



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**BOMBAS CON FLUJO MULTIFÁSICO : ANÁLISIS Y MODELOS DE
CÁLCULO DE CAPACIDAD**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA PETROLERA

PRESENTA:

FLORES RIVERA, FERNANDO

ASESOR: SÁNCHEZ ARREDONDO, FRANCISCO

1994



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

01174
329

AGRADECIMIENTOS

A PEMEX EXPLORACION Y PRODUCCION POR LA GRAN OPORTUNIDAD QUE ME BRINDO PARA SEGUIR SUPERANDOME, Y PODER CONTRIBUIR EN EL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA PETROLERA Y DE MI PAIS.

AL M.I. JOSE A. GOMEZ CABRERA POR SU VALIOSA COLABORACION PARA LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

AL M.I. FRANCISCO SANCHEZ ARREDONDO POR HACERME EL FAVOR DE DIRIGIRME ESTA TESIS Y POR SUS ACERTADOS COMENTARIOS.

AL ING. RAFAEL C. FRANCO RAMIREZ, SUPERINTENDENTE DE PRODUCCION, DISTRITO AGUA DULCE, POR LA GRAN AYUDA BRINDADA.

AL ING. ABEL DE LEON REBOLLEDO POR LA PACIENCIA QUE ME TUVO Y EL APOYO BRINDADO.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1994

DEDICATORIAS

. DOY GRACIAS A DIOS

A LA MEMORIA DE MI PADRE:

JOSE FRANCISCO FLORES CALDERON

A LA MEMORIA DE MIS

ABUELITOS: FRANCISCA,

GUILLERMO Y JOSE.

**A MI MAMA: PORQUE SIEMPRE
ME DEMUESTRA SU AMOR Y
APOYO, Y POR DARME LA MEJOR
HERENCIA QUE PUEDO PEDIR:
EDUCACION, AGRADECIMIENTO Y
RESPECTO.**

A MIS HERMANOS: JOSE
GUILLERMO, GERARDO, FRANCISCO
JAVIER, MARTHA EUGENIA, JOSE
ALFREDO, RAUL EDUARDO, JULIO
CESAR, JUAN DE DIOS Y CLAUDIA
ELIZABETH POR APOYARME Y COMO
UN INCENTIVO PARA QUE SE
SIGAN SUPERANDO Y LOGREN SUS
METAS DESEADAS.

A MIS TIAS: CARMEN, SOCORRO Y MERCEDES
POR LA GRAN AYUDA QUE ME HAN BRINDADO, Y
POR SUS SABIOS CONSEJOS QUE SIEMPRE
TENGO PRESENTE.

AL SR. CESAREO POR EL
GRAN AFECTO Y RESPETO
QUE LE TENGO Y POR SU
GRAN AYUDA QUE NUNCA
DEJARE DE
AGRADECERCELA.

FRATERNALMENTE A MIS AMIGOS

DEDICATORIA ESPECIAL A:

MI ESPOSA **MARIANA**: POR TODOS LOS
MOMENTOS DE FELICIDAD QUE TENGO
CON ELLA, POR SER UNA COMPAÑERA
PERFECTA, POR IMPULSARME A
SEGUIR ADELANTE Y POR DARME LA
MAXIMA ALEGRIA QUE PUEDA PEDIR:
UN HIJO.

A MI PEQUEÑO HIJO: **JOSE FERNANDO**
POR DARLE UNA NUEVA DIMENSION A
MI CAMINO

NADA ESCRIBE AQUEL CUYOS ESCRITOS NO SE LEEN...

CONTENIDO

	PAGINA.
RESUMEN	1
CAPITULO I	
INTRODUCCION	4
CAPITULO II	
REVISION BIBLIOGRAFICA	9
2.1 INTRODUCCION	9
2.2 REQUISITOS PARA UNA BOMBA MULTIFASICA	9
2.2.1. BOMBA ROTODINAMICAS	10
2.2.2. BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO	11
2.3 PROYECTO POSEIDON	12
2.3.1 OBJETIVO DEL PROYECTO	13
2.3.2 SELECCION DE LA TECNOLOGIA DE LA BOMBA	17
2.3.3. PRINCIPIO ROTODINAMICO	18
2.3.4 PRUEBAS REALIZADAS	21
2.3.4.1. CIRCUITO - LOOP PARA PRUEBAS DE CAMPO	21
2.3.4.2. PRUEBAS DE RESISTENCIA	22
2.3.4.3. CONCLUSIONES DE LA PRUEBA EN TUNEZ	23
2.4 PROYECTO DE LA COMPAÑIA FRAMO-SHELL	24
2.5 PROYECTO DE LA COMPAÑIA B.H.R.A.	25

2.6	PROYECTO ITALIANO	27
2.7	PROYECTO DE LA COMPAÑIA WEIR PUMPS	28
2.8	PROYECTO DE LA COMPAÑIA MULTIPHASE SYSTEMS PLC.	30
2.8.1	REQUISITOS DE LA BOMBA	31
2.8.2	PROTOTIPO DE TAMAÑO NATURAL	32
2.8.3	SELECCION DEL PRINCIPIO DE BOMBEO	34
2.8.4	CONFIRMACION DEL PRINCIPIO DE BOMBEO	35
2.8.5	DESARROLLO DEL PROGRAMA	36
2.8.6	SELECCION DEL MATERIAL	37
2.8.7	TAMAÑO BASICO DE LA BOMBA	38
2.8.8	PRUEBAS A LA BOMBA DE ESPECIFICACION COMPLETA	38
2.8.9	APLICACIONES EN POZOS	39
2.9	PROYECTO DE LA COMPAÑIA A.S.E.A	43

CAPITULO III.

	DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO	45
3.1	INTRODUCCION	45
3.2	VENTAJAS DE LAS BOMBAS DE TORNILLO	46
3.3	DESVENTAJAS DE LAS BOMBAS DE TORNILLO	47
3.4	SUMINISTRO (CAUDAL)	47
3.5	CAPACIDAD	49
3.6	CABALLOS DE FUERZA	51
3.7	DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO PARA EL CALCULO DE CAPACIDADES EN BOMBAS MULTIFASICAS	53
3.7.1	CONSIDERACIONES GENERALES	53

3.7.2 TIPOS DE BOMBAS MULTIFASICAS	54
3.7.3 DESARROLLO DE LAS ECUACIONES	56
3.7.4 ECUACIONES OBTENIDAS	58
3.7.5 OPCIONES DE CALCULO DEL MODELO	60
3.7.5.1 OPCION A. CALCULO DEL TIPO DE BOMBA	60
3.7.5.2 OPCION B. CALCULO DEL VOLUMEN TOTAL MANEJADO POR LA BOMBA	65
3.7.5.3 OPCION C. CALCULO DE LA CAIDA DE PRESION	65

CAPITULO IV

APLICACIONES DEL MODELO MATEMATICO PARA EL CALCULO

DE CAPACIDADES EN BOMBAS MULTIFASICAS	66
4.1 INTRODUCCION	66
4.2 VALIDACION DEL MODELO	67
4.3 ANALISIS DE RESULTADOS	68

CAPITULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
---------------------------------------	----

BIBLIOGRAFIA.	79
----------------------	----

DIAGRAMA DE FLUJO.

TABLAS

FIGURAS

RESUMEN

El presente trabajo fue propuesto por la Gerencia de Desarrollo Tecnológico de P.E.P en la cuál la bomba multifásica forma parte de un proyecto que dicha Gerencia esta desarrollando.

El trabajo presenta los estudios que se han desarrollado por las diferentes Compañías y grupos de investigadores sobre la nueva tecnología denominada BOMBEO MULTIFASICO.

El concepto del bombeo multifásico es una nueva tecnología para bombear y transportar los fluidos, desde el pozo hasta la central de procesamiento. El principal componente de esta tecnología es la BOMBA MULTIFASICA.

Dos son las Compañías que más avanzadas se encuentran dentro de la fase de investigación y desarrollo de este concepto. Una es un consorcio francés formado por tres Compañías, desarrollaron una bomba rotodinámica helicoidal, esto como parte de un proyecto denominado POSEIDON.

La otra Compañía, es inglesa, llamada MULTIPHASE SYSTEMS, desarrolló una bomba de desplazamiento positivo del tipo tornillos gemelos. Esta Compañía ya ha probado

su bomba a nivel de campo.

Debido a lo relativamente nuevo de la tecnología, todavía no se ha publicado mucho acerca de los resultados obtenidos en las citadas pruebas, pero si se menciona, que estas bombas se están probando en algunos lugares del mundo, principalmente en plataformas marinas.

Con la poca información disponible, se desarrolló un modelo matemático, sencillo, para el cálculo del tipo de bomba a usar, cálculo de volúmenes totales a manejar por la bomba seleccionada, cálculo de la presión diferencial a través de la succión y descarga de la misma y cálculo del volumen de líquido y gas que maneja la bomba.

Este modelo no pretende revolucionar el concepto multifásico, es un modelo simplista, desarrollado con la poca información que se disponía, ya que como se mencionó, esta tecnología es nueva, y los investigadores no se atreven a publicar sus resultados hasta estar convencidos que este sistema funcionará.

Asimismo, se presenta la validación del modelo desarrollado en este trabajo con datos publicados por las compañías de las pruebas que realizaron. También se presentan los resultados obtenidos con el modelo al

aplicarlo al campo Magallanes del Distrito Agua Dulce de la Región Sur.

C A P I T U L O I

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

Todos los pozos petroleros producen una mezcla de fluidos de hidrocarburos que se separan en gas y líquido cuando se reduce la presión a medida que son elevados del fondo del pozo a la superficie. Las porciones de gas y líquido varían de pozo a pozo, del 99 % de líquido a un 99 % de gas y aún en el mismo pozo, dado que la relación gas-líquido cambia paulatinamente. (1*).

Además de producir gas y petróleo, los pozos normalmente producen: agua y material arenoso, nuevamente en cantidades que varían de pozo en pozo.

La producción de un pozo no se presenta de manera predecible y constante, y en cualquier momento la circulación " normal " puede ser interrumpida por baches de 100 % de gas o 100 % de líquido de duraciones variables.

(1* referencias al final del trabajo).

Además el petróleo puede ser "dulce", o "amargo" si contiene H_2S , y solamente puede ser manejado mediante un equipo diseñado con materiales especiales.

El equipo necesario para manejar estos productos en sus proporciones y condiciones ampliamente variables, ha sido tradicionalmente muy complejo, pesado, costoso y, además todos han tenido que ser ubicados dentro del área del pozo, sin embargo puede resultar peligroso, inseguro e incomodo especialmente en una plataforma marina.

Después de la separación, sería necesario una bomba y una tubería para enviar el aceite a una terminal, mientras que el gas sería comprimido, y una parte se volvería a utilizar y la otra parte se enviaría a la terminal.

En estas circunstancias existe evidentemente un incentivo muy fuerte para desarrollar sistemas capaces de manejar mezclas gas-líquido y distribuirlos a una estación de tratamiento central que podría ser localizada en un sitio adecuado. a estos sistemas se les conoce actualmente como **"SISTEMAS MULTIFASICOS DE BOMBEO"**. (2)

El sistema multifásico puede ser una herramienta potencial para las Compañías petroleras para usar y

reducir sus gastos de inversión y sus costos de operación mientras que al mismo tiempo se resuelve el problema del gas y también los sistemas de producción reducirán el equipo de separación. (1*)

Evidentemente los ahorros mas significativos ocurrirán en los nuevos desarrollos donde los ahorros sobre gastos de inversión podrían ser del orden del 10 % al 40 % del costo total pero, por supuesto es posible que ninguna Compañía petrolera aplique el sistema multifásico hasta que se haya visto que un número de bombas opere confiablemente en pozos, durante largos periodos sin falla.

Bajo ciertas condiciones operativas estas bombas en un momento dado pueden manejar dos fases es decir, el gas o aire asociado con el líquido, pero la eficiencia de estas bombas se vería seriamente afectada, así como también las partes mecánicas. Las bombas rotodinámicas (centrífugas) y las de desplazamiento positivo (tornillo) son los dos tipos de bombas que los diseñadores han seleccionado para manejar las mezclas multifásicas, debido a que son las que mejor comportamiento han tenido en las pruebas desarrolladas para cada una de ellas, y que, como se tratará mas

adelante pueden manejar fracciones de gas del orden del 97 %.

En el capítulo siguiente se tratarán cada uno de los tipos de bombas que más se utilizan como multifásicas, así como lo que otras compañías han hecho y desarrollado dentro de este concepto y también en que lugares del mundo se están probando este tipo de bombas.

En el capítulo III se desarrolla un modelo matemático simple, para el cálculo del tipo de bomba multifásica que se puede utilizar de acuerdo a datos de campo dados, así como también el modelo calcula los gastos máximo de líquido y gas que puede manejar la bomba de acuerdo a la caída de presión dada, y por último el modelo también puede determinar la caída de presión con base al tipo de bomba multifásica que se esté manejando y el gasto total a condiciones de entrada.

En el capítulo IV se hace la validación del modelo con resultados reales reportados en la literatura, y se aplica el modelo desarrollado, con los datos de producción obtenidos del campo Magallanes, de la Región Sur.

Por último se presentan las conclusiones y recomendaciones en lo referente a este trabajo y al modelo presentado.

CAPITULO II

REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 INTRODUCCION.

