

36  
207



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

APLICACION DEL ANALISIS NODAL EN EL  
DISEÑO DE INSTALACIONES DE BOMBEO  
HIDRAULICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

LOPEZ JUVERA RAMON

*RUIZ LOPEZ JESUS FERNANDO*



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MÉDICO

FACULTAD DE INGENIERIA

Dirección  
60-I-225

Señores LOPEZ JUVERA RAMON Y  
RUIZ LOPEZ JESUS FERNANDO.  
P r e s e n t e .

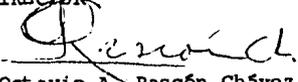
En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección, propuso el Prof. M. I.- José Angel Gómez Cabrera, para que lo desarrollen como tesis - - para su Examen Profesional de la carrera de INGENIERO PETROLERO.

"APLICACION DEL ANALISIS NODAL EN EL DISEÑO DE INSTALACIONES  
DE BOMBEO HIDRAULICO"

- INTRODUCCION.  
I ANALISIS NODAL. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.  
II BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON.  
III BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET.  
IV PROGRAMA DE COMPUTO Y APLICACIONES DEL BOMBEO  
HIDRAULICO TIPO PISTON.  
V PROGRAMA DE COMPUTO Y APLICACIONES DEL BOMBEO  
HIDRAULICO TIPO JET.  
BIBLIOGRAFIA.

Ruego a ustedes se sirvan tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberán prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Coordinación de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente.  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, D.F., a 10 de octubre de 1986.  
EL DIRECTOR

  
Dr. Octavio A. Rascón Chávez

OARCH'GCDV:gtg

# I N D I C E

		PAGINA
	INTRODUCCION	1
I	CONCEPTOS FUNDAMENTALES	3
	I.1.- Análisis Nodal "Conceptos Fundamentales"	3
II	BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON	19
	II.1.- Conceptos Fundamentales	19
	II.2.- Aplicaciones del Bombeo Hidráulico tipo Pistón.	20
	II.3.- Sistemas de Inyección del Fluido Motriz	25
	II.4.- Presiones que afectan al Bombeo Hidráulico Tipo Pistón.	26
	II.5.- Arreglos de Tuberías de Producción.	27
	II.6.- Desplazamiento de la Bomba	29
	II.7.- Desplazamiento del Motor	30
	II.8.- Fricción de la Bomba	31
	II.9.- Cálculos de Presión	32
	II.10.-Potencia	33
	II.11.-Curvas de Entrada a la Bomba (SOLO LIQUIDO).	33
	II.12.-Selección de la Bomba	34
	II.13.-Procedimiento para la preparación de las Curvas de Entrada a la Tubería (BOMBEO SOLO LIQUIDO)	37
	II.14.-Ejemplos de Aplicación.	38
	II.15.-Curvas de Entrada a la Bomba (LIQUIDO Y GAS).	54
	II.16.-Selección de la Bomba	57
	II.17.-Procedimiento para la preparación de las Curvas de Entrada a la Tubería (BOMBEO LIQUIDO Y GAS).	57
	II.18.-Selección del Gasto	59

	PAGINA
II.19.-Ejemplos de Aplicación	60
II.20.-Discusión de Resultados	75
<b>III BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET (CHORRO)</b>	<b>77</b>
III.1.- Descripción del Equipo	77
III.2.- Curvas de Comportamiento Adimensional	83
III.3.- Cavitación.	83
III.4.- Gasto y Presión del Fluido Motriz	86
III.5.- Potencia	88
III.6.- Curvas de Entrada a la Bomba (SOLO -- LIQUIDO)	89
III.7.- Selección de la Bomba.	90
III.8.- Procedimiento para la preparación de las Curvas de Entrada a la Tubería - (BOMBEANDO SOLO LIQUIDO)	92
III.9.- Ejemplos de Aplicación.	93
III.10.- Curvas de Entrada a la bomba (LIQUIDO Y GAS).	106
III.11.- Selección de la Bomba	107
III.12.- Procedimiento para la preparación de las Curvas de Entrada a la Tubería - (BOMBEANDO LIQUIDO Y GAS).	107
III.13.- Ejemplos de Aplicación.	109
III.14.- Discusión de Resultados	121
<b>IV PROGRAMA DE COMPUTO Y APLICACIONES DEL BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON</b>	<b>123</b>
IV.1.- Introducción al Programa	123
IV.2.- Diagramas de Flujo	125
IV.3.- Ejemplo de Aplicación del Programa	134

	PAGINA
PROGRAMA DE COMPUTO Y APLICACION DEL BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET (CHORRO)	141
V.1.- Introducci3n al Programa	141
V.2.- Diagramas de Flujo.	143
V.3.- Ejemplo de Aplicaci3n del Programa	149
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	156
NOMENCLATURA	161
BIBLIOGRAFIA	165
REFERENCIAS	167

## I N T R O D U C C I O N

En la Industria Petrolera, como en otros campos de investigación, los métodos y técnicas de análisis, diagnóstico y predicción de los sistemas, requieren una constante evolución para su mejor comprensión y optimización.

La Ingeniería de Producción de Pozos Petroleros, es una de las disciplinas encargadas de optimizar la explotación de los pozos. En ésta se estudian los diferentes componentes que se tienen en todo el Sistema de Producción, y así poder encontrar las causas y posibles soluciones a los problemas que se presentan.

La utilización del Análisis Nodal de Sistemas, tanto para pozos fluentes, como para aquéllos que están operando con sistemas artificiales de producción, tiene el objetivo de poder analizar el sistema de producción en forma integral, y proporcionar las herramientas para predecir el comportamiento del sistema para su optimización tanto en su diseño, manejo y control para tener así una mayor producción y una mejor eficiencia durante la explotación y poder así aumentar la vida fluvente del pozo.

El objetivo de este trabajo es mostrar la aplicación del Análisis Nodal de Sistemas, en el Bombeo Hidráulico tipo Pistón y tipo Jet (Chorro), que son dos de los métodos artificiales de producción que se usan en la Industria Petrolera; los cuales se emplean

cuando la energía de la formación productora no es suficiente para llevar los fluidos hasta la superficie o no es costeable la producción que aporta. Por lo tanto mediante este análisis se puede identificar y analizar los parámetros que controlan el flujo en el sistema de producción.

Se presentan además los procedimientos para la aplicación del Análisis Nodal para obtener los gastos de producción óptimos e identificar los parámetros que controlan el flujo en el sistema y el cambio en el comportamiento del sistema al modificar alguno de estos parámetros.

Asimismo se elaboraron programas de cómputo para los dos sistemas de bombeo, en lenguaje Basic en forma conversacional para poder realizar los procedimientos de preparación de las curvas de entrada a la tubería y así facilitar este tipo de análisis. El programa de cómputo cuenta con tres correlaciones para obtener las propiedades de los fluidos los cuales son: Standing, Oinstein y la de Vázquez; y tres correlaciones de flujo multifásico en tuberías verticales las cuales son: Poettman y Carpenter, Hagedorn y Brown y la de Beggs y Brill; las cuales nos sirven para obtener presiones de descarga, para poder así realizar el análisis completo.

# C A P I T U L O I

## ANALISIS NODAL

El objetivo de este capítulo es dar una idea general de -- los procedimientos de optimización de la producción para pozos de aceite y gas. Esto es realizado a través del procedimiento conocido como Análisis Nodal de Sistemas, algunas veces llamado Análisis de Sistemas de Producción u Optimización de la Producción.

Esto es un procedimiento para determinar el gasto de flujo al que va a producir un pozo de aceite o gas y para evaluar el -- efecto de diferentes componentes, tal como los diámetros de la sarta de producción, y línea de descarga, presión de separación, estranguladores, válvulas de seguridad, restricciones en el fondo del pozo y técnicas de terminación de pozos, incluyendo empacamientos de grava y pozos perforados normalmente. Estos componentes se combinan para optimizar el sistema completo para obtener el gasto de flujo mas eficiente. Cada componente es evaluado separadamente; entonces el sistema completo se combina para optimizar el sistema eficientemente. (Figs. 1.1 y 1.2).

Algunos sistemas de producción operan ineficientemente; -- sin embargo, la mayoría pueden mejorarse significativamente por un análisis cuidadoso. Es muy común encontrar diámetros de líneas de flujo y tuberías de producción reducidas o amplias.

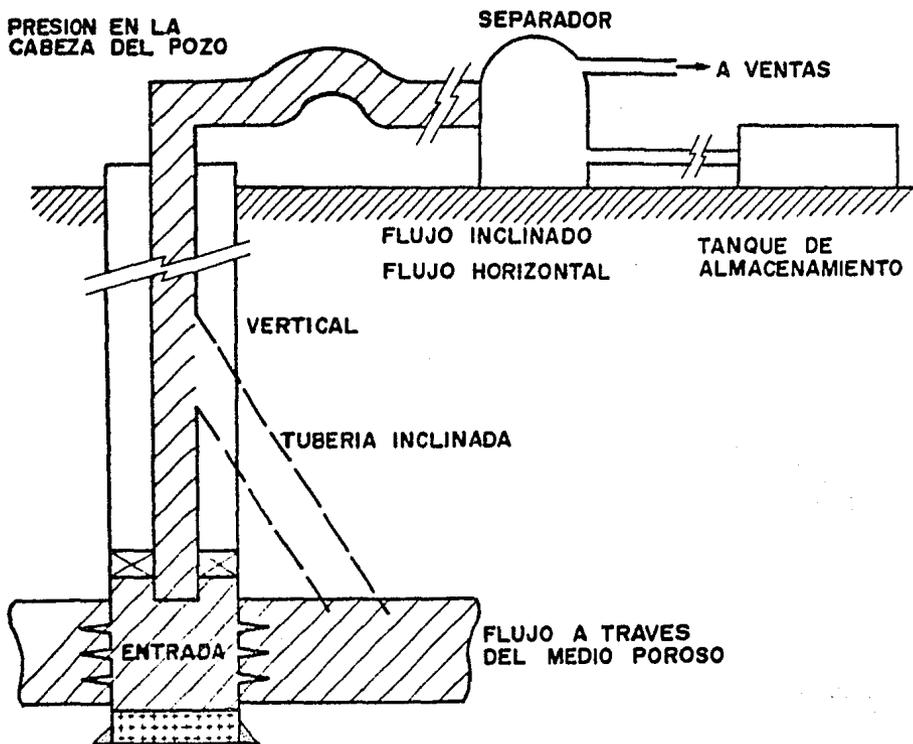


FIG. 1.1 SISTEMA DE PRODUCCION SIMPLIFICADO

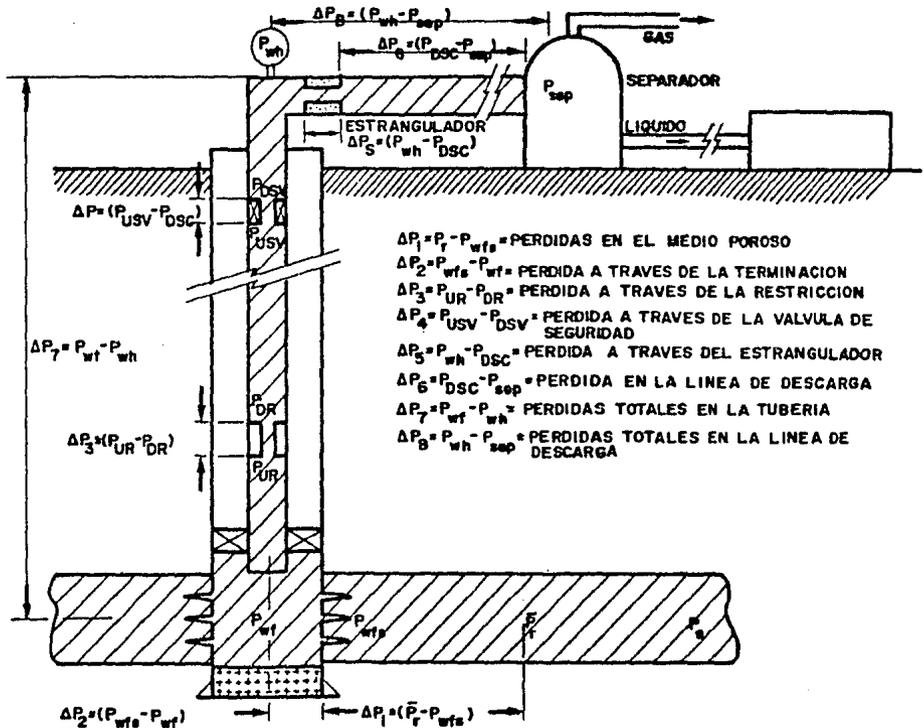


FIG. 1.2 PERDIDAS DE PRESION EN EL SISTEMA COMPLETO

Además, algunos parámetros no son medidos adecuadamente, debido a los severos cabeceos y baches que ocurren a lo largo de las líneas de flujo. La frecuencia y el tamaño de grandes baches de líquido seguidos de tapones de gas pueden causar graves problemas en la separación y en las tuberías de flujo.

Las terminaciones en pozos costa fuera son extremadamente críticas, además del alto costo para modificar diámetros de tuberías o líneas de flujo. Extensas líneas de flujo tendidas en el fondo del mar, su reemplazo resulta prohibitivo; por lo tanto los diámetros iniciales deben ser los correctos.

La frecuencia de los baches y su tamaño es absolutamente necesaria para el diseño de separadores y reductores de baches.

Resolviendo para los diferentes gastos de flujo, la posición de la solución pueden tomarse a varios nodos, tal como el fondo del pozo, la cabeza del pozo, o el separador. La posición de la solución es cambiada para ilustrar el efecto de ciertos componentes del sistema de producción completo.

Por ejemplo si se desea aislar el yacimiento como componente, se selecciona un nodo en el fondo del pozo y la solución es tomada a esa posición. Una solución en la cabeza del pozo nos permite aislar la línea de descarga y mostrar el efecto en el diámetro de la línea de descarga.

El efecto del cambio en la presión de separación puede optimizarse basado en la posible instalación de compresoras para elevar la presión del gas para ventas o para rotarlo a sistemas de bombeo neumático.

Un operador puede decidir intuitivamente un valor menor de presión de separación para incrementar el gasto de flujo y después encontrar que el gasto de flujo no ha cambiado. Por lo tanto el sistema de producción es restringido en algún otro componente como la línea de descarga o la sarta de producción.

Para pozos de alta productividad, cualquier decremento en la presión de separación puede materialmente incrementar el gasto de producción.

Recientemente numerosas terminaciones tienen la opción de instalar una línea de flujo para traer gas y líquido juntos para facilitar la separación comparado a dos líneas de separación. La pérdida de presión en dos líneas paralelas del mismo diámetro es mucho menor que en líneas de flujo multifásico, igualmente dos líneas pequeñas mostrarán menores pérdidas de presión.

Por lo tanto, la producción adicional ganada por la disminución en la presión de separación puede evaluarse económicamente contra el costo de una línea de flujo adicional.

La manera en que se termina un pozo es también muy importante. Por ejemplo el número de perforaciones necesario para prevenir excesivas pérdidas de presión a lo largo de las terminaciones con empacamiento de grava y no empacamiento, puede también -- ser evaluado por el Análisis Nodal.

Por lo tanto la densidad de disparos inadecuada puede restringir seriamente los gastos de producción debido a la insuficiente área abierta al flujo.

Para el Bombeo Hidráulico como sistema artificial de producción, el tipo de bombas que se utilizan en el equipo superficial para la inyección del fluido motriz o de trabajo son normalmente bombas triplex de desplazamiento positivo, que son accionadas por un motor eléctrico o de combustión interna a través de un mecanismo de biela y manivela. En estas bombas el número de revoluciones por minuto es menor que el del motor que las impulsa, lográndose esto, por medio de engranes, por banda o por combinación de ambos sistemas. En las bombas de desplazamiento positivo, siempre hay una cámara que aumenta de volumen en la succión, y que -- disminuye igualmente en la impulsión.

Este tipo de bombas tiene la siguiente operación. El fluido motriz proveniente de los tanques de almacenamiento, entra a la bomba por la parte inferior de la cabeza del monoblock y es descargado por la parte superior del mismo. Cuando el pistón inicia su -

carrera descendente, la carga hidrostática del tanque abre la válvula de admisión permitiendo la entrada del fluido motriz; cuando el pistón invierte su carrera, ejerce sobre el fluido una presión mayor que la debida a la carga hidrostática, cerrando la válvula de admisión. Al aumentar la presión así ejercida, abriéndola y permitiendo la salida del fluido motriz al sistema de inyección.

En una bomba de émbolo, el gasto no va a depender de la carga del sistema (fricción en las tuberías, codos, etc.), sino que dependerá del desplazamiento y de la velocidad.

Para aumentar la presión basta construir una bomba mas robusta y accionarla con un motor mas potente.

Las bombas de émbolo sólo son adecuadas para gastos limitados. Para aumentar el gasto en éstas, se requiere aumentar el tamaño de la bomba, ya que, siendo el flujo pulsatorio en estas máquinas, los fenómenos de inercia impiden aumentar el gasto mediante el aumento de velocidad.

El gasto proporcionado por una bomba de émbolo, no depende de la presión sino del área del émbolo, de la carrera del mismo, y de la velocidad de giro del muñón de la manivela.

La regulación del gasto en las bombas de émbolo se hace mediante el cierre parcial de la válvula en la línea de descarga, si

no variando el número de r.p.m. del motor. La válvula general de descarga de una bomba de émbolo, solamente se podrá cerrar al parar la bomba y nunca mientras éstas se encuentra en marcha; de lo contrario, la presión crecería hasta tal punto que la potencia -- que el motor pudiera suministrar, sería insuficiente, existiendo siempre la posibilidad de un riesgo grave.

El gasto real proporcionado por la bomba es menor que el teórico debido a causas como fugas debidas al retraso en el cierre de las válvulas de la bomba, a que dichas válvulas no sellan herméticamente y a las pérdidas hidráulicas entre la prensa-estopas y el vástago del émbolo.

Además, el gasto disminuye a causa del aire mezclado con el líquido succionado, que se desprende debido al vacío creado -- por la salida del émbolo.

Cabe mencionar que si por cualquier causa el sistema de fluido motriz y su bomba no suministran fluido motriz suficiente, se notará un descenso de la presión de funcionamiento. Por común en tal caso, la bomba no da emboladas.

La dificultad puede radicar en que la bomba del fluido motriz no descarga el volumen requerido de fluido. Esto a su vez -- puede deberse a fallas de la bomba de refuerzo, a taponamiento de la tubería de inyección, a falta de fluido motriz en el tanque, o

a otras causas.

Es por ello que tanto el equipo superficial como el subsuperficial deben operar eficientemente para poder recuperar el máximo de fluidos del pozo hacia la superficie.

El equipo superficial se encuentra constituido principalmente:

- 1.- Cabezal del pozo.
- 2.- Sistemas de Tratamiento Superficial.
- 3.- Tuberías Superficiales.
- 4.- Juego de válvulas.
- 5.- Bombas Superficiales.

Ver Figs. (1.3, 1.4 y 1.5).

Equipo Subsuperficial.

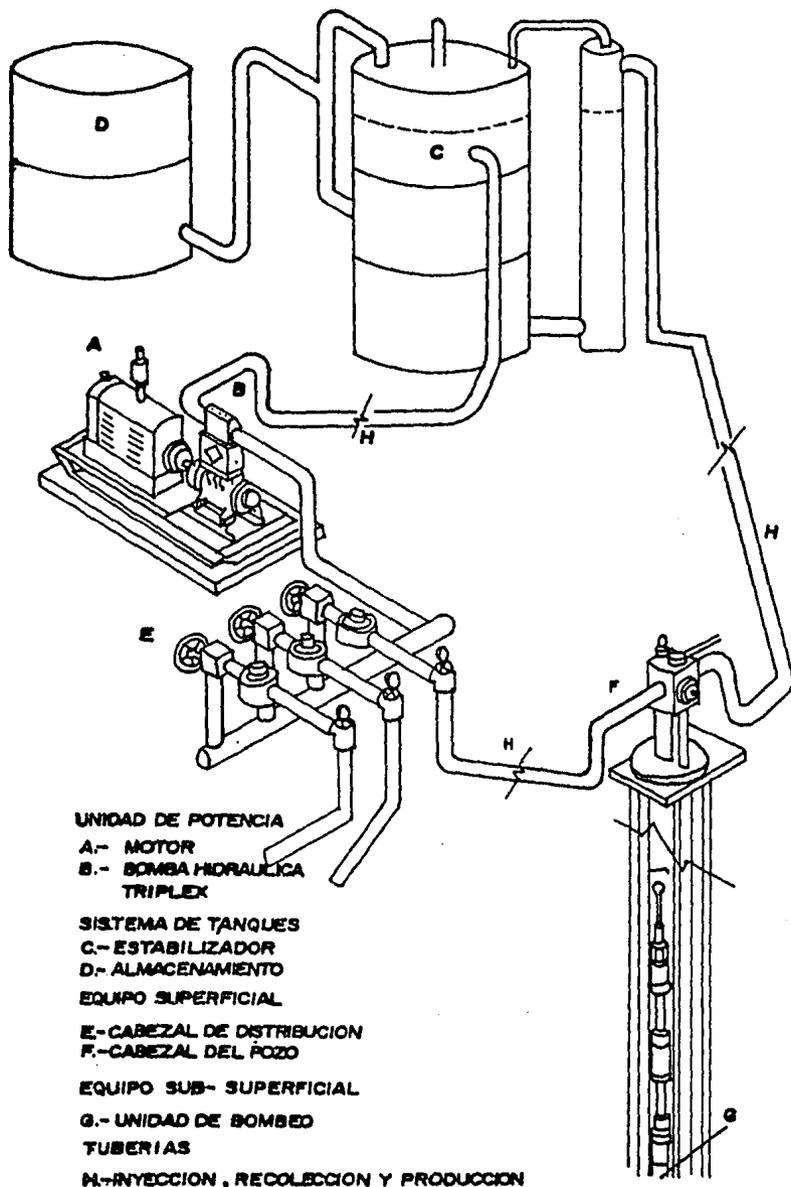
Una bomba hidráulica subsuperficial es un acoplamiento -- bomba-motor. Esta unidad es instalada bajo del nivel del fluido - motriz.

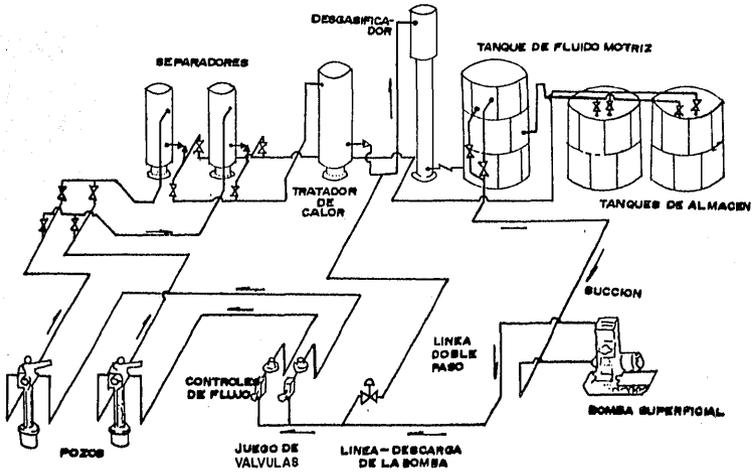
Componentes básicos de la unidad hidráulica.

- a).- Cilindro y pistón del motor.
- b).- Válvula de reversa del motor.
- c).- Embolo de la bomba (pistón).
- d).- Barril de la bomba (cilindro).
- e).- Válvula de control del fluido a la entrada y descarga de la bomba.

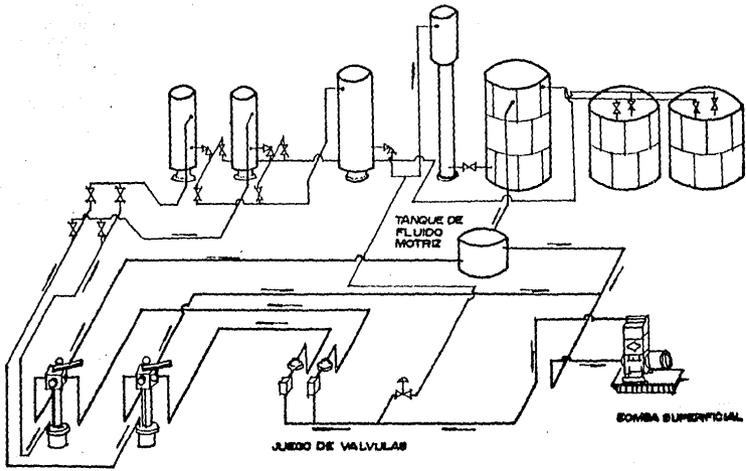
Ver. Figs. 1.6 y 1.7).

**FIG. 1.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE BOMBEO HIDRAULICO**

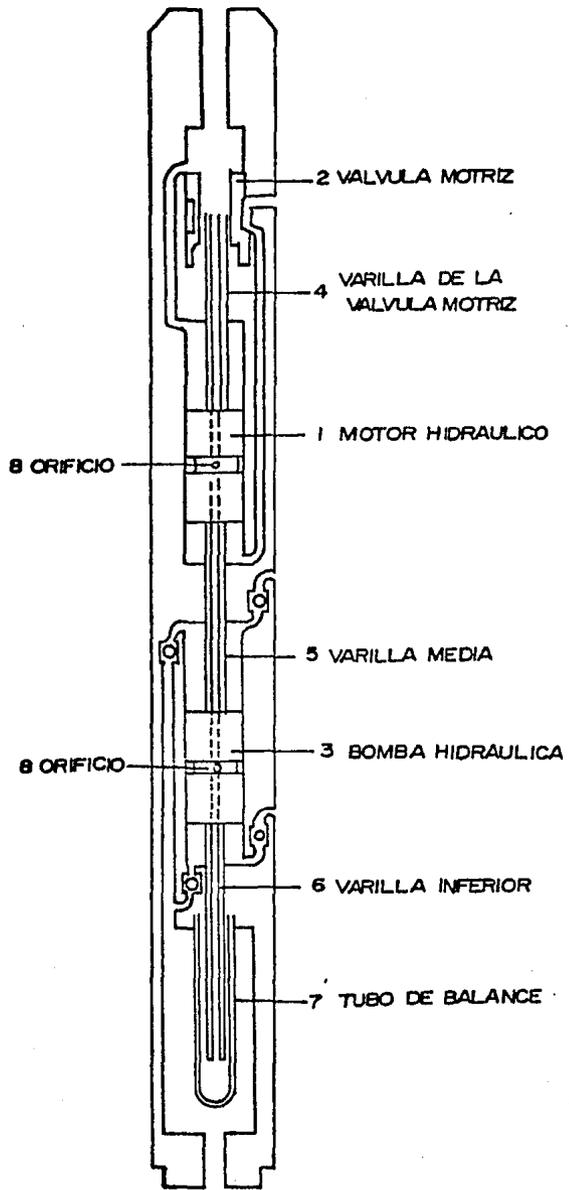




**FIG. 1.4**  
**INSTALACION SUPERFICIAL**  
**PARA VARIOS POZOS**  
**SISTEMA ABIERTO**



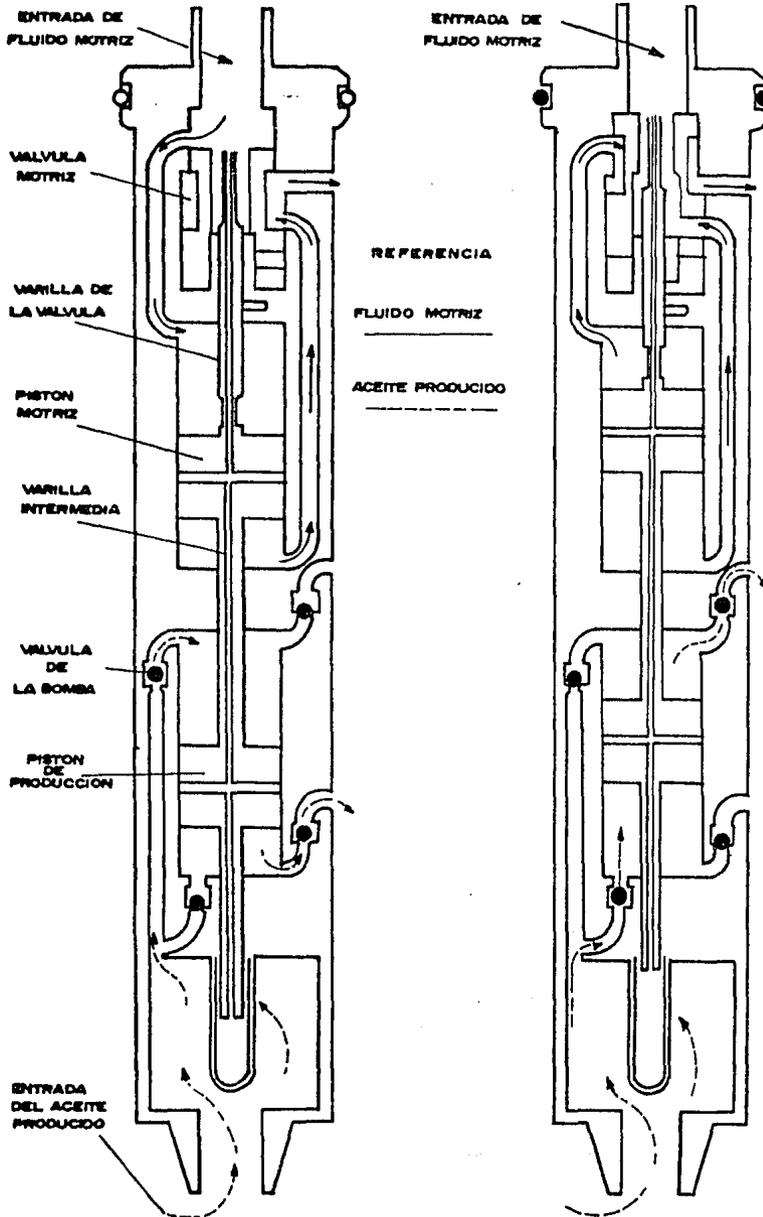
**FIG. 1.5** INSTALACION SUPERFICIAL PARA VARIOS POZOS  
SISTEMA CERRADO



**FIG.16 UNIDAD DE BOMBEO HIDRAULICO**

**CARRERA DESCENDENTE**

**CARRERA ASCENDENTE**



**FIG.1.7 OPERACION GENERAL DE LA UNIDAD DE BOMBEO HIDRAULICO**

Muchas compañías dan ahora al Análisis Nodal en computadoras, y otras están planeando hacerlo. La gráfica nodal es una herramienta necesaria trayendo altos gastos de flujo en pozos con empacamientos de grava en producción. El gasto de producción y la presión en la cabeza del pozo pueden ser usados simultáneamente para prevenir las excesivas caídas de presión a lo largo de los empacamientos de grava. Numerosas terminaciones con empacamientos de grava son destruidos durante los primeros dos o tres días de producción. Un análisis apropiado de la gráfica del sistema prevendría esto.

Algunos pozos de gas de altos gastos en la Costa del Golfo pueden requerir de un mes para obtener el gasto arriba del objetivo. Esto es casi imposible sin una buena gráfica en orden para seguir el camino del gasto de producción contra la caída de presión.

Una inspección de la capacidad del pozo contra la productividad del pozo en muchos instantes muestra que el pozo puede ser mucho mejor que con el presente gasto indicado.

El concepto nodal puede ser aplicado a pruebas de perforación para determinar correctamente las prácticas de terminación, incluyendo la selección del diámetro de tuberías.

El concepto de que el Análisis Nodal puede ser aplicado únicamente a pozos con gastos altos es incorrecto. Algunos de los

cambios más dramáticos ocurren en pozos agotados.

Por ejemplo, un caso específico de un campo muestra que -- un pozo bombeando 10 bl/día con una relación gas-aceite relativamente alta de 30 pie<sup>3</sup>/ bl podrá fluir 30 bl/día en cambio a una tubería más pequeña.

Se puede también evaluar cuando el sistema artificial inicia y cuando un pozo se supone va a morir.

La comparación de los métodos de sistemas artificiales de producción junto con la correcta selección del método de bombeo, es un problema efectivamente difícil. Uno de los criterios más importantes es la correcta determinación de los gastos de flujo para cada método artificial de producción. En orden de hacer esto la -- preparación de las Curvas de Entrada a la tubería es una necesidad. La preparación de estas curvas o sea los procedimientos para la -- preparación de estas curvas serán vistos a detalle en los capítulos 2 y 3.

Estas curvas fueron realizadas para el bombeo hidráulico - tipo pistón y tipo jet, ilustrándose con varios ejemplos.

Combinando las curvas de entrada a la tubería para el sistema artificial y las curvas de comportamiento de afluencia al pozo permiten obtener el gasto de flujo óptimo para un método de bombeo en particular.

## C A P I T U L O    I I

### BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON

El bombeo hidráulico, al igual que cualquier otro sistema artificial de producción, es introducido al pozo cuando la energía natural de éste, no es suficiente para fluir de una manera -- económicamente rentable, por lo cual es necesario proporcionar -- una energía adicional para continuar la explotación del yacimiento.

A grandes rasgos, el bombeo hidráulico tipo Pistón, consiste de un sistema integrado de un motor y una bomba reciprocante, - como equipo superficial acoplado a una tubería conectada al pozo, este equipo superficial transmite potencia a una unidad instalada en el fondo del pozo mediante acción hidráulica a través de la inyección de un fluido motriz, el cual acciona al equipo subsuperficial.

El equipo subsuperficial es un acoplamiento reciprocante cerrado de bomba y motor. El fluido motriz entra directamente al - motor a alta presión a través de una tubería y regresa a la super-ficie, una vez que ha cedido energía a los fluidos producidos, ya sea a través de la misma tubería que el fluido motriz o bien, a - través de una tubería separada.

