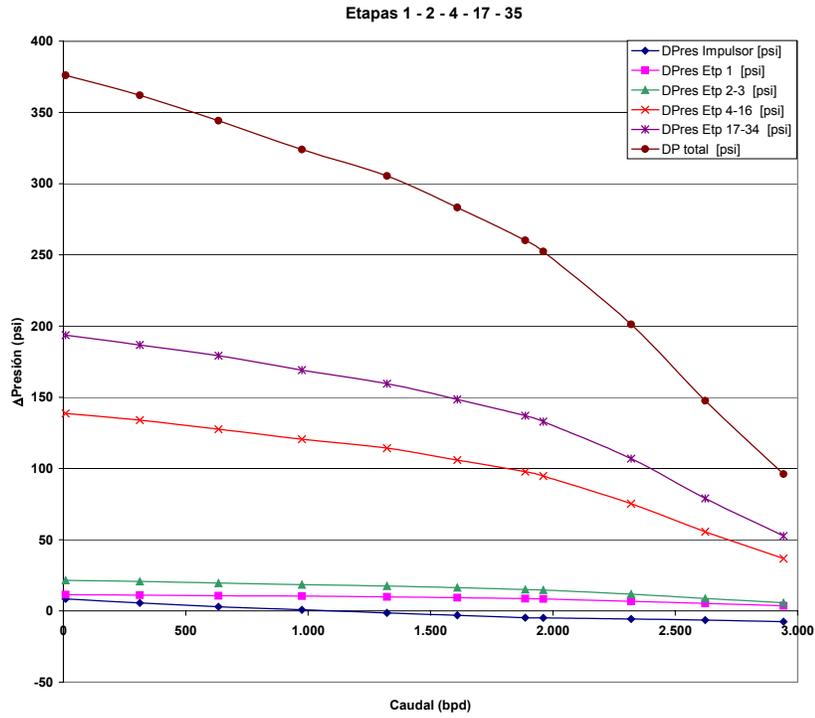


Figura 27 Curva de ΔP de la bomba para 2333 RPM y 50 PIP

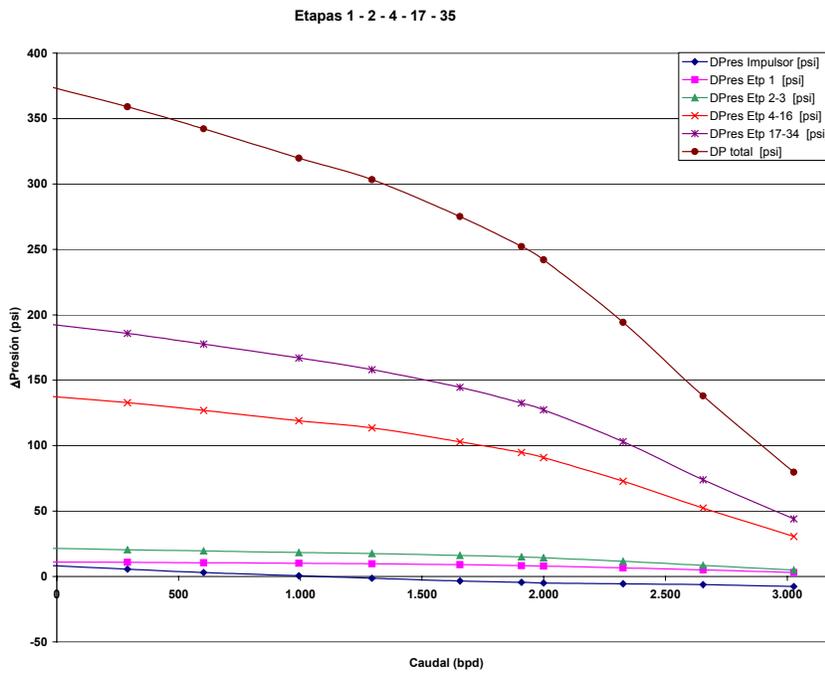


Figura 28 Curva de ΔP de la bomba para 2333 RPM y 90 PIP

Antes de realizar la construcción de estas gráficas se hizo un análisis de toda la data experimental y se pudo observar que la mayor apreciación en la medición de presión diferencial entre dos puntos continuos se logra con los valores obtenidos entre impulsor-impulsor de 2 etapas. Por ello, para visualizar mejor el fenómeno ocurrido entre las etapas y manteniendo una simetría en el análisis, se decidió tomar la diferencia de presión entre impulsor-impulsor. Adicionalmente, de los 3 sensores que fallaron 2 pertenecían a difusores. Ver tabla 2.