El concepto de BOMBEO MULTIFASICO ha sido estudiado desde 1984 y un gran número de Compañías productoras de aceite han patrocinado proyectos para el desarrollo de una bomba multifásica capaz de manejar mezclas gas-líquido con fracciones de gas bastante altas, del orden de 0 % a 97 % con el fin económico y técnico de obtener una bomba que mejor se adapte a sus necesidades de servicio.⁽³⁾

2.2 REQUISITOS PARA UNA BOMBA MULTIFASICA.

Los criterios básicos para seleccionar el tipo de bomba son: la fracción de gas en la mezcla, la producción del pozo o campo, si se manejan fluidos corrosivos o abrasivos, seguido por supuesto por la confiabilidad, el costo y el tamaño de la bomba.

La fracción de gas, expresada como un porcentaje o como la relación gas-líquido (RGL) varía grandemente de acuerdo al tipo de pozo, si es usado algún método de recuperación o depende de la vida productiva del pozo.

La fracción de gas puede ser menor del 50 % en la cabeza del pozo, especialmente si se usa la inyección de agua, o puede ser del 95 % para los pozos donde la inyección del gas se usa para llevar el petróleo a la superficie. (4)

El gasto manejable por una bomba en escala de producción está alrededor de 40,000 BPD de hidrocarburos. La presión diferencial varía entre 290 y 440 psi para las distancias cortas, hasta tal vez 880 psi por bomba para los tipos de desplazamiento positivo. (5)

Existen dos tipos básicos de bombas que son las que mejor se han comportado al flujo de mezclas multifásicas: las Bombas Rotodinámicas y las Bombas de Desplazamiento Positivo.

2.2.1. BOMBAS ROTODINAMICAS.

Las bombas Rotodinámicas, que incluyen turbinas, del tipo centrífuga y axial, son adecuadas para bajas presiones alrededor de 290 psi. Son pequeñas, ligeras y económicas, gracias a sus grandes claros internos manejan muy bien partículas de arena.

En este tipo de bombas en cada etapa del fluido es acelerado por las palas giratorias del impulsor y la energía cinética se convierte en presión cuando la

circulación del fluido es desviada dentro de las palas rectificadoras del estator.⁽⁶⁾

Pero cuando se maneja flujo multifásico, el líquido es acelerado pero el gas no y de aquí que se presenta una estratificación del fluido y la conversión de energía cinética en presión no ocurre. La idea es usar un diseño hidrodinámico cuidadoso para mantener bien mezclados el gas y el líquido, de manera que ambos se aceleren conjuntamente.

Hay bombas que pueden manejar del 40% al 50% de gas o más sin pérdida significativa de carga. Las bombas Rotodinámicas trabajan mejor para fracciones de gas bajas y bajos gastos, aunque como se verá más adelante, en el proyecto Poseidón, que utiliza bombas de ese tipo se manejan gastos a condiciones de entrada de 130,000 BPD a 200,000 BPD.

2.2.2. BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.

Las bombas de desplazamiento positivo por el contrario, pueden bombear gases así como líquidos, ya que son adecuadas para fracciones de gas muy altas. También pueden dar presiones de descarga altas. Uno de los problemas es que este tipo de bombas tienden a ser más voluminosas que una bomba rotodinámica, y por lo tanto

son más costosas. Otra posible desventaja es que este tipo de bomba trabaja con pequeños claros o espacios entre las dos partes giratorias (los tornillos) y entre cada parte y la caja, esto hace que sean susceptibles a la corrosión y a la arena. Esto significa que al hacer un diseño para bombeo multifásico es necesario seleccionar los materiales adecuados para reducir el desgaste y la corrosión, y así aumentar la confiabilidad de esta bomba.

La mayoría de las bombas de desplazamiento positivo que se están desarrollando usan el principio del "TORNILLO", aunque hay por lo menos una bomba de pistón en la lista.⁽⁷⁾

2.3. PROYECTO POSEIDON.

El proyecto Poseidón es el estudio de funcionamiento para un sistema de producción multifásico en que más tiempo se ha invertido, inició en 1984 como un consorcio formado por: STATOIL, TOTAL CFP y IFP (Instituto Francés del Petróleo).

El I.F.P es una organización de investigación que es la responsable del diseño de la bomba Poseidón y tienen mucha experiencia en el bombeo multifásico.

STATOIL puso interés en los estudios de las tuberías que moverían el fluido multifásico hacia una estación de tratamiento. Desarrolló y usó un programa computarizado de simulación dinámica del flujo multifásico para estudiar el fenómeno del flujo del fluido durante el arranque y la interrupción.

También estudió la formación de hidratos en los medios circundantes, la corrosión y la erosión con la presencia de petróleo, gas, agua y arena. Así como la instrumentación para el monitoreo del yacimiento y el control de las condiciones de entrada de la bomba.

TOTAL ha desarrollado una estación submarina, poniendo su atención en la prueba de campo de un motor eléctrico para accionar la bomba. Este motor fue probado en diciembre de 1987 a una profundidad de 492 pies en Fusa, Noruega. (4)

2.3.1 EL OBJETIVO DEL PROYECTO.

El proyecto POSEIDON se basa en una nueva tecnología para bombear y transportar el fluido desde el pozo hasta la central de procesamiento, es decir, que el proyecto incluye:

* Un sistema de bombeo multifásico.

* El motor de accionamiento eléctrico submarino, incluyendo el conector eléctrico de alta potencia con interruptor automático.

* El dominio de los problemas con los hidratos o cera, corrosión y problemas de erosión en condiciones multifásicas.

* Una arquitectura específica de la estación submarina ajustada a un mantenimiento eficiente y de bajo costo del sistema. (8)

El proyecto POSEIDON es ambicioso. El objetivo es poder bombear fluidos del pozo con una RGL alta (de cero a infinito) a través de grandes distancias, en algunos casos mayor de 50 Km. Actualmente el proyecto terminó la segunda fase que fue probar la bomba en campo.

Desde el principio el IFP reconoció que la bomba debe tener la flexibilidad para manejar una amplia gama de gastos, tanto en condiciones constantes como en condiciones variables, entendiéndose por condiciones constantes el mantener un flujo homogéneo de fluido y condiciones variables cuando existen baches de gas.

Hasta ahora la bomba rotodinámica ha demostrado que puede manejar todos estos requisitos. El prototipo original probado en 1984 en el laboratorio del IFP cerca

de Lyon fue una bomba "Helicoaxial" multietapa la cuál dio resultados promisorios.

Desde entonces el desarrollo ha producido una bomba de 13 o 15 etapas cuya caja mide 2.5 m. de largo y 0.8 m. de diámetro. El diámetro del impulsor es de 232-250 mm, girando a 8000 RPM. La producción es de 25,000 BPD, con una presión diferencial máxima de alrededor de 290 psi, y la fracción máxima de gas debe ser de 97 %. (figura No. 1).

Para el flujo en baches la unidad incluye un tanque separador para dar mejor control de las bolsas aleatorias de líquido y gas. La bomba es accionada por un motor eléctrico; se usan 200 Kw, pero hay planes para usar motores de 1 MW para bombas más grandes. También tiene sistemas de enfriamiento y lubricación submarina.

Después de exitosas pruebas en taller la bomba ha sido instalada en un campo de TUNEZ, 4,000 hrs. de funcionamiento sin problemas mecánicos han dado una mejor comprensión de como se comportó la bomba multifásica, cuando se instaló en una red de producción. En la Tabla No. 1 se presentan los resultados obtenidos de esta prueba y los planes futuros que se tienen, debido a los resultados sobresalientes obtenidos arriba de los esperados.

Basándose en estudios acerca de cuales podrían ser los requisitos futuros de los campos submarinos, ya sea en áreas de aguas profundas, satélites y alejadas, parece ser que la bomba multifásica necesaria requeriría un aumento de presión limitada (entre 290 a 726 psia). Esto se debe principalmente a la proximidad de las instalaciones existentes o a la costa por una parte, y a las profundidades de las aguas contempladas por otra parte.

Colocada en condiciones de flujo del pozo, sin que haya ocurrido ninguna separación la bomba debe enfrentar la mezcla producida, compuesta de aceite, agua y gas. Durante la vida del pozo, la fracción de gas, en condiciones constantes puede normalmente alcanzar el 95 %.(4)

Para diseñar una estación submarina económica que justifique altas inversiones en las que la bomba contribuya a un costo mínimo (alrededor del 5 %), la capacidad promedio de flujo de la bomba individual debería promediar 100,000 BPD a condiciones de entrada. Evidentemente los altos gastos de flujo requerirían de varias bombas en paralelo pero cada una de ellas con capacidad nominal alta. Por lo tanto, la producción de 40,000 BPD se determinó como un objetivo inicial.

Si la fracción del fluido producido en flujo en estado permanente puede ser estimada en 95 % no puede asegurarse que esta fracción pudiera alcanzar el 100 % en caso de flujo en bache y durante las operaciones de arranque y para de la bomba. Un requisito adicional para la bomba fue la capacidad de aceptar baches de puro gas sin previo ajuste de las condiciones de funcionamiento.

Además los tres requisitos básicos y primordiales, que los componentes de la bomba deben ser capaces de enfrentar son los parámetros clásicos de los fluidos producidos:

- * Temperaturas hasta de 130 ° C.
- * Hidrocarburos líquidos mezclados con agua salada, ácido sulfídrico y dióxido de carbono.
- * La presencia hasta de 200 g/m³ de partículas de arena.

2.3.2. SELECCION DE LA TECNOLOGIA DE LA BOMBA .

A principios de los 80's, surgieron dos diferentes tecnologías de bombeo: la bomba de tornillo gemelo y la bomba rotodinámica. La bomba de tornillo gemelo es una bomba de desplazamiento positivo donde el fluido es atrapado entre dos tornillos engranados paralelos y es

empujado hacia abajo de la salida de la bomba mediante una rotación combinada de los tornillos accionados por engranes sincronizados.

La bomba rotodinámica fue desarrollada a fines de los 70's, con un prototipo promisorio de una bomba sumergible capaz de enfrentar a una RGL de $3\text{m}^3/\text{m}^3$ bajo condiciones de succión. Actualmente la bomba multifásica Poseidón es probada industrialmente, ha funcionado en condiciones severas de campo y puede ser tomada en cuenta con toda seguridad, para aplicaciones en tierra o submarinas.

El principio rotodinámico aunque menos avanzado en los inicios del proyecto, al parecer ofreció más posibilidades de mejoras considerando los parámetros de diseño conocidos. El aumento aceptable de la presión altos flujos, la baja sensibilidad a las partículas de arena podrían ser ideadas o tomadas de los primeros prototipos existentes. Además, la simplicidad mecánica y la compatibilidad hicieron inmediatamente previsible su utilización en el fondo marino. (10)

2.3.3. PRINCIPIO ROTODINAMICO.

La selección de la mejor tecnología adecuada para el futuro desarrollo estuvo basada en varios requisitos:

* En un futuro la bomba deberá operar en el fondo marino.

* Un gran claro entre las partes mecánicas para enfrentar las posibles partículas sólidas en el fluido producido.

* Un sistema de circulación de preferencia abierto, significa que la circulación no se detiene, solamente una hay perdida de presión permisible creada por el fluido que circula libremente a través del las partes internas de la bomba.

* Tamaño y peso pequeño: para que se adapte fácilmente a los módulos marinos.

* Costo.

Una bomba estará hecha de una serie de etapas de compresión montadas en una flecha o eje (figura 2). El aumento de la presión será en función del número de etapas y el gasto una función del diámetro de etapa de compresión. Desde el punto de vista termodinámico, cada etapa o celda debería ser diferente de la otra para tomar en cuenta el cambio de la densidad del líquido ya que la presión se incrementa en cada etapa y en consecuencia la fracción de gas disminuye. Pero desde el punto de vista técnico, es mejor diseñar la etapa de

compresión para un conjunto promedio de parámetros (gasto, presión, gravedad específica) para estandarizar la fabricación de las etapas.

Las bombas diseñadas actualmente tienen dos o tres series de etapas de compresión idénticas. Este principio de compresión es el mismo para las bombas rotodinámicas clásicas pero con la mejora importante de que puede ser aceptada en una mezcla de gas/líquido.

Normalmente las palas impulsoras actúan como un buen sistema de separación, ya que las partículas de líquido son centrifugadas y las del gas no, lo cuál hace imposible el manejo del gas. La geometría de la etapa del impulsor rectificador del Poseidón combinada con el perfil del canal hidráulico evita la separación y mantienen la homogeneidad del fluido multifásico. De una etapa a otra hay una reducción del gasto volumétrico, mientras la presión aumenta, y la fracción gaseosa es reducida con la compresión del fluido multifásico.

En caso de variaciones rápidas de la composición del fluido durante el flujo bache, esto podría resultar en una variación severa en la carga sobre la flecha con posibles problemas de torque. Otro resultado exitoso del diseño hidráulico y del patrón de flujo en la bomba, es el efecto de amortiguamiento el cuál minimiza las

consecuencias de posibles baches. Aunque muy tolerante a las variaciones de la composición del fluido, la bomba siempre estará en condiciones de trabajar mejor si el régimen de flujo permanece en un estado permanente. Para ayudar a obtener estas condiciones de operación, un tanque de separador (buffer tank) fue diseñado y desarrollado.⁽⁸⁾

2.3.4. PRUEBAS REALIZADAS.

Fueron necesarios dos periodos de pruebas. El primer paso fue controlar las características de la bomba como fueron definidos después de los cálculos y estimaciones de estudios anteriores. Esto se hizo en un circuito (loop) de pruebas multifásicas en Solaize (laboratorio del IFP) en 1988-1990 (figura 3). Durante las pruebas de caracterización realizadas en este circuito de pruebas los fluidos usados fueron gas, aceite y nitrógeno.⁽⁶⁾

El segundo paso fue un periodo más largo de pruebas de resistencia con integración de una planta de producción de tamaño real para determinar el comportamiento de la bomba cuando se colocó en la red.