Existe una gran variedad de modelos de bombas; cada una es

Única en su diseño de la bomba y/o motor. Sin embargo, el principio es el mismo para todos los modelos.

Las tablas 2.1 a 2.4, son algunas de las tablas de especificaciones que se usan en el diseño de bombas subsuperficiales. (1,2).

#### APLICACION DE BOMBEO HIDRAULICO.

El bombeo Hidráulico Tipo Pistón, ofrece ventajas que lo diferencian de otros sistemas artificiales de producción, las cuales son:

- 1) Puede alcanzar profundidades hasta 18000 pies (5488 mts.).
- 2) La bomba subsuperficial es fácilmente recuperable.
- 3) Tiene buena flexibilidad sobre rangos de producción ( $\approx$  5000 bl/día).
- 4) Puede operar en pozos direccionales.
- 5) Puede instalarse como un sistema integral.
- 6) Es adecuado para el bombeo de crudos pesados.
- 7) Fácil de agregar inhibidores de corrosión.
- 8) Fácil de adaptar a la automatización.
- 9) Puede instalarse en áreas reducidas (Plataformas o áreas urbanas).

Existen dos sistemas de inyección del fluido motriz:

- 1) CIRCUITO CERRADO (CFM)

DIAMETRO DE BOMBA Y DESCRIPCION	RELACION P/E	DESPLAZAMIENTO			VELOCIDAD MAXIMA (EPM)
		GASTO bl/día	bl / día por EPM		
			MOTOR	BOMBA	
2 x 1 3/8	1.152	1.311	12.35	21.15	62
2 1/2 x 1 3/4	1.146	2.397	37.35	42.81	56
3 x 2 1/8	1.142	4.015	66.32	75.76	53

**TABLA 2.1**

**ESPECIFICACIONES PARA BOMBAS KOBE E**

DIAMETRO DE BOMBA Y DESCRIPCION	RELACION P/E	DESPLAZAMIENTO			VELOCIDAD MAXIMA (EPM)
		GASTO bl/día	bl / día por EPM		
			MOTOR	BOMBA	
2x1-13/8	0.545	139	2.15	1.15	121
2x1-1	1.000	254	2.15	2.10	121
2x1-1 3/16	1.546	393	2.15	3.25	121
2x1 3/16-1	0.647	254	3.30	2.10	121
2x1 3/16-13/16	1.000	393	3.30	3.25	121
2 1/2x1 1/4-1	0.520	256	5.02	2.56	100
2 1/2x1 1/4-1 1/2	0.746	367	5.02	3.67	100
2 1/2x1 1/4-1 1/4	1.000	492	5.02	4.92	100
2 1/2x1 1/4-1 1/16	1.431	703	5.02	7.03	100
2 1/2x1 7/16-1 1/4	0.700	492	7.13	4.92	100
2 1/2x1 7/16-1 7/16	1.000	703	7.13	7.03	100
3x1 1/2-1 1/4	0.582	486	9.61	5.59	87
3x1 1/2-1 3/8	0.787	646	9.61	7.43	87
3x1 1/2-1 1/2	1.000	821	9.61	9.44	87
3x1 1/2-1 3/4	1.480	1.218	9.61	14.00	87
3x1 3/4-1 1/2	0.676	821	14.17	9.14	87
3x1 3/4-1 3/4	1.000	1.218	14.17	14.00	87
4x2-1 3/4	0.687	1.108	21.44	14.40	77
4x2-2	1.000	1.617	21.44	21.00	77
4x2-2 3/8	1.541	2.502	21.44	32.50	77
4x2 3/8-2	0.649	1.617	32.94	21.00	77
4x2 3/8-2 3/8	1.000	2.502	32.94	32.50	77

**TABLA 2.2**

**ESPECIFICACIONES PARA BOMBAS KOBE D**

DIAMETRO DE BOMBA Y DESCRIPCION	RELACION P/E	DESPLAZAMIENTO			VELOCIDAD MAXIMA (EPM)
		GASTO bl/día	bl / día por EPM		
			MOTOR	BOMBA	
2x13/16 x13/8-13/16x13/16	0.802	751	7.79	6.21	121
2x13/16x13/8-13/8x13/16	0.976	913	7.79	7.55	121
2x13/16x13/8-13/8x13/8	1.150	1,076	7.79	8.90	121
2 1/2x11/16x13/4-11/2x11/2	0.813	1.452	17.99	14.52	100
2 1/2x17/16x13/4-13/4x11/2	0.976	1.794	17.99	17.94	100
2 1/2x17/16x13/4-1 3/4x1 3/4	1.196	2.136	17.99	21.36	100
3x13/4x21/8-17/8x17/8	0.882	2.726	35.74	31.34	87
3x13/4x21/8-21/8x17/8	1.039	3.213	35.74	36.94	87
3x13/4x21/8-21/8x21/8	1.197	3.700	35.74	42.53	87

**TABLA 2.3**

**ESPECIFICACIONES PARA BOMBAS KOBE VFR**

DIAMETRO DE BOMBA Y DESCRIPCION	RELACION P/E	DESPLAZAMIENTO			VELOCIDAD MAXIMA (EPM)
		GASTO bl/día	bl / día por EPM		
			MOTOR	BOMBA	
VFR 20,161,613	0.54	444	6.86	2.96	150
VFR 20,161,616	0.81	673	6.86	4.49	150
VFR 25,202,015	0.41	630	15.16	5.25	120
VFR 25,202,017	0.56	858	15.16	7.15	120
VFR 25,202,020	0.73	1,119	15.16	9.33	120

**TABLA 2.4**

**ESPECIFICACIONES PARA BOMBAS KOBE A**

En este sistema, el Fluido Motriz es circulado al fondo -- del pozo para accionar la unidad subsuperficial, retornando a la superficie por una tubería adicional, sin mezclarse con el fluido producido. Fig. 2.1.

## 2) CIRCUITO ABIERTO (AFM)

En este sistema, el Fluido Motriz se mezcla con el fluido producido en el fondo del pozo y regresa a la superficie como una mezcla de Fluido Motriz y fluido producido, por la tubería de descarga o por el espacio anular de las tuberías de revestimiento, -- producción o inyección. Fig. 2.1.

El fluido motriz puede ser agua o aceite. La selección del fluido motriz y/o sistema de fluido motriz depende de un número de factores, sin embargo, es importante mencionar que es común en la práctica, el circular parte del aceite producido como Fluido Motriz.

$P_1$  = Presión del Fluido Motriz, lb/pg<sup>2</sup>

$P_3$  = Presión de descarga de la bomba, lb/pg<sup>2</sup>

$P_4$  =  $P_{wf}$  = Presión de entrada, lb/pg<sup>2</sup>

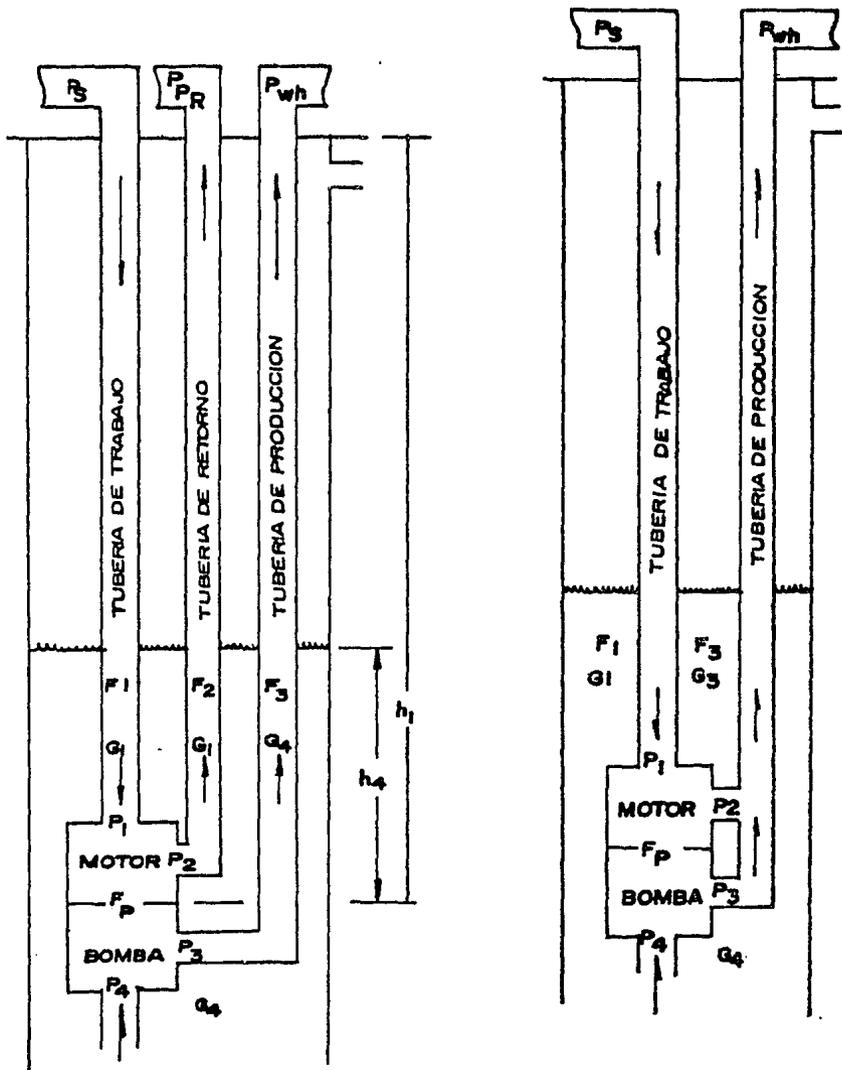
$P_2$  = Presión de descarga del motor, lb/pg<sup>2</sup>

$P_{pf}$  = Presión de retorno, lb/pg<sup>2</sup>

$P_{wh}$  = Presión en la cabeza del pozo, lb/pg<sup>2</sup>

$Q_1$  = Gasto del Fluido Motriz, blst/día.

$Q_4$  = Gasto de Producción, blst/día



SISTEMA DE FLUIDOS CERRADO

SISTEMA DE FLUIDOS ABIERTO

FIG. 2.1 PRESIONES Y PERDIDAS POR FRICCIÓN QUE AFECTAN EL BOMBEO HIDRAULICO

V = Volumen de entrada, bl/día

NOTA:

Para un sistema abierto

$$P_3 = P_2$$

$$Q_4 + Q_1 = Q_T$$

#### ARREGLOS DE TUBERIA DE PRODUCCION

Cuando la bomba se sujeta a la tubería del fluido motriz y se baja al pozo por ésta, se le llama bomba tipo fijo. Cuando la bomba se inserta en la tubería del fluido motriz y queda libre para circular al fondo y regresar de nuevo a la superficie se llama bomba tipo libre<sup>(2)</sup>.

Cualquier tipo puede estar en un sistema abierto o cerrado, pero la mayor diferencia está en que la bomba libre queda limitada por el diámetro de la tubería de producción, mientras que cualquier diámetro de bomba fija se adapta a la tubería de producción, con la condición de que esta bomba ajuste dentro de la tubería de revestimiento.

La primera columna de las tablas 2.1 a la 2.4 listan los diámetros de las bombas, identifican también, el diámetro de la tubería por el cual la bomba podrá desplazarse.

## RELACION P/E

La segunda columna de estas tablas listan la relación (llamada relación P/E) del área neta del pistón de la bomba al área neta del pistón del motor la cual se representa como:

$$P/E = \frac{A_p - A_r}{A_e - A_r} \dots \quad (2.1)$$

donde:

$A_p$  = Área del pistón de la bomba,  $pg^2$

$A_e$  = Área del pistón del motor,  $pg^2$

$A_r$  = Área de la varilla,  $pg^2$

La relación P/E se relaciona con la presión requerida en la superficie para obtener elevación. Para limitar la presión en la superficie a la máxima aceptable, generalmente de  $4000 \text{ lb/pg}^2$ , se recomienda el siguiente valor máximo.<sup>(3)</sup>

$$(P/E)_{\text{max}} = 10,000/NL \dots \quad (2.2)$$

donde:

NL = Elevación neta en pies, dada por:

$$NL = D_p - (P_4/G_f) \dots \quad (2.3)$$

$D_p$  = Profundidad de colocación de la bomba, pies

$P_4$  = Presión de entrada a la bomba,  $lb/pg^2$

$G_f$  = Gradiente de fluido fluyendo en la tubería de producción,  $lb/pg^2/pie$ .

En el caso especial, en el cual la bomba se asienta en el

fondo del pozo, queda:

$$NL = D - (Pwf/Gf) \dots \quad (2.4)$$

donde:

D = Profundidad del pozo, pies.

Pwf = Presión de fondo fluyendo, lb/pg<sup>2</sup>

Generalmente, y especialmente para pozos con presiones de fondo bajas, Pwf/Gf es muy pequeño comparado con D y, por esto, puede ser despreciado. (1,2),

Generalmente, cuando puede ser usado más de un diámetro de bomba, se elige la que presente mayor capacidad de elevación (menor relación P/E).

Esto reducirá la presión de operación en la superficie y, con esto se reduce el resbalamiento en la bomba subsuperficial.

#### DESPLAZAMIENTO DE LA BOMBA

La tercera columna de las tablas listan el máximo desplazamiento de la bomba basado en la razón máxima de velocidad (última columna). La quinta columna muestra el desplazamiento de la bomba en bl/día/EPM. Con esto el gasto de producción en bl/día, queda, dado por. (1)

$$Q_4 = q_4 \times SPM \dots \quad (2.5)$$

q<sub>4</sub> = desplazamiento de la bomba, bl/día/EPM

SPM = Velocidad de la bomba, EPM .

Normalmente, al  $Q_4'$  se le llama gasto de producción teórico. Este es igual al gasto de producción real solo si la bomba opera - al 100% de su eficiencia. Una práctica de diseño es el usar 85% de eficiencia de la bomba, y para seleccionar una bomba ésta debe operar alrededor del 85% de su gasto, por consiguiente: (1,2)

$$V = Q_4' \left( \frac{Q_4}{Q_4'} \right) \dots \quad (2.6)$$

sustituyendo la ecuación 2.5 en la última ecuación se obtiene:

$$V = q_4 \times \text{SPM} \left( \frac{Q_4}{Q_4'} \right) \dots \quad (2.7)$$

donde  $(Q_4/Q_4')$  es la eficiencia de la bomba (Eb).

V en la ecuación 2.7 es el gasto del fluido producido (líquido más gas) a la presión de entrada y, por lo tanto, será igual al gasto en la superficie sólo si el fluido se considera incompresible, tal como con el líquido, V debe ser calculada con la ecuación:

$$V = Q_4 \quad VF$$

#### DESPLAZAMIENTO DEL MOTOR

Debido a que el motor es acoplado a la bomba, el pistón -- del motor se mueve a la misma velocidad que el pistón de la bomba. Con esto, el gasto teórico de fluido motriz está dado por:

$$Q_1' = q_1 \times \text{SPM} \dots \quad (2.9)$$

Donde  $q_1$  es el desplazamiento del motor en bl/día/EPM (columna 4 de las tablas de especificaciones).

La eficiencia del motor es la relación del gasto teórico - al gasto real,  $\theta$  (1):

$$Em = \frac{Q_1'}{Q_1}$$

sustituyendo la última ecuación en la ecuación 2.9 queda:

$$Q_1 = q_1 \times SPM / (Q_1' / Q_1)$$

o bien

$$Q_1 = q_1 \times SPM \times Em \dots \quad (2.10)$$

donde:

$Q_1$  = Gasto real de fluido motriz requerido para producir - el gasto de fluido real  $V$ , (bl/día).

$Em$  = Eficiencia del motor, alrededor del 90%.

#### FRICCIÓN DE LA BOMBA.

La presión requerida para operar una bomba hidráulica bajo condiciones de no-carga se muestra en la Fig. 2.2. La gráfica muestra tanto la fricción mecánica como la hidráulica en la bomba. Esta fricción depende del tipo de bomba, porcentaje de gasto y, - la viscosidad del fluido motriz.

## CALCULOS DE PRESION

Las distintas presiones involucradas en un sistema abierto o cerrado se muestran en la Fig. 2.1. La presión disponible para operar el motor es  $P_1$ , el motor debe descargar frente a  $P_2$ . La bomba debe descargar frente a  $P_3$  al tiempo que es llenada por  $P_4$ . Este balance de fuerzas se muestra a continuación:

$$-P_1 A_r - P_2 (A_e - A_r) + P_1 (A_e - A_r) - P_3 (A_p - A_r) + P_4 (A_p - A_r) + P_1 A_r = 0$$

o

$$(P_1 - P_2) (A_e - A_r) - (P_3 - P_4) (A_p - A_r) = 0$$

o

$$P_1 - P_2 - (P_3 - P_4) \left( \frac{A_p - A_r}{A_e - A_r} \right) = 0 \dots \quad (2.11)$$

La fricción de la bomba se puede restar a la ecuación - - (2.11). Por lo tanto:

$$P_1 - P_2 - (P_3 - P_4) \left( \frac{A_p - A_r}{A_e - A_r} \right) - F_p = 0 \dots \quad (2.12)$$

Sustituyendo la ecuación 2.1 en la ecuación 2.12 se obtiene:

$$P_1 - P_2 - (P_3 - P_4) (P/E) - F_p = 0 \dots \quad (2.13)$$

La ecuación 2.13 es igualmente válida para un sistema - - abierto o uno cerrado, sin embargo,  $P_2 = P_3$ . Con esto, la ecuación 2.13 puede escribirse como:

$$P_1 - P_3 - (P_3 - P_4) (P/E) - F_p = 0 \dots \quad (2.14)$$

## POTENCIA

La potencia requerida del equipo de bombeo se puede estimar a partir de la siguiente ecuación<sup>(1)</sup>:

$$HP = 1.7 \times 10^{-5} Q_1 \times Ps \dots \quad (2.15)$$

## CURVAS DE ENTRADA A LA BOMBA.

### INTRODUCCION:

La predicción de las curvas de entrada para bombas hidráulicas se consideran para dos casos: (1) Bombeando puro líquido y (2) bombeando gas con el líquido. Para ambos casos, se considera que la bomba está sentada en el fondo del pozo y para esto se ha fijado la presión en la cabeza del pozo y diámetro de la tubería de inyección.

Para el caso 2 se considera que todo el gas asociado se bombea con el líquido. La sensibilidad de la variable seleccionada para este sistema de elección es la presión del fluido motriz. Como se verá después, la predicción de las curvas de entrada para el bombeo hidráulico es directo para el caso 1 e indirecto para el caso 2.

(1) Bombeando líquido. Como el líquido es ligeramente compresible,  $V$  en la ecuación 2.7 se puede considerar constante e igual al gasto en la superficie  $Q_4$ , o

$$Q_4 = q_4 \times \text{SPM} \times E_b$$

o

$$\text{SPM} = \frac{Q_4}{q_4 E_b} \dots \quad (2.16)$$

En este caso, la presión en la cabeza del pozo, la contra presión en la superficie, el diámetro de la trayectoria del flujo y la presión de descarga están fijas para cada gasto.

Esto deja como variable sólo a  $P_1$ . Resolviendo las ecuaciones 2.13 y 2.14 para  $P_4$  se obtiene:

Para sistemas cerrados:

$$P_4 = \left[ P_3 + \frac{P_2 + F_p}{(P/E)} \right] - \frac{P_1}{(P/E)} \dots \quad (2.17)$$

Para sistemas abiertos:

$$P_4 = \left[ P_3 + \frac{P_3 + F_p}{(P/E)} \right] - \frac{P_1}{(P/E)} \dots \quad (2.18)$$

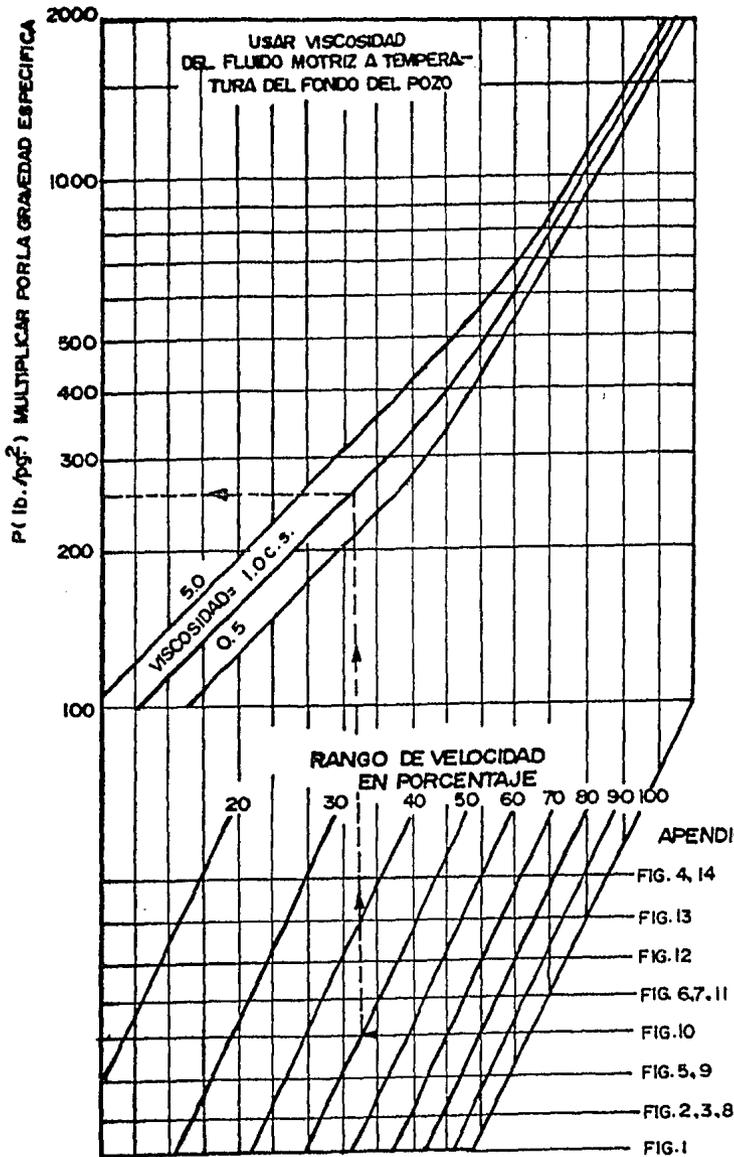
Nota: Si la bomba está sentada en el fondo del pozo, como en este caso,  $P_4$  sería igual a  $P_{wf}$ .

(2) Selección de la Bomba. Como se mencionó anteriormente, el diámetro de la bomba está limitado por el diámetro de la tubería de inyección (tipo libre) o por el diámetro de la tubería de revestimiento (tipo fijo). Otra restricción es la relación  $P/E$  de la bomba, la cual no debe exceder la  $(P/E)_{max}$  dada por la ecuación 2.2. En el caso de que se encuentre más de una bomba adecuada y la presión de operación en la superficie es fija, se recomienda el si-

guiente procedimiento:

- (1) Para cada bomba, suponer un gasto de producción y hacer lo siguiente:
  - (a) Calcular SPM de la ecuación 2.16. Para ésto, calcular  $Q_1$  de la ecuación 2.10. Determinar el porciento de gasto.
  - (b) Determinar la presión del fluido motriz y la(s) presión(es) de descarga, empleando una correlación de flujo multifásico en tuberías verticales.
  - (c) Determinar  $F_p$  de la Fig. 2.2, o por medio de las correlaciones de flujo multifásico.
  - (d) Calcular  $P_4$  de la ecuación 2.17 o ecuación 2.18.
  - (e) Repetir los pasos a-d para otros gastos supuestos.
- (2) Graficar  $P_4$  vs. gasto para cada bomba. Graficar la curva de IPR en bl st/día a la misma escala en la misma gráfica (ver Fig. 2.3).
- (3) Leer el gasto para cada bomba en la intersección de la curva de entrada con la curva de IPR.
- (4) Para cada gasto, calcular SPM de la ecuación 2.16,  $Q_1$  de la ecuación 2.10 y, HP de la ecuación 2.15.
- (5) Seleccionar una bomba subsuperficial tomando como referencia los pasos anteriores, con un análisis económico.

Nota: El gasto de la bomba seleccionada no debe exceder el 85% de



\* VER REFERENCIA 6

FIG.2.2 PRESION REQUERIDA PARA OPERAR UNA BOMBA HIDRAULICA SIN CARGA

su desplazamiento a la velocidad de gasto. (1,2).

Debido a la diferencia en la relación P/E y al gasto del fluido motriz, las gráficas preparadas en el paso 2 se traslapan (Fig. 2.3); por lo tanto el comportamiento de la bomba dependerá de la productividad del pozo (posición de la curva IPR). Otra limitación que puede influir en la selección de la bomba es la disponibilidad de fluido motriz y/o potencia. Si el objetivo es maximizar el gasto de producción, podrá seleccionarse la bomba que rinda el gasto mas alto.

#### PROCEDIMIENTO PARA PREPARAR LAS CURVAS DE ENTRADA DE LA TUBERIA DE PRODUCCION PARA LIQUIDO EXCLUSIVAMENTE.

Es necesario obtener la caída de presión por fricción, para disminuir el límite de la presión de operación en la superficie.

- (1) Decidir el tipo de fluido motriz (agua o aceite) y el tipo de sistema (cerrado o abierto).
- (2) Seleccionar una bomba subsuperficial conveniente.
- (3) Suponer un gasto de producción y hacer lo siguiente:
  - (a) Calcular SPM de la ecuación 2.16. Para esto calcular  $Q_1$  de la ecuación 2.10. Determinar el porcentaje de gasto.
  - (b) Determinar la presión de descarga requerida de una correlación de flujo multifásico en tuberías verticales.

- (c) Determinar  $F_p$  de la Fig. 2.2 o por las correlaciones.
  - (d) Suponer varias presiones de fluido motriz y calcular  $P_4$  de la ecuación 2.17 o de la ecuación 2.18.
  - (e) Repetir los pasos a-d para otros gastos supuestos.
- (4) Graficar  $P_4$  contra gasto de producción para cada presión de fluido motriz supuesta. Graficar la curva de IPR en bl/día a la misma escala en la misma gráfica.
  - (5) Leer los gastos posibles en la intersección de las curvas de entrada a la bomba con la curva de IPR.
  - (6) Para cada gasto posible, calcular  $Q_1$ . Entonces determinar la presión de operación en la superficie. Calcular HP con la ecuación 2.15.
  - (7) Graficar el gasto contra  $Q_1$ ,  $P_4$  y HP. Considerar el 85% del desplazamiento de la bomba a la velocidad de gasto en la misma gráfica.
  - (8) Seleccionar el gasto óptimo.

#### EJEMPLO Pozo # 1 (SOLO LIQUIDO)

Los datos del pozo, fluidos, y yacimiento se muestran en la tabla 2.5. En el fondo del pozo esta sentada una bomba hidráulica tipo fijo con un sistema abierto. La solución se muestra en la Fig. 2.6

POZO, FLUIDOS, YACIMIENTO, E INFORMACION USADA EN EL SISTEMA DE BOMBEO  
EN LOS CALCULOS DE LOS EJEMPLOS PARA EL POZO #1 Y #2

	POZO # 1	POZO # 2
Profundidad , pies	8,000	7,600
Diámetro de T.R., pg	7	5 1/2
Diámetro de T.P., pg	2 7/8	2 3/8
Presión en la cabeza del pozo, lb/pg <sup>2</sup>	120	80
Temperatura en la cabeza del pozo, °F	110	110
°API	35	40
$\gamma_{ocs}$	0.85	0.83
$\gamma_{gsc}$	0.70	0.65
% agua	50 %	0
$\gamma_{wsc}$	1.074	—
RGA, pies <sup>3</sup> /bl ost	400	200
Pb, lb/pg <sup>2</sup>	1,820	940
Pws, lb/pg <sup>2</sup>	1,920	1,500
IP (arriba), bl st/día	5	0.4
q <sub>max</sub> , bl st/día	6,267	400
Temperatura de Fondo, °F	170	167

TABLA 2.5

Como la bomba está colocada en el fondo del pozo, la presión de entrada a la bomba será la presión de fondo fluyendo del pozo; de aquí, que se aplica la curva de IPR mostrada en la Fig. 2.5.

Si se ignora  $P_{wf}/G_f$ , la ecuación 2.4 da una elevación neta de 8000 pies. Con esto, la ecuación 2.2 da:

$$(P/E)_{\max} = 10,000/8,000 = 1.25$$

De las tablas de especificaciones (2.1 a la 2.4) se observan algunas bombas con relación P/E menor que  $(P/E)_{\max}$ . El comportamiento entre estas bombas está por lo tanto limitado únicamente -- por el diámetro de la tubería de revestimiento y la productividad del pozo. Para un pozo similar de alta productividad, se consideraran tres alternativas (bombas de alta capacidad) con una diferencia significativa en la relación P/E y el fluido motriz requerido

Estas bombas serán numeradas 1, 2 y 3.

Bomba	Tabla	P/E	Desplazamiento	$q_4$	$q_1$	Velocidad máxima
#1	1(#3)	1.142	4,015	75,76	66.32	53
#2	2(#22)	1.000	2,502	32.50	32.94	77
#3	3(#7)	0.882	2,728	31.34	35.74	87

Para la bomba #1, suponiendo  $E_b = 85\%$  y  $E_m = 90\%$ . Con esto, las ecuaciones 2.16 , 2.10 y 2.18 quedarán respectivamente.

$$SPM = \frac{Q_4}{75.76 \times 0.85} = \frac{Q_4}{64.4} \dots \dots (2.19)$$

$$Q_1 = 66.32 \times \text{SPM } 10.9 = 73.69 \text{ SPM} \dots \quad (2.20)$$

$$P_4 = P_3 + \left( \frac{P_3 + F_p}{1.142} \right) - \frac{P_1}{1.142} \dots \quad (2.21)$$

Suponiendo un gasto de producción en la superficie de 1,000 - - bl st/día, la ecuación 2.19 dá:

$$\text{SPM} = 1000/64.4 = 15.53 \text{ EPM}$$

Sustituyendo en la ecuación (2.20) da:

$$Q_1 = (73.69)(15.53) = 1144 \text{ bl. st/día}$$

$$\% \text{ de gasto (\% RS)} = (15.53) (100)/53 = 29.3$$

Para 29.3% de gasto, la Fig. 2.2 muestra:

$$F_p = (195) (0.85) = 166 \text{ lb/pg}^2$$

El gasto total de líquido en la tubería de producción es - 1000 + 1144 = 2144 bl/día del cual 1644 bl son aceite y 500 bl son agua. Para este gasto:

$$P_3 = 3,325 \text{ lb/pg}^2 \text{ (correlación de flujo multifásico en tuberías verticales).}$$

Con un gasto de fluido motriz de 1,144 blo st/día y si la presión de operación en la superficie se fija con 4000 lb/pg<sup>2</sup>, se obtiene:

$$P_1 = 6,761 \text{ lb/pg}^2 \text{ (correlación de flujo multifásico en tuberías verticales).}$$

con esto la ecuación 2.21 dá:

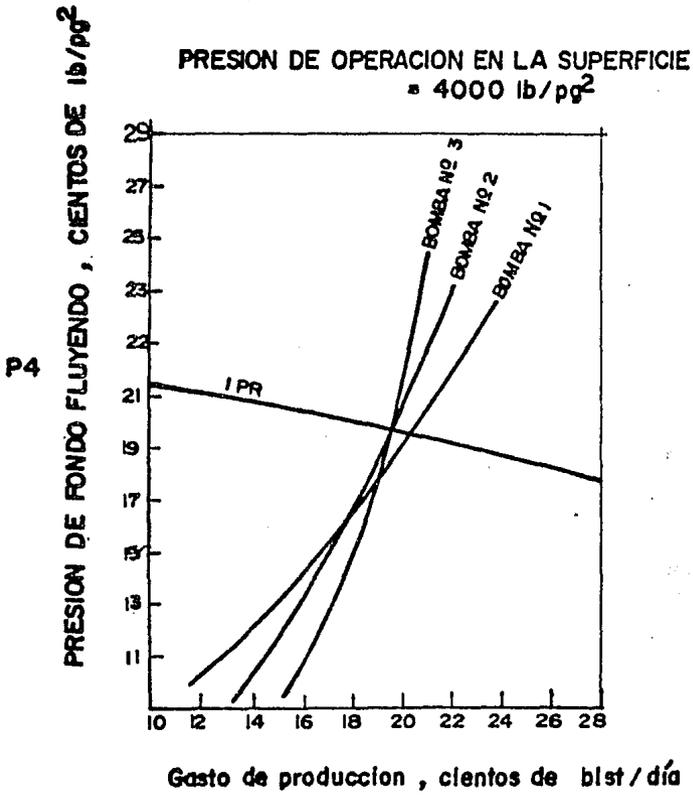
$$P_4 = 3,325 + \left( \frac{3,325+166}{1.142} \right) - \frac{6761}{1.142} = 462 \text{ lb/pg}^2$$

Similarmente, puede obtenerse lo siguiente para la misma - bomba con otros gastos supuestos, y empleando el mismo procedimien- to se obtiene la tabla siguiente:

Q <sub>4</sub>	SPM	%RS	Fp	Q <sub>1</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>4</sub>
1,200	19	35	205	1,371	3,387	6,741	629
1,400	22	41	244	1,602	3,459	6,721	815
1,600	25	47	279	1,831	3,541	6,702	1,017
1,800	28	53	323	2,060	3,633	6,683	1,245
2,000	31	59	378	2,289	3,735	6,663	1,502
2,200	34	64	440	2,517	3,848	6,644	1,784
2,400	37	70	506	2,746	3,971	6,625	2,089

En la Fig. 2.3 se graficó P<sub>4</sub> vs Q<sub>4</sub>; en ésta se incluyó la curva de IPR empleando la misma escala.