Archivo	Presión Ent BES [psig]	Pres Imp Etp 1 [psig]	Pres Difu Etp 1 [psig]	Pres Imp Etp 2 [psig]	Pres Difu Etp 2 [psig]	Pres Difu Etp 3 [psig]	Pres Imp Etp 4 [psig]	Pres Difu Etp 4 [psig]	Pres Difu Etp 5 [psig]	Pres Imp Etp 17 [psig]	Pres Difu Etp 17 [psig]	Pres Difu Etp 34 [psig]	Pres Imp Etp 35 [psig]	Pres Difu Etp 35 [psig]
Ag3000_2333_50	49,94	47,80	47,47	51,35	50,70	-61,64	57,11	54,95	58,33	93,87	94,63	-533,38	146,57	145,98
Ag2666_2333_50	50,65	49,69	49,62	54,92	54,53	-61,35	63,73	62,32	67,10	119,37	120,72	-533,41	198,33	198,26
Ag2333_2333_50	50,33	50,46	50,54	57,23	56,88	-61,56	69,01	68,01	74,20	144,32	146,01	-533,43	251,31	251,55
Ag2000_2333_50	50,86	52,09	52,24	60,47	60,17	-61,62	75,13	74,36	81,78	169,83	171,74	-533,40	302,77	303,17
Ag1933_2333_50	50,64	51,97	52,15	60,61	60,36	-61,70	75,72	75,04	82,65	173,51	174,96	-533,43	310,56	310,85
Ag1666_2333_50	50,99	53,51	53,72	62,88	62,61	-61,67	79,27	78,54	86,70	185,28	186,53	-533,38	333,79	334,23
Ag1333_2333_50	50,12	53,79	53,98	63,69	63,47	-61,55	81,26	80,69	89,50	195,57	197,17	-533,41	355,18	355,51
Ag1000_2333_50	49,65	54,62	54,89	65,06	64,75	-61,66	83,49	83,31	92,44	204,11	205,52	-533,43	373,16	373,56
Ag666_2333_50	50,50	56,76	57,06	67,44	67,37	-61,70	86,96	87,69	97,10	214,59	216,80	-533,37	393,84	394,67
Ag333_2333_50	50,60	58,49	58,77	69,57	69,63	-61,66	90,25	90,71	101,00	224,17	226,12	-533,42	410,95	412,60
Ag25_2333_50	49,89	59,32	59,64	70,80	70,69	-61,69	92,26	92,30	103,42	230,95	232,54	-533,36	424,50	425,95

Tabla 2 Datos experimentales para una frecuencia de 40 Hz y una PIP = 50 psig

En las figuras 27 y 28 pareciera que las últimas etapas de la bomba presenta un mejor desempeño. Pero resulta ser que los sensores no se encuentran distanciados por el mismo número de etapas. Para poder comparar el desempeño por etapa se tomó en cuenta el  $\Delta P$  que genera un grupo de etapas y se dividió por el número de etapas que componen ese grupo, así se obtuvo el promedio de las presiones por etapas, que comparada con el resto del grupo presenta un mismo comportamiento (ver figura 29 y 30). No se puede decir lo mismo para la primera etapa, ya que antes de ella se encuentra el inductor que también incrementa la presión.