2.3.4.1 CIRCUITO (LOOP) PARA PRUEBA DE CAMPO.

Este circuito para pruebas ha sido construido por TOTAL y STATOIL en 1988 en un campo en tierra en Túnez (SIDI

EL ITAYEM), operado por CFTP (compañía franco-tunesina de petróleo). Este circuito multifásico da la posibilidad de probar equipos en verdaderas condiciones de campo y que una válvula automática de paso aísla el circuito en caso de problemas en el dispositivo de prueba. Este manifold (múltiple) controla un promedio de 5,000 BPD de líquido con un alto contenido de agua y una fracción de gas de aproximadamente el 95 % (figura 4).

Mientras se estaba probando la bomba Poseidón en Solaize en 1989/90, se trajo y se instaló una bomba de tornillo gemelo Bornemann en el SIT para mejorar el conocimiento sobre el equipo disponible. Actualmente en SIT es posible probar dos tipos de bombas multifásicas, una tipo tornillo gemelo y otra tipo rotodinámica (POSEIDON) instaladas en un campo, más varios aparatos de medición multifásica. (figura 5).⁽⁹⁾

2.3.4.2. PRUEBAS DE RESISTENCIA.

Se desarrollaron 4,000 Hrs. de funcionamiento sin ninguna falla mecánica de la unidad motor-bomba. La principal causa del paro fue una falla en el suministro eléctrico, lo cuál representa el 95% del tiempo de paralización. Otras causas son la utilización directa de la bomba sin modificaciones después de las pruebas de taller en Solaize (laboratorio del IFP). No se hizo

ninguna modificación al sistema de presión del sello diseñado para las presiones de succión más altas 30 bar (435 psi) y usando 10 bar (145 psi) en el SIT (red de campo). Una adaptación de los conductos de flujo internos del tanque separador también fue necesario para las condiciones de flujo del SIT (las partículas grandes tapan las perforaciones).

Se revisó el desgaste mecánico mediante una prueba de vibración realizada ante la instalación y después de 4,000 Hrs. lo cuál no detectó ninguna evolución anormal.

2.3.4.3. CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS EN TUNEZ.

La instalación en el campo de la bomba POSEIDON aunque no fue modificada para las condiciones de flujo, ha dado conclusiones satisfactorias:

- 1.- El conocimiento del comportamiento de la bomba rotodinámica en una línea de producción multifásica y una mejor comprensión de las interacciones de cada uno de los componentes de la tubería, especialmente cuando enfrentan condiciones extremas con respecto a las especificaciones del diseño. En resumen la adaptación a los parámetros corriente ascendente o arriba, el comportamiento del tanque separador, los puntos de trabajo de la bomba, y la reacción de los parámetros

corriente abajo. El efecto suavizador del tanque separador ha demostrado estar bien adaptado a las condiciones severas de la prueba.

2.- La prueba validó las opciones mecánicas seleccionadas para los sellos y los cojinetes (chumaceras) los cuales operaron sin ningún problema, bajo condiciones de operación muy severas.

Finalmente confirmó la capacidad de la bomba para enfrentar un proceso multifásico complejo. (11,12)

2.4. PROYECTO DE LA CIA. FRAMO-SHELL.

Shell es una compañía recién llegada a la tecnología multifásica, pero al parecer se va a convertir en la primer compañía petrolera en introducir una bomba multifásica en servicio para el campo.

Al contrario de Poseidon, la Norske Shell y Framo Engineering de Bergen tienen el proyecto SMUBS (SHELL MULTIPHASE UNDERWATER BOOSTER STATION), una estación multifásica Submarina Shell, que tiene objetivos menos ambiciosos pero a corto plazo. (2,19)

El primer estudio, fue ordenado por Shell en 1986 y terminado por la Cía. Framo en diciembre de 1987. Se probaron varios tipos de bombas y la seleccionada fue el

diseño Helicoaxial del IFP, fabricada por la compañía francesa Pompes Guinard.

Diseñada para pozos que usan inyección de agua en vez de gas-lift, manteniendo la RGL baja, la bomba toma su energía del sistema de inyección de agua por medio de una turbina hidráulica. Debido a que las bombas son compactas y pesan solamente 1 Tonelada puede ser reemplazada fácilmente. (Figura 6).

La fase dos del proyecto fue iniciada en 1988. Esta abarca el diseño detallado de la bomba, seguido por la fase tres, en la que la bomba será probada en un pozo ficticio. Se tenía planeado que esto iniciará en Agosto de 1989 y terminara a fines de año.

Aunque el proyecto SMUBS tiene actualmente objetivos limitados, existe la idea de cambiar el tipo de bomba a medida que los nuevos diseños están disponibles. Framo está trabajando en un nuevo tipo de bomba axial la cual tiene dos turbinas que giran en direcciones opuestas. Esto ayuda a propagar las fuerzas dinámicas generadas por los baches de gas hasta 95 %.(14)

2.5. PROYECTO DE LA COMPAÑIA B.H.R.A.

Durante los últimos dos años BHRA ha estado manejando un proyecto de investigación para mejorar el manejo de gas

de las bombas rotodinámicas. La primera etapa del proyecto implica el realizar las pruebas a las bombas existentes y desarrollar un modelo matemático para mostrar lo que sigue en flujo multifásico.

La prueba de cuatro tipos de bombas, las cuales incluyen los diseños: axial, flujo-mezclado y centrifugas, está ahora terminada y los resultados están a punto de publicarse.

En Abril de 1989 se debió empezar la segunda etapa, en la cuál se diseñará y construirá una bomba rotodinámica prototipo para manejar el 50 % de gas. Las pruebas de campo de la bomba están programadas para 1992.

Por el momento la prueba se ha hecho en un circuito de pruebas de aire/agua en Cranfield, pero BHRA pronto estará construyendo en Escocia un circuito de prueba de alta presión para hidrocarburos. Hasta el momento, el trabajo ha demostrado que hay tres factores claves que afectan el funcionamiento de la bomba:

- 1.- La fracción de gas. En valores pequeños, por ejemplo de 2 a 3 %. se presentan severas pérdidas de carga , en las fracciones de gas más altas, hasta del 20 % hacen que la bomba se depresione.

2.- coeficiente de flujo. Altas gastos de líquido mejoran la capacidad para manejar gas y reduce los efectos de separación.

3.- Régimen de flujo. El régimen de flujo es muy importante a la entrada y a lo largo de los pasajes del impulsor. El flujo homogéneo produce un pequeño deterioro, mientras que flujo estratificado puede causar una depresión. (2,13)

2.6 PROYECTO ITALIANO.

Desde 1985 Snamprogetti ha estado trabajando con Agip y Nuovo Pignone en un proyecto llamado Sistema reforzador submarino (SBS). El objetivo de este proyecto es poder transferir el producto desde la cabeza del pozo directamente a la costa a una distancia de 100 Km. y con profundidades de agua de 1,000 m. La capacidad básica de la unidad de la bomba es fijar 10,000 BPD de petróleo con unidades multifásicas para usarse posteriormente para flujos más grandes.

Se están considerando cuatro tipos de bombas: una bomba centrífuga, una bomba de tornillo y otros dos diseños, uno de Nuovo Pignone y el otro de Snamprogetti, cuya información es escasa. La bomba centrífuga es un diseño de 4 etapas de Nuovo Pignone la cual esta siendo probada

como un prototipo en el circuito de prueba de flujo multifásico de hidrocarburos de la compañía. El objetivo según Nuovo Pignone, ha sido evitar el flujo estratificado usando impulsores especiales y un difusor de salida cuidadosamente diseñado. El impulsor tiene ondulaciones y agujeros para dar una recirculación parcial del líquido para prevenir la estratificación. La compañía espera que el diseño final de la bomba maneje fracciones de gas hasta del 50 %.

La bomba de tornillo que está siendo probada es básicamente un diseño de Stother y Pitt con cojinetes (chumaceras) modificadas por Nuovo Pignone para permitir que la bomba trabaje a presiones más altas. En pruebas del circuito de flujo los italianos requieren una diferencial de presión de 610 psi a una fracción de gas del 85 %.(2,13)

2.7. PROYECTO DE LA CIA. WEIRS PUMPS.

Weir pumps ha reunido una lista formidable de 16 compañías petroleras para apoyar el desarrollo de su bomba de tornillo de desplazamiento positivo, actualmente en la segunda etapa de desarrollo. Se han estado realizando pruebas de resistencia en un prototipo de 10,000 BPD, y una bomba de 40,000 BPD de fluido y

hasta 95 % de gas se tenía planeado terminarla en 1989-1990.

La bomba de Weir esta diseñada como una serie de etapas idénticas, separadas. No es claro si estas tienen uno o dos tornillos. Las etapas están montadas verticalmente y son usadas en serie, cada una con su propio accionador. Los accionadores pueden ser motores eléctricos de velocidad variable o bien turbinas hidráulicas; Weir favorece y apoya a las turbinas ya que sus características de torque dan un cambio de velocidad automático para ajustarse a las condiciones de bombeo. Esta carga de energía es entonces automáticamente compartida entre las etapas de la bomba sin necesidad de un sistema de control de la velocidad.

La sobrepresión es un problema que tiene que ser considerado con las bombas de desplazamiento positivo, una vez más las turbinas hidráulicas son útiles ya que pueden hacer la presión de salida ajustable. El paquete de potencia hidráulica puede ser colocado en una plataforma o en el fondo del mar.

La unidad de bombeo opera sin ningún sello mecánico, engranes o cojinetes (chumaceras) externos. Esto, dice Weir, aumentará la confiabilidad para dar dos años de funcionamiento sin revisión. (15,16)

2.8. PROYECTO DE LA CIA. MULTIPHASE SYSTEMS PLC .

Multiphase system plc. es una compañía formada en Septiembre de 1988 para dedicarse al desarrollo de la bomba de desplazamiento positivo de tornillo gemelo de Stothert y Pitt la cuál puede manejar hasta el 95 % de gas. También dará mayor flexibilidad en la producción de petróleo permitiendo que los campos marginales se desarrollen económicamente. (1)

Todo empezó a principios de los 80's cuando la bomba de tornillo gemelo usada para añejar vinagre bombeaban hasta el 50 % de aire sin problemas. A principio de 1982 se terminaron las pruebas con éste tipo de bomba con mezclas de aire/agua, en los talleres de Stothert y Pitt en Bath. Los resultados fueron prometedores y se formó el consorcio con BP, Shell, Mobil y Stothert y Pitt en 1983.

El objetivo fue desarrollar una bomba con capacidad de 40,000 BPD y que funcione con una presión diferencial de 500 psi y además que maneje una fracción de gas del 95 %.

Para la producción de petróleo los componentes de la bomba necesitaron ser resistentes al agua salada

corrosiva, H₂S, CO₂, y pequeñas cantidades de arena (10 lb/1,000 Bls).

2.8.1 REQUISITOS DE LA BOMBA .

1.- Bombear un volumen en la succión de hasta 40,000 BPD.

2.- Presión diferencial de hasta 500 psi

3.- Rango de presión en caja ANSI clase 900.

4.- Resistir temperaturas de hasta 260 °F.

5.- Resistencia a la corrosión contra agua salada con la presencia de H₂S y CO₂.

6.- Resistencia a la erosión (pequeñas cantidades de arena, hasta 75 lb/1,000 bls).

7.- Manejar una fracción en vol. de gas hasta del 90 %.

8.- Resistencia a frenados o paros severos.

9.- Corridas en seco hasta por 15 minutos.

10.- Severos bacheos.

Se construyó una bomba de 5,000 BPD con materiales estándar de acero y hierro fundido. Esta fue probada en

el centro de investigación Sunbury de BP para probar la teoría de bombeo y correlacionar la diferencia entre los sistemas de agua/aire y gas/aceite. En 12 semanas dos tipos de petróleo crudo con hasta el 95 % de metano fueron probados en la bomba. La bomba de tornillo gemelo probó que podría hacer el trabajo y al parecer las mezclas aire/agua fueron una buena aproximación de los sistemas gas/aceite. (3)

2.8.2 PROTOTIPO DE TAMAÑO NATURAL .

La siguiente etapa del desarrollo fue la construcción de una bomba de tamaño natural de 40,000 BPD. Esto implicó el seleccionar los materiales apropiados para la construcción y dar el tamaño básico de la bomba, además de diseñar todos los componentes de la bomba. Se escogieron los aceros inoxidable duplex para la bomba ya que combinan la fuerza mecánica con la resistencia a la corrosión. Las partes mojadas se hicieron de ferralio 255, y se sobrecargaron las puntas de los tornillos con Stelita, (figura 7).

La combinación de velocidad/paso/tamaño que deben cumplir con las especificaciones fue calculada usando datos empíricos. Esto dio una bomba de tornillo de velocidad intermedias (3,000 RPM). La eficiencia volumétrica fue del 85 %.

Cuando se construyó el prototipo pasó por pruebas de resistencia durante un periodo de 28 semanas en un circuito (loop) de pruebas construido especialmente en East Midland de BP. La bomba fue probada durante 3,500 hrs., durante las últimas tres semanas se incluyó en la prueba arena en la mezcla gas/petróleo.