Este mismo tipo de cálculos, con una presión de operación en la superficie de 4000 lb/pg<sup>2</sup> fueron hechos para la bomba # 2 - y la bomba #3. Los resultados de los cálculos también fueron grafi- cados en la Fig. 2.3. Nótese que las curvas de la Fig. 2.3 se cru- zan debido a la diferencia en la relación P/E y gasto de fluido mo- triz. Para este pozo en particular y con una presión de operación en la superficie de 4000 lb/pg<sup>2</sup>, los gastos posibles y de fluido mo- triz, porciento de gasto y requerimientos de potencia para cada -- bomba son como siguen:



**FIG. 2.3 CURVAS DE ENTRADA PARA VARIAS BOMBAS HIDRAULICAS  
EN EL POZO Nº 1  
(Bombeando líquido)**

Bomba	$q_p$	% Rs	$Q_1$	HP
# 1	2,030	59.5	2,823	158
# 2	1,960	92.1	2,596	177
# 3	1,950	84.1	2,907	198

De la tabla anterior se puede observar lo siguiente:

La bomba #2 no se recomienda ya que su porcentaje de gasto es más alto del 85%. La bomba #1 puede ser seleccionada sobre la bomba #3, porque da un alto gasto de producción, requiriendo bajo gasto de fluido motriz (menor potencia en la superficie) y su porcentaje de gasto es menor.

Si la presión de operación máxima disponible es de 4000 lb/pg<sup>2</sup> y el gasto de producción será optimizado para la bomba seleccionada, se debe estudiar el comportamiento de la bomba para presiones de operación menores o igual a 4000 lb/pg<sup>2</sup>. Pero, para tomar en cuenta el efecto de fricción, el límite en la presión de operación en la superficie debe ser disminuido, el cual caso no será una limitante en la presión del fluido motriz. Para un gasto de producción supuesto de 200 bl st/día, la ecuación 2.19 da:

$$SPM = 200/64.4 = 3.11 \text{ EPM}$$

Con esto:

$$\% RS = 3.11 (100)/53 = 5.86$$

Para 5.86% de gasto, la Fig. 2.2 muestra:

$$F_p = 110 \text{ lb/pg}^2$$

De la ecuación 2.20 se obtiene:

$$Q_1 = (73.69) (3.11) = 229 \text{ blo st/día}$$

El gasto total de líquido en la tubería de producción es - entonces  $200+229 = 429 \text{ blst/día}$  de los cuales  $329 \text{ blst}$  son aceite y  $100 \text{ blst}$  de agua. Para este gasto:

$$P_3 = 3,179 \text{ lb/pg}^2 \text{ (correlación de flujo multifásico en tuberías verticales).}$$

Si se supone una presión de fluido motriz de  $4,500 \text{ lb/pg}^2$ , la - -- ecuación 2.21 dá:

$$P_4 = 3,179 + \left( \frac{3,179 + 110}{1.142} \right) - \frac{4500}{1.142} = 2119 \text{ lb/pg}^2$$

Similarmente con otras presiones supuestas de fluido motriz y para el mismo gasto se puede obtener lo siguiente:

$P_1$	$P_4$
5000	1681
5500	1245
6000	805
6500	367

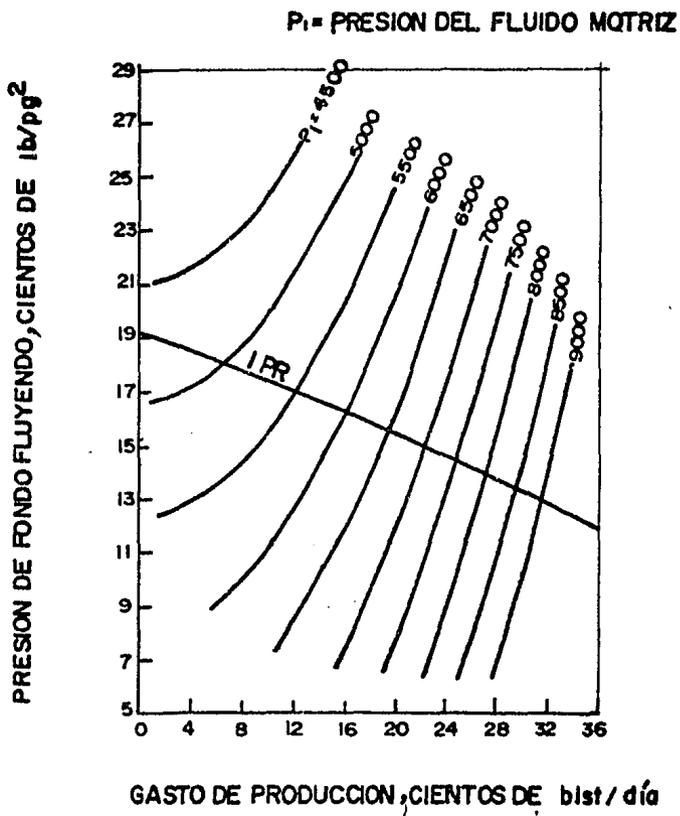
El mismo tipo de cálculos se hizo para otros gastos supuestos. Los resultados de éstos, se muestran en la tabla 2.6. En la Fig. 2.4, la presión  $P_4$  se graficó contra  $Q_4$  para las distintas presiones -- del fluido motriz. Asimismo la curva de IPR se graficó empleando - la misma escala.

T A B L A 2.6

PRESION DE ENTRADA PARA UNA BOMBA HIDRAULICA EN EL POZO # 1  
(BOMBEANDO LIQUIDO)

$P_4$  para presiones de fluido motriz de

$Q_4$	$P_3$	$F_p$	4,500	5,000	5,500	6,000	6,500	7,000	7,500	8,000	8,500	9,000
400	3,200	110	2,159	1,721	1,283	845	408	- -	- -	- -	- -	- -
800	3,273	131	2,314	1,876	1,438	1,453	453	125	- -	- -	- -	- -
1,200	3,387	205	2,595	2,154	1,716	1,278	840	402	- -	- -	- -	- -
1,600	3,541	279	2,945	2,507	2,069	1,631	1,193	755	318	- -	- -	- -
2,000	3,735	378	3,396	2,958	2,520	2,082	1,645	1,207	769	331	- -	- -
2,400	3,971	506	3,951	3,513	3,075	2,637	2,199	1,761	1,324	886	448	10
2,800	4,249	677	4,623	4,185	3,747	3,309	2,871	2,434	1,996	1,558	1,120	682
3,200	4,572	850	5,379	4,941	4,503	4,066	3,628	3,190	2,752	2,314	1,876	1,439
3,600	4,950	935	6,144	5,707	5,269	4,831	4,393	3,955	3,517	3,080	2,641	2,204



**FIG. 2.4. CURVAS DE ENTRADA PARA BOMBEO HIDRAULICO  
EN EL POZO N° 1 (BOMBEANDO LIQUIDOS)**

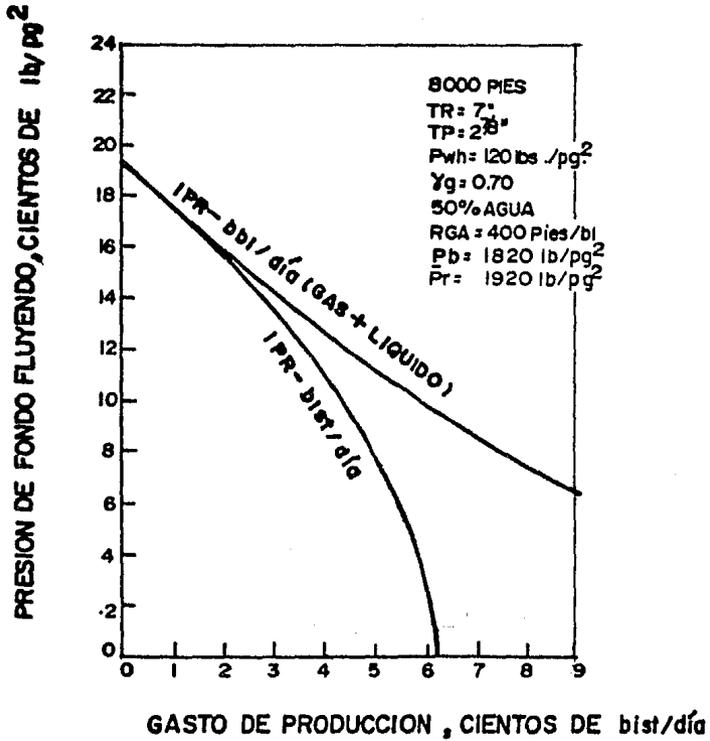


FIG. 2.5 RELACION DE COMPORTAMIENTO DE AFLLENCIA PARA EL POZO Nº 1

Los gastos posibles son encontrados en la intersección de las curvas de entrada a la bomba con la curva de IPR. Por ejemplo, el pozo puede producir 650 blst/día con una presión de fluido motriz de 5000 lb/pg<sup>2</sup>. Para este gasto, de la ecuación 2.19 se obtiene:

$$\text{SPM} = 650/64.4 = 10 \text{ EPM}$$

Con esto la ecuación 2.20 se obtiene:

$$Q_1 = (73.69) (10) = 744 \text{ bl o st/día}$$

Para una presión de fluido motriz de 5000 lb/pg<sup>2</sup> y un gasto de fluido motriz de 744 blo st/día.

$$P_s = 2221 \text{ lb/pg}^2 \text{ (correlación de flujo multifásico)}$$

con ésto, de la ecuación 2.15 se obtiene:

$$\text{HP} = 1.7 \times 10^{-5} \times 744 \times 2221 = 28 \text{ HP}$$

El mismo tipo de cálculo fue hecho para otros gastos posibles. Los resultados se muestran en la tabla 2.7. El gasto posible  $q_p$  se graficó contra  $Q_1$ ,  $P_4$  y HP en la Fig. 2.6. El desplazamiento de la bomba disponible ( $4015 \times 0.85 = 3413$  bl st/día) fue considerado en la misma figura.

T A B L A      2.7

REQUERIMIENTOS DE POTENCIA PARA LOS POSIBLES GASTOS PARA EL POZO -  
#1 CON BOMBEO HIDRAULICO (BOMBEANDO LIQUIDOS).

$P_1$	$q_p$	SPM	$Q_1$	$P_s$	HP	$\Delta q_p / \Delta HP$
5,000	650	10	744	2,221	28	15
5,500	1,190	18	1,362	2,777	64	10.8
6,000	1,590	25	1,819	3,337	103	7.7
5,500	1,920	30	2,197	3,903	146	6.4
7,000	2,220	34	2,540	4,477	193	5
7,500	2,470	38	2,826	5,052	243	4.4
8,000	2,710	42	3,101	5,635	297	3.7
8,500	2,925	45	3,347	6,221	354	3.3
9,000	3,125	49	3,576	6,811	414	- -

De la Fig. 2.6, es evidente que arriba de 4000 bl st/día, la presión requerida aumenta rápidamente sin una ganancia significativa en el gasto de producción. De aquí, que este gasto será seleccionado si éste está dentro del desplazamiento de la bomba disponible, por un lado, y por otro si éste no rebasa el límite de presión de operación en la superficie. En este caso, sin embargo se usará el límite recomendado de 4000 lb/pg<sup>2</sup> de presión de operación en la superficie. Con esta presión el pozo puede producir -- 1,975 blost/día para los cuales el gasto de fluido motriz es de - 2260 blost/día y la potencia requerida es de 154 HP (Ver Fig. 2.6)

GASTO DEL FLUIDO MOTRIZ, CIENTOS DE bls/día

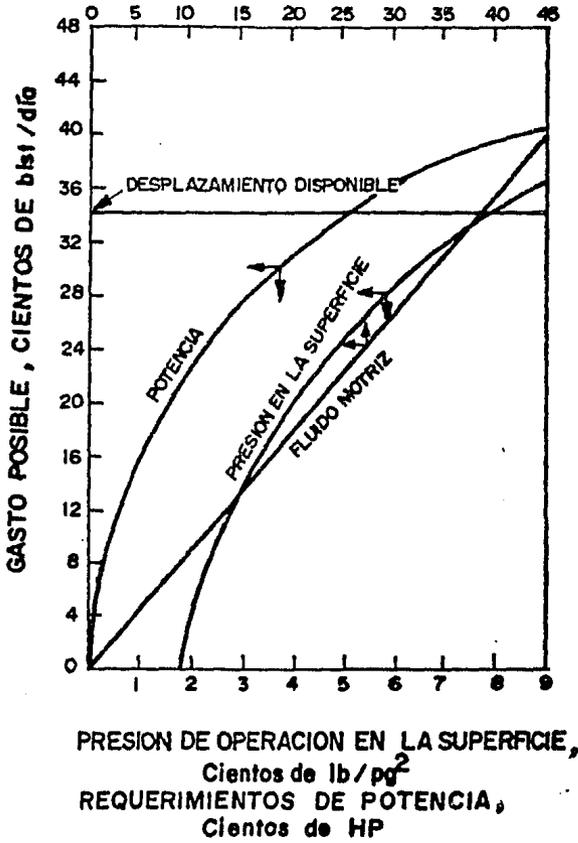


FIG. 2.6 POSIBLES GASTOS DE PRODUCCION POR BOMBEO HIDRAULICO CONTRA HP, PS, y Q<sub>i</sub> PARA EL POZO N° 1 ( Bombeando líquido )

## EJEMPLO Pozo # 2

(SOLO LIQUIDO)

Este ejemplo fue resuelto empleando el mismo procedimiento, y los resultados se muestran en las Figs. 2.7 y 2.8, las cuales utilizan los datos de las tablas 2.8 y 2.9.

La presión requerida para los gastos (obtenidos de la Fig. 2.7) se muestran en la tabla 2.9. La Fig. 2.8 es una gráfica de  $q_p$  contra HP, Ps y  $Q_1$ . Para este gasto en (bl/día), la potencia en -- (HP), la presión de operación en la superficie ( $lb/pg^2$ ) y, el gasto de fluido motriz son 43.5, 2250 y 1135 respectivamente (Ver Fig. 2.8).

## T A B L A 2.8

PRESION DE ENTRADA PARA BOMBEO HIDRAULICO EN EL POZO # 2  
(BOMBEANDO LIQUIDO)

$P_4$  para presiones de trabajo supuestas.

$Q_4$	$P_3$	$F_p$	3,500	3,750	4,000	4,250	4,500	4,750
50	2,727	52	1,394	931	468	- -	- -	- -
100	2,741	97	1,516	1,053	590	127	- -	- -
150	2,159	156	1,675	1,212	749	286	- -	- -
200	2,783	202	1,828	1,365	900	439	- -	- -
250	2,812	260	2,020	1,557	1,094	631	168	- -
300	2,847	327	2,244	1,781	1,318	855	392	- -
350	2,887	406	2,505	2,042	1,579	1,116	653	190
400	2,934	454	2,725	2,262	1,799	1,336	873	410

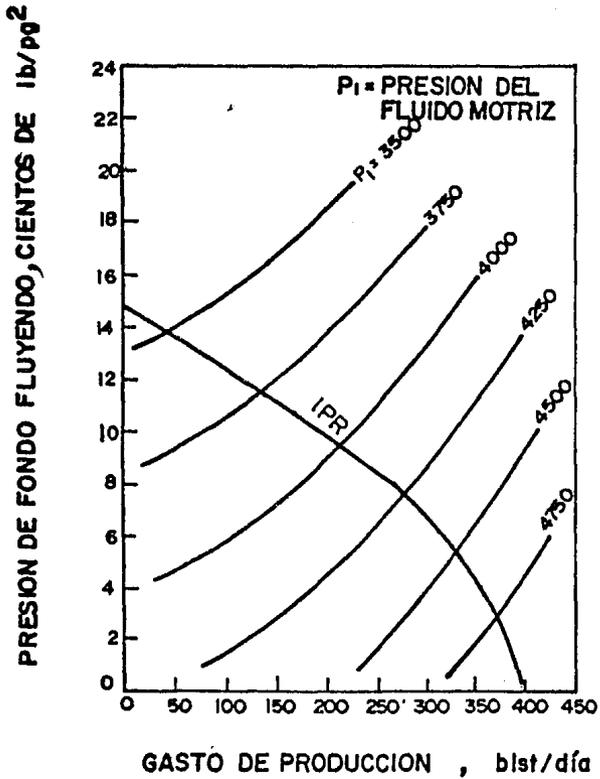


FIG. 2.7 CURVAS DE ENTRADA PARA BOMBEO HIDRAULICO EN EL POZO N° 2 (BOMBEANDO LIQUIDO)

T A B L A            2.9

REQUERIMIENTOS DE POTENCIA PARA LOS POSIBLES GASTOS PARA EL POZO -  
#2 CON BOMBEO HIDRAULICO (BOMBEANDO LIQUIDO)

$P_1$	$q_p$	SPM	$Q_1$	$P_s$	HP	$\Delta q_p / \Delta HP$
3,500	47	18.7	142	860	2.1	15.25
3,750	137	54.5	415	1,124	8	10.38
4,000	220	87.4	666	1,405	16	7.23
4,250	280	111.3	848	1,684	24.3	5.49
4,500	330	131.2	1,000	1,963	33.4	4.38
4,750	372	147.9	1,127	2,242	43	- -

BOMBEANDO LIQUIDO Y GAS.

Debido a la compresibilidad del gas; V no puede considerarse constante pero puede determinarse a la presión de entrada con la ecuación:

$$V = Q_4 \times VF$$

donde:

V = volumen de gasto de fluido motriz, (bl/dfa)

VF = factor de volumen

Con esto, la ecuación 2.7 quedará:

$$Q_4 \text{ VF} = q_4 \times \text{SPM} \times \text{Eb}$$

o

$$\text{SPM} = Q_4 \text{ VF} / q_4 \text{ Eb} \dots \quad (2.22)$$

donde VF se determina a la presión de entrada de la ecuación:

$$\text{VF} = f_w + (1-f_w) B_o + GJP (RGL - (1-f_w) R_s) B_g \dots \quad (2.23)$$

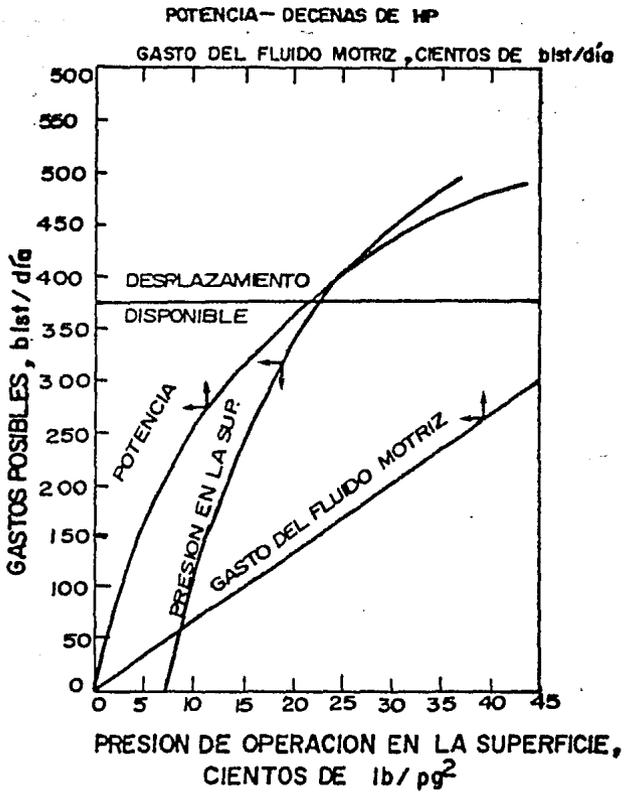


FIG. 2.8 POSIBLES GASTOS DE PRODUCCION POR BOMBEO HIDRAULICO VS HP,  $P_s$  y  $Q_i$  PARA EL POZO N° 2 (BOMBEANDO LIQUIDO)

Para un sistema abierto usando aceite como fluido motriz, el gasto total de líquido, la relación gas-aceite, y el porcentaje de agua en la columna de producción es como sigue:

$$Q_T = Q_1 + Q_4 \dots \dots \quad (2.24)$$

$$RGA = \frac{Q_4}{Q_1 + Q_4} \frac{RGL}{(1-f_w)} \dots \dots \quad (2.25)$$

y

$$f_{w2} = \frac{Q_4}{Q_T} f_w \dots \dots \quad (2.26)$$

respectivamente. Para un sistema cerrado, la relación gas-aceite y el porcentaje de agua en la columna de producción es constante.

A diferencia del caso cuando se bombea puro líquido, la predicción de curvas de entrada para el caso de gas-líquido es indirecta. Esto se debe a que la presión de entrada debe ser conocida para estimar VF.

Como la contrapresión en la superficie y la presión en la cabeza son supuestas y serán fijas, debe fijarse también la presión en la descarga para el mismo gasto. De aquí que la presión del fluido motriz no puede ser supuesta tal como se hizo en el caso de líquido pero, puede ser calculada ya sea con la ecuación 2.13 o la ecuación 2.14.

Para facilitar la elaboración de la gráfica de las curvas de entrada, es necesario obtener la presión de entrada para los

gastos de producción para presiones de fluido motriz iguales. Esto se puede completar ya sea graficando  $P_4$  contra  $P_1$  para cada gasto o por interpolación.

Resolviendo las ecuaciones 2.13 y 2.14 para  $P_1$  se obtiene:

Para sistemas cerrados:

$$P_1 = P_2 + (P_3 - P_4) (P/E) + F_p = 0 \dots \quad (2.27)$$

Para sistemas abiertos:

$$P_1 = P_3 + (P_3 - P_4) (P/E) + F_p = 0 \dots \quad (2.28)$$

#### SELECCION DE LA BOMBA

Además del diámetro de la tubería de producción o tubería de revestimiento, los demás factores que intervienen en la selección de la bomba son la relación  $P/E$  y la diferencia en los requerimientos de fluido motriz. Debido a la existencia de gas en este caso, la diferencia en el fluido motriz requerido será mayor que en el caso de líquido. Con esto la bomba que puede usarse en el caso de líquido podrá usarse para el caso de gas-líquido.

#### PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACION DE LAS CURVAS DE ENTRADA PARA -- BOMBEO DE GAS Y LIQUIDO.

Como en el ejemplo anterior, el límite en la presión de --  
operación es reducido. El procedimiento para elaborar las curvas -

de entrada se ilustra con los ejemplos 3 y 4.

- (1) Decidir el tipo de fluido motriz (aceite o agua) y el tipo de sistema de fluido motriz (cerrado o abierto).
- (2) Seleccionar una bomba subsuperficial disponible.
- (3) Suponer varios gastos de producción en blst/día y, para cada uno de éstos gastos hacer lo siguiente:
  - (a) Suponer una presión de entrada.
  - (b) Determinar VF a la presión supuesta de entrada, con la ecuación 2.23.
  - (c) Calcular SPM de la ecuación 2.22. Calcular  $Q_1$  de la ecuación 2.10.
  - (d) Determinar el porcentaje de gasto. Enseguida, determinar  $F_p$  de la Fig. 2.2.
  - (e) Determinar la(s) presión(es) de la descarga empleando correlaciones de flujo multifásico.
  - (f) Calcular la presión del fluido motriz de la ecuación 2.27 o ecuación 2.28.
  - (g) Repetir los pasos b-f para otras presiones de entrada supuestas.
- (4) Por interpolación o graficando, obtener las presiones de entrada para los gastos de producción supuestas para las mismas presiones de fluido motriz.
- (5) Graficar la presión de entrada (obtenida en el paso 4) contra gasto para varias presiones de fluido motriz, graficar la curva de IPR en blst/día a la misma escala en la misma gráfica.

- (6) Leer los gastos posibles en la intersección de las curvas de entrada de la bomba con la curva de IPR.
- (7) Para cada gasto posible, calcular  $Q_1$ . Determinar la presión de operación en la superficie. Calcular HP de la ecuación 2.15.
- (8) Graficar el gasto posible contra  $P_1$ ,  $P_s$  y HP. Considerar - el 85% del desplazamiento de la bomba a la velocidad de -- bombeo en la misma gráfica.
- (9) Seleccionar el gasto de producción óptimo.

#### SELECCION DEL GASTO

Ya sea que se bombee puro líquido o gas con líquido, la selección del gasto debe ser:

- (1) Tomar el 85% del desplazamiento de la bomba.
- (2) Lo mas económico posible.

Como la presión del fluido motriz y, consecuentemente, el gasto de producción y de fluido motriz se incrementa, el efecto de pérdidas por fricción en las tuberías empieza a manifestarse por - sí sola.

Como resultado, la ganancia en gasto de producción por cada HP tiende a disminuir hasta que se hace insignificante.

### EJEMPLO PROBLEMA # 3

Debido a que la bomba está sentada en el fondo del pozo y todo el gas se bombea con el líquido, se puede aplicar la curva de IPR de la Fig. 2.5 y el dato de factor de volumen de la tabla 2.10. Referir las Figs. 2.9 y 2.10 para la solución.

T A B L A                      2.10

DATOS DE VF A VARIAS PRESIONES PARA EL FLUIDO DEL POZO #1  
( T = 170°F, Rsw = 0, Bw = 1.0 )

P	Rs	Bo	Bg	VF
200	27.9	1.0631	0.0155	3.9210
400	64.4	0.0782	0.0076	2.3197
600	105	1.0953	0.0050	1.7900
800	148.4	1.1141	0.0038	1.5302
1,000	194.2	1.1343	0.0030	1.3733
1,200	241.9	1.1557	0.0025	1.2718
1,400	291.3	1.1783	0.0021	1.2025
1,600	342.2	1.2019	0.0018	1.1533
1,800	394.3	1.2266	0.0015	1.1175
2,000*	400	1.2259	- -	1.1129
2,200	400	1.2227	- -	1.1114
2,400	400	1.2201	- -	1.1101
2,600	400	1.2179	- -	1.1090
2,800	400	1.2160	- -	1.1080
3,000	400	1.2144	- -	1.1072
3,200	400	1.2129	- -	1.1058
3,400	400	1.2117	- -	1.1058
3,600	400	1.2106	- -	1.1053
3,800	400	1.2096	- -	1.1048
4,000	400	1.2087	- -	1.1043
4,200	400	1.2078	- -	1.1039
4,400	400	1.2071	- -	1.1036
4,600	400	1.2064	- -	1.1032
4,800	400	1.2058	- -	1.1029
5,000	400	1.2052	- -	1.1026

\* Arriba de la presión de burbujeo.

T A B L A      2.11

DATOS DE LA VF A VARIAS PRESIONES PARA EL FLUIDO DEL POZO # 2  
( T = 167° F)

P	R <sub>s</sub>	Bo	B <sub>g</sub>	VF
200	31.1	1.0554	0.0157	3.7216
400	71.6	1.0788	0.0077	2.0639
600	116.8	1.0975	0.0050	1.5176
800	165.2	1.1180	0.0037	1.2483
1,000*	200	1.1315	- -	1.1315
1,200	200	1.1277	- -	1.1277
1,400	200	1.1249	- -	1.1249
1,600	200	1.1229	- -	1.1229
1,800	200	1.1213	- -	1.1213
2,000	200	1.1200	- -	1.1200
2,200	200	1.1190	- -	1.1190
2,400	200	1.1181	- -	1.1181
2,600	200	1.1174	- -	1.1174
2,800	200	1.1168	- -	1.1168
3,000	200	1.1162	- -	1.1162
3,200	200	1.1157	- -	1.1157
3,400	200	1.1153	- -	1.1153
3,600	200	1.1149	- -	1.1149
3,800	200	1.1146	- -	1.1146
4,000	200	1.1143	- -	1.1143
4,200	200	1.1140	- -	1.1140
4,400	200	1.1138	- -	1.1138
4,600	200	1.1136	- -	1.1136
4,800	200	1.1134	- -	1.1134
5,000	200	1.1132	- -	1.1132

\* Arriba de la presión de burbujeo.

Para el caso de líquido la bomba #1 fue seleccionada sobre la bomba #3 debido a que, para la misma presión de operación en la superficie, da un mayor gasto de producción, requiriendo de un menor gasto de fluido motriz y su porcentaje de desplazamiento fue menor. La diferencia con los gastos de producción de ambas bombas se atribuyó a la diferencia en los gastos de fluido motriz el cual, - en girar, hace que el efecto de fricción sea más grande para la --

bomba # 1. En este caso, debido a la existencia del gas, el gasto del fluido será igualmente alto, de aquí, se disminuirá la presión de operación en la superficie.

Suponiendo:

$$E_b = 85\% \text{ y } E_m = 90\%$$

las ecuaciones 2.23 y 2.10 quedarán:

$$SPM = Q_4 VF / (75.76 \times 0.85) = Q_4 VF / 64.4 \dots \quad (2.29)$$

y

$$Q_1 = (66.32) SPM / 10.9 = 73.69 SPM \dots \quad (2.30)$$

Para el fluido del pozo # 1, las ecuaciones 2.24, 2.25 y 2.26 quedaron:

$$Q_T = Q_1 + Q_4 \dots \quad (2.31)$$

$$RGA_2 = \frac{200 Q_4}{Q_1 + 0.5 Q_4} \dots \quad (2.32)$$

y

$$f_{w_2} = \frac{0.5 Q_4}{Q_T} \dots \quad (2.33)$$

La relación P/E para la bomba # 1 es 1.142, la ecuación 2.28 queda:

$$P_1 = P_3 + 1.142 (P_3 - P_4) + F_p \dots \quad (2.34)$$

Si se supone un gasto en la superficie de 4000 blst/día y una presión de entrada de 200 lb/pg<sup>2</sup> entonces:

$$VF = 3.9210 \text{ bl/blst (Tabla 2.10)} \quad 200 \text{ lb/pg}^2$$

$$SPM = (400)(3.9210)/64.4 = 24.36 \text{ EMP (Ecuación 2.29)}$$

$$\% \text{ Rs} = (24.36) (100) / 53 = 45.95$$

Para un 45.95% de desplazamiento, la Fig. 2.2 da:

$$F_p = 273 \text{ lb/pg}^2$$

$$Q_1 = (73.69) (24.36) = 1795 \text{ blst/día (Ecuación 2.30)}$$

$$Q_T = 1795 + 400 = 2195 \text{ blst/día (Ecuación 2.31)}$$

$$RGA_2 = \frac{(200)(400)}{1795 + 400} = 40 \text{ pies}^3/\text{blst (Ecuación 2.32)}$$

$$fw_2 = \frac{(6.5) (400)}{2195} = 9\% \quad (\text{Ecuación 2.33})$$

Con el gasto de líquido de 2195 blst/día, RGA de 40 pies<sup>3</sup>/blst, 9% de porcentaje de agua, y los datos del pozo y del fluido de la tabla 5.1, de una correlación de flujo multifásico en tuberías verticales se obtiene:

$$P_3 = 3,175 \text{ (lb/pg}^2)$$

Con esto, la ecuación 2.34 da:

$$P_1 = 3.175 + (1.142) (3,175 - 200) + 273 = 6,846 \text{ lb/pg}^2$$

Con otras presiones de entrada supuestas se hicieron cálculos similares para el mismo gasto de 400 bl st/día. La Tabla 2.12 muestra la continuación de los cálculos.

T A B L A      2.12

PRESIONES DE FLUIDO MOTRIZ PARA BOMBEO HIDPAULICO EN EL POZO # 1 -  
(BOMBEANDO 400 bl st/dfa CON TODO EL GAS)

P <sub>4</sub>	VF	SPM	%RS	Fp	Q <sub>1</sub>	Q <sub>T</sub>	RGA <sub>2</sub>	fw <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>1</sub>
200	3,9210	24.36	45.95	273	1,795	2,195	40	0.09	3,175	6,846
300	2,8532	17.72	33.44	193	1,306	1,706	53	0.12	3,122	6,538
400	2,3197	14.41	27.19	153	1,062	1,462	63	0.14	3,098	6,332
500	2,0009	12.53	23.45	131	916	1,316	72	0.15	3,082	6,162
600	1,7900	11.12	20.98	116	819	1,219	78	0.16	3,072	6,010
700	1,6410	10.19	19.23	106	751	1,151	84	0.17	3,065	5,871
800	1,5302	9.50	17.93	99	700	1,100	89	0.18	3,052	5,723
900	1,4425	8.96	16.91	93	660	1,060	93	0.19	3,047	5,591
1,000	1,3733	8.53	16.10	89	629	1,029	97	0.19	3,042	5,463
1,100	1,3175	8.18	15.44	85	603	1,003	100	0.20	3,038	5,337
1,200	1,2718	7.90	14.91	82	582	982	102	0.20	3,035	5,213
1,300	1,2340	7.67	14.46	80	565	964	105	0.21	3,033	5,091
1,400	1,2025	7.47	14.10	78	550	950	107	0.21	3,030	4,970
1,500	1,1759	7.30	13.78	76	538	938	108	0.21	3,029	4,852
1,600	1,1533	7.16	13.52	75	527	927	110	0.22	3,027	4,732
1,700	1,1342	7.04	13.29	73	519	919	111	0.22	3,025	4,613
1,800	1,1175	6.94	13.10	72	512	912	112	0.22	3,024	4,495
1,900	1,1139	6.92	13.10	72	510	910	113	0.22	3,024	4,380
2,000	1,1129	6.91	13	72	510	910	113	0.22	3,024	4,265

Interpolando la tabla 2.12 se obtiene:

P <sub>1</sub>	-	P <sub>4</sub>
4500	-	1795
5000	-	1375
5500	-	971
6000	-	607
6500	-	317

El mismo tipo de cálculos se hizo para otros gastos.

Los resultados se muestran en la tabla 2.13. La presión de entrada  $P_4$  se graficó contra  $Q_4$  para las distintas presiones de fluido motriz en la Fig. 2.9. La curva de IPR en bl st se graficó a la misma escala en la misma figura. Los gastos posibles se encuentran en la intersección de las curvas de entrada a la bomba con la curva de IPR.