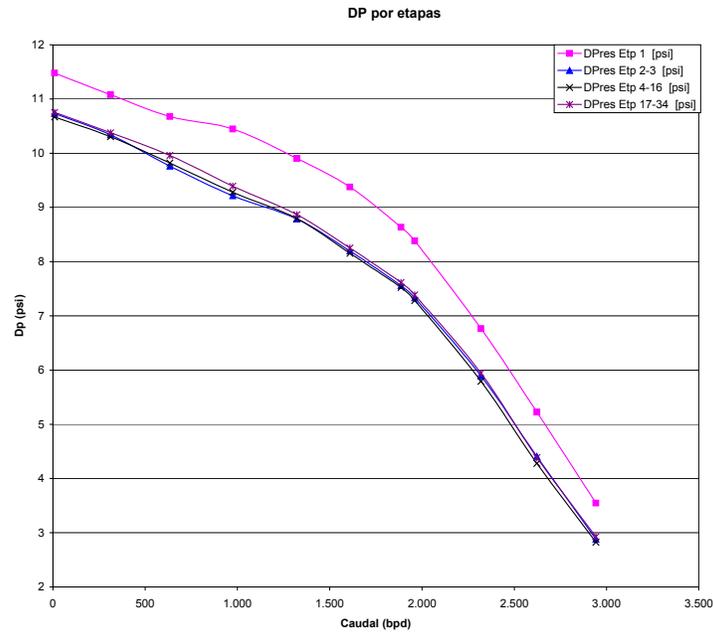


Figura 29 Curva de  $\Delta P$  de la bomba por etapas para 2333 RPM y 50 PIP

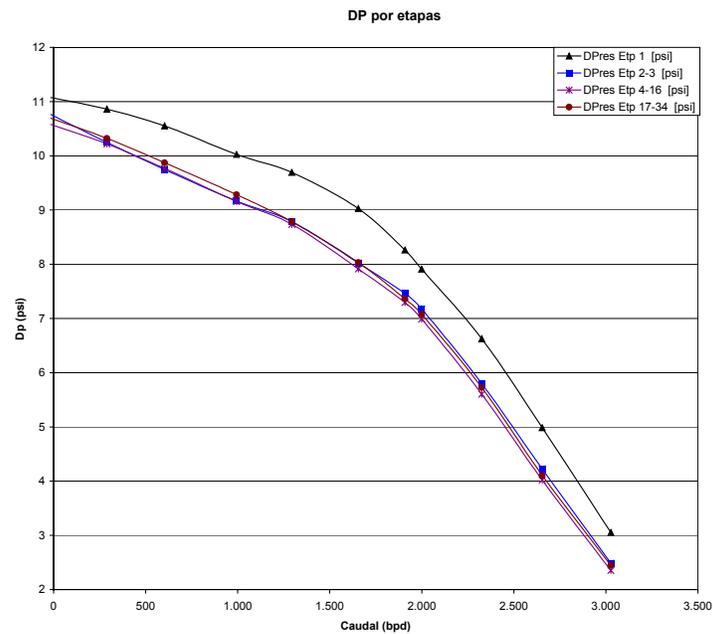


Figura 30 Curva de  $\Delta P$  de la bomba por etapas para 2333 RPM y 90 PIP

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

Este es uno de los primeros estudios realizado con bombeo electrosumergible con instrumentación inter-etapas utilizando fluido monofásico no viscoso. Los datos aquí obtenidos son el punto de partida para posteriores estudios en el tema, sobre todo para fluidos viscoso.

Con los ensayos experimentales se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Los datos para el análisis ínter etapas de una bomba electrosumergible marca Centrilift modelo GC2900 de 35 etapas, fueron obtenidas para flujo monofásico, con una presión de entrada de 50 y 90 psig.
2. Las curvas de calibración obtenidas en las pruebas demostraron el buen funcionamiento de la bomba y permitió realizar un estudio confiable del comportamiento inter-etapas de la bomba electrosumergible. Los valores obtenidos servirán como referencia a las futuras pruebas con fluido viscoso.
3. A pesar de las dificultades experimentales y la falta de espacio en la colocación de sensores, se mostró la factibilidad técnica de la medición de presión inter-etapas.
4. Con los valores de presión utilizados en la entrada de la bomba se pudo apreciar que el valor de la presión de succión no es un parámetro que ejerce mayor influencia en el comportamiento de la bomba, cuando se esta trabajando con un fluido monofásico.
5. El aporte de altura dinámica de las etapas en estudio son similares, a excepción de la primera etapa que esta influenciada por el inductor ubicado en la entrada de la bomba.
6. Se pudo apreciar un pequeño aumento de la temperatura del fluido cuando este pasa a través de las diferentes etapas de la bomba. Esto podría afectar el comportamiento con fluidos viscoso.