Después de la prueba de resistencia la bomba fue regresada al taller, para revisar los afectos que había tenido la arena sobre la bomba. Se encontró que había una disminución en la capacidad de manejo de la fase líquida del 11 %, y una pérdida estimada en el funcionamiento multifásico del 5 %.

Aunque estos porcentajes son altos, las pruebas de arena se realizaron hasta con un contenido de arena en el petróleo de 200 lb/1,000 bls, lo cuál es más de 20 veces lo que se encontró en la mayoría de los aceites. No hubo disminución en la capacidad durante la prueba de resistencia de 3,000 hrs. Al momento de desmontar la bomba se pudo observar la erosión de la arena, pero los componentes de la bomba en términos generales estaban en buenas condiciones. (17)

2.8.3 SELECCION DEL PRINCIPIO DE BOMBEO.

La fracción de gas del orden del 90 % - 95 % excluye inmediatamente el uso de cualquier bomba rotodinámica. En un principio, cualquier bomba de desplazamiento positivo podría manejar mezclas de gas/líquido, pero las condiciones de servicio eliminan a la mayoría de los tipos de bombas.

De esta manera, para la capacidad requerida las bombas de pistón y émbolo serían muy grandes y necesitarían ser manejadas lentamente para evitar un paro (shock). La presencia de arena excluye a las bombas que dependen de movimiento deslizante que está en contacto con el fluido bombeado - ejemplo, las bombas (rotatorias) de paletas y las bombas de tornillo sin engranes de distribución y la combinación de capacidad y presión diferencial excluye a las bombas de engranes y de lóbulos. La presencia de hidrocarburos de la conveniencia para las bombas de cavidad con estator de algún elastómero, (es un tipo de hule muy resistente al trabajo pesado porque está tratado químicamente) pero la desventaja es la poca resistencia de este elastómero al gas. Es posible usar estatores metálicos para estas bombas pero el espacio necesario implica una pérdida en la eficiencia volumétrica.

La capacidad requerida necesitaría la construcción de una bomba más grande que cualquiera construida hasta la fecha. La bomba de tornillo gemelo con engranes de distribución ya se ha considerado para tales capacidades y presiones diferenciales.

2.8.4. CONFIRMACION DEL PRINCIPIO DE BOMBEO.

Para verificar que las bombas de tornillo gemelo serían capaces de bombear mezclas con fracciones de gas tan altas, se fijó el circuito para pruebas simples con una bomba de tornillo gemelo tamaño 95 estándar (diam espiral en mm), el agua como líquido de prueba y el aire como gas. Los ensayos confirmaron las expectativas teóricamente basadas.

1.- La eficiencia volumétrica fue similar a la del agua con la misma presión diferencial. La eficiencia volumétrica de una máquina de desplazamiento positivo esta definida como el volumen bombeado y medido a condiciones de succión dividido entre el volumen barrido por la bomba.

2.- El consumo de energía no cambia significativamente por la presencia de gas.

3.- Estas dos afirmaciones fueron verdaderas en fracciones de gas más altas probadas (aproximadamente 90 %). (18)

2.8.5. DESARROLLO DEL PROGRAMA.

El desarrollo del programa se realizó en tres etapas:

1ª.- Pruebas a pequeña escala sobre mezclas gas/líquido. Para confirmar el comportamiento de la bomba con fluidos hidrocarburos, se ensambló una bomba similar a las usadas en los ensayos iniciales. Los resultados de estas pruebas confirmaron que:

a) Ambos dispositivos para pruebas dieron resultados similares para las mezclas aire/agua.

b) El funcionamiento con las mezclas gas/aceite fue similar al de las mezclas aire/agua.

2da.- Diseño y fabricación de una bomba de especificación completa. Al conseguirse un término exitoso en los ensayos a pequeña escala, se proporcionaron fondos para el diseño y construcción de una bomba de tamaño natural (40,000 BPD) y de especificación completa.

3ª.- Aprobación de la bomba de especificación completa. (19)

2.8.6. SELECCION DEL MATERIAL .

Los requisitos de la bomba identificaron la necesidad de un material que posea una buena resistencia general a la corrosión junto con una inmunidad contra el ataque selectivo, como el picamiento y el agrietamiento por corrosión intensa.

Adicionalmente, se tomo en cuenta el daño causado por la erosión originado por el arrastre de arena y el posible daño causado por el contacto entre los tornillos y el revestimiento.

Los aceros inoxidable duplex, 24 a 26 % de cromo, 4.5 a 6.5 % de níquel, 2 a 4 % de molibdeno y 1.3 a 4 % de cobre, ofrecieron la mejor combinación de propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. Estas aleaciones presentan en general una resistencia a la corrosión igual o mejor que el acero inoxidable estándar y con mucho menos susceptibles al agrietamiento por la corrosión intensa provocada por el cloruro para evitar el desgaste en las puntas de los tornillos, estas fueron recubiertas con Stelita.

Finalmente vale la pena hacer notar que el rango duplex, de los aceros inoxidable proporcionan un límite elástico de por lo menos dos veces que el de los aceros

estándar. El Ferralio 255 fue seleccionado para los componentes húmedos por las siguientes razones:

- a) De las aleaciones disponibles hasta el momento esta tubo el límite elástico más grande.
- b) Los socios del proyecto tuvieron más experiencia con respecto a esta aleación que con ninguna otra.

2.8.7. TAMAÑO BASICO DE LA BOMBA .

Usando datos empíricos bien establecidos, fue posible obtener una combinación de velocidad/paso/tamaño para dar una capacidad de manejo y cumplir con los requisitos de la bomba que se listaron anteriormente. Esto tuvo como resultado una bomba de tornillo gemelo de tamaño intermedio de alta velocidad, 3000 RPM, para dar una unidad con una eficiencia volumétrica aceptable, 85 %, cuando se manejan fracciones altas de gas, (tabla No. 2).

2.8.8 PRUEBAS A LA BOMBA DE ESPECIFICACION COMPLETA .

La figura 7 muestra la bomba en su sección transversal. Las pruebas de esta bomba se realizaron en tres etapas:

- 1.- Pruebas en el taller. (figura 8).

2.- Pruebas de resistencia en un circuito de prueba.
(figura 9).

3.- Pruebas de repetición en los talleres.

Desde 1986, el desarrollo de una bomba para 40,000 BPD, llamada MP40, se extendió para comprender bombas de mayor capacidad, como por ejemplo:

- MP5 para una capacidad de 5,000 BPD.
- MP10 para una capacidad de 10,000 BPD.
- MP40 para una capacidad de 40,000 BPD.
- MP100 para una capacidad de 100,000 BPD.
- MP200 para una capacidad de 200,000 BPD.

Sin embargo, cada tamaño de bombas tiene cuatro posibilidades de configuración internas, cada configuración para maximizar el funcionamiento de la bomba en una faceta diferente, esto es: producción, una alta RGL, resistencia a la arena, una alta presión diferencial, etc.

2.8.9 APLICACIONES EN POZOS.

Probablemente el área más importante de la actividad y del logro durante los últimos dos años, ha sido la venta

a tres importantes compañías petroleras. Las unidades multifásicas las cuales operan en pozos productores de aceite están dando información única y vital acerca del funcionamiento, potencial y confiabilidad de las bombas multifásicas de tornillo gemelo. Sólo la experiencia puede convencer a las demás compañías petroleras para que den una seria atención a la posibilidad de desarrollar nuevos campos usando el concepto multifásico.

Las aplicaciones son las siguientes:

(1) La primera bomba multifásica en costa fuera fue proporcionada a Shell-Petronas para su uso en la plataforma BOKOR B a las afueras de Sarawak en Malasia. Fue puesta en servicio en Agosto de 1989. La bomba MP-40 recibe fluidos de hasta 6 pozos que se conectan directamente en el múltiple de succión y se descarga por una línea debajo del mar hasta un separador, el cuál es incorporado principalmente para la medición de flujo, está provisto con un sistema de control de presión para permitir que la bomba opere en contra de altas presiones diferenciales.

Durante los ensayos iniciales de puesta en servicio, la fracción en volumen de gas máxima de la bomba fue de 97.4 %, arriba del 94 % garantizado, Shell requirió que

se redujera la presión del pozo de 116/127 psi a 58 psi con un mínimo garantizado de 25 psi. en realidad la bomba ha funcionado exitosamente a 15 psi.

El loop de prueba de campo incluye una línea de recirculación de líquido de la salida del separador hasta la succión de la bomba para permitir el control de la fracción en volumen de gas.

La bomba MP-40 maneja volúmenes brutos de hasta 95,000 BPD y presiones diferenciales de hasta 400 psi. La bomba es accionada por una máquina Caterpillar de gas de 630 kw por medio de embrague y una unidad de engranes que dan un rango de velocidades de 1800 a 3000 RPM. La descarga de la bomba está garantizada para llegar a mantenerse durante un año de operación con un contenido máximo de arena de 43 mg/l de aceite y un tamaño de partícula de 75 a 150 micras.

(2) La segunda bomba multifásica que se proporcionó para la aplicación en un pozo esta instalada en la plataforma BP Forties Bravo en el Mar del Norte. La bomba fue puesta en servicio en Julio de 1990 usando agua de mar para probar la bomba contra la corrosión causada por el agua de mar, y posteriormente 10,000 hrs. de prueba con hidrocarburos misma que comenzó el 17 de Octubre del mismo año.

La compañía BP ha fijado arduas condiciones de operación para esta bomba, con un volumen de entrada total de 110,000 - 121,000 BPD funcionando la unidad a 3,200 RPM, aproximadamente 8 % más que la velocidad asignada.

Puede manejar hasta un máximo del 90 % en volumen de gas, se enfrenta a un contenido de arena de 215 mg/l de aceite y genera una presión diferencial de 150-440 psi. La unidad es accionada por un motor eléctrico de velocidad variable de 500 kw con un rango de velocidades de 1,550 - 3,200 RPM.

(3) La MP-10 que maneja 10,000 BPD se proporcionó para un campo en Italia, llamado Trecate al norte de Italia. La bomba ha funcionado exitosamente desde la puesta en servicio en Octubre de 1989. El periodo de prueba actual se extendió hasta finales de Noviembre de 1990 durante un total de aproximadamente 7,000 Hrs de funcionamiento.

En 1985 una unidad de prueba estuvo funcionando en un pozo de Beckingham, Lincolnshire, en 1986 BP reportó que existía una bomba de 200,000 BPD, y que una bomba para 700,000 BPD será diseñada.

Hasta ahora el trabajo con bombas es avanzado puesto que ya se han vendido tres. La primera de 40,000 BPD de hidrocarburos se instaló costa-fuera por Shell Sarawak.

La segunda, se entregó en Enero de 1989, es del mismo tamaño que la primera y ha sido comprobada por BP para el Mar del Norte. La tercera una bomba mas pequeña (10,000 BPD) se probó por Agip en un campo al norte de Italia.

Ninguna de estas tres aplicaciones es submarina. Multiphase Systems actualmente está construyendo un circuito de prueba submarino el cuál se debió terminar a finales de 1989. El sello de las bombas es mediante dobles sellos mecánicos colocados espalda contra espalda (back to back). Seguramente al parecer la bomba multifásica estará trabajando, habiendo sido probada durante 3,500 hrs. de funcionamiento satisfactorio.

2.9 PROYECTO DE A.S.E.A.

Una bomba de desplazamiento positivo la cuál ha recibido menos publicidad, proviene de la división de petróleo y gas de ASEA con el apoyo de Statoil. La bomba de ariete rotatorio accionado hidráulicamente deriva de una bomba de carbón y se dice que es capaz de manejar 100 % de líquido y baches de 100 % de gas.

La bomba tiene un cárter (alojamiento) que contiene un barril el cual gira lentamente y está entre cuatro o cinco pares de cilindros. Cada par tiene un cilindro

accionador, cuyo pistón esta conectado directamente al pistón de un cilindro productor. a medida que los barriles giran, suministran una presión hidráulica a cada cilindro accionador en turno, el cuál acciona los pistones productores para proveer un flujo semi-continuo. (2,21)

C A P I T U L O I I I

DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO

3.1 INTRODUCCION.

Para el desarrollo del modelo propuesto y después de revisar la literatura existente, se determinó, utilizar las bombas de tornillo gemelo, ya en este tipo de bombas multifásicas es donde se tiene la mayor cantidad de información publicada por los fabricantes de las mismas.

Las bombas de tornillo son un tipo especial de bombas de desplazamiento positivo rotatorio, en las cuales la circulación a través de los elementos de bombeo es en forma axial. El fluido es transportado entre las roscas de los tornillos en uno o más rotores y es desplazado axialmente a medida que los tornillo giran o se engranan. En todas las bombas rotatorias el fluido es forzado a viajar circunferencialmente, dándole de esta manera a la bomba de tornillo con su único patrón de circulación axial y bajas velocidades internas un número de ventajas en muchas áreas de aplicación.⁽²²⁾

3.2 VENTAJAS DE LA BOMBA DE TORNILLO.

- 1.- Un amplio rango de flujos y presiones.
- 2.- Un amplio rango de fluidos y viscosidades.
- 3.- Una capacidad de alta velocidad, permitiendo la libertad de seleccionar el accionador mas adecuado.
- 4.- Bajas velocidades internas.
- 5.- Cebado automático, con buenas características de succión.
- 6.- Una alta tolerancia para el aire y gases arrastrados.
- 7.- Un agitado o formación de espuma mínimo.
- 8.- Una baja vibración mecánica, un flujo libre de pulsaciones y una operación tranquila.
- 9.- Diseño reforzado y compacto - fácil de instalar y mantener.
- 10.- Alta tolerancia a la contaminación en comparación con otras bombas rotatorias.