T A B L A 2.13

PRESIONES DE ENTRADA PARA BOMBEO HIDRAULICO EN EL POZO # 1  
(BOMBEANDO LIQUIDO Y GAS)

Interpolando valores de  $P_4$  para presiones de fluido motriz de:

$Q_4$	4,500	5,000	5,500	6,000	6,500	7,000	7,500	8,000	8,500
400	1,795	1,375	971	607	317	162	- -	- -	- -
800	1,946	1,584	1,195	849	562	378	280	225	179
1,200	2,324	1,888	1,496	1,142	845	624	477	385	320
1,600	2,739	2,304	1,870	1,504	1,185	930	737	598	495
2,000	3,277	2,842	2,408	1,975	1,605	1,308	1,068	880	734
2,400	3,926	3,491	3,057	2,623	2,192	1,777	1,486	1,242	1,042
2,800	4,677	4,242	3,807	3,372	2,939	2,507	2,078	1,705	1,444
3,200	- -	- -	4,578	4,143	3,707	3,273	2,839	2,407	1,977
3,600	- -	- -	- -	4,881	4,405	4,010	3,576	3,142	2,710

Por ejemplo, el pozo puede producir 530 bl st/día con una presión del fluido motriz de 4,500 lb/pg<sup>2</sup>. La presión de entrada para 530 bl st/día es 1,830 lb/pg<sup>2</sup> a la cual:

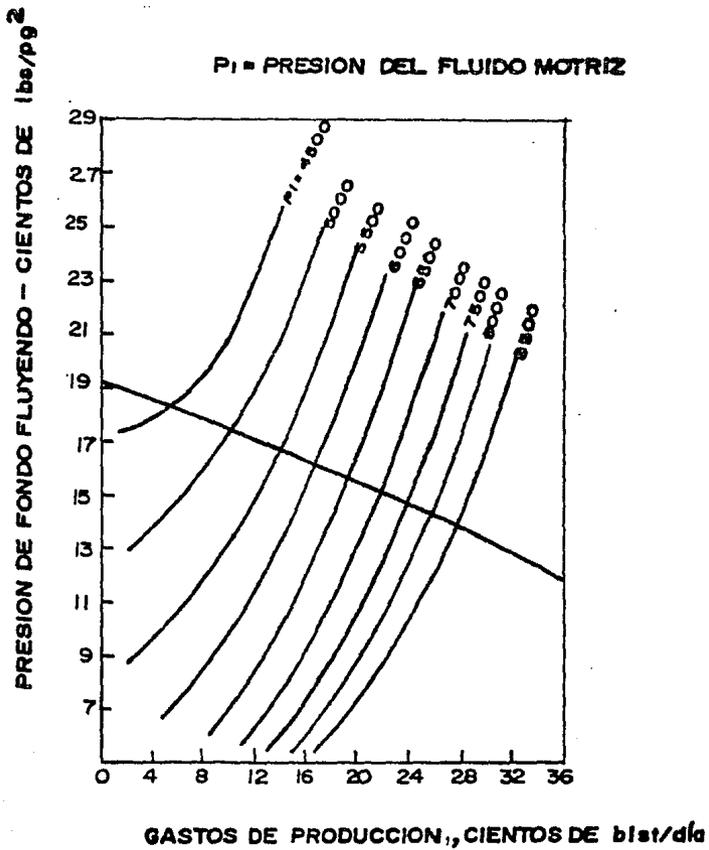


FIG. 2.9 CURVAS DE ENTRADA POR BOMBEO HIDRAULICO  
 EN EL POZO N.º 1  
 ( BOMBEANDO LIQUIDO Y GAS )

$$VF = 1.1150 \text{ bl/blst (Tabla 2.10 } \quad 1,830 \text{ lb/pg}^2)$$

con esto:

$$SPM = (530) (1.1150)/64.4 = 9.18 \text{ EPM (Ecuación 2.29)}$$

$$Q_1 = (73.69)(9.18) = 676 \text{ blost/dfa (Ecuación 2.30)}$$

Para un gasto de fluido motriz de 676 blost/dfa y 4,500 lb/pg<sup>2</sup> de presión de fluido motriz:

$$P_s = 1,659 \text{ lb/pg}^2 \text{ (de correlación de fluido multifásico)}$$

con esto, la ecuación 2.15 se obtiene:

$$HP = (1.7 \times 10^{-5}) (1659) (676) = 19.1 \text{ HP.}$$

El mismo tipo de cálculos se hizo para otros gastos. Los resultados se muestran en la tabla 2.14. El gasto posible  $q_p$  se graficó contra  $Q_1$ ,  $P_s$  y HP en la Fig. 2.10

T A B L A      2.14

REQUERIMIENTOS DE POTENCIA PARA POSIBLES GASTOS PARA EL POZO # 1  
CON BOMBEO HIDRAULICO (BOMBEANDO LIQUIDO Y GAS)

$P_1$	$q_p$	$P_4$	VF	SPM	$Q_1$	$P_s$	HP	$\Delta q_p / \Delta HP$
4,500	530	1,830	1.1150	9.18	676	1,659	19.1	16.17
5,000	1,020	1,740	1.1272	17.85	1,316	2,209	49.4	10.72
5,500	1,405	1,665	1.1405	24.82	1,834	2,781	86.7	7.25
6,000	1,700	1,610	1.1513	30.39	2,240	3,346	127.4	5.97
6,500	1,955	1,560	1.1619	35.37	2,599	3,849	170.1	4.45
7,000	2,180	1,510	1.1734	39.72	2,927	4,435	220.7	3.70
7,500	2,390	1,470	1.1833	43.72	3,236	5,042	277.4	2.94
7,000	2,570	1,430	1.1940	47.65	3,511	5,672	338.6	2.58
7,500	2,750	1,390	1.2053	51.47	3,793	6,332	408.3	- -

El desplazamiento de la bomba disponible ( $4,105 \times 0.85 = 3,413$  bl/día) en este caso se refiere al volumen de gas mas liquido a la presión de entrada.

Este se puede convertir a blst/día entrando a la curva de IPR en bl/día (Fig. 2.5) a 3,413 bl/día y de aquí moviéndose horizontalmente a la curva de IPR en blst/día de donde se obtiene --- 2,850 bl st/día. Este gasto se consideró en la Fig. 2.10. En ésta se observa que arriba de 3600 blst/día, la presión de operación en la superficie así como la potencia requerida se incrementan considerablemente sin cambios significativos en el gasto de producción. De aquí, que este gasto podrá ser el seleccionado si por una parte es menor al disponible por la bomba y por otra parte si el límite de presión de operación en la superficie no se excede.

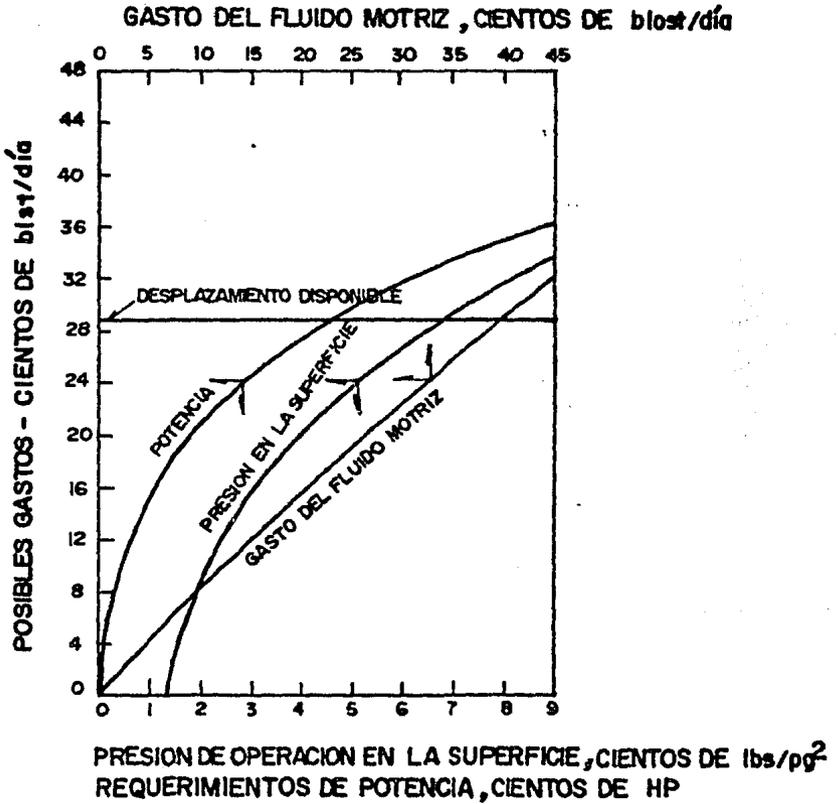


FIG.2.10 POSIBLES GASTOS DE PRODUCCION POR BOMBEO HIDRAULICO  
 CONTRA HP, PS Y Q<sub>1</sub> PARA EL POZO Nº 1  
 ( BOMBEANDO LIQUIDO Y GAS )

En este caso, el límite en la presión de operación en la superficie de  $4000 \text{ lb/pg}^2$ , será usado. Con esta presión el pozo -- puede producir  $2010 \text{ blst/día}$ , que es mayor que el obtenido previamente para el caso de líquido ( $1975 \text{ blst/día}$ ), el gasto del fluido motriz es de  $2,680 \text{ blst/día}$ , y la potencia es  $180 \text{ HP}$  (Fig. 2.10).

#### EJEMPLO PROBLEMA # 4.

Los datos del pozo, fluidos, y yacimiento se muestra en la tabla 2.5. Los cálculos de VF con 100% se tomaron en la tabla 2.11. La IPR en  $\text{bl st/día}$  y en  $\text{bl/día}$  se muestran en la Fig. 2.11.

El mismo tipo de cálculos hechos previamente para el pozo #1 se hicieron para este pozo. La bomba que se encontró más adecuada fue la bomba #1 (mostrada en la tabla 2.4).

Los resultados de los cálculos se muestran en las tablas 2.15 y 2.16.

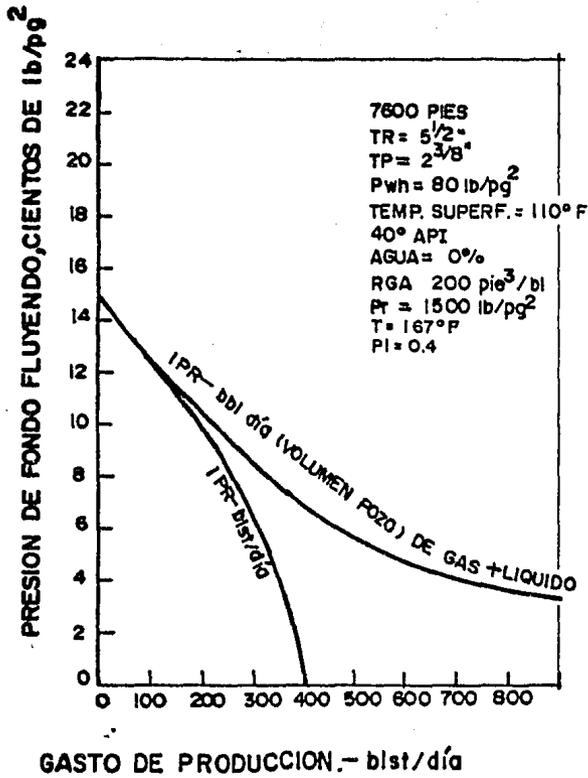


FIG. 2.11 RELACION DE COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA PARA EL POZO N° 2

T A B L A      2.15

PRESIONES DE ENTRADA PARA BOMBEO HIDRAULICO EN EL POZO #2  
(BOMBEANDO LIQUIDO Y GAS)

Interpolando valores de  $P_4$  para presiones de fluido motriz

$Q_4$	3,500	3,750	4,000	4,250	4,500	4,750
50	1,285	843	506	310	210	150
100	1,457	998	640	430	315	240
150	1,644	1,185	805	570	440	360
200	1,890	1,430	1,015	735	585	490
250	2,196	1,740	1,285	950	780	660
300	2,533	2,074	1,617	1,240	1,020	870
350	2,942	2,481	2,019	1,560	1,340	1,140

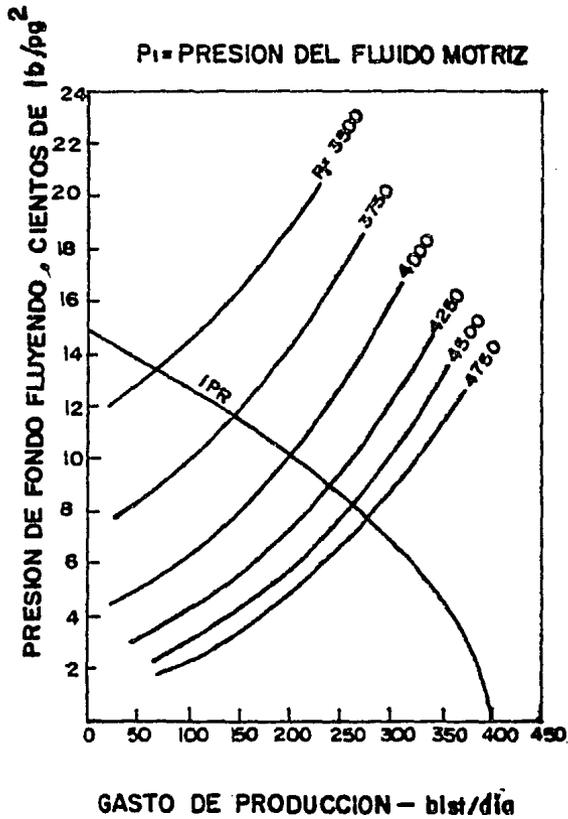
T A B L A      2.16

REQUERIMIENTOS DE POTENCIA PARA LOS GASTOS POSIBLES PARA EL POZO #2  
CON BOMBEO HIDRAULICO      ( BOMBEANDO LIQUIDO Y GAS )

$P_1$	$q_p$	$P_4$	VF	SPM	$Q_1$	$P_s$	HP	$\Delta q_p / \Delta HP$
3,500	66	1,335	1.1257	29.53	225	862	3	12.67
3,750	142	1,150	1.1285	63.69	485	1,131	9	7.86
4,000	197	1,010	1.1301	88.48	674	1,406	16	5.13
4,250	238	895	1.1645	110.15	840	1,682	24	2.75
4,500	260	825	1.2238	126.47	964	1,956	32	1.89
4,750	277	765	1.2838	141.34	1,077	2,232	41	- -

La información de la tabla 2.15 se graficó en la Fig. 2.12.

La curva de IPR en bl st/día se graficó a la misma escala en la misma figura. La potencia requerida para los gastos posibles --



**FIG. 2.12. CURVAS DE ENTRADA POR BOMBEO HIDRAULICO  
EN EL POZO Nº 2  
( BOMBEANDO LIQUIDO Y GAS )**

POTENCIA – DECENAS DE HP  
 GASTO DE FLUIDO MOTRIZ – CIENTOS DE blst/día

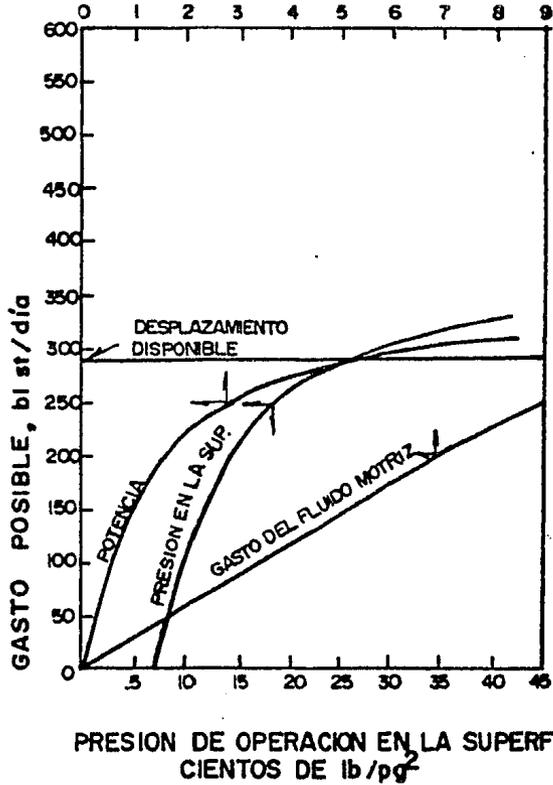


FIG. 2.13 POSIBLES GASTOS DE PRODUCCION POR BOMBEO HIDRAULICO  
 CONTRA HP, PS y Q1 PARA EL POZO Nº 2  
 ( BOMBEANDO LIQUIDO Y GAS )

(obtenidos en la Fig. 2.12) se muestran en la tabla 2.16. La Fig. 2.13 es una gráfica de  $q_0$  contra HP,  $P_s$  y  $Q_1$ . El gasto seleccionado es 290 blst/día (desplazamiento admisible de la bomba). Para este gasto, los requerimientos de potencia, la presión de operación en la superficie, y el gasto de fluido motriz son 51,2550 y 1085 -- respectivamente (Ver Fig. 2.13).

#### DISCUSION DE RESULTADOS.

Si se bombea únicamente líquido (Figs. 2.6 y 2.8) o si se bombea gas con el líquido (Figs. 2.10 y 2.13), es evidente que la ganancia en el gasto de producción por cada HP disminuye como el incremento en el gasto. Esto se debe al efecto de pérdidas por fricción en las tuberías, con trabajos que incrementan la presión de descarga y reducen la presión del fluido motriz. Nótese que el efecto de pérdidas por fricción en el pozo #2 es menor debido a los gastos bajo asociados con este pozo.

Comparando la Fig. 2.4 con la Fig. 2.9 o la Fig. 2.7 con la Fig. 2.12 se observa que, para la presión de entrada arriba o poco abajo del punto de burbujeo ( $1820 \text{ lb/pg}^2$ ) para el crudo del pozo #1 y ( $940 \text{ lb/pg}^2$ ) para el crudo del pozo #2, se pueden obtener gastos mayores bombeando un pequeño volumen de gas con el líquido.

La razón es la existencia de gas en la columna de producción reduce la presión de descarga abajo del nivel necesario para

el caso en que no hay gas. Sin embargo, debido a las caídas de presión en la entrada, abajo del punto de burbujeo, toma lugar una gran expansión en el gasto de fluido motriz, causando un incremento significativo en el gasto de fluido motriz. Gasto de producción altos (líquido) combinados con gastos moderadamente altos de fluido motriz causan una declinación constante en la RGL, con la columna de producción y un continuo incremento en las pérdidas por fricción. Eventualmente, la presión de descarga excederá la requerida para el caso cuando se bombea únicamente líquido, y toma lugar el efecto opuesto.

### C A P I T U L O   I I I

#### BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET < A CHORRO >

## BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET ( A CHORRO )

El bombeo subsuperficial tipo Jet (a chorro) es un sistema especial de bombeo hidráulico, a diferencia del tipo pistón, no ocupa partes móviles y su acción de bombeo se realiza por medio de transferencia de energía entre el fluido motriz y los fluidos producidos.

### DESCRIPCION DEL EQUIPO

Un ejemplo típico de una bomba subsuperficial tipo chorro es el que se muestra en la Fig. 3.1, con detalles en la Fig. 3.2.

El fluido motriz entra por la parte superior de la bomba y pasa a través de la tobera, donde disminuye su presión y aumenta su velocidad. La tobera descarga un chorro en la cámara de entrada de los fluidos producidos, la cual tiene comunicación con la formación. El fluido producido se combina con el fluido motriz y entran a la cámara de mezclado de la bomba, la cual es de un diámetro más grande que el de la tobera.

Durante este proceso, el fluido motriz pierde energía que es ganada por los fluidos del pozo. La mezcla resultante de fluidos en la cámara de mezclado, tiene la presión suficiente para fluir en contra de los fluidos producidos. Mucha de esta presión total se pierde, para ganar velocidad de carga.

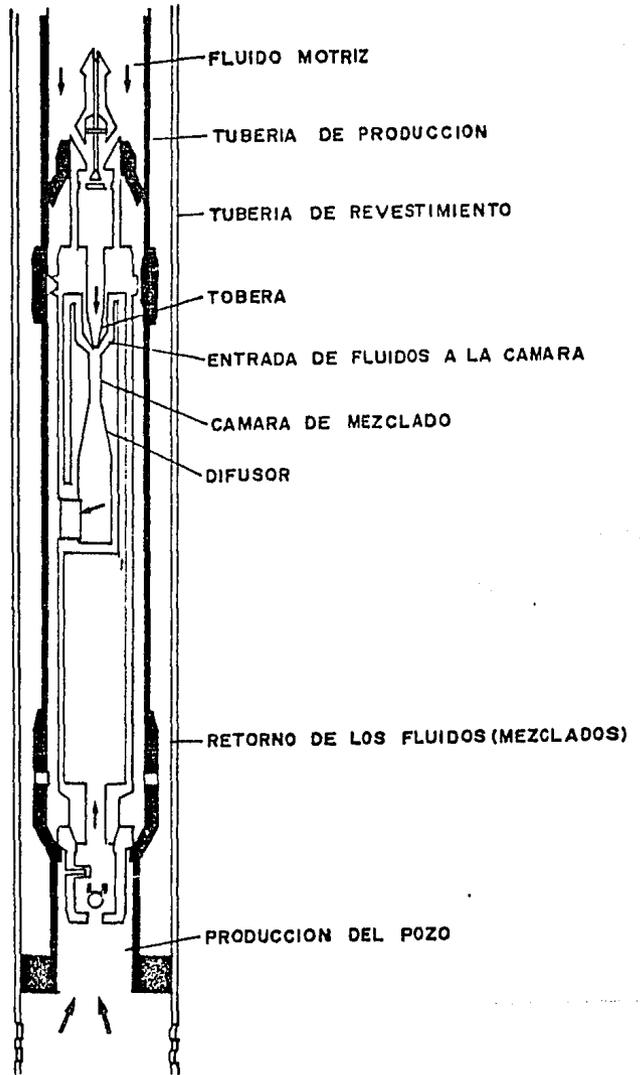
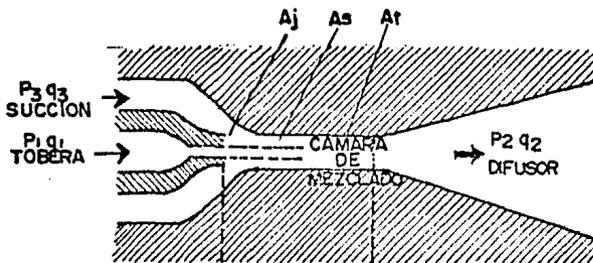
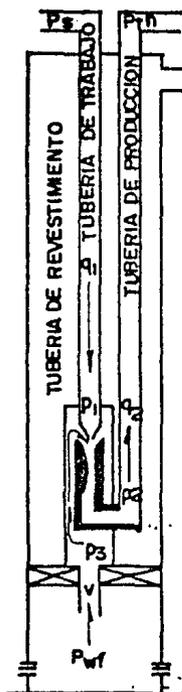


FIG. 3.J BOMBA LIBRE TIPO CHORRO



- $A_j$  = AREA DE LA TOBERA
- $A_5$  = AREA ANULAR DE LA CAMARA DE MEZCLADO
- $A_t$  = AREA DE LA TOBERA
- $q_1$  = GASTO DE LA TOBERA
- $q_2$  = GASTO EN LA DESCARGA
- $q_3$  = GASTO EN LA SUCCION
- $P_1$  = PRESION EN LA TOBERA
- $P_2$  = PRESION EN LA DESCARGA
- $P_3$  = PRESION EN LA SUCCION

FIG. 3.2 NOMENCLATURA DE LA BOMBA HIDRAULICA TIPO JET



- $P_1$  = PRESION DEL FLUIDO MOTRIZ  $lb/pg^2$
- $P_2$  = PRESION DE DESCARGA  $lb/pg^2$
- $P_3 = P_{wf}$  = PRESION DE ENTRADA  $lb/pg^2$
- $P_4$  = PRESION DE OPERACION EN LA SUPERFICIE  $lb/pg^2$
- $P_5$  = PRESION DE OPERACION EN LA CABEZA DEL POZO  $lb/pg^2$
- $q_1$  = GASTO DE FLUIDO MOTRIZ  $bist/día$
- $q_2$  = GASTO TOTAL DE LIQUIDO EN LA TUBERIA DE PRODUCCION  $bist/día$
- $V$  = VOLUMEN DE ENTRADA  $m^3/día$

FIG. 3.3 INSTALACION DE BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET

La sección final de trabajo de la bomba tipo chorro es, -- por lo tanto, una forma especial de difusor, esto es, una sección de expansión de área que convierte la velocidad en una presión estática mayor que la presión ejercida por la columna de fluidos, -- permitiendo el flujo hacia la superficie. <sup>(4)</sup>

#### AREA ADIMENSIONAL

A la relación del área de la tobera al área total de la cámara de mezclado (Fig. 3.2) se le llama relación de áreas,  $O^{(4)}$ :

$$R = A_j/A_t \dots \quad (3.1)$$

#### GASTO ADIMENSIONAL

El gasto adimensional se define por:

$$M = q_3/q_1 \dots \quad (3.2)$$

donde:

$q_3$  = Gasto de fluido producido (líquido más gas).

$q_1$  = Gasto de fluido motriz

$q_3$  se determina a la presión de entrada con la ecuación 2.8. Cuando se bombean fluidos ligeramente compresibles, tal como los líquidos, éste puede considerarse constante e igual al gasto en la superficie.

#### CARGA ADIMENSIONAL

La carga adimensional se define como la relación del incre-

mento de presión que sufre el fluido producido entre las pérdidas de presión sufridas por el fluido motriz (ver Fig. 3.2 y 3.3).

$$H = \frac{P_2 - P_3}{P_1 - P_2} \dots \quad (3.3)$$

donde:

$P_1$  = presión del fluido motriz.

$P_2$  = presión de descarga.

$P_3$  = presión de entrada.

El desarrollo de la ecuación 3.3 se basa en el modelo de Lorenz's, o modelo mezcla-pérdida, involucra la conversión de velocidad estática a presión estática.

#### EFICIENCIA

La eficiencia de una instalación de bombeo hidráulico se define como la relación de potencia ganada por los fluidos del pozo a la pérdida de potencia del fluido motriz<sup>(4)</sup>

La potencia ganada por los fluidos del pozo es:

$$(HP) q_3 \propto q_3 (p_2 - p_3) \dots \quad (3.4)$$

Entonces, la eficiencia es:

$$E = \frac{(HP) q_3}{(HP) q_1} = \frac{(q_3)}{(q_1)} \frac{(P_2 - P_3)}{(P_1 - P_2)} \dots \quad (3.6)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.2 y 3.3 en la ecuación 3.6 se obtiene:

$$E = M.H. . . . (3.7)$$

### CURVAS DE COMPORTAMIENTO ADIMENSIONAL

El comportamiento de bombas a chorro, geométricamente similares, que se encuentran operando al mismo número de Reynolds, se describe por las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3. y 3.7. En la Fig. 3.4 se muestra una gráfica de estas ecuaciones, en la cual está graficado H y E contra M para diferentes valores de R. La relación de áreas seleccionada se basa en un rango de potencia relativamente alto, con un gasto bajo de bombeo (relación A,  $R= 0.410$ ) para una potencia relativamente baja y un gasto alto de bombeo (relación E,  $R=0.168$ ).

Como una regla práctica de campo, se debe operar la bomba a su máxima eficiencia. Para este caso, la M y H serán fijas; de aquí, las ecuaciones 3.2 y 3.3 quedan:

$$q_1 = q_3/M_p . . . (3.8)$$

y

$$P_3 = (1 + H_p) P_2 - H_p P_1 . . . (3.9)$$

donde  $M_p$  y  $H_p$  son las máximas relaciones de eficiencia de flujo y carga respectivamente.

### CAVITACION

La cavitación se define, como la vaporización local de un -

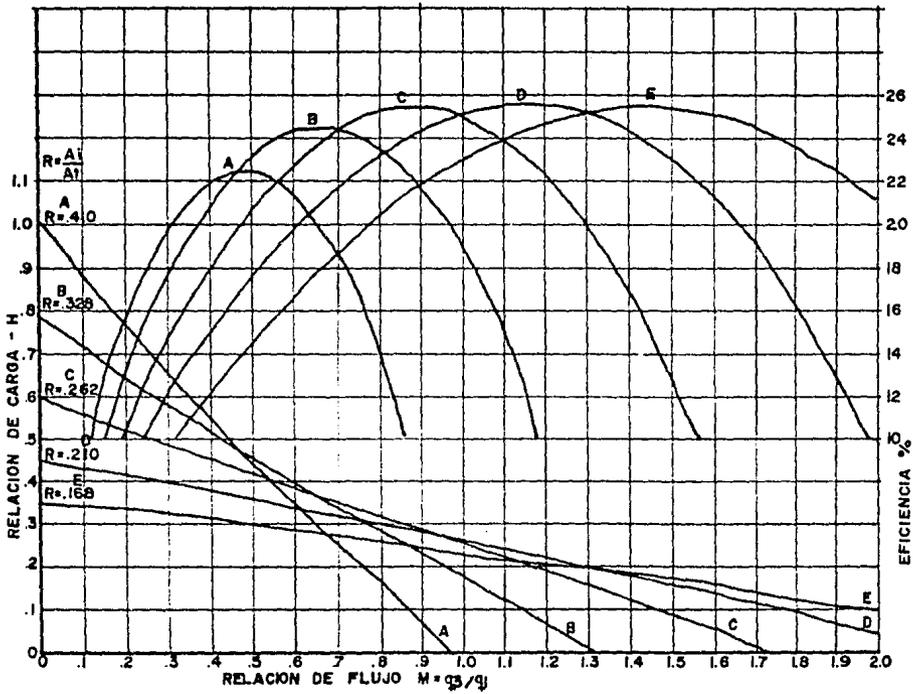


FIG. 3.4 GRAFICA DE H vs M Y EFICIENCIA

líquido, debido a las reducciones locales de presión por la acción dinámica del fluido. Este fenómeno está caracterizado por la formación de cavidades o burbujas, las cuales se llenan con vapor del mismo líquido que se está bombeando. Estas burbujas de vapor son altamente comprimidas, tan pronto como alcanzan regiones de alta presión, en su camino a través de la bomba.

La condición física para que ocurra la cavitación, es que se requiere que la presión disminuya por cualquier concepto, hasta el valor de la presión de vapor correspondiente a la temperatura del líquido. La reducción de la presión absoluta en el interior de la bomba, hasta aquella correspondiente a la presión de vapor, puede ser general para todo el sistema o únicamente local, esta última puede producirse sin que exista cambio en la presión promedio.

Para un gasto de producción dado y una presión de entrada a la bomba, se tendrá un área mínima de flujo anular requerida para evitar la cavitación. (5)

$$ASM = (A_j - A_t) = q_3 / 691 \sqrt{p_3 / G_3} \dots \quad (3.10)$$

donde:

ASM = Área mínima anular para evitar la cavitación,  $Pg^2$

$G_3$  = Gradiente de los fluidos producidos,  $lb/pg^2/pe$ .

Se requiere una corrección por cavitación para el gas. Suponiendo que el flujo estrangulado dentro del área mínima anular -

de la cámara de mezclado, es más o menos, el chorro del fluido motriz, se requiere un área adicional para el paso del gas, esta - - área es:

$$AG = q_3 (1 - fw) R / 24,650 P_3 \dots \quad (3.11)$$

donde:

AG = área para el paso del gas,  $pg^2$

fw = fracción de agua

La ecuación 3.10 considerando gas queda: <sup>(5)</sup>

$$ASM = q_3 (1/691 \sqrt{73/P_3^1} + (1-fw) R/24,650 P_3 ) \dots \quad (3.12)$$

#### GASTO Y PRESION DEL FLUIDO MOTRIZ

Al igual que las bombas hidráulicas tipo pistón, las bombas tipo chorro utilizan agua o aceite como fluido motriz. El gasto real de fluido motriz está en función de  $P_1$ ,  $P_3$ , el área de flujo de la tobera  $A_j$ , y de la densidad relativa del fluido motriz . considerando unidades de campo, el gasto de fluido motriz se puede estimar con la siguiente ecuación: <sup>(4)</sup>

$$q_1 = 1,214.5 A_j \sqrt{\frac{P_1 - P_3}{\gamma}} \dots \quad (3.13)$$

donde:

$q_1$ , en bl st/día

$P_1$  y  $P_3$  en  $lb/pg^2$

$A_j$ , en  $pg^2$

Como  $q_1$  se conoce de la relación de M (ecuación 3.2), la ecuación 3.13 puede resolverse para  $A_j$ :

$$A_j = \frac{q_1}{1,214.5} \sqrt{\frac{\gamma}{P_1 - P_3}} \dots \quad (3.14)$$

Una vez determinado  $A_j$  de la ecuación 3.14, éste puede ser corregido para los diámetros de la tobera disponibles (tabla 3.1).

Considerando altas presiones de entrada del fluido motriz, se tendrán bajas presiones de entrada y consecuentemente altos gastos de producción.

En condiciones normales, la presión de operación en la superficie no debe exceder de 4,000 lb/pg<sup>2</sup>.