7. Se confirma la validez de las leyes de afinidad para este tipo de bomba electrosumergible cuando el fluido de trabajo es incompresible (agua).

## 6.2 Recomendaciones

Para ampliar el conocimiento en este tema se recomienda:

- 1) Continuar con la experiencia donde se pueda estudiar el comportamiento del fluido con el cambio de temperatura que sufre al pasar por las etapas de la bomba.
- 2) Investigar las razones por la cual la primera etapa de este modelo de bomba, presenta mayor diferencial de presión que las demás etapas. Por esta razón un esquema detallado de la bomba con todas las dimensiones de la entrada es requerido.
- 3) Es recomendable instalar un sensor a la descarga del inductor de la bomba, ya que de esta manera se puede conocer el comportamiento de este elemento y así tener un mejor estudio para la condición de flujo bifásico.
- 4) Es recomendable realizar experimentos para presiones de entrada mayores y menores a 100 psi, que permitan investigar el efecto de este parámetro en el comportamiento en las diferentes etapas de la bomba BES.
- 5) Realizar una búsqueda exhaustiva para ver la posibilidad de medir el torque ínter etapas y así tener el valor real de la potencia al freno en cada etapa, sin tener que promediarla.
- 6) La adquisición de una válvula electrónicamente controlable para la descarga de la BES.
- 7) Incrementar el diámetro de la válvula de control de flujo a la descarga de la bomba BES, para reducir la caída de presión aguas abajo de la bomba, permitiendo así un mayor rango de condiciones a ser sometidas a prueba.
- 8) Llevar a cabo ensayos más próximos a las condiciones reales de un yacimiento.
- 9) Realizar pruebas con otros modelos de bombas electrosumergibles.

## REFERENCIAS

1. American Petroleum Institute, 1997, RP11S2, "Recommended Practice for Electric Submersible Pump Testing", Second Edition, August,.
2. Añez, D, 2000, "Predicción del Comportamiento de Bombas Electrosumergibles que Manejan Flujo Bifásico", Tesis de Maestría. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas
3. Centrilift, 1983, "Training Manual". Tulsa, Oklahoma.
4. Centrilift, 1995, "Catálogo de Productos", Baker Huges Centrilift.
5. Cirilo R. y Doty D.; 1999, "Gas-Liquid Flow Through Electric Submersible Pumps", SPE Workshop,.
6. Crane Co.; 1991, "Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe", Edición 25, Chicago.
7. Lea J. F. y Bearden J. L.; 1982, "Effect of Gaseous Fluids on Submersible Pump Performance", SPE 9218.
8. Mataix C.; 1975, "Turbomáquinas Hidráulicas, editorial ICAI, Madrid.
9. Mataix C.; 1982, "Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas", 2da edición, editorial Harla, México.
10. Pessoa R, Escalante S, Caicedo S, Yánez R, 1995, Resultados Experimentales del Estudio de Comportamiento de la Bomba Electrosumergible GC2900 con y sin Inyección de Diluyente", Informe de Avance, PDVSA.
11. Pessoa, R, 2000, "Experimental Investigation of Two Phase Flow Performance of Electric Submersible Pump Stages, Informe de avance. Tesis de Maestría. Oklahoma.
12. Stepanoff, A. J.; 1976, "Centrifugal and Axial Flow Pumps Theory, Design, and Application", 2da edición John Wiley & Sons, Inc., New York,.
13. Turpin, J.L.; Lea J.F.; Bearden,J.L. (1986). *Gas Liquid Flow Through Centrifugal Pumps Correlation of Data.*