3.3 DESVENTAJAS DE LA BOMBA DE TORNILLO

- 1.- Costo relativamente alto debido a las rigurosas tolerancias y distancia funcional.
- 2.- La capacidad de alta presión requiere una larga longitud de los elementos de bombeo.
- 3.- Características de funcionamiento sensibles a cambios de viscosidad.

3.4. SUMINISTRO O CAUDAL.

Debido a que las bombas de tornillo son aparatos de desplazamiento positivo, suministrarán una cantidad constante de fluido con cada revolución de los rotores. Este suministro (caudal) puede ser definido en términos de desplazamiento (D), el cuál es el volumen teórico desplazado por revolución de los rotores y depende solamente de la dimensión física de los rotores. Es medido generalmente en $\text{pg}^3/\text{revolución}$. Este suministro o caudal también puede ser definido en términos de capacidad teórica (Q_t) medido en gal E.U/minuto, el cuál es una función del desplazamiento (D) y la velocidad (N), en RPM.

$$Q_t = \frac{DN}{231}$$

Si no existen claros (distancia) internos, la capacidad suministrada real de la bomba o la capacidad neta (Q) sería igual a la capacidad teórica (Q_t). Sin embargo las distancias internas existen, con el resultado que siempre cuando se presente una presión diferencial habrá un escape o deslizamiento de la salida a la entrada. Este escape o deslizamiento llamado comúnmente "SLIP" (S), varía dependiendo del tipo o modelo de bomba, de la cantidad de distancia libre, de la viscosidad del fluido en las condiciones de bombeo y de la presión diferencial. Para cualquier de estas condiciones dadas, el escape o deslizamiento (S) para todos los propósitos prácticos, no es afectado por la velocidad. La capacidad suministrada o capacidad neta, por consiguiente, es la capacidad teórica menos "El deslizamiento":

$$Q = Q_t - S$$

Si la presión diferencial es casi cero, el "deslizamiento" puede ser omitido y:

$$Q = Q_t$$

La capacidad teórica de cualquier bomba puede ser calculada si se conocen todas las dimensiones esenciales.

El "deslizamiento" (S) también puede ser calculada, pero usualmente depende de los valores empíricos desarrollados mediante pruebas. Estos datos de pruebas son la base de los parámetros del diseño usados por cada fabricante de bombas.

3.5 CAPACIDAD.

La capacidad suministrada actual de cualquier bomba de tornillo como se estableció anteriormente, esta capacidad teórica menos el deslizamiento interno o "Slip" cuando se manejan fluidos libres de vapor. Para una velocidad particular:

$$Q = Q_t - S$$

donde las unidades estándar de Q y S son: gal. U.S./ minuto.

La capacidad suministrada actual de cualquier bomba de desplazamiento positivo se ve afectada por:

1.- La velocidad decreciente: La velocidad se ve afectada cuando las partes mecánicas de la bomba comienzan a tener desgastes por el uso o bien los ajustes internos ya no tienen la tolerancia adecuada, esto es debido a que la bomba no ha sido trabajada en

condiciones adecuadas para la cuál fue diseñada, o simplemente por el tiempo de uso de la misma.

2.- Disminución en la viscosidad: Una bomba de desplazamiento positivo se diseña para un conjunto de parámetros dados, uno de ellos es la viscosidad, si la viscosidad del fluido bombeado no se mantiene constante esto originará que la bomba se vea afectada en la velocidad y repercutirá en el gasto este no va a ser constante, va a tener fluctuaciones, y además las partes mecánicas trabajarán en condiciones forzadas

3.- Incremento en la presión diferencial: Variaciones en las condiciones de operación, tanto en la presión de entrada como en la salida.

Debido a las separaciones internas entre los rotores y la caja, viscosidades menores y presiones mayores incrementan la pérdida lo cual produce una capacidad menor para una velocidad dada. El impacto de estas características puede variar ampliamente para los diferentes tipos de bombas encontradas. Sin embargo, la pérdida no se ve afectada por los cambios en la velocidad y de esa manera se vuelve un porcentaje más pequeño de la circulación total con el uso de velocidades superiores. Este es un factor muy

significativo en el manejo de las viscosidades ligeras en presiones superiores, particularmente en el caso de las bombas de tornillo no sincronizado, que favorecen la alta velocidad para la obtención de mejores resultados y una mejor eficiencia volumétrica. Generalmente este no es el caso con bombas que tienen límites de velocidad.

La eficiencia volumétrica de la bomba (E_v) se calcula de la siguiente ecuación:

$$E_v = \frac{Q}{Q_t} = \frac{Q_t - S}{Q_t} * 100 \quad (\%)$$

Con Q_t variando directamente con la velocidad.

3.6 CABALLOS DE FUERZA.

La potencia al freno requerida (BHP) para accionar una bomba de tornillo es la suma de la potencia teórica del líquido y las pérdidas de la potencia interna. La potencia teórica del líquido (TWHP), es el trabajo real hecho al mover el fluido de su condición de presión de entrada a la presión de descarga. y puede ser calculada:

$$TWHP = \frac{Q_t * DP}{1714} \quad (\text{HP})$$

Se debe notar que la T_{WHP} es independiente de la viscosidad y únicamente es función de las dimensiones físicas de los elementos de bombeo, la velocidad rotatoria y la presión diferencial.

En general, las pérdidas para un tipo y tamaño dados de bomba varían con la viscosidad y la velocidad rotatoria y pueden o no ser afectadas por la presión, dependiendo del tipo y modelo de bomba bajo consideración. Estas pérdidas, sin embargo, deben estar basadas siempre en la viscosidad máxima que va a ser manejada ya que serán más altas en ese punto.

La potencia actual de salida de la bomba (WHP) o la potencia suministrada al líquido, es la potencia impartida al líquido por la bomba en la salida. Esta calculada de manera similar a la potencia teórica del líquido, usando Q en lugar de Q_t; de ahí que el valor siempre será menor.

La eficiencia de la bomba (E_p) es:

$$E_p = \frac{WHP}{BHP} * 100 \quad (\%)$$

donde: WHP: Potencia de la bomba a la salida, (HP).

BHP: Potencia al freno requerida, (HP).

Esta eficiencia mejora al incrementar el tamaño del rotor. La eficiencia incluye todas las pérdidas de potencia interna, las cuales se dividen en: pérdidas mecánicas y pérdidas viscosas. Las primeras incluyen la potencia para vencer la fricción mecánica y las viscosas incluyen las pérdidas de potencia de los fluidos viscosos.

No es fácil obtener tablas de eficiencias de las bombas; los datos de los fabricantes se presentan en forma de gráficas o curvas que no indican la eficiencia, salvo que el diseñador desee calcular u obtener datos de eficiencia del fabricante, se pueden utilizar con cautela sus gráficas o curvas para obtener la potencia requerida. Por esta razón, el fabricante ya da los datos de eficiencia de las bombas que manufactura. (22)

3.7. DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO PARA EL CALCULO DE CAPACIDADES EN BOMBAS MULTIFASICAS.

3.7.1. CONSIDERACIONES GENERALES.

Para el desarrollo del modelo matemático que se presenta en este trabajo, fue necesario recurrir a gráficas de comportamiento de bombas multifásicas proporcionadas por el fabricante, en este caso se trata

de la compañía MULTIPHASE SYSTEMS, que trabaja con la bomba de tornillo gemelo, así pues el modelo aquí presentado funciona para las bombas de este tipo, pero podría ser utilizado como parámetro de comparación para las bombas multifásicas fabricadas por otras compañías.

Estas gráficas fueron obtenidas al efectuar pruebas en el circuito de prueba que fue diseñado para determinar el comportamiento de las bombas multifásicas bajo condiciones reales de operación, después de haber pasado la fase de pruebas a pequeña escala en el laboratorio.

3.7.2. TIPOS DE BOMBAS MULTIFASICAS.

Como ya se vio anteriormente la MULTIPHASE SYSTEMS maneja seis tipos de bombas multifásicas de acuerdo a la capacidad de manejo de hidrocarburos, estas bombas son:

MP-5 Para una capacidad de 5,000 a 20,800 BPD

MP-10 Para una capacidad de 9,000 a 32,500 BPD

MP-20 Para una capacidad de 22,600 a 72,500 BPD

MP-40 Para una capacidad de 33,700 a 107,200 BPD

MP-100 Para una capacidad de 62,000 a 168,000 BPD

MP-200 Para una capacidad de 103,000 a 290,000 BPD

La potencia nominal de cada uno de los tipos de bombas es:

MP-5	HP = 150	(108 Kw)	VEL. MAX. 3600 RPM.
MP-10	HP = 210	(157 Kw)	VEL. MAX. 3600 RPM.
MP-20	HP = 430	(321 Kw)	VEL. MAX. 3600 RPM.
MP-40	HP = 590	(438 Kw)	VEL. MAX. 3600 RPM.
MP-100	HP = 860	(641 Kw)	VEL. MAX. 3000 RPM.
MP-200	HP = 1460	(1087 Kw)	VEL. MAX. 2000 RPM.

El rango de capacidades, así como el rango de presiones diferenciales es obtenido de las gráficas de comportamiento para cada una de las bombas a manejar. El rango de presiones diferenciales para cada bomba multifásica es:

MP-5	delta_P max.	35 BAR (507 psi)
MP-10	delta_P max.	38 BAR (551 psi)
MP-20	delta_P max.	40 BAR (580 psi)
MP-40	delta_P max.	45 BAR (653 psi)

MP-100 delta_P max. 48 BAR (696 psi)

MP-200 delta_P max. 48 BAR (696 psi)

Estas gráficas de comportamiento de bombas multifásicas, representan el comportamiento de una bomba multifásica dada, y están en función del volumen total de entrada a la bomba y la presión diferencial que puede manejar la bomba. Estas gráficas de comportamiento están representadas por las figuras 10-a, 10-b, 10-c, 10-d, 10-e y 10-f, para las bombas tipo MP-5, MP-10, MP-20, MP-40, MP-100 y MP-200 respectivamente. Así mismo en la tabla No. 2 se presentan las dimensiones y especificaciones de estas bombas. (20)

3.7.3. DESARROLLO DE LAS ECUACIONES.

Para obtener las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de estas gráficas se recurrió a un análisis de regresión lineal, porque se vio que todas las bombas tienen un comportamiento lineal cuando se varía cualquiera de los dos parámetros que vienen representados en las gráficas correspondientes. Este comportamiento se ajusta al descrito por la ecuación de una recta:

$$Y = a + bX$$

Este análisis se puede hacer de dos maneras, la primera es en forma analítica y la segunda es utilizando un programa ya establecido en una computadora personal. Por su sencillez y ahorro de tiempo, para ajustar las ecuaciones que se utilizaron en el modelo se recurrió a la segunda opción.

El comportamiento lineal de las bombas, obedece a que siguen el patrón descrito por la ecuación general de una bomba, es decir, si hacemos un análisis con esta ecuación tenemos:

La ecuación general de una bomba es:

$$HP = \frac{C}{E} * Q * DP$$

donde: Potencia: (HP)

Q: (gal/min); DP = Pd - Ps (psig)

E = eficiencia de la bomba ; C = 0.00058

despejando Q:

$$Q = HP * \frac{E}{C} * DP^{-1}$$

tomando logaritmos en ambos miembros:

$$\text{Log}Q = \text{Log}(HP * \frac{E}{C}) - \text{Log}DP$$

haciendo $HP * E / C = A$, tenemos finalmente:

$$\text{Log}Q = \text{Log}A - \text{Log}DP$$

Por lo tanto, las ecuaciones de las bombas se representan por una línea recta en papel log-log.

El resultado del análisis de regresión lineal fueron ecuaciones que reproducen el comportamiento de las bombas multifásicas para un determinado volumen total a la entrada o una determinada presión diferencial en la bomba.

Cada una de las ecuaciones funcionan únicamente para un rango dado de presión diferencial y por lo tanto no fue posible obtener una sola ecuación para presentar el comportamiento de una bomba.