T A B L A            3.1

Diámetros y áreas de toberas y cámaras de mezclado

No.	área de tobera	diámetro	No.	cámara de mezclado	diámetro
1	0.00371	0.06869	1	0.00905	0.10733
2	0.00463	0.07680	2	0.01131	0.12000
3	0.00579	0.08587	3	0.01414	0.13416
4	0.00724	0.09600	4	0.01767	0.15000
5	0.00905	0.10733	5	0.02209	0.16771
6	0.01131	0.12000	6	0.02761	0.18750
7	0.01414	0.13416	7	0.03451	0.20963
8	0.01767	0.15000	8	0.04314	0.23438
9	0.02209	0.16771	9	0.05393	0.26204
10	0.02761	0.18750	10	0.06741	0.29297
11	0.03451	0.20933	11	0.08426	0.32755
12	0.04314	0.23438	12	0.10533	0.36621
13	0.05393	0.26204	13	0.13166	0.40944
14	0.06741	0.29297	14	0.16458	0.45776
15	0.08426	0.32755	15	0.20572	0.51180
16	0.10533	0.36621	16	0.25715	0.57220
17	0.13166	0.40944	17	0.32144	0.64974
18	0.16458	0.45776	18	0.40180	0.71526
19	0.20572	0.51180	19	0.50225	0.79968
20	0.25715	0.57220	20	0.62782	0.89407
			21	0.78477	0.99960
			22	0.98096	1.11759
			23	1.22620	1.24950
			24	1.53275	1.39698

POTENCIA

La potencia requerida se estima con la ecuación: (1)

$$HP = 1.7 \times 10^{-5} \times q_1 \times Ps \dots \quad (3.15)$$

donde Ps es la presión de operación del fluido motriz en la superficie en lb/pg<sup>2</sup>.

## CURVAS DE ENTRADA A LA BOMBA

El procedimiento para predecir las curvas de entrada a la bomba se considera para dos casos: 1) Bombeando líquido y 2) bombeando gas con líquido. Para ambos casos, se supone que la bomba se coloca en el fondo del pozo, la presión en la cabeza del pozo y el diámetro de la tubería de flujo son fijos, y la bomba se opera a su máxima eficiencia.

Para el caso 2 se supone que todo el gas asociado se bombea con el líquido. La variable sensible seleccionada para este sistema de operación es la presión del fluido motriz. Como se verá después, la predicción de las curvas de entrada es directa para el caso 1 e indirecta para el caso 2.

### CASO 1. BOMBEANDO LIQUIDO.

Los líquidos son poco compresibles, con esto,  $q_3$  en la ecuación 3.8 se puede considerar constante e igual al gasto en la superficie.

$$q_1 = q_{sc} / M_p \dots \quad (3.16)$$

Debe tenerse en cuenta que; como la bomba se coloca en el fondo del pozo, la presión de entrada en la ecuación 3.9 es igual a la presión de fondo fluyendo.

Suponiendo gastos de producción en la superficie,  $q_1$  se puede calcular de la ecuación 3.16; entonces el gasto total de líquido

do en la columna de producción, como es necesario conocer  $P_2$ , podrá determinarse.

Habiendo determinado  $P_2$  y suponiendo varias presiones del fluido motriz, la presión de entrada se puede determinar de la ecuación  $d(HP) = (1/0.433) \frac{hp (V)}{h (V)} dp \dots$  (3.17)

Estas son las bases para la construcción de curvas de entrada para bombas tipo chorro.

#### SELECCION DE LA BOMBA

Generalmente hablando, bombas con alta relación de carga - tal como las asociadas a las relaciones A o B, podrán usarse en pozos profundos con gastos altos.

Por otro lado, bombas con gastos altos, tal como las asociadas a las relaciones D o E, se podrán usar en pozos poco profundos. Pero la bomba más apropiada para un pozo específico será desconocida hasta que se investigue el comportamiento de varias relaciones de bombas para el comportamiento del yacimiento.

Un procedimiento para la selección de la bomba es el siguiente:

- 1) Estimar una presión de operación en la superficie.
- 2) Leer R, M y  $H_p$  para varias relaciones de bomba de la Fig. 3.4.

Para cada relación de bomba hacer lo siguiente:

- a) suponer un gasto de producción.
  - b) calcular  $q_1$  de la ecuación 3.16.
  - c) determinar la presión del fluido motriz y la presión de descarga empleando una correlación de flujo multifásico en tuberías verticales.
  - d) calcular la presión de entrada con la ecuación 3.9
  - e) repetir los pasos b-d para otros gastos supuestos.
- 3) Graficar la presión de entrada contra gasto para cada relación de bomba. Graficar la curva de IPR en blst/día a la misma escala en la misma gráfica.
- 4) Leer los gastos posibles para cada bomba en la intersección de la curva de entrada con la curva de IPR.
- 5) Para cada gasto posible, calcular  $q_1$  de la ecuación 3.16, con esto determinar la potencia requerida de la ecuación 3.15.
- 6) Seleccionar la bomba más conveniente, basado en las consideraciones económicas.

Debido a la diferencia en las relaciones  $M_p$  y  $H_p$ , las gráficas preparadas en el paso 3) se traslaparan. De aquí que la selección de la bomba apropiada dependerá de la posición de la curva de IPR. Otra restricción que puede influir en la selección de la bomba es la disponibilidad de fluido motriz y la potencia requeri-

da. Si el objetivo es maximizar el gasto, se seleccionará la bomba que proporcione el gasto más alto.

PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACION DE LAS CURVAS DE ENTRADA DE TUBERIA DE PRODUCCION PARA LA BOMBA TIPO CHORRO.

- 1) Seleccionar la bomba adecuada.
- 2) Leer  $M_p$  y  $H_p$  de la Fig. 3.4 para la bomba seleccionada.
- 3) Suponer un gasto de producción y hacer lo siguiente:
  - a) calcular  $q_1$  de la ecuación 3.16.
  - b) determinar  $P_2$  de una correlación de flujo multifásico - en tuberías verticales.
  - c) suponer varias presiones de fluido motriz y, para estas presiones, calcular  $P_3$  de la ecuación 3.9.
- 4) Graficar  $P_3$  contra gastos para las presiones del fluido motriz supuestos. Graficar la curva de IPR en blst/día a la misma escala en la misma gráfica.
- 5) Determinar el área de cavitación para cada  $P_3$  de la ecuación 3.10. Calcular el flujo máximo sin cavitación para cada  $P_3$ , de la ecuación  $q_s = q_3 (A_t - A_j) / ASM^{(5)} \dots (3.18)$ . Marcar el gasto límite de cavitación para cada curva de entrada. Trazar una curva a través de los puntos de cavitación.
- 6) Leer los gastos posibles en la intersección de las curvas de entrada a la bomba con la curva de IPR.

- 7) Para cada gasto posible, calcular el gasto de fluido motoriz, con ésto, determinar  $P_s$  y calcular HP de la ecuación 3.15.
- 8) Graficar el gasto posible contra  $P_s$ , HP y  $q_1$ , considerando el gasto límite de cavitación.
- 9) Seleccionar el gasto adecuado.

EJEMPLO. PROBLEMA #1 (BOMBEANDO LIQUIDO)

Los datos del pozo, yacimiento y fluidos, se muestra en la tabla 2.5. En la Fig. 2.5 se muestra el IPR en blst/día y con bl/-/día. Para la solución consultar las Figs. 3.5 a 3.7.

Como la bomba está colocada en el fondo del pozo, la presión de entrada es igual a la presión de fondo fluyendo; de aquí, se puede usar la curva de IPR de la Fig. 2.5.

Para la bomba A, la máxima relación de flujo es 0.475 y la relación de máxima eficiencia es también 0.475 (Fig. 3.4). Con ésto, las ecuaciones 3.16 y 3.9 quedan:

$$q_1 = q_{sc} / 0.475 \dots \quad (3.19)$$

y

$$P_3 = 1.475 P_2 - 0.475 P_1 \dots \quad (3.20)$$

Si se supone un gasto de producción de 200 bl st/día, la ecuación 3.19 queda:

$$q_1 = 200/0.475 = 421 \text{ bl st/día}$$

El gasto total de líquido en la tubería de retorno es:

200 + 421 = 621 bl st/día, de las cuales 521 bl st/día son aceite y 100 bl st/día son agua. La presión de descarga requerida para és te gasto es:

$P_2 = 3,129 \text{ lb/pg}^2$  (de correlación de flujo multifásico en tuberías verticales).

Con una presión de operación en la superficie de 4000 lb/ - /pg<sup>2</sup>, la presión del fluido motriz es:

$P_1 = 6824 \text{ lb/pg}^2$  (de correlación de flujo multifásico en tu berías verticales).

Con ésto, de la ecuación 3.19 se obtiene:

$$P_3 = (1.475)(3129) - (0.475)(6824) = 1374 \text{ lb/pg}^2$$

De manera similar, se pueden obtener los resultados de la tabla 3.2 para otros gastos supuestos.

### T A B L A 3.2

Valores obtenidos de  $q_1$ ,  $P_2$ ,  $P_1$  y  $P_3$  para varios gastos supuestos

$q_{sc}$	$q_1$	$P_2$	$P_1$	$P_3$
400	842	3,169	6,787	1,451
600	1,263	3,231	6,750	1,560
800	1,684	3,314	6,714	1,699
1,000	2,105	3,417	6,679	1,868
1,200	2,526	3,542	6,644	2,069
1,400	2,947	3,688	6,452	2,375
1,600	3,368	3,855	6,450	2,670
1,800	3,789	4,044	6,238	3,002

La presión de entrada  $P_3$  se graficó contra  $q_{sc}$  en la Fig. - 3.5. El IPR en bl st/día se graficó a la misma escala en la misma gráfica.

Cálculos similares se hicieron para otras bombas. Los resultados se graficaron en la misma figura (3.5). Nótese que las -- curvas se traslapan debido a la diferencia de gasto y la relación de carga. Es evidente que sin el límite de presión de operación en la superficie de  $4,000 \text{ lb/pg}^2$ , la relación A debe ser seleccionada debido a que proporciona un mayor gasto que la relación B. No hay flujo en las relaciones de bomba C, D y E.

Para la relación de bomba A, el pozo puede producir 900 bl st/día con una presión de operación en la superficie de  $4,000 \text{ lb/pg}^2$ . (Fig. 3.5).

Si la presión de operación máxima permisible en la superficie es de  $4,000 \text{ lb/pg}^2$  y se desea optimizar el gasto de producción debe estudiarse el comportamiento de la bomba para presiones menores de  $4,000 \text{ lb/pg}^2$ . Pero para mostrar el efecto de fricción y la zona de cavitación, el límite de presión de operación en la superficie puede ser bajo, en este caso, no hay límite en la presión del fluido motriz.

Para un gasto supuesto de 200 bl st/día la presión del fluido motriz, determinada previamente fue de  $3,129 \text{ lb/pg}^2$ . Con esto, si se supone una presión de fluido motriz de  $6,000 \text{ lb/pg}^2$ , de -

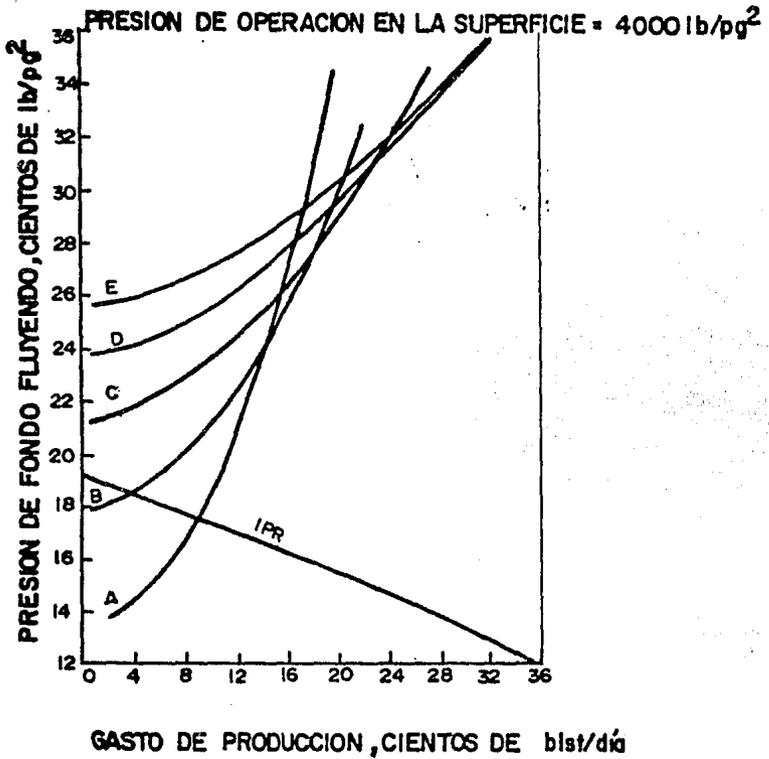


FIG. 3.5 CURVAS DE ENTRADA PARA DIFERENTES BOMBAS HIDRAULICAS TIPO JET EN EL POZO N.º 1 (BOMBEANDO LIQUIDO)

la ecuación 3.20 se obtiene:

$$P_3 = (1.475) (3,129) - (0.475) (6,000) = 1,765 \text{ lb/pg}^2.$$

Similarmente, para el mismo gasto de 200 bl st/día con --  
otras presiones de fluido motriz supuestas, se puede optimizar:

$P_1$	$P_3$
7,000	1,290
8,000	815
9,000	340

Cálculos similares se hicieron para otros gastos supuestos. Los resultados se muestran en la tabla 3.3. La presión de entrada -  $P_3$  se graficó contra  $q_{sc}$  para diferentes presiones del fluido motriz en la Fig. 3.6. El IPR en bl st/día se graficó en esta a la -- misma escala.

T A B L A 3.3

PRESION DE ENTRADA PARA BOMBEO JET EN EL POZO # 1  
(BOMBEANDO LIQUIDO)

$P_3$  Para presiones de fluido motriz supuestas de

$q_{sc}$	$P_2$	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000	11,000	12,000
400	3,169	1,825	1,350	875	400	--	--	--
800	3,314	2,038	1,563	1,088	613	138	--	--
1,200	3,542	2,375	1,900	1,425	950	475	0	--
1,600	3,855	2,836	2,361	1,886	1,411	936	461	--
2,000	4,256	3,428	2,953	2,478	2,003	1,528	1,053	578
2,400	4,750	4,156	3,681	3,206	2,731	2,256	1,781	1,306
2,800	5,343	5,031	4,556	4,081	3,606	3,131	2,656	2,181

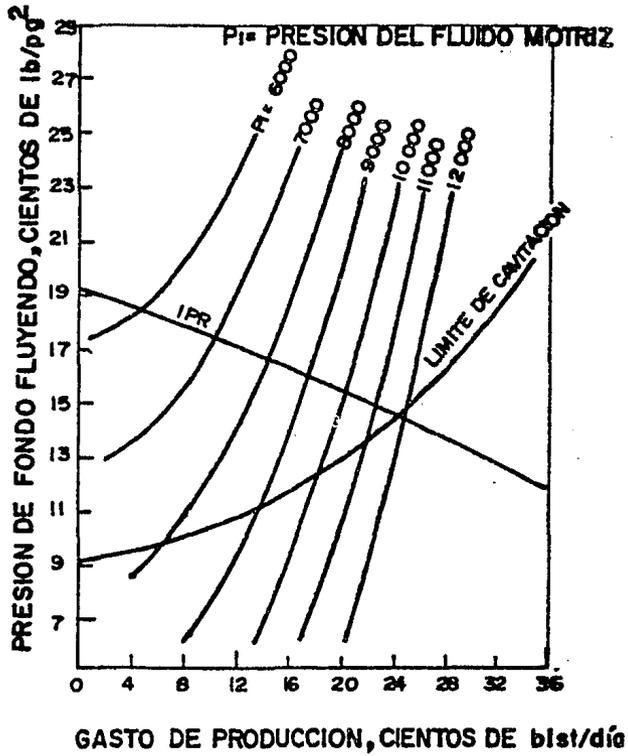


FIG. 3.6 CURVAS DE ENTRADA PARA BOMBA HIDRAULICA TIPO JET EN EL POZO Nº 1 (BOMBEANDO LIQUIDO)

El área de cavitación se calcula de la ecuación 3.10, y el gasto límite de cavitación se calcula con la ecuación 3.18. Los resultados se muestran en la tabla 3.4.

T A B L A 3.4

AREA Y GASTO MAXIMO DE CAVITACION PARA EL POZO # 1

$P_1$	$P_3$	ASM	$q_s$
8,000	1,425	0.02970	686
9,000	1,411	0.03978	1,344
10,000	1,528	0.04779	1,799

Los puntos de cavitación se marcaron en la intersección de la línea de  $q_s$  con la respectiva curva de entrada, con esto se trazó una curva suave a través de estos puntos (ver Fig. 3.6). La operación de la bomba puede ser en cualquier parte abajo de la curva de cavitación y está limitada únicamente por la presión de operación en la superficie del fluido motriz.

Los gastos posibles son las intersecciones de las curvas de entrada de la bomba con la curva de IPR. Por ejemplo, el pozo puede producir 450 blst/día con una presión de operación del fluido motriz de 6,000 lb/pg<sup>2</sup>. El gasto de fluido motriz requerido se obtiene con la ecuación 3.18:

$$q_1 = \frac{450}{0.475} = 947 \text{ blo st/día}$$

Para una presión y un gasto de fluido motriz de 6,000 lb/pg<sup>2</sup> y 947 blost/día respectivamente, se obtiene:

$PS = 3198 \text{ lb/pg}^2$  (de correlación de flujo multifásico en tuberías verticales) y de la ecuación 3.15 se obtiene:

$$HP = (1.7 \times 10^{-5})(947)(3198) = 52 \text{ HP}$$

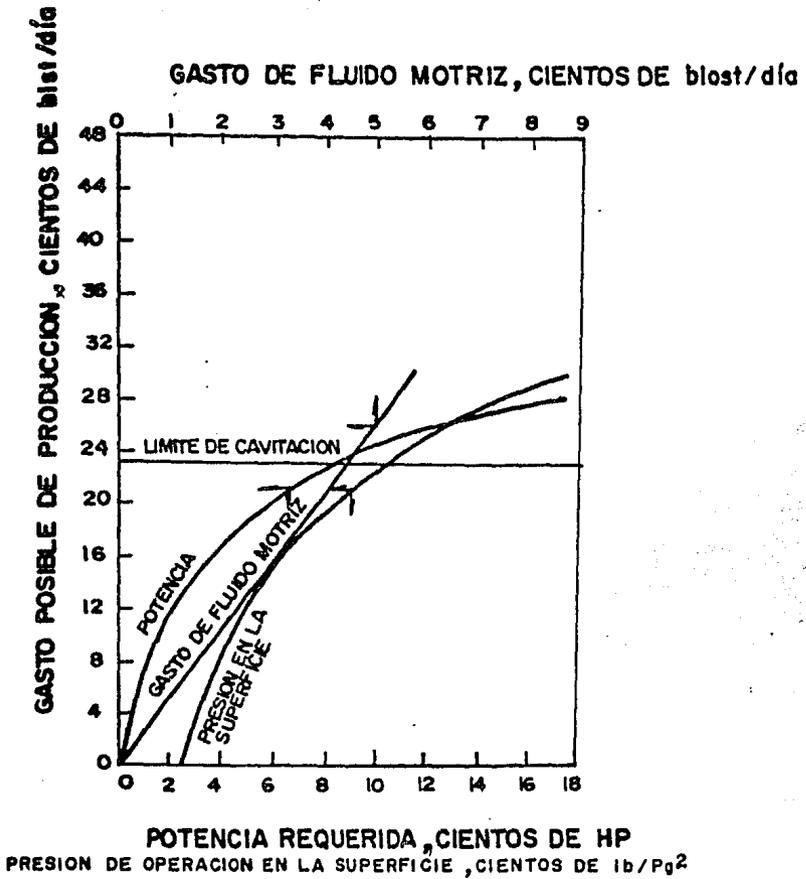
Cálculos similares se hicieron para otros gastos. Los resultados se muestran en la tabla 3.5. El gasto posible se graficó contra HP, Ps y  $q_1$  en la Fig. 3.7.

T A B L A 3.5

POTENCIA REQUERIDA PARA LOS GASTOS POSIBLES DEL POZO # 1 CON BOMBEO JET (BOMBEANDO LIQUIDO)

$P_1$	$q_p$	$q_1$	$P_S$	HP	$\Delta q_p / \Delta HP$
6,000	450	947	3,198	52	5.3
7,000	1,030	2,168	4,354	161	3.2
8,000	1,425	3,000	5,588	288	2.2
9,000	1,740	3,663	6,923	431	1.6
10,000	2,010	4,232	8,361	601	1.3
11,000	2,255	4,757	9,874	797	1.0
12,000	2,470	5,200	11,986	1,007	---

En la Fig. 3.7 se puede observar que, arriba de 2,800 blst/día, la presión de operación en la superficie, así como la potencia requerida se incrementan rápidamente sin obtener una ganancia significativa en el gasto de producción. Este gasto podría ser seleccionado, si no presenta cavitación y límite recomendado de 4,000  $\text{lb/pg}^2$  de presión de operación. Con esta presión, el pozo puede producir 880 blst/día (ver Fig. 3.7). Con esto:



**FIG. 3.7 GASTOS POSIBLES DE PRODUCCION POR BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET CONTRA HP, PS, Y Q<sub>1</sub> PARA EL POZO N° 1 (BOMBEANDO LIQUIDO)**

$$q_1 = 880/0.475 = 1853 \text{ blst/día}$$

$$HP = (1.7 \times 10^{-5}) (1853) (4,000) = 112 \text{ HP}$$

$$P_1 = 6,700 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_3 = 1770 \text{ lb/pg}^2$$

con esto, de la ecuación 3.14 se obtiene:

$$A_j = \frac{1853}{1214.5} \sqrt{\frac{0.85}{6700 - 1770}} = 0.02 \text{ pg}^2$$

Nota:  $A_j$  puede ser corregido por el diámetro de tobera disponible (ver referencia<sup>7</sup>).

#### EJEMPLO PROBLEMA # 2 (UNICAMENTE LIQUIDO)

La información del pozo, fluidos y yacimiento se muestra en la tabla 2.5. El IPR en blst/día y en bl/día se muestra en la Fig. 2.11.

El mismo tipo de cálculos hechos previamente para el pozo #1 se hicieron para este pozo. La bomba más adecuada fue basada en la relación de bomba A. Los resultados de éstos cálculos se muestran en las tablas 3.6 y 3.7.

La información de la tabla 3.6 se graficó en la Fig. 3.8. El IPR en blst/día se graficó en ésta a la misma escala.

La potencia requerida para los gastos posibles se muestra en la tabla 3.7. La Fig. 3.9 es una gráfica de  $q_p$  contra  $P_s$ , HP y  $q_1$ . El gasto seleccionado es de 220 blst/día (para una presión de operación en la superficie de 4000 lb/pg<sup>2</sup>). Para este gasto, la  $p_0$

tencia requerida, el gasto y la presión del fluido motriz son 32 - HP, 465 blost/dfa y, 600 lb/pg<sup>2</sup> respectivamente. El área de tobera que, está sujeta a corrección, es 0.0046 pg<sup>2</sup>.

T A B L A 3.6

PRESION DE ENTRADA PARA BOMBEO JET EN EL POZO # 2 (BOMBEANDO LIQUIDO)

Presión de entrada para presiones de fluido motriz supuestas de:

q <sub>sc</sub>	P <sub>2</sub>	5,500	6,000	6,500	7,000	7,500	8,000
50	2,727	1,409	1,172	934	697	459	222
100	2,735	1,421	1,183	946	708	471	233
200	2,761	1,460	1,222	985	747	510	272
300	2,800	1,518	1,281	1,043	806	568	331
400	2,853	1,596	1,359	1,121	884	646	409
500	2,920	1,694	1,456	1,219	981	744	506
600	2,999	1,811	1,573	1,336	1,098	861	623
700	3,091	1,947	1,710	1,472	1,235	997	760
800	3,197	2,103	1,886	1,628	1,391	1,153	916
900	3,317	2,280	2,042	1,805	1,567	1,330	1,092

T A B L A 3.7

PRESION REQUERIDA PARA LOS GASTOS POSIBLES DEL POZO # 2 CON BOMBEO JET ( BOMBEANDO LIQUIDO )

P <sub>1</sub>	q <sub>p</sub>	q <sub>1</sub>	P <sub>S</sub>	HP	Δq <sub>p</sub> /ΔHP
5,500	40	84	2,862	4	7.91
6,000	127	267	3,381	15	5.57
6,500	205	432	3,906	29	4.50
7,000	268	564	4,436	43	3.71
7,500	320	674	4,973	57	2.86
8,000	360	758	5,513	71	- -

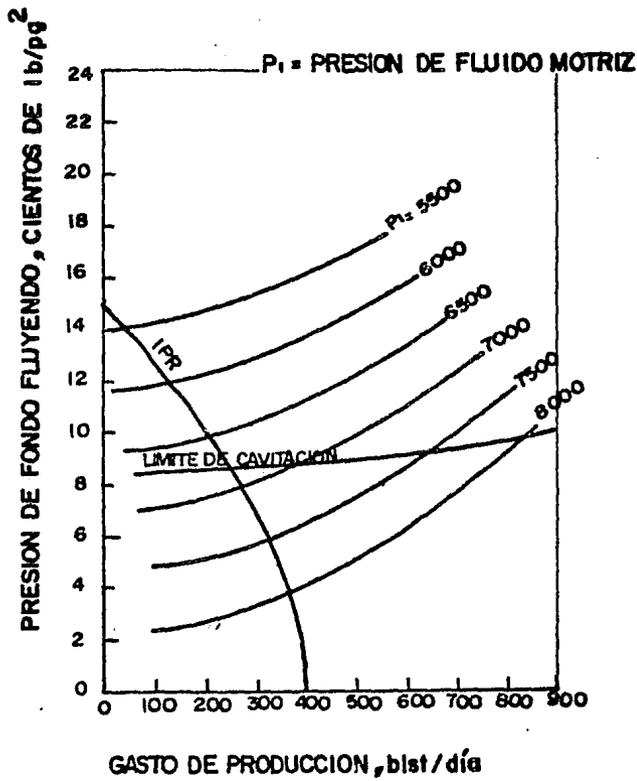
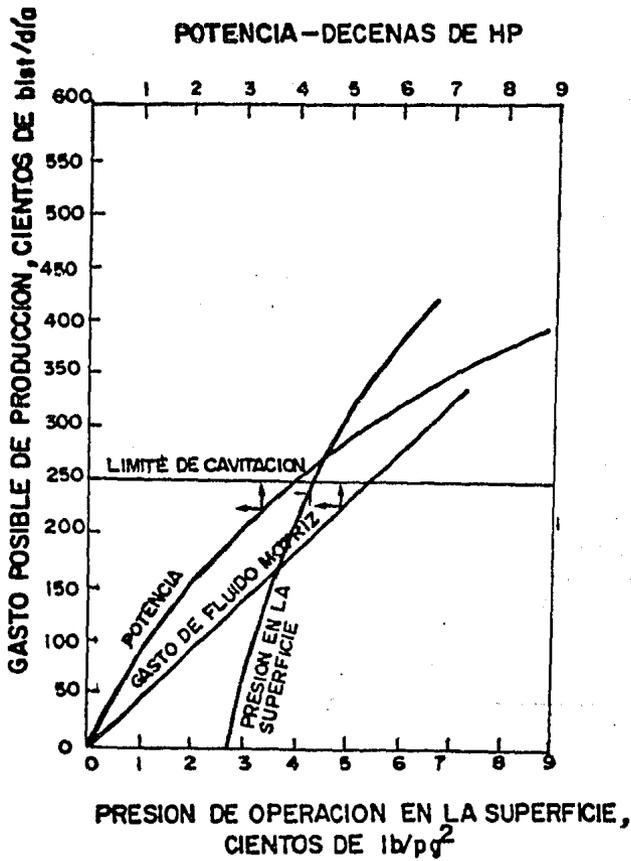


FIG.38 CURVAS DE ENTRADA A LA BOMBA HIDRAULICA TIPO JET  
EN EL POZO Nº 2 (BOMBEANDO LIQUIDO)



**FIG. 3.9 GASTOS POSIBLES DE PRODUCCION POR BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET CONTRA POTENCIA, PS Y Q<sub>1</sub> PARA EL POZO N° 2 (BOMBEANDO LIQUIDO).**

## BOMBEANDO LIQUIDO Y GAS

Debido a la alta compresibilidad del gas,  $q_1$  en la ecuación 3.8 no puede considerarse constante como se hizo para el caso de líquido, pero se puede determinar a la presión de entrada de la ecuación 2.8, quedando:

$$q_1 = q_{sc} VF Mp \dots \quad (3.21)$$

donde VF es el factor de volumen estimado a la presión de entrada de la ecuación:

$$VF = fw + (1-fw)Bo + (RGL - (1-fw)Rs)Bg \dots \quad (3.22)$$

Para bombas tipo chorro utilizando aceite como fluido motriz, el gasto total de líquido, la relación gas-aceite y el porcentaje de agua en la columna de retorno es:

$$q_2 = q_1 + q_{sc} \dots \quad (3.23)$$

$$R2 = \frac{q_{sc} RGL}{q_1 + q_{sc} (1-fw)} \dots \quad (3.24)$$

$$fw_2 = \frac{q_{sc} fw}{q_2} \dots \quad (3.25)$$

Cuando se bombea líquido y gas libre, la predicción de las curvas de entrada es indirecta. Esto se debe a que la presión de entrada debe ser conocida para determinar VF. Como la presión en la cabeza del pozo es constante, la presión de descarga es constante para cada gasto. De aquí, que la presión del fluido motriz no -

puede ser supuesta como se hizo en el caso de líquido, pero puede determinarse de la ecuación 3.9. Con el fin de facilitar las curvas de entrada, es necesario obtener presiones de entrada para los gastos de producción supuestos con presiones del fluido motriz iguales. Esto puede completarse haciendo una gráfica de  $P_3$  contra  $P_1$  para cada gasto o por interpolación. Resolviendo la ecuación 3.9 para  $P_1$  se obtiene:

$$P_1 = \frac{(1 + H_p) P_2 - P_3}{H_p} \dots \quad (3.26)$$

#### SELECCION DE LA BOMBA

Como se mencionó anteriormente, los dos factores que intervienen en la selección de la bomba son el flujo y la relación de presiones. La diferencia en la relación de flujo es una medida de la diferencia del gasto de fluido motriz; debido a la existencia de gas en este caso, ésta será mayor que para el caso cuando se bombea líquido. De aquí, que la bomba empleada para el caso de líquido será empleada en este caso.

#### PROCEDIMIENTO PARA PREPARAR LAS CURVAS DE ENTRADA A LA TUBERIA DE PRODUCCION PARA BOMBAS TIPO CHORRO (BOMBEANDO GAS).

Como se hizo para el caso de líquido, el límite en la presión de operación en la superficie será disminuido, tampoco habrá límite en la presión del fluido motriz. Los pasos adecuados del procedimiento son:

- 1) Seleccionar la bomba adecuada.
- 2) Suponer varios gastos de líquido y, para cada uno de estos gastos hacer lo siguiente:
  - a) Suponer una presión de entrada.
  - b) Determinar VF con la presión de entrada supuesta de la ecuación 3.22.
  - c) Calcular  $q_1$  de la ecuación 3.21
  - d) Calcular  $q_2$ ,  $R_2$  y  $fw_2$  de las ecuaciones 3.23, 3.24 y -- 3.25.
  - e) Determinar  $P_2$  de una correlación de flujo multifásico - en tuberías verticales.
  - f) Calcular  $P_1$  de la ecuación 3.26.
  - g) Repetir los pasos b-f para otras presiones de entrada - supuestas.
- 3) Interpolando o graficando, obtener la presión de entrada - para los gastos de producción supuestos para presiones - - iguales de fluido motriz.
- 4) Graficar la presión de entrada (obtenida en el paso 3) con tra gasto para varias presiones de fluido motriz. Grafi-- car la curva de IPR en bl st/día en ésta, a la misma esca-- la.
- 5) Calcular el área de cavitación para cada  $P_3$  de la ecuación 3.12, el gasto máximo sin cavitación de la ecuación 3.18. Marcar el gasto límite sin cavitación para cada curva de - entrada. Trazar una curva a través de los puntos de cavita ción.

- 6) Leer los gastos posibles en la intersección de la curva de entrada a la bomba con la curva de IPR.
- 7) Para cada gasto posible calcular el gasto de fluido motriz; entonces, determinar  $P_s$  y calcular HP de la ecuación 3.15.
- 8) Graficar el gasto posible contra  $q_1$ ,  $P_s$  y HP, considerando el gasto límite de cavitación.
- 9) Seleccionar el gasto adecuado.

#### SELECCION DEL GASTO.

Al igual que cuando se bombea líquido, al bombear gas con el líquido, la selección del gasto se hará en base a:

- 1) Que no exista cavitación
- 2) Económicamente factible.

Como la presión del fluido motriz y consecuentemente el -- gasto de producción fueron aceptables, al incrementarse el gasto de fluido motriz se incrementan las pérdidas por fricción en las tuberías de flujo. Como resultado, la ganancia en gasto de producción por 1 HP, irá disminuyendo hasta resultar insignificante.

#### EJEMPLO: POZO # 1 (BOMBEANDO GAS).

Como la bomba se coloca en el fondo del pozo y se bombea todo el gas, se puede aplicar la curva de IPR en la Fig. 2.5 y la información del factor de volumen de la tabla 2.11.

Para el caso de líquido, se seleccionó la relación de bomba A, debido a que se tenían gastos altos. La misma bomba será usada en este caso.

Las ecuaciones 3.21 y 3.26 quedan:

$$q_1 = q_{sc} \text{ VF} / 0.475 \dots \quad (3.27)$$

y

$$P_1 = \frac{1.475 P_2 - P_3}{0.475} \dots \quad (3.28)$$

Para el fluido del pozo #1, las ecuaciones 3.22, 3.23 y 3.24 quedan:

$$q_2 = q_1 + q_{sc} \dots \quad (3.29)$$

$$R_2 = \frac{200 q_{sc}}{q_1 + 0.5 q_{sc}} \dots \quad (3.30)$$

$$fw_2 = \frac{0.5 q_{sc}}{q_2} \dots \quad (3.31)$$

Si el gasto de líquido en la superficie es de 200 blst/día y se supone una presión de entrada de 500 lb/pg<sup>2</sup>, entonces:

$$\text{VF} = 1.9899 \text{ bl/blst (Tabla 2.10 @ 500 lb/pg}^2\text{)}$$

$$q_1 = (200) (1.9899) / 0.475 = 838 \text{ blo st/día}$$

$$R_2 = \frac{(200) (200)}{838 + (0.5)(200)} = 43 \text{ pie}^3/\text{blo st}$$

$$fw_2 = \frac{(0.5)(200)}{1038} = 0.096$$

Para un gasto de liquido de 1,038 blst/dfa,  $R=43 \text{ pie}^3 / \text{--} / \text{blo st}$  y  $fw = 0.06$  se obtiene:

$P_2 = 3,066$  (de correlación de flujo multifásico en tuberías verticales).