3.7.4 ECUACIONES OBTENIDAS.

Las ecuaciones obtenidas fueron las siguientes:

PARA LA BOMBA MP-5

$$Q_t = 138 - 1.964(DP) \quad (\text{M}^3/\text{Hr}) \quad 0 < DP \leq 28 \quad (\text{bar})$$

$Q_f = 110 - 1.543(DP)$ (M^3/Hr) $28 < DP \leq 35$ (bar)

PARA LA BOMBA MP-10

$Q_f = 215 - 2.678(DP)$ (M^3/Hr) $0 < DP \leq 28$ (bar)

$Q_f = 160 - 1.714(DP)$ (M^3/Hr) $28 < DP \leq 35$ (bar)

$Q_f = 130 - 1.842(DP)$ (M^3/Hr) $35 < DP \leq 38$ (bar)

PARA LA BOMBA MP-20

$Q_f = 480 - 4.286(DP)$ (M^3/Hr) $0 < DP \leq 28$ (bar)

$Q_f = 380 - 3.428(DP)$ (M^3/Hr) $28 < DP \leq 35$ (bar)

$Q_f = 265 - 2.733(DP)$ (M^3/Hr) $35 < DP \leq 38$ (bar)

$Q_f = 220 - 1.750(DP)$ (M^3/Hr) $38 < DP \leq 40$ (bar)

PARA LA BOMBA MP-40

$Q_f = 710 - 5.893(DP)$ (M^3/Hr) $0 < DP \leq 28$ (bar)

$Q_f = 555 - 4.314(DP)$ (M^3/Hr) $28 < DP \leq 35$ (bar)

$Q_f = 425 - 4.024(DP)$ (M^3/Hr) $35 < DP \leq 41$ (bar)

$Q_f = 370 - 3.356(DP)$ (M^3/Hr) $41 < DP \leq 45$ (bar)

PARA LA BOMBA MP-100

$Q_f = 1110 - 8.214(DP)$ (M^3/Hr) $0 < DP \leq 28$ (bar)

$Q_f = 1150 - 23.958(DP) \quad (M^3/Hr) \quad 28 < DP \leq 48 \quad (bar)$

PARA LA BOMBA MP-200

$Q_f = 1930 - 11.428(DP) \quad (M^3/Hr) \quad 0 < DP \leq 28 \quad (bar)$

$Q_f = 1520 - 9.143(DP) \quad (M^3/Hr) \quad 28 < DP \leq 35 \quad (bar)$

$Q_f = 1150 - 8.049(DP) \quad (M^3/Hr) \quad 35 < DP \leq 41 \quad (bar)$

$Q_f = 1000 - 6.667(DP) \quad (M^3/Hr) \quad 41 < DP \leq 48 \quad (bar)$

3.7.5. OPCIONES DE CALCULO DEL MODELO

El modelo fue desarrollado en lenguaje PASCAL V, el diagrama de flujo se presenta al final del trabajo, el modelo consta de tres partes:

- (A) CALCULO DEL TIPO DE BOMBA
- (B) CALCULO DE VOLUMEN TOTAL
- (C) CALCULO DE LA CAIDA DE PRESION

3.7.5.1. OPCION A.- CALCULO DEL TIPO DE BOMBA.

Si seleccionamos la opción (A) el modelo requiere de los siguientes datos:

- 1.- Nombre del pozo o campo
- 2.- Presión de succión en la bomba, p_1 (psig)

- 3.- Presión de descarga en la bomba p_2 (psig)
- 4.- Temperatura a la entrada de la bomba, t_1 ($^{\circ}$ F)
- 5.- Gasto de gas a condiciones estándar, Q_g (P^3/D)
- 6.- Gasto de agua, Q_w (BPD).
- 7.- Gasto de aceite, Q_o (BPD).

De acuerdo con estos datos el modelo realiza los cálculos correspondientes de acuerdo con las ecuaciones utilizadas para calcular cada uno de los parámetros, los cuales son:

- PARA CALCULAR LA PRESION DE SUCCION EN LA BOMBA:

$$P_s = P_1 + 1.013 \quad (\text{psia})$$

- LA PRESION DIFERENCIAL:

$$DP = P_2 - P_1 \quad (\text{psia})$$

- LA TEMPERATURA A LA ENTRADA DE LA BOMBA:

$$T_1 = C + 273.15 \quad (^{\circ}\text{K})$$

- LA ECUACION QUE NOS DETERMINA EL GASTO A CONDICIONES DE SUCCION DE LA BOMBA ES:

$$Q_{gas} = Q_g * (P_o / P_s) * (T_1 / T_o)$$

donde:

Q_{gas} : gasto de gas a condiciones de succión (P^3/D)

para condiciones estándar:

$P_o = 14.7$ (psia)

$T_o = 15$ °C + 273.15 (°K)

Q_g : gasto de gas a condiciones estándar (P^3/D)

P_s : Presión de succión de la bomba, (psia)

T_1 : Temperatura de entrada a la bomba, (°K)

El gas real es más compresible que el gas ideal, debido a que presentan dos tendencias (27):

- 1).- Se apartan entre si por su constante movimiento cinético.
- 2).- Se atraen por fuerzas eléctricas existentes entre las moléculas.

A presiones bajas las moléculas están distantes, las fuerzas de atracción son insignificantes y, el gas real se comporta como ideal.

En cambio a presiones altas, por ejemplo 5,000 psia, los gases pasan de un estado supercompresible a uno en

que la compresión es más difícil que si se tratara de gases ideales.

Se establece por lo tanto la conclusión de que un gas es tanto más ideal cuanto menor es la presión a que se encuentra sometido. Y se hace ideal totalmente cuando la presión tiende a cero.

Al valor numérico, que representa una medida de la desviación del comportamiento ideal del gas, se le denomina FACTOR DE DESVIACION, SUPERCOMPRESIBILIDAD o COMPRESIBILIDAD y su símbolo es "Z". Este factor varía por lo general entre 0.40 y 1.20, el valor de 1.00 representa el comportamiento ideal.

Por este motivo en la ecuación en donde se calcula Q_{gas} , el valor de Z se consideró igual a 1, debido a que se tienen bajas presiones en la succión de la bomba y el comportamiento del gas real tiende al comportamiento de un gas ideal. (23)

- EL VOLUMEN TOTAL EN LA SUCCION DE LA BOMBA ES:

$$Q_t = Q_{gas} + Q_{liq} \quad (\text{BPD}).$$

- LA FRACCION DE GAS EN VOLUMEN ES:

$$FVG = \frac{Q_{gas}}{Q_t} * 100 \quad (\%)$$

- LA RELACION GAS LIQUIDO SE CALCULA CON:

$$RGL = \frac{Q_{gas}}{Q_{liq}} \quad (M^3/HR/M^3/HR)$$

o también:

$$RGL = \frac{Q_{gas}}{Q_{liq}} * 5.615 \quad (P^3/BL)$$

Utilizando las ecuaciones en unidades consistentes se obtienen los siguientes resultados:

DP: presión diferencial en (BAR), (PSIG)

T: Temperatura en la bomba (°K)

Qgas: Gasto de gas a condiciones de succión (M³/HR), (BPD).

Qlíq: Gasto de liquido (M³/HR), (BPD).

Qt: Volumen total en la succión de la bomba (M³/HR), (BPD).

FVG: Fracción de gas en volumen (%)

RGL: Relación gas-líquido, (P³/BL)

Con estos resultados obtenidos de volumen total manejado y caída de presión, el programa selecciona el tipo de bomba más adecuada a esos resultados.

3.7.5.2. OPCION B.- CALCULO DEL VOLUMEN TOTAL MANEJADO POR LA BOMBA.

En la opción (B) el modelo determina el volumen total a manejar por la bomba, esto es en base al tipo de bomba previamente seleccionada y a la presión diferencial que se fije para esa bomba. Así también determina la fracción de gas en volumen, el gasto de líquido y el gasto de gas dando como dato la relación gas - líquido.

3.7.5.3. OPCION C.- CALCULO DE LA CAIDA DE PRESION.

En la opción (C) el modelo determina la presión diferencial que requiere la bomba para manejar un gasto establecido previamente para una bomba específica.

En éstas dos últimas opciones el modelo hace uso de las ecuaciones que se obtuvieron por medio del análisis de regresión lineal.

En el capítulo siguiente se verán los resultados obtenidos al aplicar el modelo a tres casos reportados en la literatura, se analizarán los resultados obtenidos en cada uno de ellos. También el modelo se

aplicó a un campo de la región sur en el Distrito de Agua Dulce y se discutirán los resultados.

También se anexan, los listados del programa, las corridas para los tres ejemplos reportados en la literatura y tablas de producción por campo y central de recolección, así como los resultados obtenidos en forma de tabla de las corridas realizadas para el campo Magallanes de la Región Sur.

C A P I T U L O I V

APLICACION DEL MODELO MATEMATICO PARA EL CALCULO DE CAPACIDADES EN BOMBAS MULTIFASICAS

4.1 INTRODUCCION.

Como se explicó en capítulos anteriores, la filosofía del bombeo multifásico de hidrocarburos es, para eliminar la necesidad de centrales de recolección, transportar los fluidos desde el pozo a un centro de procesamiento a través de una sola tubería (oleogasoducto), prolongar la vida del pozo al reducir la contrapresión, entre otras.

Así, que el campo de aplicación de estas bombas multifásicas puede ser tanto en pozos o campos terrestres, como en pozos o campos costa fuera, y en un futuro no muy lejano se desarrollarán estaciones multifásicas completamente submarinas con lo que se pretende reducir los costos de operación y mantenimiento de las plataformas ya que estas se verán reducidas en dimensiones operadores.

En si el potencial más grande de esta técnica, es en pozos o campos nuevos o en áreas alejadas en donde la

construcción de una central de recolección para unos pozos no justificaría la inversión, entonces es ahí en donde el bombeo multifásico podría obtener los mejores beneficios económicos y técnicos.

4.2. VALIDACION DEL MODELO.

El modelo desarrollado en este trabajo se aplicó a tres ejemplos proporcionados por la literatura⁽⁷⁾ y los resultados que se obtuvieron con el modelo coinciden con los reportados por el fabricante. Esto sirvió para que, al correr el modelo en condiciones reales se tuviera la certeza de que los resultados dados por el modelo fueran confiables.

Los resultados comparativos de estas corridas se presentan en la tabla No.3, en donde se puede observar que el por ciento de error obtenido con el modelo es muy bajo, del orden del 0.21 % en lo que se refiere al volumen total manejando, y en general un error que se puede considerar muy bajo, y que se puede atribuir a los factores de conversión utilizados y a los redondeos utilizados por la computadora.

Después el modelo se corrió para datos obtenidos del campo MAGALLANES del Distrito Agua Dulce, Región Sur, esto no quiere decir que la bomba se aplicará en esa región si no que se pretendía determinar el

comportamiento del modelo con datos reales y poder así obtener una conclusión positiva sobre este modelo.

El campo MAGALLANES cuenta actualmente con 6 centrales de recolección que tienen las siguientes claves: 3119, 3120, 3121, 3122, 3123, 3124. Los datos de producción de estas centrales de recolección así como del campo se presentan en las tablas 4, 4-3120, 4-3121, 4-3122, 4-3123 y 4-3124.

Cabe mencionar que este campo esta sujeto a la etapa de recuperación secundaria y además sus pozos trabajan con el sistema de bombeo neumático la mayoría de ellos.

Para los efectos de la ejecución del programa, la central de recolección 3119 que cuenta solamente con un pozo de bombeo neumático se integró junto con la central de recolección 3120.

El modelo se corrió con los datos obtenidos para todo el campo y también se corrió para cada una de las centrales de recolección. Los resultados de estas corridas se analizarán mas adelante.

4.3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

Se corrió el modelo primeramente tomando en cuenta todo el campo, se fijaron la presión de succión promedio y la presión de descarga promedio en 36.64 psig y 281.16 psig respectivamente, el promedio de estas presiones se obtuvo aritméticamente de las presiones que manejan

cada central de recolección. La temperatura es de 84.2°F, el campo maneja una producción de gas de 23.3517 MMPCD, con una producción de aceite de 6232.2 BPD y 4007.9 BPD de agua.

Con estos datos el modelo se corrió obteniéndose una caída de presión de 16.85 bar (244.29 psig), un gasto de gas a condiciones de entrada de la bomba de 8274.05 M³/Hr., un gasto de líquido de 67.89 M³/Hr., un volumen total manejado de 8341.94 M³/Hr. (1'259,215.64 BPD), con una fracción en volumen de gas de 99.19 % y una Relación gas-líquido de 121.86:1 es decir 684.23 P³/Bl.

Tabla No. 5.

Con la presión diferencial calculada y el volumen total manejado por la bomba el modelo calculó que el gasto es demasiado grande para ser manejado por una bomba, y la bomba de mayor capacidad que existe es la MP-200, que maneja un gasto entre 103,000 y 290,000 BPD, entonces el gas máximo que puede manejar la bomba de acuerdo a la presión diferencial calculada, es de 1737.64 M³/Hr (262,296.62 BPD), con lo que para manejar ese volumen calculado se requerirían de 5 bombas MP-200.

Esta cantidad de bombas se puede obtener de dos maneras: la primera ir dividiendo el gasto total dado entre 1, 2, 3, 4, etc. número de bombas a utilizar, hasta que el gasto pueda ser manejado por la bomba, y

la segunda forma que es la que utiliza el modelo, es dividir el volumen total manejado, que en este caso fue de 8341.94 M³/Hr. entre el gasto máximo que se puede obtener para las condiciones dadas, en este caso fue de 1737.64 M³/Hr.

Al correr el modelo ahora dividiendo el gasto total entre 5 bombas se obtuvo un volumen total manejado de 1668.39 M³/Hr (251.843.13 BPD), este volumen si es posible manejarlo con una bomba MP-200, por tal motivo para manejar el gasto total del campo Magallanes se requerirán de 5 bombas tipo MP-200. Tabla No. 6.

La fracción en volumen de gas resultó ser muy elevada, al igual que la Relación gas-líquido, esto es debido a que el campo esta sujeto al sistema de bombeo neumático.

Por último el cálculo de la caída de presión de acuerdo al volumen total manejado para todo el campo se hizo de la siguiente manera: con el volumen total manejado y el tipo de bomba en este caso la MP-200, para el caso de que la producción se va a manejar con una sola bomba, el modelo selecciona la ecuación correspondiente de las dadas en el capítulo anterior y calcula la caída de presión, en este caso como el gasto es mayor del que puede manejar la bomba MP-200, no fue posible obtener la correspondiente caída de presión.

Sin embargo, como el caso es que la producción se manejará con 5 bombas, si se obtuvo su correspondiente caída de presión, por ejemplo para un volumen total manejado de 1668.39 M³/Hr (251,843.13 BPD) y una bomba tipo MP-200, la caída de presión resultante sería de 22.89 bar (331.92 psig), esto para el caso de que la producción se pensará manejar con 5 bombas MP-200.

En la central de recolección 3120, los datos que se utilizaron para correr el modelo fueron: presión de succión 44.02 psig, presión de descarga 298.2 psig estos datos al igual que para el campo Magallanes son la presión de separación y la presión de bombeo de la batería en cuestión respectivamente. La temperatura fue de 84.2 °F, el gasto de gas a condiciones estándar fue de 7.2996 MMPCD, el gasto de agua 186.9 BPD y el de aceite fue 1923.7 BPD.

Los resultados que se obtuvieron fueron caída de presión 253.94 psig, gasto de gas a condiciones de succión 2261.37 M³/Hr. el gasto de líquido 13.99 M³/Hr, lo que da un volumen total manejado de 2275.36 M³/Hr (343,465.57 BPD) con una fracción en volumen de gas de 99.39 % y una relación gas líquido de 907.41 P³/bl.

Con estos resultados obtenidos no se cuenta con alguna bomba que pueda manejar ese volumen, la más grande es la MP-200 que maneja 103,000 y 290,000 PD de

hidrocarburos, entonces lo que se hizo fue utilizar dos bombas del mismo tipo MP-200 y correr el programa ahora dividiendo la producción que maneja esa central de recolección entre dos, así se obtuvieron los resultados de la corrida que se representan en la tabla No. 5 y en la tabla No. 6 la tabla general de resultados. De esta manera si fue posible manejar la producción de la central de recolección.

El comportamiento del modelo corrido para cada una de las centrales de recolección faltantes fue similar o tuvo la misma tendencia al presentado para los dos casos anteriores.

En la tabla No. 5 se presentan los resultados de las corridas en sus condiciones originales, es decir sin variar los gastos totales en las corridas para el campo Magallanes y para la batería 3120 que fueron los casos en los que se utilizaron varias bombas.

En la tabla 6 se presentan los resultados al dividir los gastos en los dos casos anteriores, en el campo Magallanes y en la batería 3120, y los resultados obtenidos en las demás baterías, así como la cantidad de bombas a utilizar en cada batería y en el campo. Por último se presenta la tabla No. 7, que es un resumen de los resultados obtenidos en cada uno de los casos vistos.

También se presenta un diagrama simplificado de las instalaciones actuales en las centrales de recolección, así como el diagrama utilizando el bombeo multifásico en cada una de las centrales de recolección. Estos diagramas están representados por las figuras 11, para el diagrama de las instalaciones actuales, y 12, 12-a, 12-b, 12-c, 12-d, 12-e para presentar la instalación si se usarán bombas multifásicas en lugar de las centrales de recolección 3120, 3121, 3122, 3123 y 3124 respectivamente.

Por otro lado si graficamos los valores obtenidos de FGV contra RGL:1 se obtendrá curva como la mostrada en la figura 13, la cuál se satisface para cualquier valor de RGL desde 0 hasta infinito y para el FGV desde 20 hasta 100 %.

Finalmente, podemos decir que el modelo da una serie de alternativas, para hacer la selección de la bomba multifásica mas adecuada dependiendo de lo que nosotros necesitemos por ejemplo: mas o menos caída de presión, gasto máximo, bombas del mismo tipo en paralelo, o bombas de diferente capacidad también en paralelo, además falta hacer el análisis de la capacidad del oleoducto y gasoducto como un sólo oleogasoducto; lo cuál queda fuera del alcance de este trabajo.

C A P I T U L O V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El bombeo multifásico esta entrando rápidamente en la categoría de la tecnología probada.
2. Dos son las compañías petroleras que mas trabajos de investigación y desarrollo han realizado en lo referente a este tema: MULTIPHASE SYSTEMS PCL y un consorcio francés formado por: STATOIL, IFP y TOTAL.
3. El consorcio francés tiene un proyecto denominado POSEIDON, el cuál desarrolló una bomba multifásica helicoaxial multietapa.
4. La Cía MULTIPHASE SYSTEMS desarrolló una bomba multifásica de desplazamiento positivo del tipo "TORNILLOS GEMELOS".
5. Ambos tipos de bombas ya se han probado en circuitos de campo, y de las bombas de tornillos gemelos ya se vendieron tres y se estaban utilizando.
6. La aplicación submarina es donde la tecnología multifásica proporcionará el potencial más grande, ya que se reducirán los costos. Otras aplicaciones son en plataformas marinas y en tierra, especialmente en campos marginales o distantes.

7. Estas bombas en teoría son capaces de manejar fracciones de gas del orden del 97% y RGL de 0 a infinito.
8. Con la información existente se desarrolló un modelo matemático para el análisis del comportamiento de operación de las bombas multifásicas.
9. Con este modelo se pueden dimensionar bombas multifásicas para determinadas condiciones de operación.
10. Se presentan tres alternativas para el cálculo de bombas multifásicas: Cálculo del tipo de bomba, cálculo del volumen total y cálculo de la caída de presión en la bomba.
11. Para desarrollar el modelo se recurrió al estudio y análisis de gráficas empíricas de comportamiento de bombas de tornillo gemelo de la Cía. MULTIPHASE SYSTEMS, de las cuales se obtuvieron las ecuaciones que permitieron simular el comportamiento de las bombas.
12. Por medio un análisis de regresión lineal se ajustaron estas ecuaciones para reproducir el comportamiento de las bombas al variar los parámetros principales que son: el volumen total a condiciones de entrada y la caída de presión.

13. Se elaboró un programa en lenguaje PASCAL V y se validó con los datos proporcionados en la literatura y posteriormente se hicieron corridas con datos reales de campo.
14. Se presentaron los resultados reportados en la literatura contra los datos obtenidos por el modelo, así como el por ciento de error que se presentaron en los tres casos.
15. Este modelo nos permite en un momento dado decidir la colocación de bombas multifásicas en algunos campos principalmente en áreas nuevas o localizaciones marginales o alejadas de los centros de procesamiento, ya que representan un ahorro económico pues sólo se necesitaría una o algunas bombas multifásicas en lugar de construir centrales de recolección con todo lo que a una central de este tipo rodea como son: personal, mantenimiento, etc. La bomba multifásica también requeriría de personal y mantenimiento pero en menor escala.
16. No es recomendable el uso de este tipo de bombas en campos que estén bajo el efecto de la inyección de gas, esto debido a que la fracción de gas en volumen resultaría muy grande y repercutiría en un dimensionamiento de una bomba de mayor capacidad y por consecuencia de un costo mayor.

17. El modelo fue corrido con datos reales tomando como ejemplo el campo MAGALLANES, del Distrito AGUA DULCE en la REGION SUR, el cuál esta bajo el efecto de la inyección de agua y son pozos la mayoría de bombeo neumático.
18. Se obtuvieron resultados del tipo y número de bombas a utilizar con base en el número de pozos que concurren a las centrales de recolección del campo.
19. También se calcularon los gastos máximos de gas y líquido que puede manejar la bomba teniendo como dato la caída de presión y la RGL.
20. Por último se calcula la caída de presión en la bomba multifásica, dados el tipo de bomba a usar y el volumen total manejado por la misma.
21. En la fracción de gas en volumen y la RGL sus comportamientos están en función del volumen de gas a manejar por la bomba y el gasto de líquido.
22. Por último este nuevo sistema, el bombeo multifásico, se presenta como una alternativa en el desarrollo de campos nuevos o campos y pozos alejados o marginales de las centrales de recolección, así pues con éste trabajo se pretende poner en conocimiento de todos los interesados esta nueva tecnología, pero aún quedan cosas por hacer. El tema queda abierto para todos los estudiantes que

tengan la inquietud para adentrarse más en esta tecnología. Se puede hacer un análisis más profundo sobre el modelo matemático, es decir, con la literatura que se obtenga tratar de mejorarlo, así como también estudios sobre el diseño del oleogasoducto para transportar la mezcla multifásica y el equipo de automatización a usar.

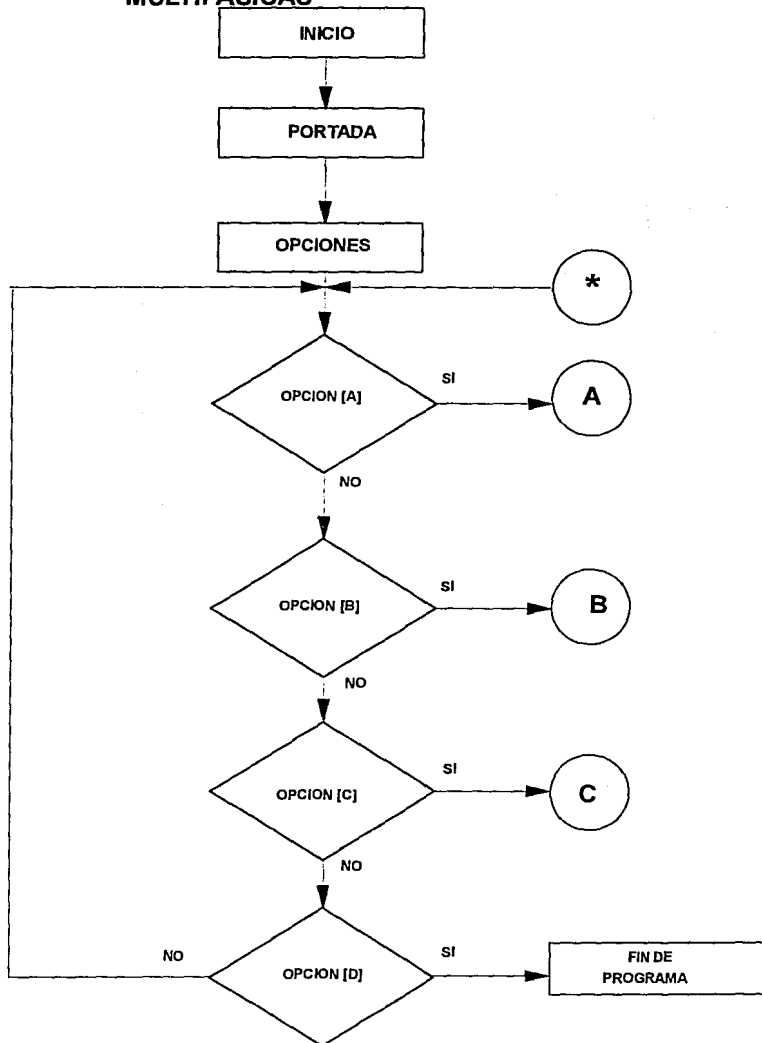
BIBLIOGRAFIA

- 1.- Goodridge, R. and Stuart L.: "Multiphase pump testing development and live well applications", Multiphase Systems. PCL. (oct.1986).
- 2.- Butcher, Ch.: "Multiphase pumping", The Chemical Engineer. (dic.1988).
- 3.- Dolan, P.J., Goodridge R. A. y Leggate, J.S.: "Development of twin-screw pump for multiphase duties" S.P.E. (nov.1988), 459-465.
- 4.- Pierre Gié.: "What is Poseidon?", Total, I.F.P., y Statoil. (Ene.1984).
- 5.- Robert E. Snyder.: "Multiphase pumping advanced by Poseidon sea trials", Ocean industry. (jun.1988).(24-27).
- 6.- Pierre Gié: "Field test of the Poseidon pump". S.P.E. (mar.1992).
- 7.- Goodridge, R.: "Multiphase systems PCL. pumping applications", S.P.E. (mar.1986).
- 8.- Lafaille. A.: "Poseidon: the multiphase boosting and transportation technology now reaching the pre-industrial stage". S.P.E. (oct.1990).
- 9.- Pierre, G.: "Poseidon pump ready for manufacture". The oilman. (ago.1991).