De la ecuación 3.28 se obtiene:

$$P_1 = \frac{(1.475)(3,066) - 500}{0.475} = 8,467 \text{ lb/pg}^2$$

El mismo procedimiento se siguió para el gasto de 200 blst/dfa con otras presiones de entrada supuestas. Los resultados se muestran en la tabla 3.8.

T A B L A 3.8

PRESION DEL FLUIDO MOTRIZ PARA BOMBEO A CHORRO EN EL POZO # 1 - -  
(BOMBEANDO 200 blst/dfa CON TODO EL GAS)

$P_3$	$V_F$	$q_1$	$q_2$	$R_2$	$fw_2$	$P_2$	$P_1$
500	1.9899	838	1,038	43	0.098	3,066	8,467
600	1.7767	748	948	47	0.106	3,061	8,243
700	1.6256	684	884	51	0.113	3,059	8,024
800	1.5134	637	837	54	0.120	3,057	7,808
900	1.4274	601	801	57	0.125	3,056	7,594
1,000	1.3598	573	773	59	0.129	3,054	7,379
1,100	1.3057	550	750	62	0.133	3,053	7,164
1,200	1.2618	531	731	63	0.137	3,051	6,949
1,300	1.2257	516	716	65	0.140	3,050	6,735
1,400	1.1957	503	703	66	0.199	3,049	6,521
1,500	1.1708	493	693	67	0.144	3,044	6,295
1,600	1.1499	484	684	68	0.146	3,043	6,082
1,700	1.1323	477	677	69	0.148	3,043	5,870
1,800	1.1175	471	671	70	0.149	3,042	5,657

Interpolando de la tabla 3.8 se obtiene:

$P_1$	$P_2$
6,000	1,639
7,000	1,176
8,000	711

Cálculos similares se hicieron para otros gastos supuestos, los resultados se muestran en la tabla 3.9.

T A B L A 3.9

PRESION DE ENTRADA PARA BOMBEO A CHORRO EN EL POZO # 1  
(BOMBEANDO GAS CON EL LIQUIDO)

VALORES INTERPOLADOS DE  $P_3$  PARA PRESIONES DE FLUIDO MOTRIZ DE

$q_{sc}$	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000	11,000	12,000
400	1,702	1,243	800	422	221	120	86
800	1,932	1,483	1,070	719	478	343	272
1,200	2,310	1,838	1,426	1,068	788	594	469
1,600	2,822	2,351	1,881	1,491	1,170	919	737
2,000	3,470	2,998	2,528	2,060	1,648	1,333	1,093
2,400	4,253	3,781	3,310	2,840	2,373	1,909	1,569
2,800		4,699	4,227	3,757	3,287	2,820	2,355

La presión de entrada  $P_3$ , se graficó contra  $q_{sc}$  para diferentes presiones del fluido motriz en la Fig. 3.10. El IPR en blst/día se graficó en ésta a la misma escala.

Si se supone que la presión de vapor es igual a cero, la cavitación a la presión de entrada es la igual a la calculada pre-

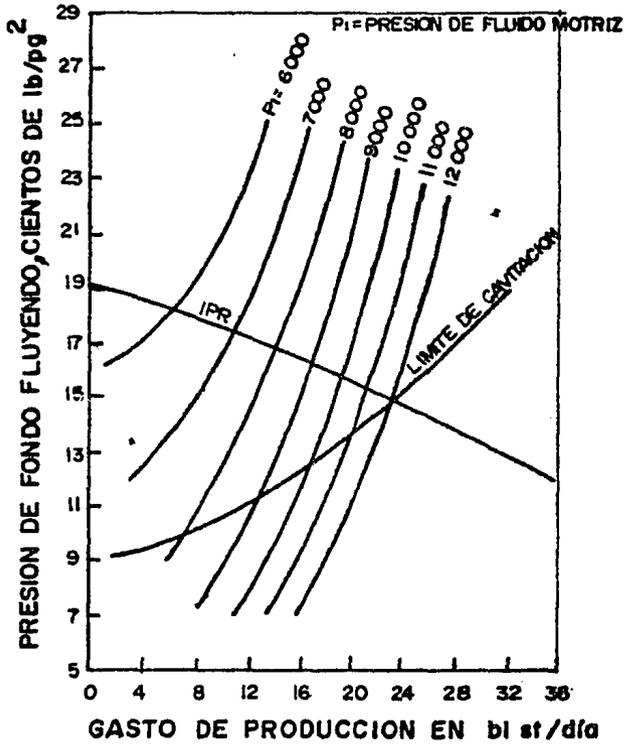


FIG. 3.10 CURVAS DE ENTRADA PARA BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET EN EL POZO N° 1 ( BOMBEANDO GAS CON LIQUIDO)

viamente para el caso de líquido. La curva de cavitación de la -- Fig. 3.6 fue reproducida en la Fig. 3.10. La bomba operará en cualquier parte abajo de la zona de cavitación y estará limitada, -- únicamente, por la presión de operación en la superficie del fluido motriz.

Los gastos posibles están en la intersección de las curvas de entrada a la bomba con la curva de IPR. Por ejemplo, el pozo - puede producir 630 blst/día con una presión de fluido motriz de 6,000 lb/pg<sup>2</sup> (ver Fig. 3.10). La presión de entrada para este gasto es de 1,815 lb/pg<sup>2</sup>, a la cual VF = 1.1162 (tabla 2.10 ). Con és to, de la ecuación 3.27 se obtiene:

$$q_1 = (630)(1.1162)/0.475 = 1,480 \text{ blst/día.}$$

Para un gasto y una presión de fluido motriz de 1,480 blost/día y 6,000 lb/pg<sup>2</sup> se obtiene:

$$P_s = 3,233 \text{ lb/pg}^2 \text{ (de correlación de flujo multifásico en tuberías verticales).}$$

De la ecuación 3.15 se obtiene:

$$HP = (1.7 \times 10^{-5}) (1,480) (3,233) = 81 \text{ HP}$$

El mismo tipo de cálculos se hizo para otros gastos posibles. Los resultados se muestran en la tabla 3.10. El gasto posible  $q_p$  se graficó contra  $P_s$ , HP y  $q_1$  en la Fig. 3.11, considerándo se el gasto límite de cavitación.

T A B L A      3.10

POTENCIA REQUERIDA PARA LOS GASTOS POSIBLES DEL POZO # 1 CON  
BOMBEO A CHORRO (BOMBEANDO GAS CON EL LIQUIDO)

$P_1$	$q_p$	$P_3$	VF	$q_1$	$P_s$	HP	$\Delta q_p / \Delta HP$
6,000	630	1,815	1.1162	1,480	3,233	81	4.1
7,000	1,090	1,730	1.1276	2,587	4,398	193	2.6
8,000	1,420	1,665	1.1381	3,402	5,654	327	1.7
9,000	1,690	1,615	1.1470	4,081	7,025	487	1.2
10,000	1,925	1,560	1.1578	4,692	8,517	679	0.96
11,000	2,140	1,515	1.1674	5,259	10,095	903	0.78
12,000	2,325	1,430	1.1754	5,753	11,661	1,140	0.78

Una inspección de la Fig. 3.11 muestra que, arriba de - - 2,800 blst/día la presión de operación en la superficie y la potencia requerida se incrementan rápidamente sin una ganancia significativa en el gasto de producción. Este gasto podrá seleccionarse si no presenta cavitación y no rebasa el límite en la presión de operación en la superficie. En este caso se dispondrá de una presión de operación en la superficie arriba del límite práctico de - 4,000 lb/pg<sup>2</sup>. Para esta presión el pozo puede producir 950 blst/día (Fig. 3.11), el cual es mayor al obtenido previamente para el caso de líquido (880 blst/día) con este gasto:

$$q_1 = 2,250 \text{ blst/día (Fig. 3.11).}$$

$$HP = 160 \text{ HP (Fig. 3.11)}$$

$$P_3 = 1,755 \text{ lb/pg}^2 \text{ (Fig. 3.10)}$$

$$P_1 = 6,600 \text{ lb/pg}^2 \text{ (determinada)}$$

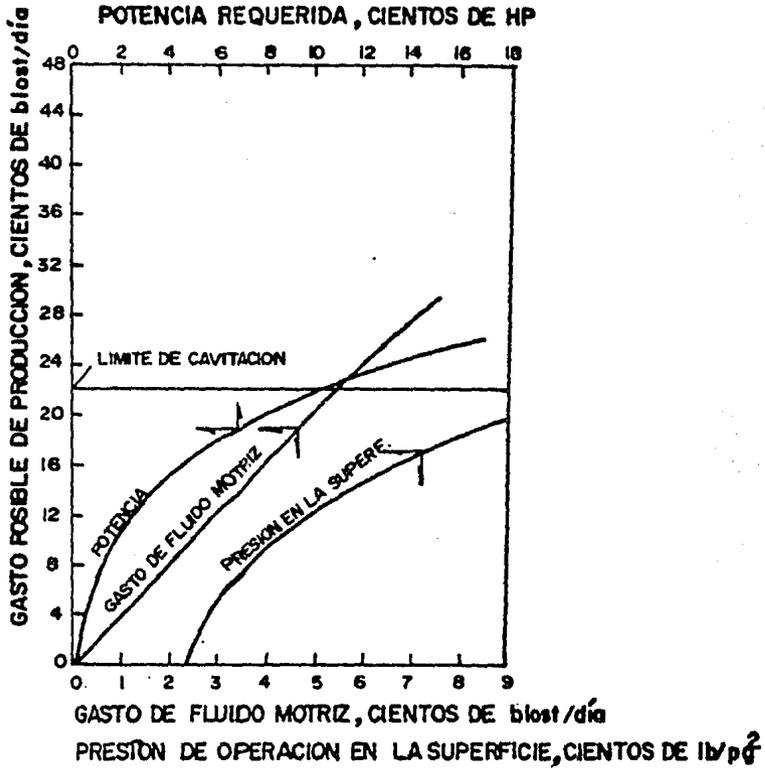


FIG. 3.11 GASTO POSIBLE DE PRODUCCION POR BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET  
 CONTRA HP, PS y Q1 PARA EL POZO Nº 1 (BOMBEANDO GAS CON LIQUIDO)

Además

$$A_j = \frac{2,250}{1,214.5} \cdot \sqrt{\frac{0.85}{6,600 - 1,755}} = 0.025 \text{ pg}^2$$

EJEMPLO: PROBLEMA # 2 (BOMBEANDO GAS CON EL LIQUIDO)

Los datos del pozo, fluido y yacimiento se muestran en la tabla 2.5. Los cálculos de VF con el 100% del gas producido se hizo en la tabla 2.11. El IPR en blst/día y en bl/día se muestra en la Fig. 2.11.

El mismo tipo de cálculos hecho previamente para el pozo #1, se hizo para este pozo. La bomba más adecuada se baso en la relación de bomba A. Los resultados de los cálculos se muestran en las tablas 3.11 y 3.12.

La información de la tabla 3.11 se graficó en la Fig. 3.12. El IPR en blst/día se graficó en ésta a la misma escala. La potencia requerida para los gastos posibles (obtenidos en la Fig. 3.12) se muestra en la tabla 3.12. La Fig. 3.13 es una gráfica de  $q_p$  contra  $P_s$ , HP y  $q_1$ .

El gasto seleccionado es 250 blst/día (con una presión de operación en la superficie de 4,000 lb/pg<sup>2</sup>). Para este gasto, la potencia requerida, el gasto y la presión del fluido motriz son -- 44 HP, 610 blst/día y 6,550 lb/pg<sup>2</sup>, respectivamente. El área de tobera, que está sujeto a corrección, es 0.0061 pg<sup>2</sup>.

T A B L A            3.11

PRESION DE ENTRADA PARA BOMBEO A CHORRO EN EL POZO # 2  
(BOMBEANDO GAS CON EL LIQUIDO )

VALORES INTERPOLADOS DE  $P_3$  PARA PRESIONES DE FLUIDO MOTRIZ DE:

$q_{sc}$	5,500	6,000	6,500	7,000	7,500	8,000
50	1,297	1,060	833	621	413	270
100	1,294	1,056	832	626	434	300
150	1,305	1,068	843	640	460	330
200	1,327	1,090	867	670	490	360
300	1,397	1,160	930	730	570	430
400	1,488	1,252	1,015	810	645	520
500	1,605	1,369	1,133	910	735	600
600	1,745	1,509	1,275	1,040	850	710
700	1,908	1,672	1,437	1,202	- -	- -

T A B L A            3.12

POTENCIA REQUERIDA PARA LOS GASTOS POSIBLES DEL POZO # 2  
CON BOMBEO A CHORRO (BOMBEANDO GAS CON EL LIQUIDO)

$P_1$	$q_p$	$P_3$	VF	$q_1$	$P_s$	HP	$\Delta q_s / \Delta HP$
5,500	85	1,295	1.1263	202	2,871	10	6.21
6,000	172	1,075	1.1274	408	3,394	24	4.25
6,500	240	885	1.1721	592	3,925	40	2.14
7,000	285	720	1.3367	802	4,471	61	1.21
7,500	320	580	1.5525	1,046	5,039	90	0.68
8,000	345	465	1.8260	1,326	5,637	127	- -

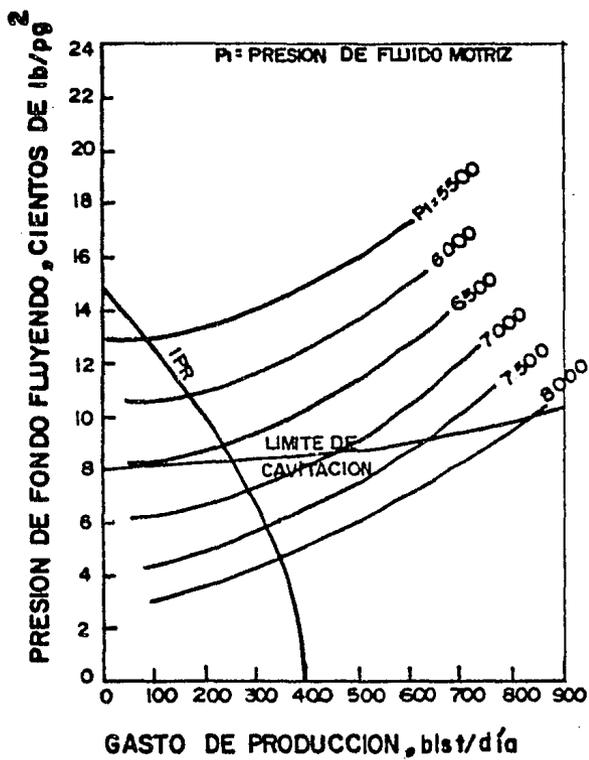
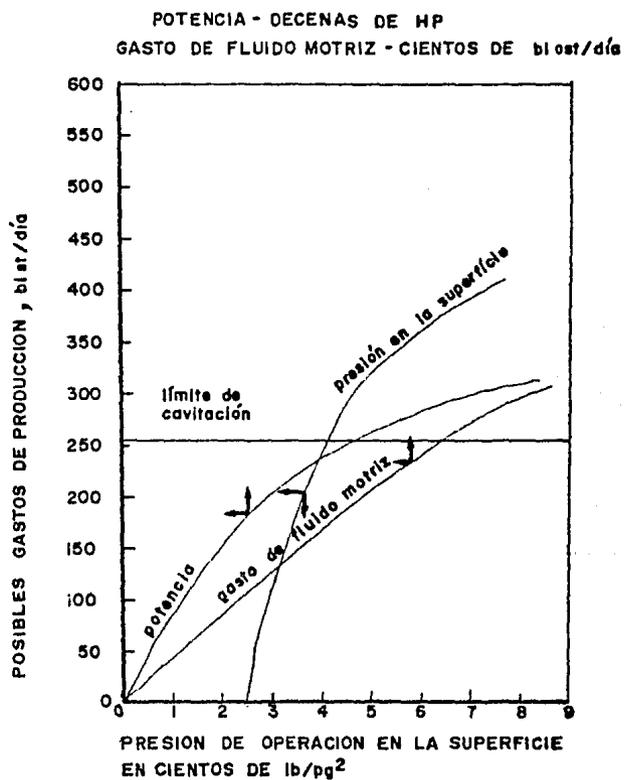


FIG. 3.12 CURVAS DE ENTRADA PARA BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET EN EL POZO Nº 2 (BOMBEANDO GAS CON LIQUIDO)



**FIG. 3.13 POSIBLES GASTOS DE PRODUCCION POR BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET vs HP, Ps Y q<sub>i</sub> PARA EL POZO # 2 (BOMBÉANDO LIQUIDO Y GAS)**

## DISCUSION DE RESULTADOS

Cuando se bombea líquido (Figs. 3.7 y 3.9) o bombeando gas con el líquido (Fig. 3.11 y 3.13), es evidente que la ganancia en el gasto de producción por 1 HP disminuye conforme se incrementa el gasto. Esto se atribuye al efecto de pérdidas por fricción en las tuberías de flujo, el cual incrementa la presión de descarga y disminuye la presión del fluido motriz. El efecto de pérdidas por fricción es menor en el pozo # 2 debido a los gastos bajos asociados a este pozo.

Comparando la Fig. 3.6 con la Fig. 3.10 o la Fig. 3.8 con la Fig. 3.12 se observa que, para presiones de entrada ligeramente abajo del punto de burbujeo ( $1,820 \text{ lb/pg}^2$  para el crudo del pozo #1 y  $940 \text{ lb/pg}^2$  para el crudo del pozo #2) se pueden obtener gastos de producción mayores si se bombea algo de gas con el líquido. La razón es que la existencia de gas en la columna de producción reduce la presión de descarga abajo del nivel necesario para el caso en que no hay gas.

Sin embargo, como la presión de entrada cae alrededor del punto de burbujeo, toma lugar una expansión en el volumen de fluido producido, causando un incremento significativo en el gasto de fluido motriz.

Altos gastos de producción (líquido) combinado con altos gastos de fluido motriz, causan una declinación continua en la RGL

de producción y un incremento continuo en las pérdidas por fricción.

Eventualmente, la presión de descarga excederá la requerida para el caso cuando se bombea puro líquido y toma lugar el efecto opuesto.

## CAPITULO IV

### PROGRAMA DE COMPUTO Y APLICACIONES DEL BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON

El uso de la computadora, como herramienta auxiliar en la resolución de problemas, resulta esencial para la obtención de los parámetros necesarios en la elaboración del análisis de un sistema de producción, considerando diferentes alternativas.

En el análisis nodal aplicado al bombeo hidráulico tipo Pistón, se elaboró un programa de cómputo en lenguaje BASIC, el cual para mayor facilidad del usuario, es de tipo conversacional, esto es, establece un diálogo entre usuario-pantalla.

El programa fue probado y corrido en una computadora personal COMMODORE 64 y para ser instalado en otro sistema de cómputo sólo es necesario cambiar los comandos de lectura e impresión, los cuales cambian para cada máquina.

En este programa se consideró como nodo su solución la bomba subsuperficial, debido a que su principal objetivo es determinar la bomba adecuada para el gasto óptimo de producción.

El programa cuenta con tres correlaciones para determinar las propiedades de los fluidos, las cuales son, la correlación de Standing para aceite de bajo encogimiento y, las de Oinstein y

Vázquez para aceite volátil. Cuenta además con tres correlaciones de flujo multifásico en tuberías verticales que son: Poettman y Carpenter, Beggs y Brill, y la de Hagedorn y Brown, para esta última se utilizan las Figuras 4.1 a 4.3. Para el flujo en el medio poroso se utilizó la correlación de Vogel. No se consideró el flujo en la tubería horizontal.

Este modelo incluye datos de 39 bombas comerciales, y un algoritmo que selecciona las bombas apropiadas de acuerdo a las condiciones del pozo. Para ser empleado se requieren los datos del pozo, fluidos y yacimiento.

Para facilitar la comprensión del programa de cómputo, se presenta un diagrama de flujo.

Se incluye además los resultados obtenidos del uso del programa, con los datos de entrada y las gráficas de los resultados incluidos en las Figuras 4.4 a 4.6.

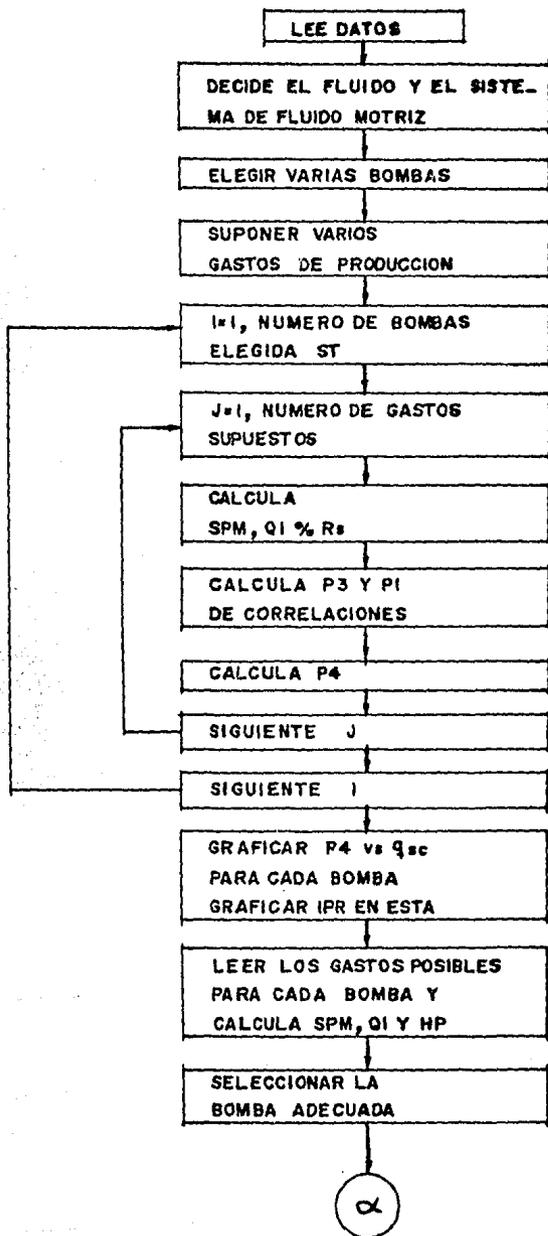
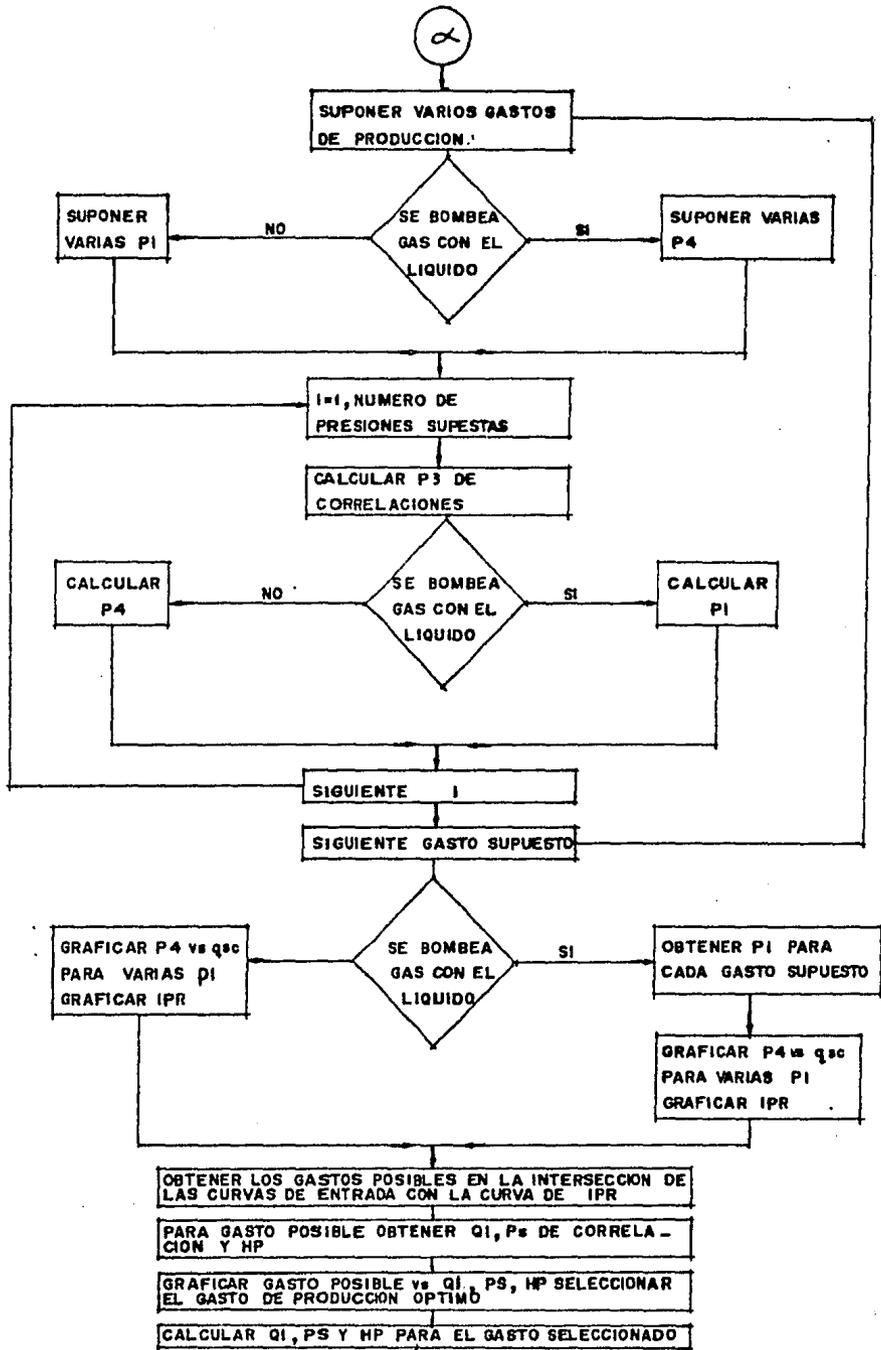


DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL PARA LA PREPARACION DE LAS CURVAS DE ENTRADA, EN BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON



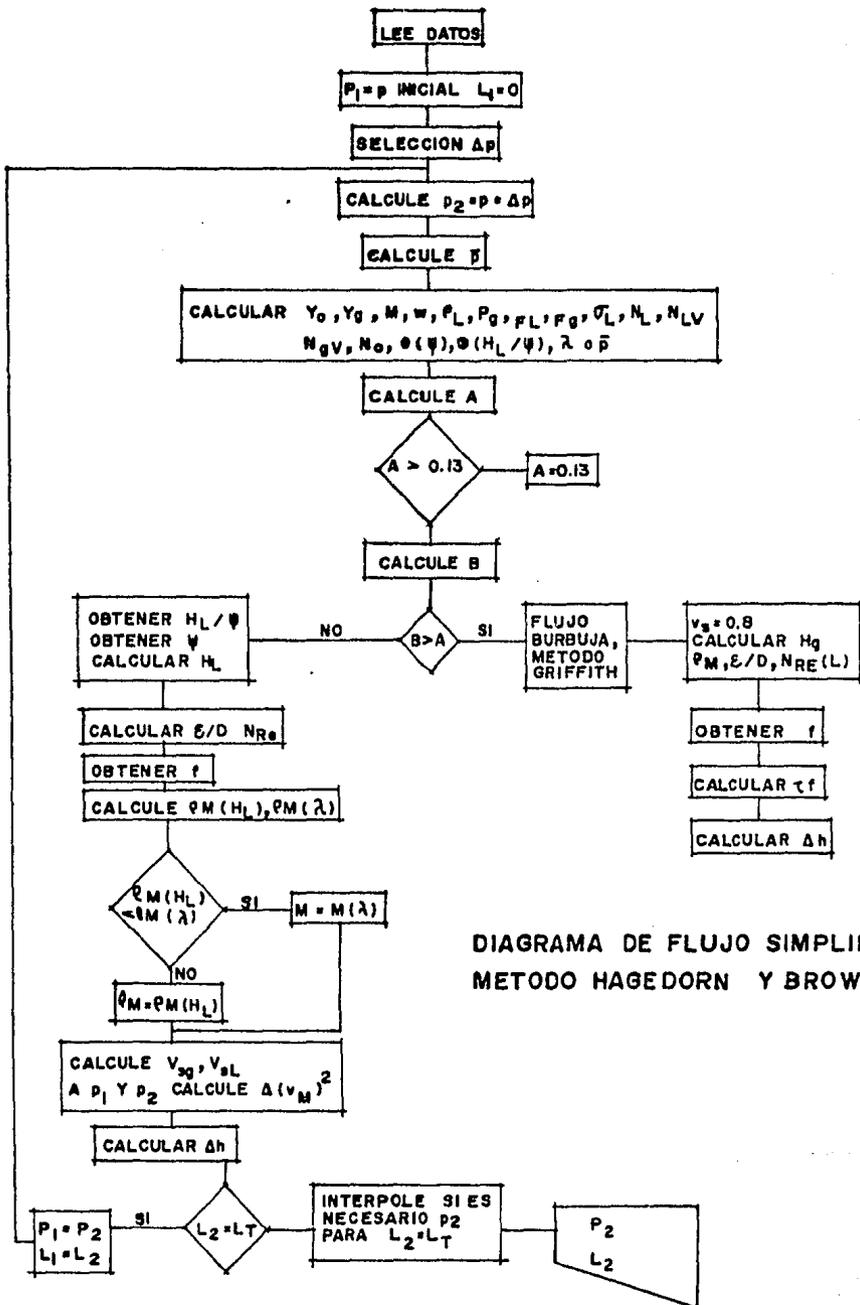


DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO  
METODO HAGEDORN Y BROWN

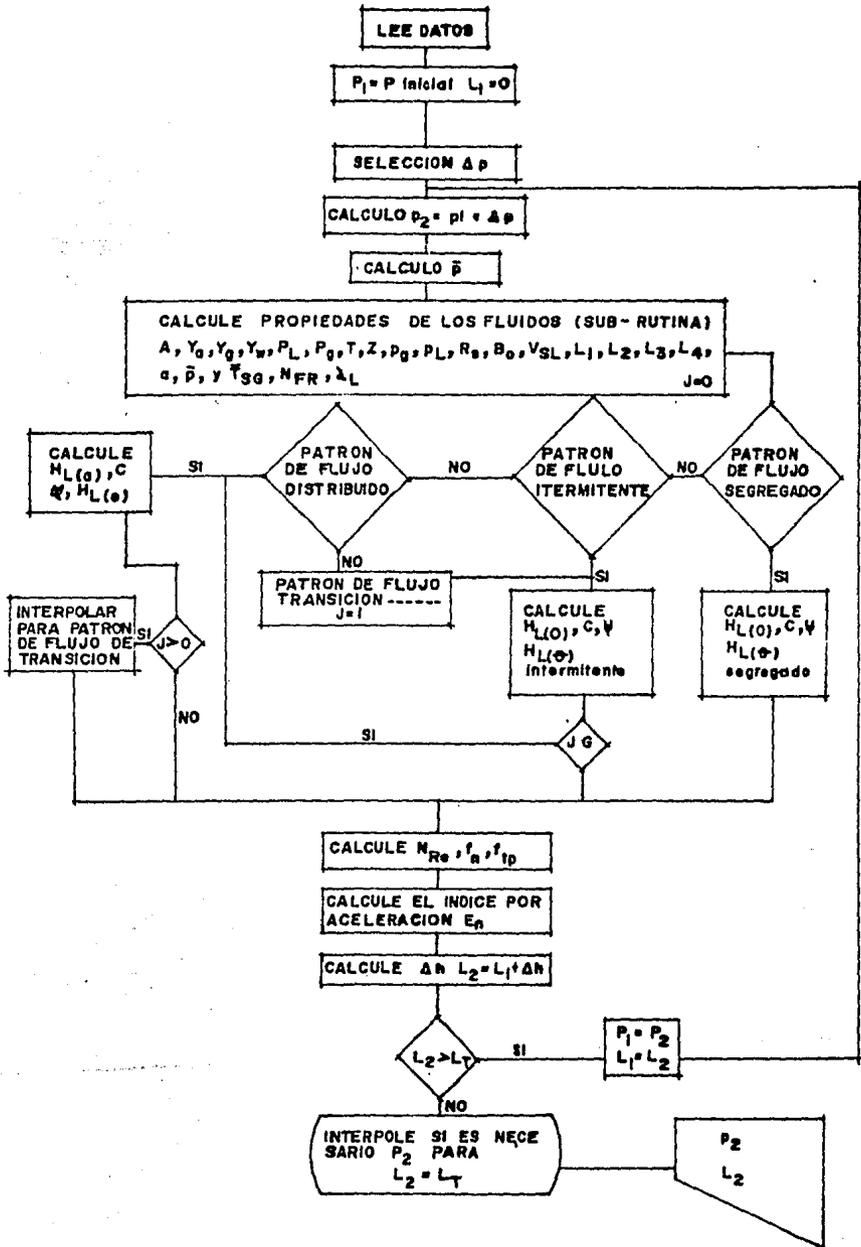


DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO METODO BEGGS Y BRILL

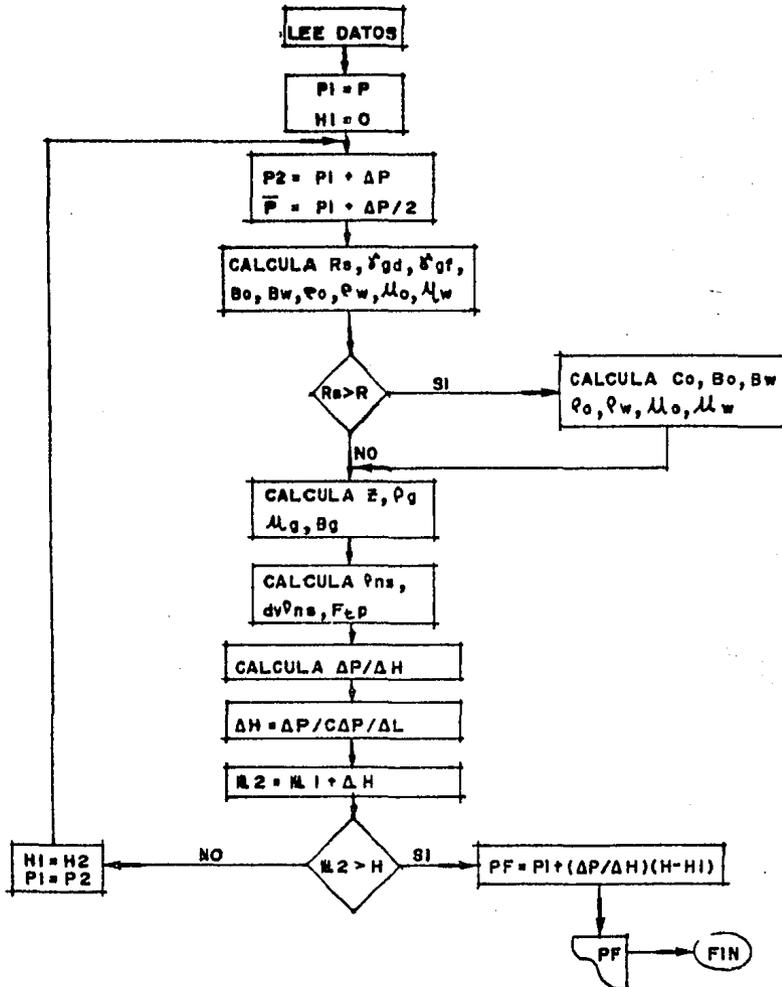


DIAGRAMA GENERAL PARA LA OBTENCION DE LAS PRESIONES DE DESCARGA CON, LA CORRELACION DE POETMAN Y CARPENTER

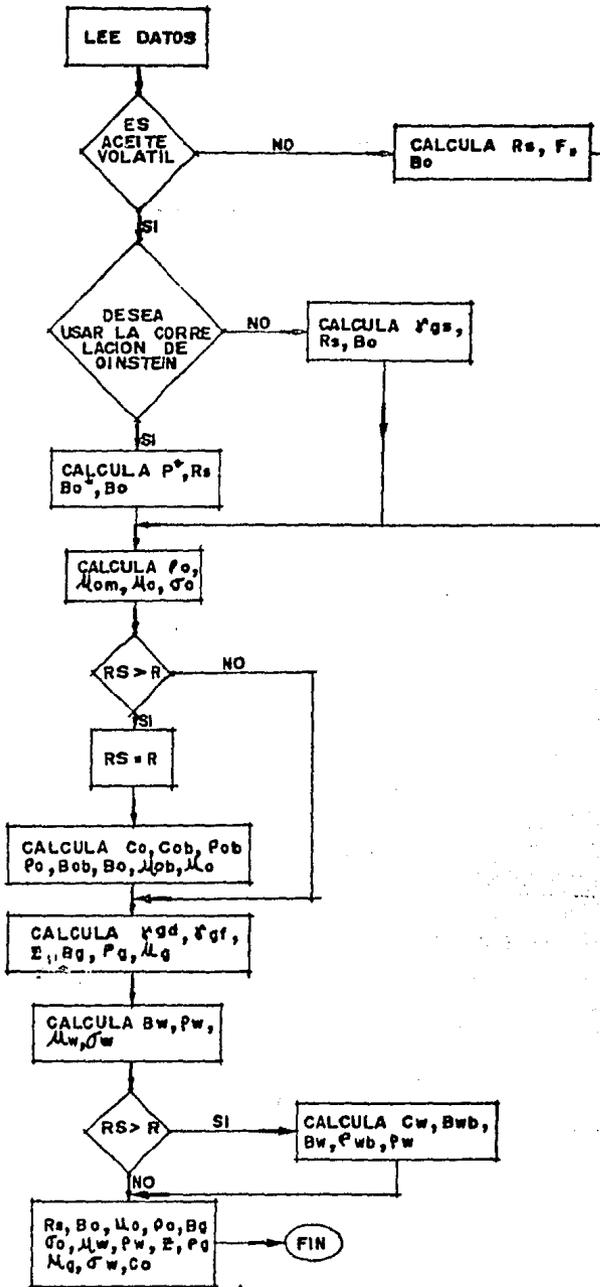


DIAGRAMA GENERAL PARA LA OBTENCION DE LAS PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

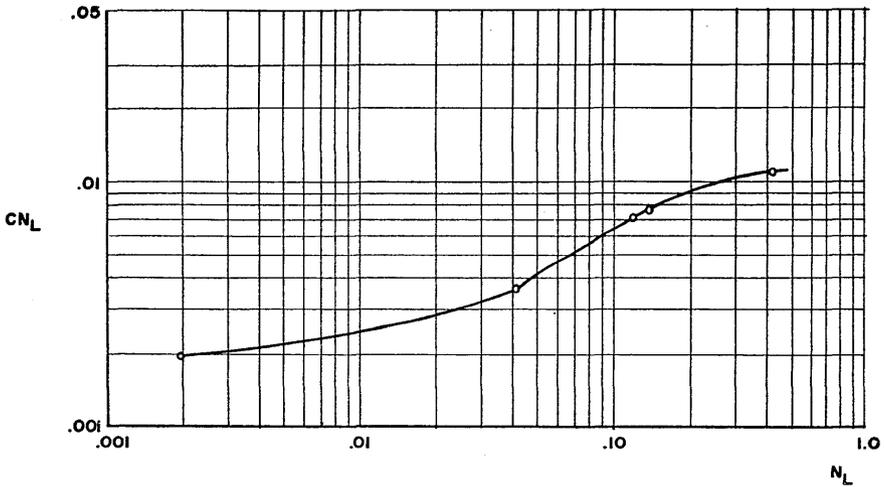


FIG. 4.1 CORRELACION DEL COEFICIENTE DEL NUMERO DE VISCOSIDAD C

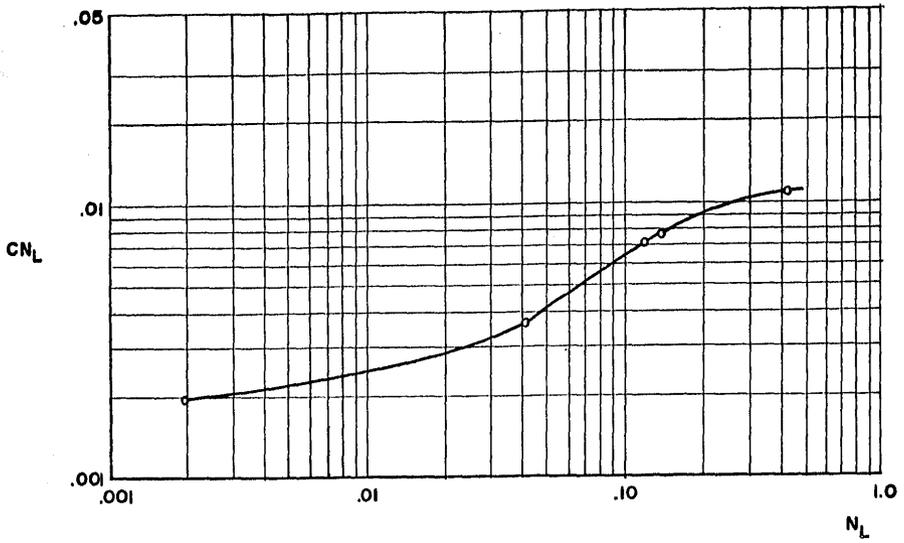


FIG. 4.1 CORRELACION DEL COEFICIENTE DEL NUMERO DE VISCOSIDAD C

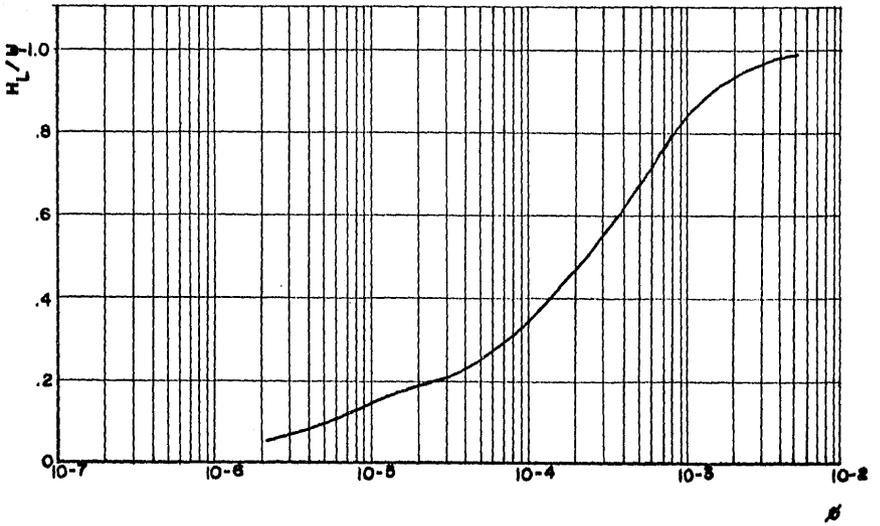


FIG. 4.2 CORRELACION DEL COLGAMIENTO DEL LIQUIDO

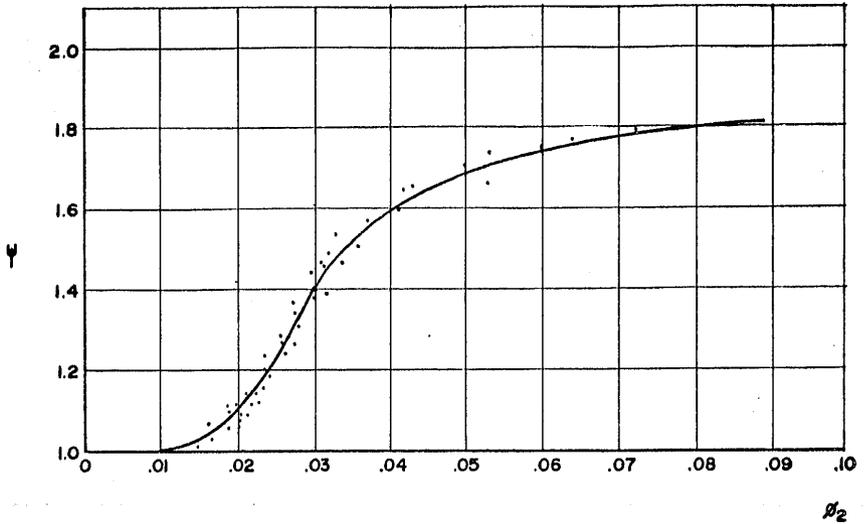


FIG. 4.3 CORRELACION DEL FACTOR DE CORRECCION  $\psi$

\*\*\*\*\*  
 \*\* DATOS DEL POZO, FLUIDOS Y YACIMIENTO PARA LA CORRIDA \*\*  
 \*\*\*\*\*

PROFUNDIDAD DE COLOCACION DE LA BOMBA (PIES)= 8000  
 DIAMETRO DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO (PG)= 7  
 DIAMETRO DE LA TUBERIA DE PRODUCCION (PG)= 2.5  
 DIAMETRO DE LA TUBERIA DE INYECCION (PG)= 2.5  
 PRESION EN LA CABEZA DEL POZO (LB/PG12)= 120  
 TEMPERATURA EN LA CABEZA DEL POZO (F)= 110  
 DENSIDAD DEL ACEITE PRODUCIDO (API)= 35  
 DENSIDAD RELATIVA DEL GAS PRODUCIDO= .7  
 FRACCION DE AGUA PRODUCIDA= .5  
 DENSIDAD RELATIVA DEL AGUA PRODUCIDA= 1.074  
 RELACION GAS ACEITE PRODUCIDO (PIE13/BLOST)= 400  
 PRESION DE SATURACION (LB/PG12)= 1820  
 PRESION ESTATICA DEL YACIMIENTO (LB/PG12)= 1920  
 IPR (ARRIBA DE PB) (BLOST/DIA/LB/PG12)= 4.99760766

BOMBEANDO LIQUIDO  
 SE ELIGIO SISTEMA ABIERTO

\*\*\*\*\*  
 \*\* R E S U L T A D O S \*\*  
 \*\*\*\*\*

S E L E C C I O N D E L A B O M B A

RESULTADOS PARA LA BOMBA # 1

P/E	GASTO	Q1	Q4	M.V			
1.142	4015	66.32	75.76	53			
QS	SPM	%RS	FP	Q1	P3	P1	P4
1000	15	29	177	1144	3161	6726	194
1200	18	35	246	1373	3420	6776	696
1400	21	41	324	1602	3701	6836	1239

1600	24	46	411	1830	4004	6907	1822
1800	27	52	508	2059	4334	6990	2453
2000	31	58	613	2288	4692	7084	3134
2200	34	64	727	2517	5082	7189	3874
2400	37	70	850	2746	5508	7306	4678

RESULTADOS PARA LA BOMBA # 2

P/E	GASTO			Q1	Q4	M.V	
1	2502			32.94	32.5		77
QS	SPM	%RS	FP	Q1	P3	P1	P4
1000	36	47	230	1324	3267	6765	-1
1200	43	56	319	1599	3559	6833	604
1400	50	65	421	1854	3877	6916	1259
1600	57	75	534	2119	4223	7014	1966
1800	65	84	660	2384	4602	7127	2737
2000	72	94	797	2649	5018	7255	3578
2200	79	103	945	2914	5475	7400	4495
2400	86	112	1104	3179	5978	7560	5500

RESULTADOS PARA LA BOMBA # 3

P/E	GASTO			Q1	Q4	M.V	
.882	2726			35.74	31.34		87
QS	SPM	%RS	FP	Q1	P3	P1	P4
1000	37	43	284	1490	3368	6806	-208
1200	45	51	394	1788	3691	6893	508
1400	52	60	519	2086	4046	7001	1285
1600	60	69	660	2385	4436	7127	2134
1800	67	77	815	2683	4865	7273	3059
2000	75	86	984	2981	5340	7438	4077
2200	82	94	1167	3279	5865	7625	5193
2400	90	103	1363	3577	6448	7832	6425

RESULTADOS PARA TRAZAR LA CURVA DE IPR

GASTO MAXIMO DEL POZO [BL/DIA]= 6267

PWF	QSC
100	6188
200	6082
300	5948
400	5788
500	5600
600	5385
700	5143
800	4874
900	4577
1000	4254
1100	3903
1200	3525
1300	3119
1400	2687
1500	2227
1600	1740
1700	1226
1800	685
1900	116

BOMBA	Q. POS	ZRS	Q1	HP
1	1530	44	1750	119
2	1510	70	2000	136
3	1490	64	2221	151

OPTIMIZACION DEL GASTO DE PRODUCCION

P4 PARA PRESIONES DEL FLUIDO MOTRIZ DE:

QSC	P3	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
200	2468	719	281	0	0	0	0	0
400	2555	957	519	0	0	0	0	0
600	2924	1908	1470	1032	594	0	0	0
1200	3420	3219	2781	2343	1905	1468	1030	0
1600	4004	4797	4359	3921	3483	3046	2608	2170
2000	4692	6663	6225	5787	5349	4911	4473	4036
2400	5508	8838	8401	7963	7525	7087	6649	6212

P1	QP	SPM	Q1	PS	HP
4500	785	12	898	1893	28
5000	900	13	1029	2352	41
5500	1080	16	1235	2819	59
6000	1175	18	1344	3274	74
6500	1280	19	1464	3738	93
7000	1390	21	1590	4214	113
7500	1500	23	1716	5094	148

PARA UN GASTO DE PRODUCCION DE [BL/DIA]= 1370

POTENCIA REQUERIDA [HP]= 106

GASTO DE FLUIDO MOTRIZ [BL/DIA]= 1567.70662

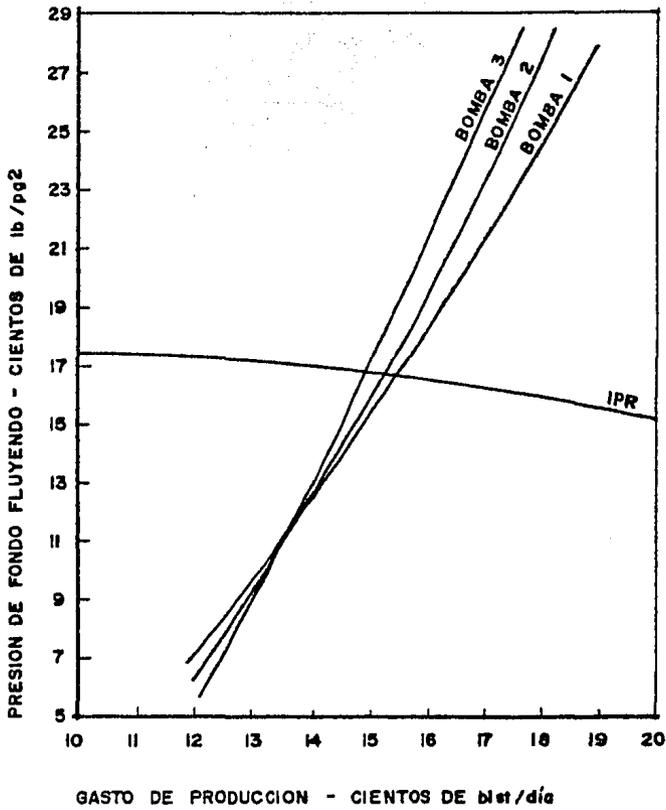


FIG. 4.4 CURVAS DE ENTRADA PARA VARIAS BOMBAS OBTENIDAS DE LOS RESULTADOS DEL PROGRAMA

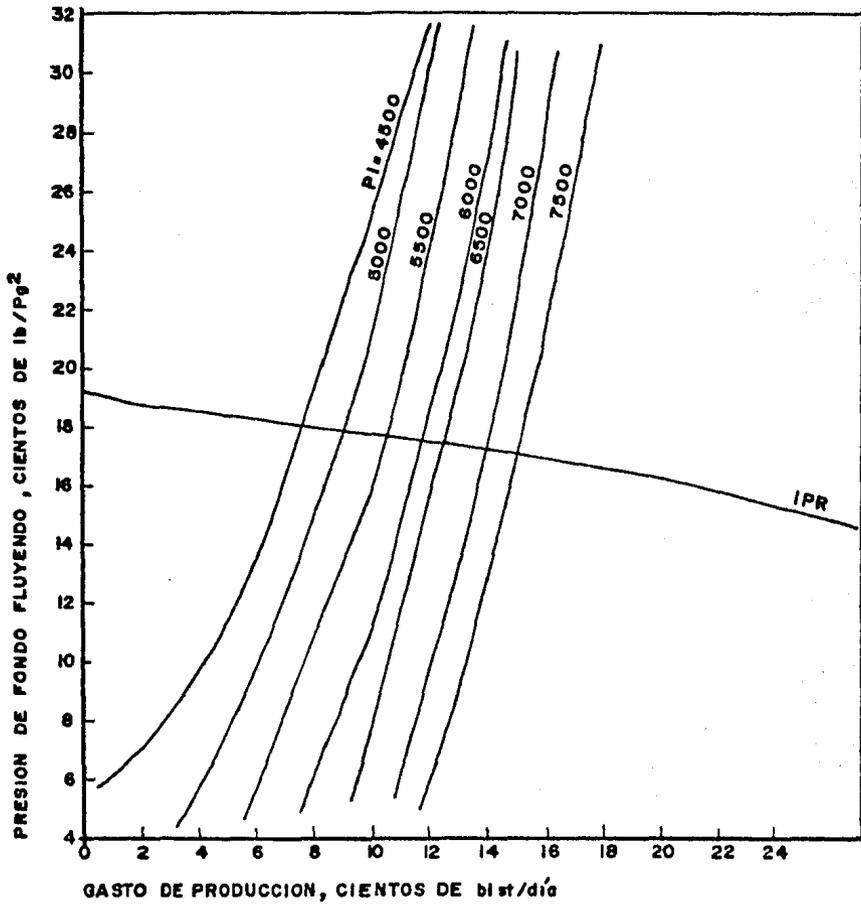


FIG. 4.5 CURVAS DE ENTRADA PARA BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON, OBTENIDOS CON LOS RESULTADOS DEL PROGRAMA

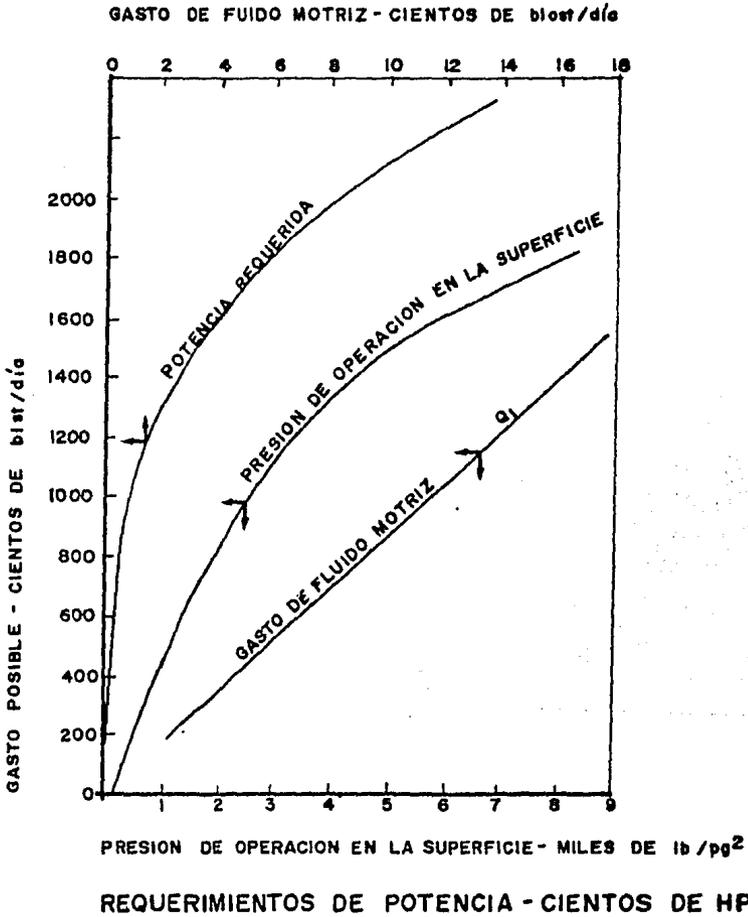


FIG. 4.6 POSIBLES GASTOS DE PRODUCCION POR BOMBEO HIDRAULICO TIPO PISTON vs HP, P<sub>s</sub> Y Q<sub>1</sub> OBTENIDOS DE LOS RESULTADOS DEL PROGRAMA

## CAPITULO V

### PROGRAMA DE COMPUTO Y APLICACIONES DEL BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET ( CHORRO )

La utilización del Análisis Nodal es un procedimiento completo el cual requiere de un gran número de cálculos por lo cual es necesario utilizar a la computadora como herramienta auxiliar.

Este programa se elaboró en lenguaje Basic, en forma conversacional para mayor facilidad del usuario.

El programa fue evaluado y corrido en una computadora - - - - -  
COMMODORE 64 y puede ser instalado en otro sistema de cómputo, haciendo los cambios necesarios en los comandos de lectura y de impresión, los cuales son diferentes para cada máquina.

Se considero en este programa como nodo de solución la bomba subsuperficial, debido a que el objetivo es encontrar la bomba adecuada para el gasto de producción óptimo. El programa cuenta con tres correlaciones para determinar las propiedades de los fluidos, los cuales son: Standing para aceites de bajo encogimiento, la de Oinstein y Vázquez para aceite volátil. Cuenta además con tres correlaciones de flujo multifásico en tuberías verticales las cuales son: Poettman y Carpenter, Beggs y Brill, y la de Hagedorn y Brown, para la cual se utilizan las Figuras 4.1 a 4.3 mismas que

se encuentran en subrutinas. Para el flujo en el yacimiento se -- utilizó la correlación de Vogel. No se considero flujo en la tubería horizontal.

Así mismo contiene un banco de datos de veinte diámetros y áreas de tobera y cámara de mezclado para facilitar la optimiza-- ción de las posibles combinaciones tobera-cámara de mezclado y se leccionar la mas adecuada de acuerdo a los datos del pozo, fluidos y del yacimiento.

Para una mayor comprensión del programa se presenta el dia-- grama de flujo, así como los resultados obtenidos del mismo, los - cuales se muestran en las Figuras 5.1 a 5.3.

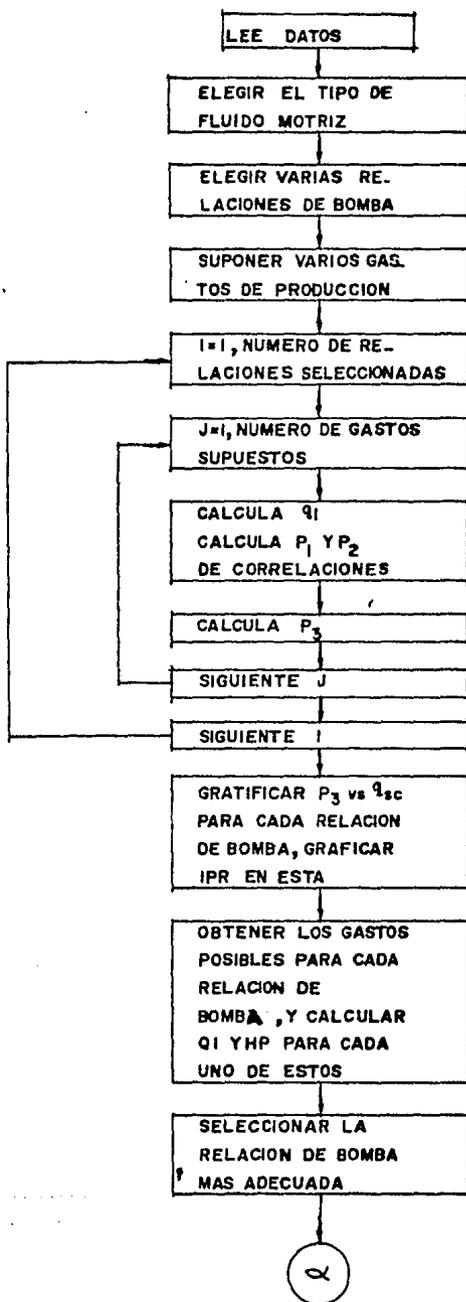
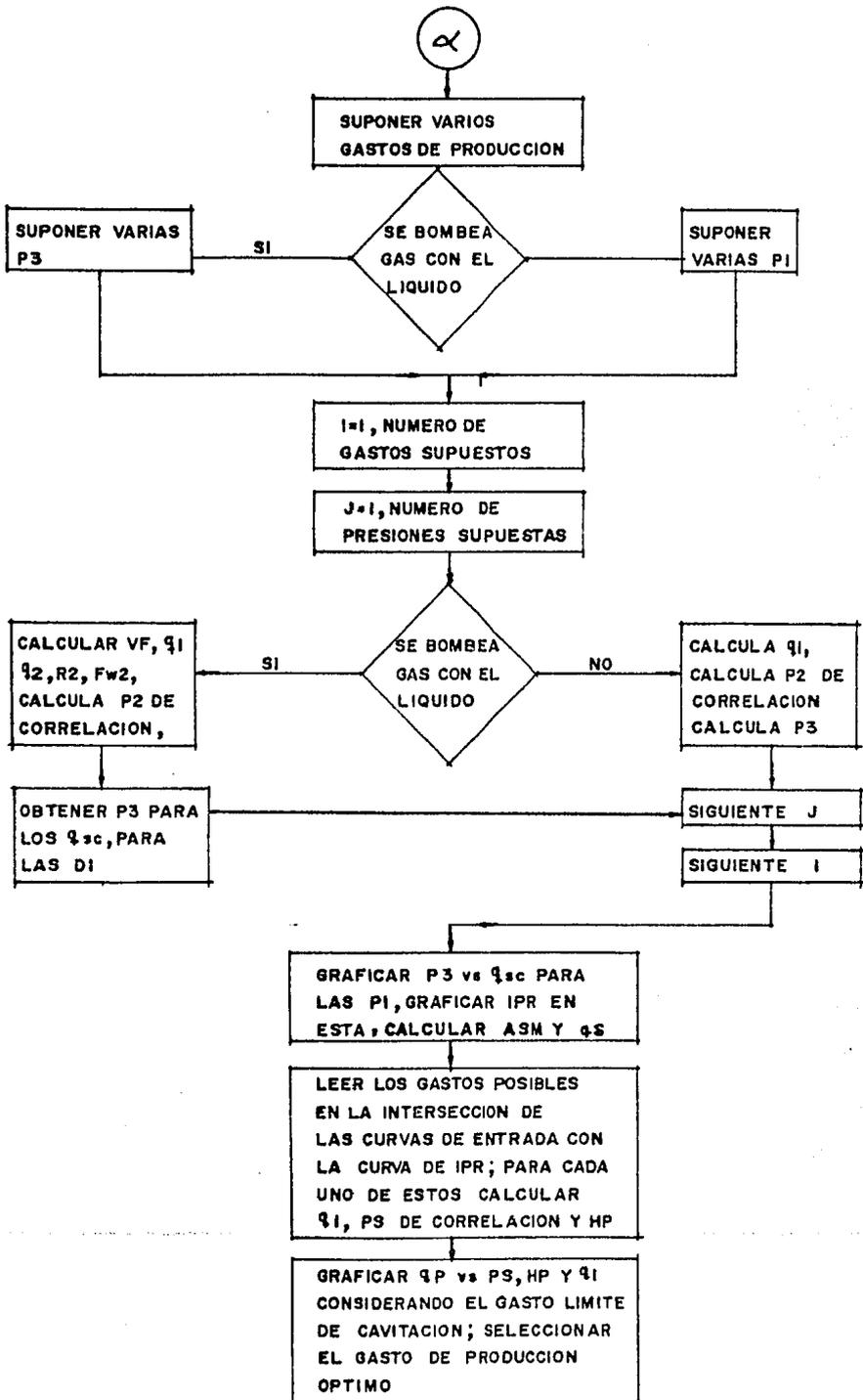


DIAGRAMA DE FUJO GENERAL PARA LA PREPARACION DE LAS CURVAS DE ENTRADA EN BOMBEO HIDRAULICO TIPO JET



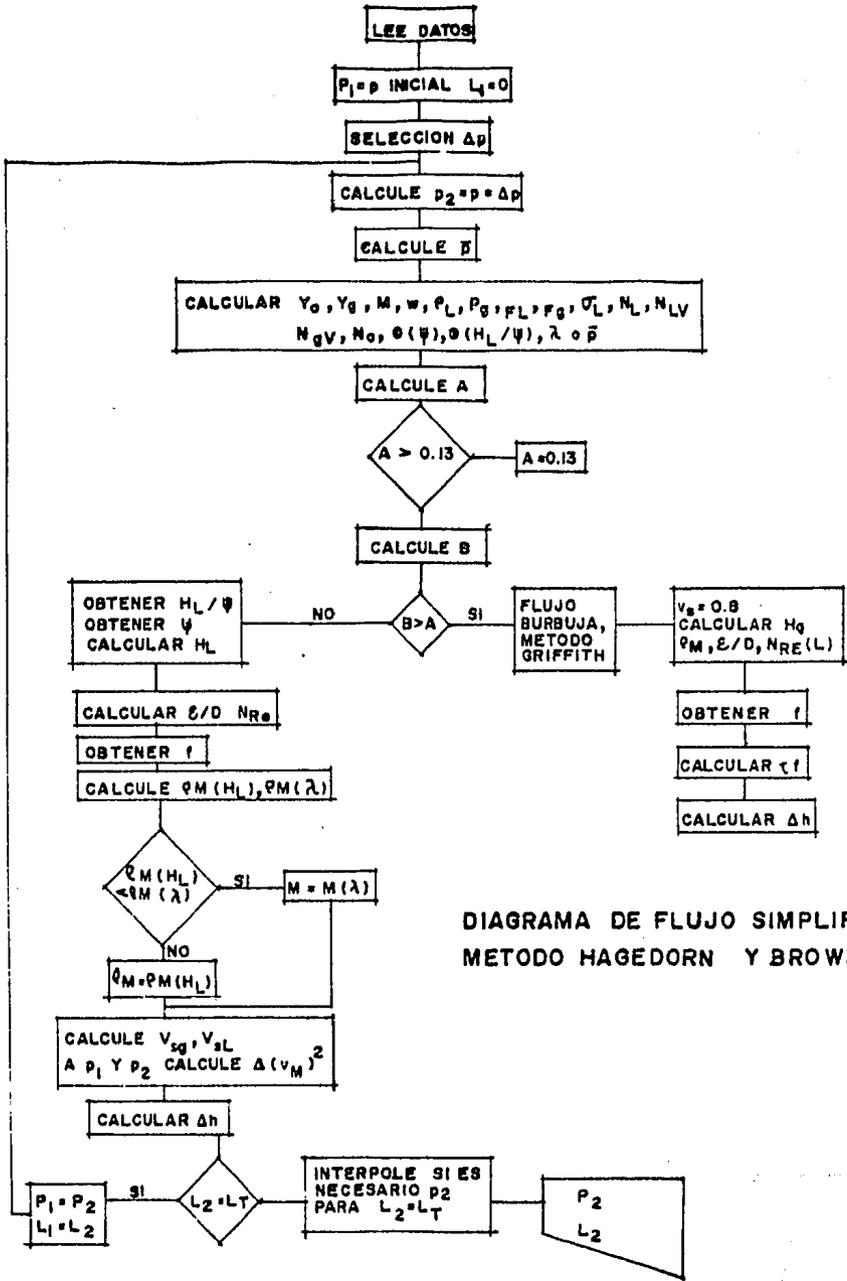


DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO METODO HAGEDORN Y BROWN

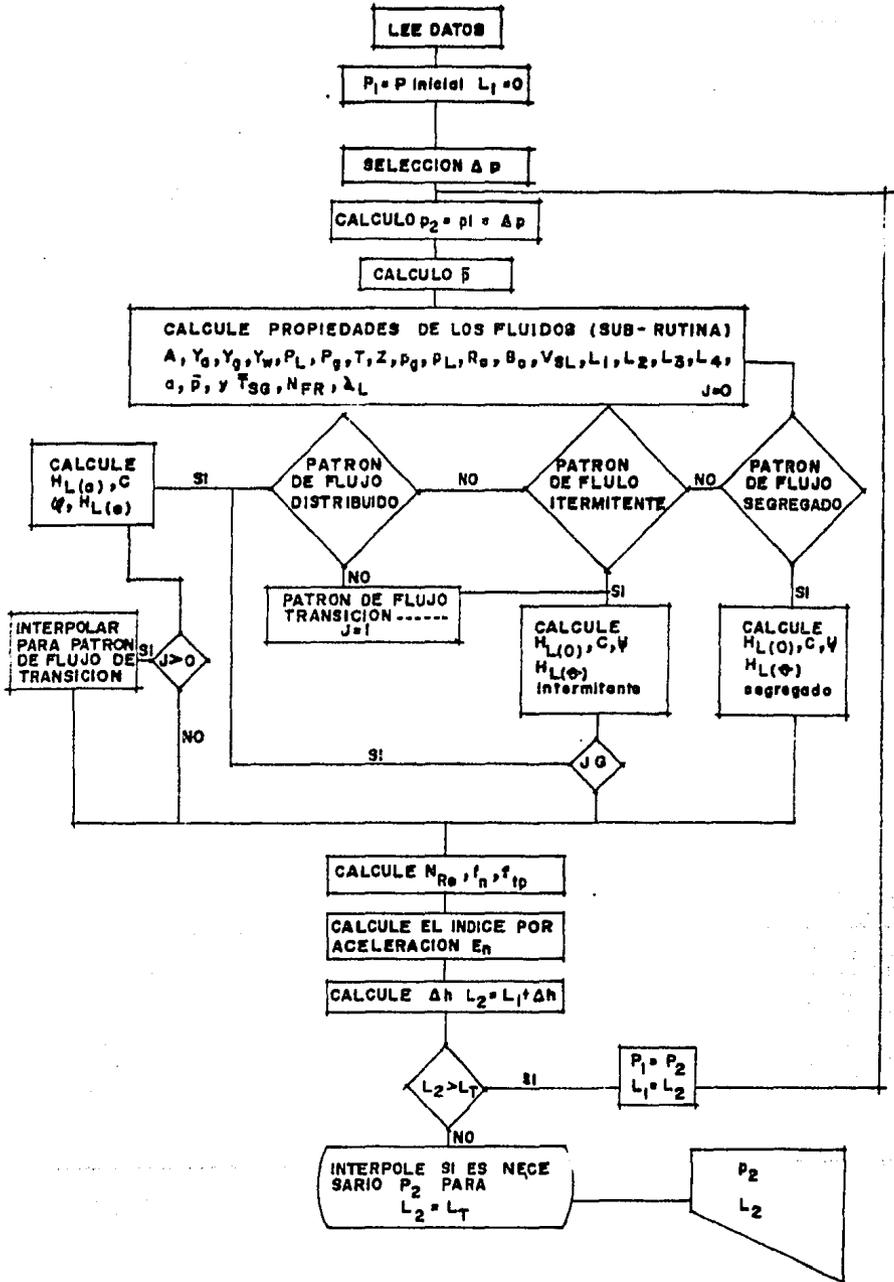


DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO  
METODO BEGGS Y BRILL

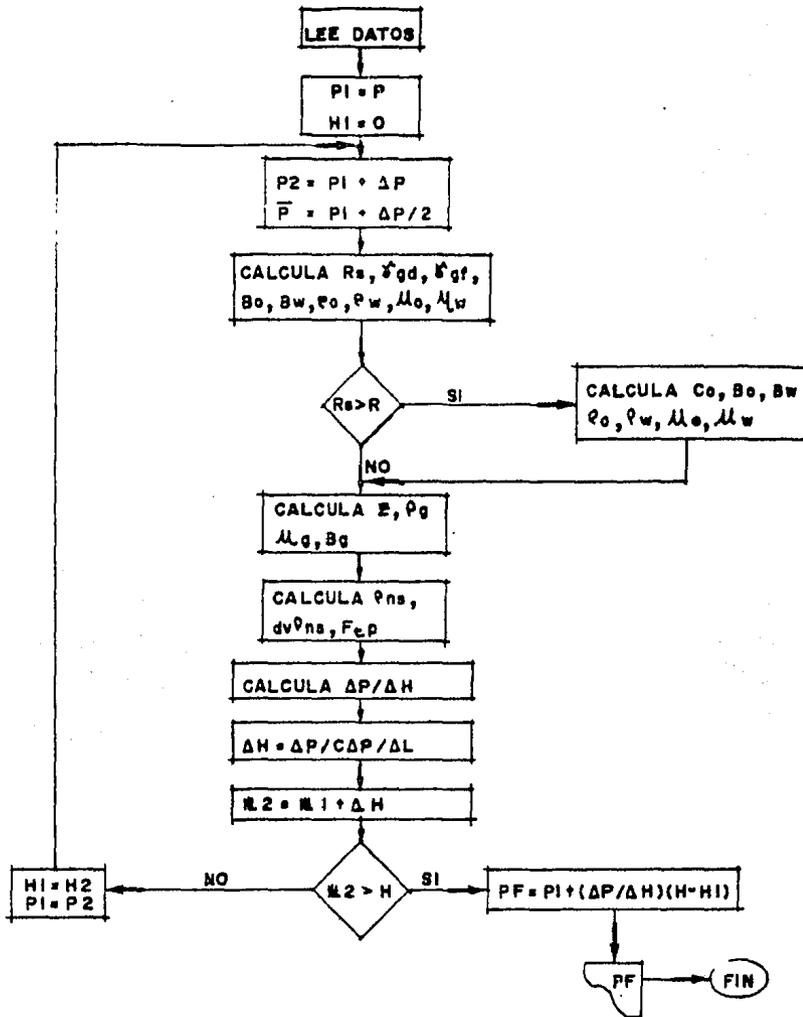


DIAGRAMA GENERAL PARA LA OBTENCION DE LAS PRESIONES DE DESCARGA CON, LA CORRELACION DE POETMAN Y CARPENTER



\*\*\*\*\*  
 \*\* DATOS DEL POZO, FLUIDOS Y YACIMIENTO PARA LA CORRIDA \*\*  
 \*\*\*\*\*

PROFUNDIDAD DE COLOCACION DE LA BOMBA [PIES]= 8000  
 DIAMETRO DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO [PG]= 7  
 DIAMETRO DE LA TUBERIA DE PRODUCCION [PG]= 2.5  
 DIAMETRO DE LA TUBERIA DE INYECCION [PG]= 2.5  
 PRESION EN LA CABEZA DEL POZO [LB/PG+2]= 120  
 TEMPERATURA EN LA CABEZA DEL POZO [F]= 110  
 DENSIDAD DEL ACEITE PRODUCIDO [API]= 35  
 DENSIDAD RELATIVA DEL GAS PRODUCIDO= .7  
 FRACCION DE AGUA= .5  
 DENSIDAD RELATIVA DEL AGUA PRODUCIDA= 1.074  
 RELACION GAS ACEITE [PIE13/BLOST]= 400  
 PRESION DE SATURACION [LB/PG+2]= 1820  
 PRESION ESTATICA DEL YACIMIENTO [LB/PG+2]= 1920  
 J (ARRIBA DE PB) [BLST/DIA]= 4.99760766  
 GASTO MAXIMO DEL POZO [BLST/DIA]= 6267  
 TEMPERATURA DE FONDO FLUYENDO [F]= 170  
 SE USARA ACEITE COMO FLUIDO MOTRIZ  
 BOMBEANDO LIQUIDO

\*\*\*\*\*  
 \*\* R E S U L T A D O S \*\*  
 \*\*\*\*\*

SELECCION DE LA RELACION DE BOMBA ADECUADA  
 VALORES OBTENIDOS DE Q1, P2, P1 Y P3 PARA LOS VARIOS GASTOS  
 SUPUESTOS Y UNA RELACION DE BOMBA= 1

QSC	Q1	P2	P1	P3
200	421	2556	6481	692
400	842	2685	6479	884
600	1263	2900	6491	1195
800	1684	3165	6514	1574
1000	2105	3465	6547	2001
1200	2526	3798	6590	2472
1400	2947	4169	6642	2994

1600	3368	4583	6705	3575
1800	3789	5047	6777	4225
2000	4210	5571	6860	4959

VALORES OBTENIDOS DE Q1, P2, P1 Y P3 PARA LOS VARIOS GASTOS  
SUPUESTOS Y UNA RELACION DE BOMBA= 2

QSC	Q1	P2	P1	P3
200	296	2545	6487	1106
400	592	2609	6477	1198
600	888	2739	6479	1374
800	1185	2911	6488	1605
1000	1481	3110	6502	1872
1200	1777	3330	6520	2166
1400	2074	3569	6544	2483
1600	2370	3828	6573	2826
1800	2666	4109	6606	3197
2000	2962	4414	6644	3600

VALORES OBTENIDOS DE Q1, P2, P1 Y P3 PARA LOS VARIOS GASTOS  
SUPUESTOS Y UNA RELACION DE BOMBA= 3

QSC	Q1	P2	P1	P3
200	222	2543	6495	1429
400	444	2576	6480	1475
600	666	2660	6477	1584
800	888	2779	6479	1736
1000	1111	2923	6485	1919
1200	1333	3084	6494	2123
1400	1555	3260	6506	2345
1600	1777	3448	6520	2582
1800	2000	3649	6538	2835
2000	2222	3864	6558	3104

SE SELECCIONO LA RELACION DE BOMBA NO. = 1

RESULTADOS PARA TRAZAR LA CURVA DE IPR

GASTO MAXIMO DEL POZO [BL/DIA]= 6267

PWF	QSC
100	6188
200	6082
300	5948
400	5788
500	5600
600	5385
700	5143
800	4874
900	4577
1000	4254
1100	3903
1200	3525
1300	3119
1400	2687
1500	2227
1600	1740
1700	1226
1800	685
1900	116

# OPTIMIZACION DEL GASTO DE PRODUCCION

P3 PARA P1 SUPUESTAS DE:

QSC	P2	6000	7000	8000	9000	10000
200	2543	300	425	0	0	0
400	2576	949	474	0	0	0
600	2650	1073	538	123	0	0
800	2779	1249	774	299	0	0
1000	2923	1461	936	511	36	0
1200	3034	1698	1223	748	273	0
1400	3250	1958	1483	1003	533	58
1600	3448	2235	1760	1235	810	335
1800	3649	2532	2057	1532	1107	632
2000	3864	2849	2374	1899	1424	949

AREA MINIMA Y GASTO MAXIMO SIN CAVITACION

P1	P3	ASM	QS
6000	974	.151123204	1095
7000	1213	.209894369	1146
8000	1577	.312312064	1380
9000	1954	.522869793	2092
10000	2213	.613247824	2451

POTENCIA REQUERIDA PARA LOS GASTOS POSIBLES

P1	QP	Q1	PS	HP
6000	1230	2589	2862	111
7000	1595	3357	3437	173
8000	1705	3589	4542	244
9000	2075	4368	4691	307
10000	2405	5063	4982	378

PARA UN GASTO DE PRODUCCION DE [BL/DIA]= 1000

HP= 143

P1 [LB/PG12]= 6890

P3 [LB/PG12]= 2323

AJ [PG12]= .0237244188

Q1 [BL/DIA]= 2105

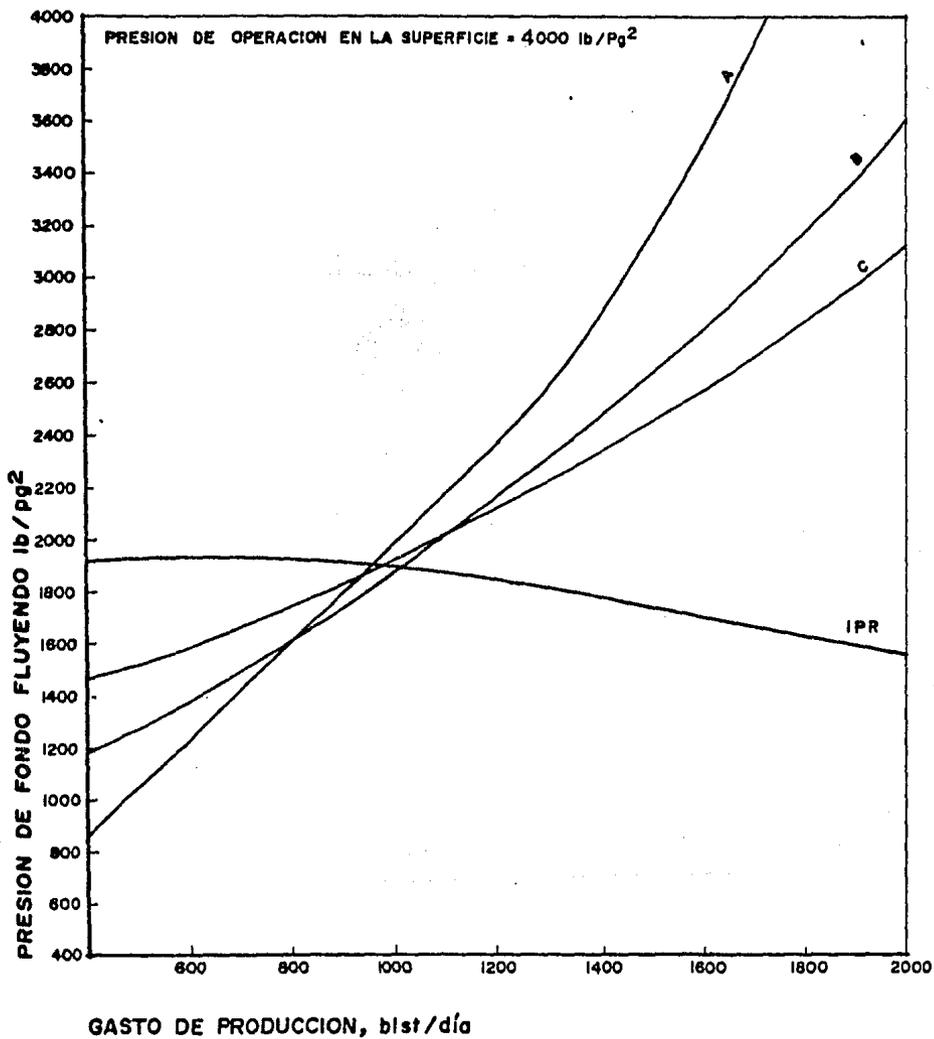


FIG. 5.1 CURVAS DE ENTRADA PARA LAS RELACIONES DE BOMBAS A CHORRO ELEGIDAS, OBTENIDAS DE LOS RESULTADOS DEL PROGRAMA.

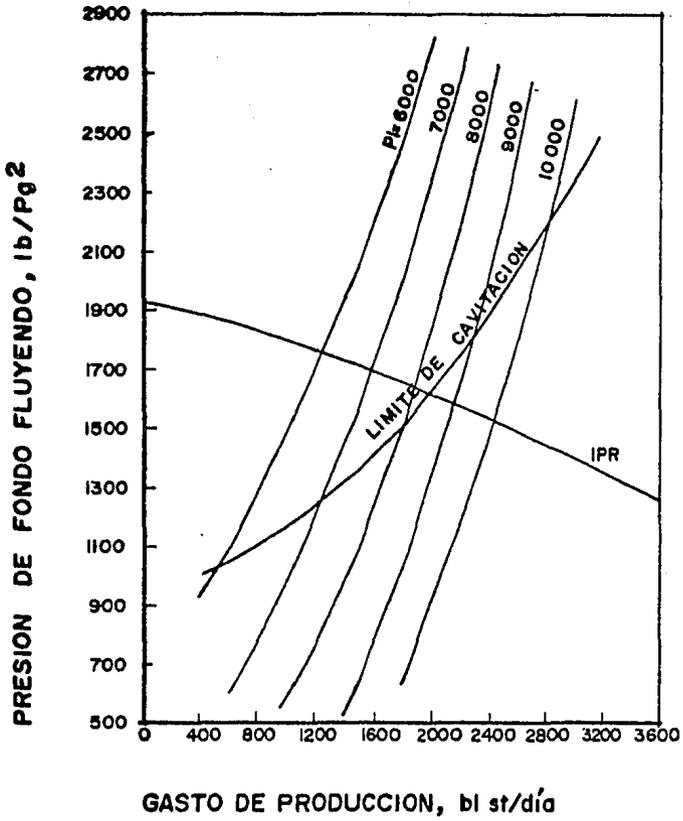
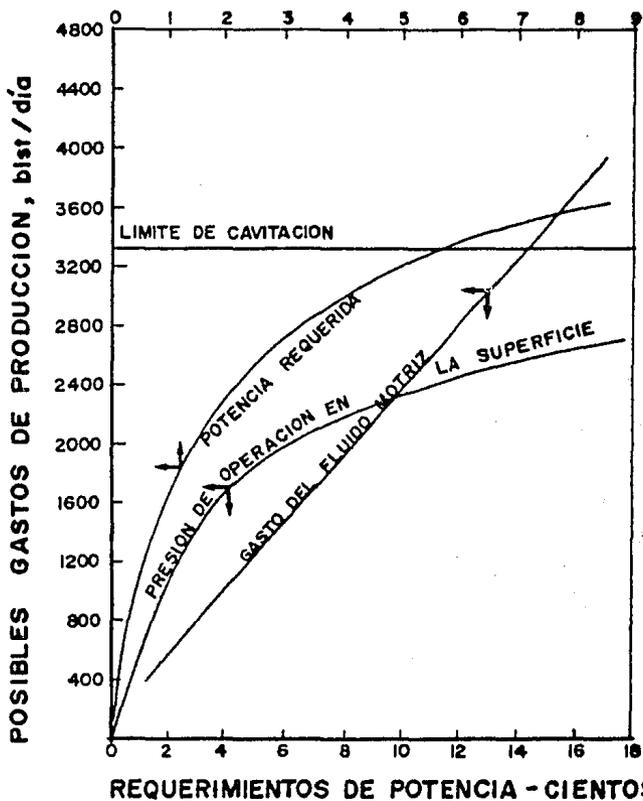


FIG. 5.2 CURVAS DE ENTRADA A LA BOMBA SELECCIONADA, OBTENIDAS CON LOS RESULTADOS DEL PROGRAMA

$Q_1$  - MILES DE bbl / día



PRESION DE OPERACION EN LA SUPERFICIE - MILES DE  $lb/pg^2$

FIG. 5.3 POSIBLES GASTOS DE PRODUCCION POR BOMBEO HIDRAULICO TIPO CHORRO vs HP,  $P_s$  Y  $q_1$ , OBTENIDOS CON LOS RESULTADOS DEL PROGRAMA.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los métodos de cálculo empleados en el modelo computarizado son confiables, para las ecuaciones básicas que gobiernan el comportamiento del Bombeo Hidráulico tipos pistón y chorro; Este análisis es laborioso y requiere muchas horas - - hombre. Los fabricantes de bombas tanto para bombeo hidráulico tipo pistón y tipo chorro utilizan diferentes técnicas para predecir el comportamiento de un sistema en particular; en la cual utilizan gráficas, nomogramas y programas de - - cómputo.
2. Las soluciones de los procedimientos mediante programas de cómputo, hace de éstos una herramienta auxiliar e indispensable, y ejecuta rápidamente los cálculos del Análisis Nodal de Sistemas. Se analizan los diferentes tipos de bombas que se pueden utilizar en bombeo hidráulico tipo pistón, y se analizan las diferentes combinaciones de tobera y cámara de mezclado para el bombeo hidráulico tipo chorro bajo diferentes condiciones del pozo.
3. Una ventaja notable del programa, es que puede seleccionar - la bomba subsuperficial más adecuada de acuerdo a los objetivos, lo que reduce considerablemente el tiempo invertido en la preparación de las curvas de entrada a la bomba. Así mismo se observa que mas de una bomba puede ser adecuada, pero

muchas veces la selección final del equipo se complementará con análisis económico, que incluye costos de operación iniciales y de operación del equipo. En éste trabajo no se incluye análisis económico por la falta de información de los costos de bombas de los fabricantes.

4. Otra ventaja del Análisis Nodal de Sistemas es que se identifican los parámetros que controlan el flujo en el sistema de producción, en orden de predecir los gastos de flujo y poder optimizar los componentes del sistema. Si bien el comportamiento de éstos dos sistemas de bombeo hidráulico fue investigado variando únicamente un parámetro. Sin embargo, el método puede ser usado para estudiar el efecto de otros factores, como la presión en la cabeza del pozo, diferentes diámetros de tuberías, profundidad de colocación de la bomba, bombeo parcial del gas libre con el líquido. Cada uno de éstos factores influye en el comportamiento del sistema en diferente grado.
5. Si se tiene cuidado en recabar la mayor información precisa y confiable de campo, para alimentar el programa tanto del pozo, fluidos y del yacimiento, se obtendrán resultados dentro de rangos más aceptables.
6. De los resultados del análisis de sensibilidad se puede concluir lo siguiente:

Mientras mayor sea la presión del Fluido Motriz y la presión de operación en la superficie, mayores serán los gastos de producción tanto para el Bombeo Hidráulico tipo Pistón como para Bombeo Hidráulico tipo Chorro.

Se observa que el bombeo Hidráulico tipo Chorro, es muy sensible a la presión, por lo que al aumentar la presión del Fluido Motriz y a bajas presiones de descarga de la bomba se incrementa significativamente la capacidad de la bomba tipo chorro. Esto puede ser complementado con la reducción de las pérdidas por fricción, usando conductos de flujo más grandes. Por ejemplo se puede doblar el gasto de producción utilizando el espacio anular como columna de retorno en lugar de la tubería de producción.

En pozos con bajos gastos se tendrán menores pérdidas por fricción, y en pozos con altos gastos de producción, con altos gastos de fluido motriz tienen una declinación continua en la RGL, en la columna de producción y se tienen mayores pérdidas por fricción.

Teniendo una menor presión de descarga de la bomba se requiere una menor potencia de operación en la superficie.

En pozos con algo de gas con el líquido se tendrá una menor tendencia a la cavitación, debido a la presencia del gas en la columna de producción dado que se tiene un aligeramiento

en esta columna, reduciendo la presión de descarga de la --  
bomba.

Al igual que el bombeo hidráulico tipo chorro, en el bombeo hidráulico tipo pistón se tendrán mayores caídas de presión por fricción en pozos asociados con gastos altos, y con gastos bajos se reducirán las pérdidas de presión por fricción; reduciendo la presión de descarga de la bomba.

Para los dos sistemas de bombeo se pueden obtener gastos de producción mayores bombeando un pequeño volumen de gas con el líquido.

7. Tomando en cuenta que en la actualidad se perfora a profundidades cada vez mayores y a altos ritmos de extracción, - muy pronto será necesario el empleo de sistemas artificiales como el Bombeo Hidráulico que es capaz de extraer fluidos a profundidades hasta de 18000 pies, y producciones del orden de 5000 a 15000 bl/día, con densidades desde 12°API, esta puede ser una alternativa para poder explotar este tipo de yacimientos.

En este trabajo se pretende mostrar la aplicación de Análisis Nodal a los sistemas artificiales de producción como -- una alternativa más para conocer y evaluar el sistema de - producción para el mejor aprovechamiento de los recursos pe-

troleros.

Se trato que este trabajo fuera accesible y fácil de compre  
nder, de tal manera que quien no se encuentra familiarizado -  
con la computación lo puede utilizar y manejar.

## N O M E N C L A T U R A

Las unidades expuestas aquí corresponden a las ecuaciones --  
del Capítulo II. Bombeo Hidráulico tipo Pistón.

### SIMBOLOS

### D E F I N I C I O N

Ae	Area del pistón del motor ( $pg^2$ )
Ap	Area del pistón de la bomba ( $pg^2$ )
Ar	Area de la varilla ( $pg^2$ )
Bg	Factor de volumen del gas ( $pie^3/pie^3$ )
Bo	Factor de volumen del aceite (b bl/blost)
Dp	Profundidad de colocación de la bomba (pies)
Eb	Eficiencia de la bomba (fracción)
Em	Eficiencia del motor (fracción)
EPM	Emboladas por minuto
Fp	Fricción de la bomba ( $lb/pg^2$ )
fw	Fracción de agua en el Yac. (Fracción)
fw2	Fracción de agua en la columna de retorno (fracción)
Gf	Gradiente del fluido en la T.P. ( $lb/pg^2/pie$ )
GIP	Porcentaje del gas de inyección de la formación.
HP	Potencia (HP)
IPR	Indice de Productividad ( $b1/dfa / lb/pg^2$ )
NL	Elevación neta (pies)
P1	Presión del fluido motriz ( $lb/pg^2$ )
P2	Presión de descarga del motor ( $lb/pg^2$ )
P3	Presión de descarga de la bomba ( $lb/pg^2$ )
P4	Presión de entrada a la bomba ( $lb/pg^2$ )
Ppf	Presión de retorno ( $lb/pg^2$ )
Pwh	Presión en la cabeza del pozo ( $lb/pg^2$ )
Pwf	Presión de fondo fluyendo ( $lb/pg^2$ )
Ps	Presión de operación en la superficie ( $lb/pg^2$ )

## SIMBOLOS

## DEFINICION

P/E	Relación bomba-motor (adim)
(P/E)max	Relación bomba-motor máxima (adim)
Q <sub>1</sub>	Gasto del fluido motriz (bl st/dfa)
Q'1	Gasto teórico del fluido motriz (blst/dfa)
Q <sub>4</sub>	Gasto de producción (blst/dfa)
Q'4	Gasto de producción teórico (blst/dfa)
q <sub>4</sub>	Desplazamiento de la bomba (bl/dfa x EPM)
q <sub>1</sub>	Desplazamiento de la bomba (bl/dfa x EPM)
qp	Gasto posible (blst/dfa)
QT	Gasto total (blst/día)
RGA	Relación gas-aceite (pies <sup>3</sup> /blst)
RGA 2	Relación gas-aceite en la columna de retorno (pies <sup>3</sup> /blst).
RGL	Relación gas-líquido (pies <sup>3</sup> /blst)
R <sub>s</sub>	Relación de solubilidad (pies <sup>3</sup> /blst)
% RS	Porcentaje de velocidad de bombeo (%)
SPM	Desplazamiento de la bomba (EPM)
T	Temperatura (°F)
VF	Factor de volumen (bl cyac/blst)

## SUBINDICES

- o - aceite
- w - agua
- st - condiciones standard
- r.p.m. - revoluciones por minuto

## N O M E N C L A T U R A

Las unidades expuestas aquí corresponden a las ecuaciones -- del Capítulo III. Bombeo Hidráulico Tipo Jet (Chorro).

### SIMBOLOS

### D E F I N I C I O N

AG-	Area para el paso de gas ( $pg^2$ )
Aj-	Area de la tobera ( $pg^2$ )
ASM-	Area mínima anular para evitar cavitación ( $pg^2$ )
At-	Area de la cámara de mezclado ( $pg^2$ )
Bg-	Factor de volumen del gas ( $pie^3/pie^3$ )
Bo-	Factor de volumen del aceite de la formación (b bl/blst)
E-	Eficiencia = M.H
EPM-	Emboladas por minuto
fw-	Fracción de agua en el yacimiento (fracción)
fw2-	Fracción de agua en la columna de retorno (fracción)
G1-	Gradiente del fluido motriz en la tubería de inyección ( $lb/pg^2/pie$ )
G2-	Gradiente de fluido motriz en la columna de retorno ( $lb/pg^2/pie$ )
G3-	Gradiente de los fluidos producidos ( $lb/pg^2/pie$ )
GIP-	Porcentaje del gas de inyección
H-	Relación de carga adimensional.
Hp-	Máxima relación de carga adimensional.
HP-	Potencia (HP)
IPR-	Índice de Productividad (blst/día/lb/ $pg^2$ )
M-	Relación de flujo adimensional
Mp-	Máxima relación de eficiencia adimensional
P1-	Presión del fluido motriz ( $lb/pg^2$ )
P2-	Presión de descarga ( $lb/pg^2$ )
P3-	Presión de entrada ( $lb/pg^2$ )

## SIMBOLO

## DEFINICION

Ps-	Presión de operación en la superficie (lb/pg <sup>2</sup> )
Pwh-	Presión en la cabeza del pozo (lb/pg <sup>2</sup> )
q <sub>1</sub> -	Gasto del fluido motriz (blst/dfa)
q <sub>2</sub> -	Gasto total de líquido en la columna de retorno (blst/dfa).
qs-	Gasto máximo sin cavitación (bl/dfa)
qsc-	Gasto de producción en la superficie (blst/dfa)
R	Relación gas-aceite (pies <sup>3</sup> /blst)
R <sub>2</sub> -	Relación gas-aceite en la columna de retorno (pies <sup>3</sup> /blst)
RGL-	Relación gas-líquido (pies <sup>3</sup> /blst)
Rs-	Relación de Solubilidad (pies <sup>3</sup> /blst)
VF-	Factor de volumen (bl/blst)

## SUBINDICES

- o - aceite
- w - agua
- γ - densidad relativa del fluido motriz
- st - condiciones estandard

## B I B L I O G R A F I A

### CAPITULO I

Brown, Kermit E.- "The Technology of Artificial -- Lift Methods" Volumen 4. Petroleum Publishing Co. (1984) Tulsa, Oklahoma.

Parres, José L.- "Máquinas Hidráulicas" Editorial Bolivar (1958).

Gómez Cabrera José A.- "Apuntes de Producción de - Pozos I" Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. Oct. (1985).

Brown, Kermit E.- "The Technology of Artificial -- Lift Methods" Volumen 2a. Petroleum Publishing - Co. (1980) Tulsa, Oklahoma.

### CAPITULOS II y III

Brown, Kermit E.- "The Technology of Artificial -- Lift Methods" Volumen 2b Petroleum Publishing Co. (1980) Tulsa, Oklahoma.

Petrie H.L. and Smart.- "Jet Pumping Oil Wells" World Oil Noviembre (1983).

De Antuñano Muñoz.- "Bombeo Hidráulico Tipo Pistón" Tesis. Facultad de Ingeniería. U.N.A.M. Noviembre (1985).

### CAPITULOS IV y V

Standing M.B.- "A Pressure - Volume - Temperature Correlation for Mixtures of California Oil and -- Gases" Drill and Prod. Prac., API (1947).

Vázquez, M. y Beggs, M.D. "Correlations for Fluids Physical Property Prediction". J.P.T., Junio (1980).

Oinstein Glaso. "Generalized Pressure - Volume -  
Temperatura Correlations".  
J.P.T. Mayo (1980).

Standing, M.B. y Katz, D.L. "Density of Natural --  
Gases", Trans. AIME (1942).

Poettman F.H. y Carpenter P.G. "The Multiphase - -  
Flow of Gas, Oil and Water Through Vertical Flow  
Strings with Application to the Design of Gas - -  
Lift Instalations". Drill and Prod. Pract.  
API (1952).

Hagedorn, A.R. and Brown, K.E.- "Experimental - --  
Study of Pressure Gradients occurring During Con-  
tinuous Two- Phase Flow in Small Diameter Vertical  
Conduits".  
J.P.T. Abril (1965).

Beggs H.D. and Brill, J.P., "An Experimental Study  
of Two phase Flow in Inclines Pipes"  
J.P.T. Mayo (1973).

Garaicochea, J.F.- "Apuntes de Transporte de Hi--  
drocarburos". Facultad de Ingenierfa  
U.N.A.M. (1985).

Fuentes Nucamendi, F.A. "Análisis Nodal Conceptos  
y Fundamentos" Tesis, Facultad de Ingenierfa  
U.N.A.M. (1986).

## REFERENCIAS

- 1.- Brown, K.E. "The Technology of Artificial Lift Methods". Vol. 2b. Capítulo 5. Tulsa, Oklahoma: The Petroleum Publishing Co., 1980.
- 2.- Wilson, P.M. "Introduction to Hydraulic Pumping. Huntington" Park, California: Kobe Inc., 1976.
- 3.- Byrd, J.P. Personal communication to Kermit E. Brown.
- 4.- Brown, K.E., "The Technology of Artificial Lift Methods". Vol. 2b. Capítulo 6. Tulsa, Oklahoma: The Petroleum Publishing Co., 1980.
- 5.- Petrie, H.L. and Smart, E.: "Jet Pumping Oil Wells". World Oil, November 1983.
- 6.- Gómez, J.A. "Apuntes de Producción de Pozos I". Capítulo 3 Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. 1985.
- 7.- Brown, K.E. "The Technology of Artificial Lift Methods" Vol. 1, Capítulo 1. Tulsa, Oklahoma: The Petroleum Publishing Co., 1977.