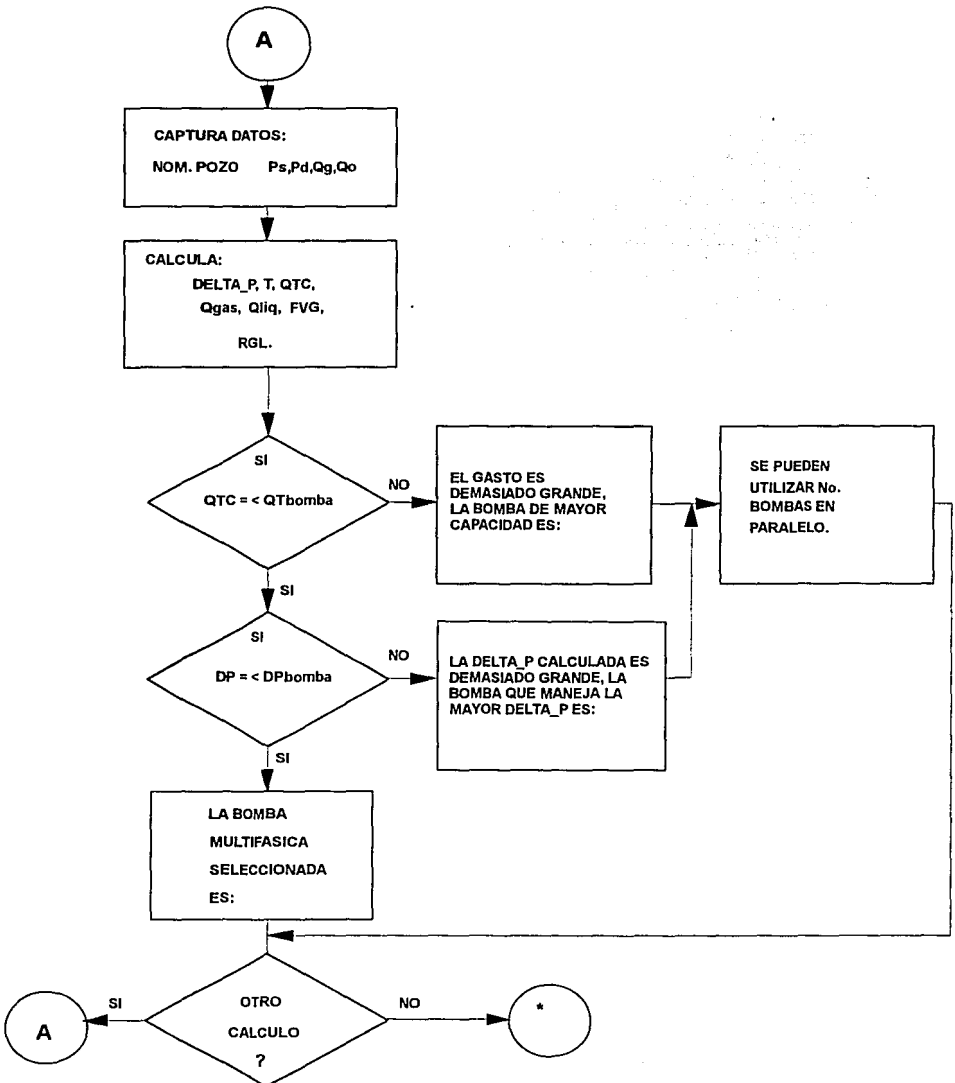
- 10.- Lafaille, A.: "Poseidon The multiphase boosting and transportation system", OSEA 90128. (dic.1990), (44-48).
- 11.- Gie, P y Buvat, P.: " poseidon multiphase pump: Field test results". OCT 7037. (may.1992).
- 12.- Lafaille, A. Cessou, M.: "Poseidon: The multiphase pumping production system, on the way towards industrial applications". (may.1986).
- 13.- Giovanni, O.: "Process for pumping a multiphase gas-liquid mixture by means of use a pump", GB 2224545-A. (oct.1989).
- 14.- Delaittre, P.A.: "SMUBS- The shell multiphase underwater booster station". Shell international Petroleum. (jun.1988).
- 15.- Grant A. A.: "Development of a multiphase pump for subsea oilfield production systems", World pumps. (jun.1989).
- 16.- Grant. A. A.: "Underwater multiphase pump: Key to subsea production", World oil. (dic.1987).
- 17.- Goodridge, R.: "Multiphase pump advancements prompt commercial applications", Offshore international. (nov.1990).
- 18.- Emma Chynoweth.: "Twin screw pump is developed for multiphase applications", Process Engineering. (dic. 1986).

- 19.- Leggate, J.S., Iball, W.N. y McJarrow. J.: "Oil production using pumped multiphase systems", S.P.E. (nov.1989).
- 20.- Goodridge, R.A.: "Development of multiphase pump units for offshore applications", The Institute of Marine Engineers, (ene.1991).
- 21.- Torp, Tore A.: "Subsea multiphase boosting: Review and future applications", Statoil, Norway.
- 22.- Viejo Zubicaray, M.: "Bombas: Teoría, diseño y aplicación", Ed. Limusa, (feb.1974), (89-91).
- 23.- González, H. S., De la Garza, C. N.: "Apuntes de fisicoquímica y termodinámica de los hidrocarburos" Departamento de Explotación del petróleo. División de Ingeniería en ciencias de la tierra. (ago.1988), (250-253).

DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO PARA EL CALCULO DE CAPACIDADES EN BOMBAS MULTIFASICAS



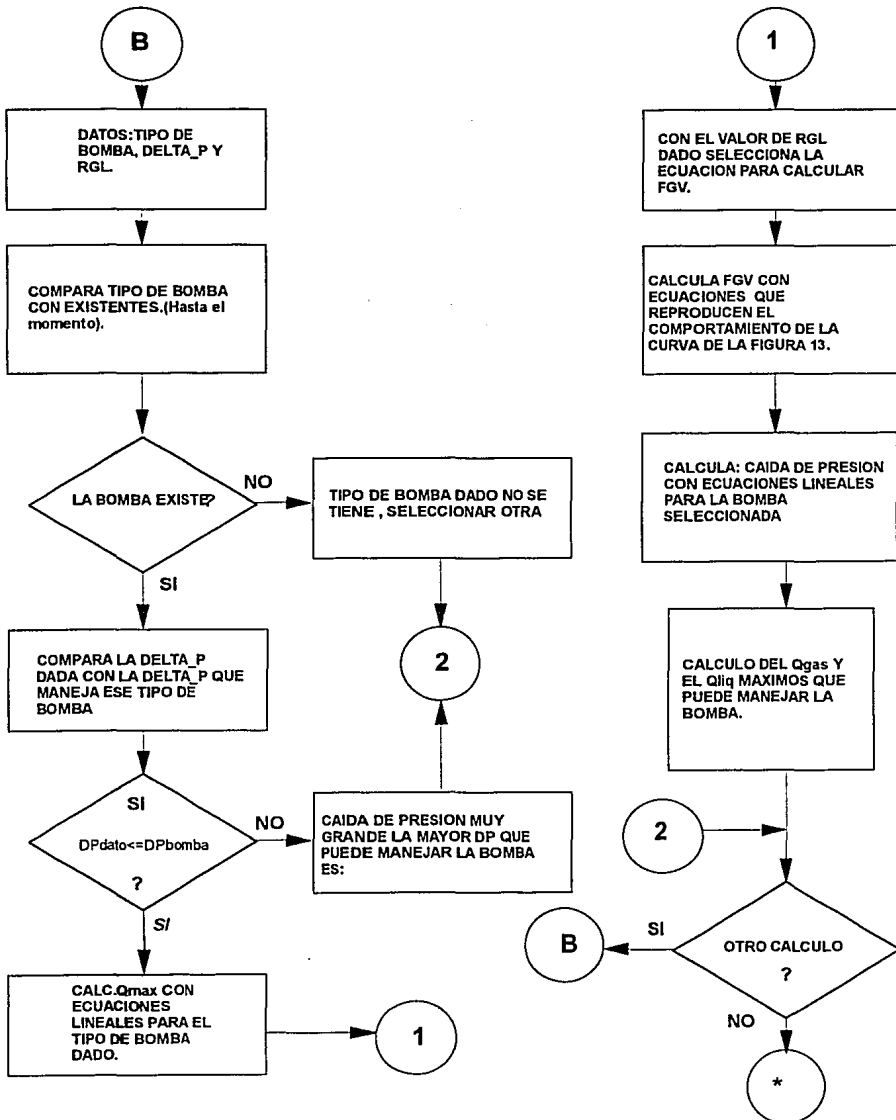
CALCULO DE LA CAIDA DE PRESION, VOLUMEN TOTAL Y TIPO DE BOMBA MULTIFASICA.



CALCULO DE LAS CAPACIDADES MAXIMAS

LIQUIDO Y GAS QUE PUEDE MANEJAR UNA BOMBA MULTIFASICA

TENIENDO COMO DATO: LA PRESION DIFERENCIAL Y LA RGL.



CALCULO DE LA CAIDA DE PRESION, PARA UN BOMBA MULTIFASICA DADA Y UN VOLUMEN TOTAL DADO

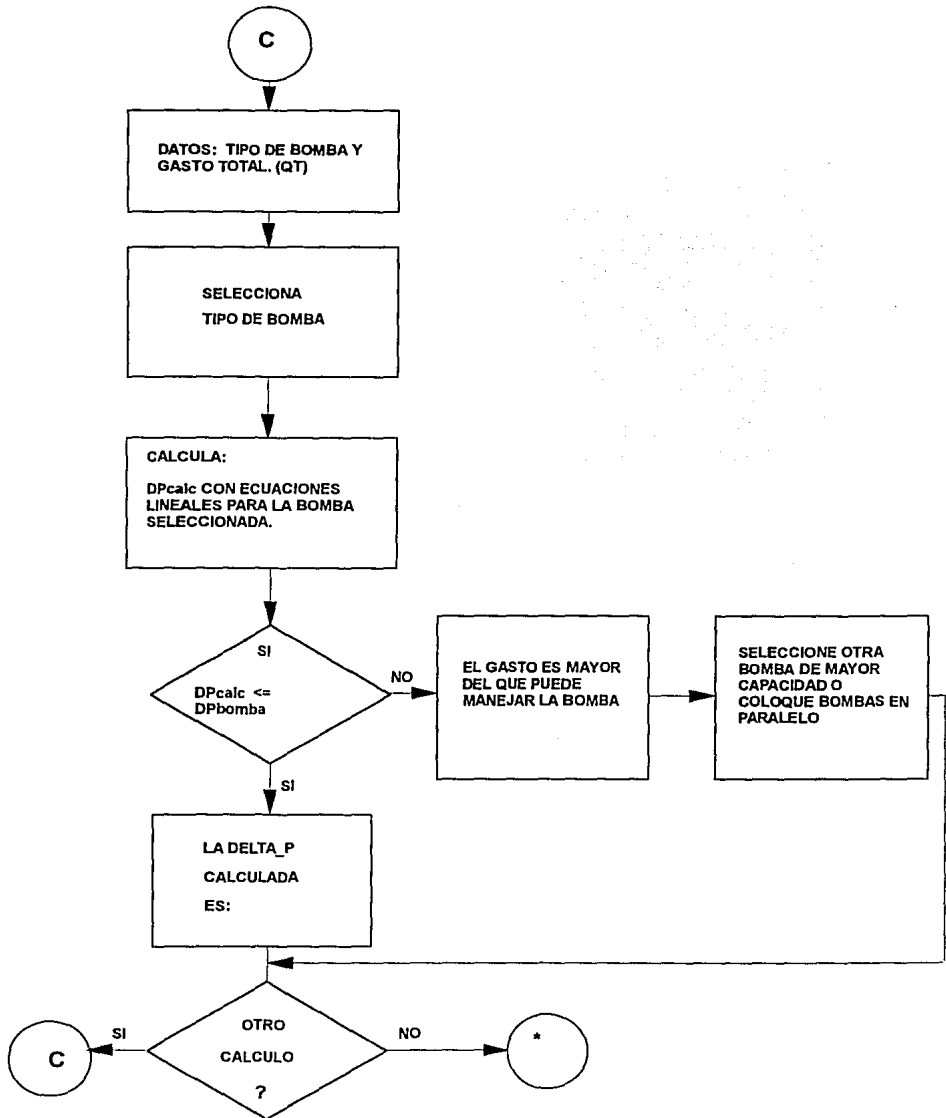


TABLA No.1.- BOMBA MULTIFASICA POSEIDON

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN TUNEZ

	P 300 DATOS DE DISEÑO	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON LA P-300	P 302 RESULTADOS OBTENIBLES
GASTO TOTAL (cond.de entrada)	25000 BPD	35000 BPD	130000 BPD
FRACCION DE GAS (cond.de entrada)	DE 0 A 90 %	DE 0 A 95 %	DE 0 A 95 %
PRESION DE ENTRADA (min - max)	145 A 580 PSI	MINIMA 73 PSI	MINIMA 72 PSI
PRESION ALCANZADA (RGL=10 M ³ /M ³)	290 PSI	319 PSI	464 PSI
VEL.DE ROTACION (RPM)	3000 A 6500	2000 A 5500	2500 A 6600
EFIC.HIDRAULICA	40 A 60 %	42 % RGL=10 M ³ /M ³	CERCANO A 45 %

PLANES FUTUROS

	SERIE P300	SERIE P400
MAX.GASTO A MANEJAR (cond.de entrada)	130000 BPD	200000 BPD
PRESION ALCANZADA (RGL=10, P _s =145 PSI)	464 PSI	508 PSI
PRESION DE ENTRADA	MINIMO 73 PSI	MINIMO 73 PSI
RGL	0 A INFINITO	0 A INFINITO
VEL.DE ROTACION (RPM)	2500 A 6600 (LIQ A GAS)	2500 A 6600 (LIQ A GAS)
EFIC.HIDRAULICA	42 %	45 %
POT.TOT.EN FLECHA	ARRIBA DE 2 MW	ARRIBA DE 3 MW
PRESION MAX. ESTAT. EN LA BOMBA.	5080 PSI	5080 PSI

TABLA No. 2.- DIMENSIONES Y ESPECIFICACIONES DE LAS BOMBAS MULTIFASICAS DE TORNILLO GEMELO.

TIPO DE BOMBA	DIMENSIONES (mm)									PESO PATIN DE LA BOMBA INCLUIDO MOTOR.(Kg)	PESO PATIN DE SERV. (Kg)	DIAM.NOM. (Pg)		VEL. MAX. (RPM)	POTENCIA REQUERIDA MOTOR (Kw)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I			SUCC.	DESC.		
	MP5	3500	1100	2000	1500	1390	1000	305	748			900	4800		
MP10	4600	1100	2500	2000	15000	1400	381	860	1000	5800	2500	8	6	3600	150
MP20	5200	1350	2500	2000	2270	1550	381	1300	1400	8500	2500	8	8	3600	545
MP40	6632	1440	3000	2500	2320	1700	432	1231	1500	10500	3200	10	10	3600	545
MP100	6500	1600	4000	4000	2830	2000	533	1560	1880	18000	4000	14	14	3000	1600
MP200	8000	2100	4000	4000	3450	2350	610	1850	2260	30000	4000	16	16	2000	2400

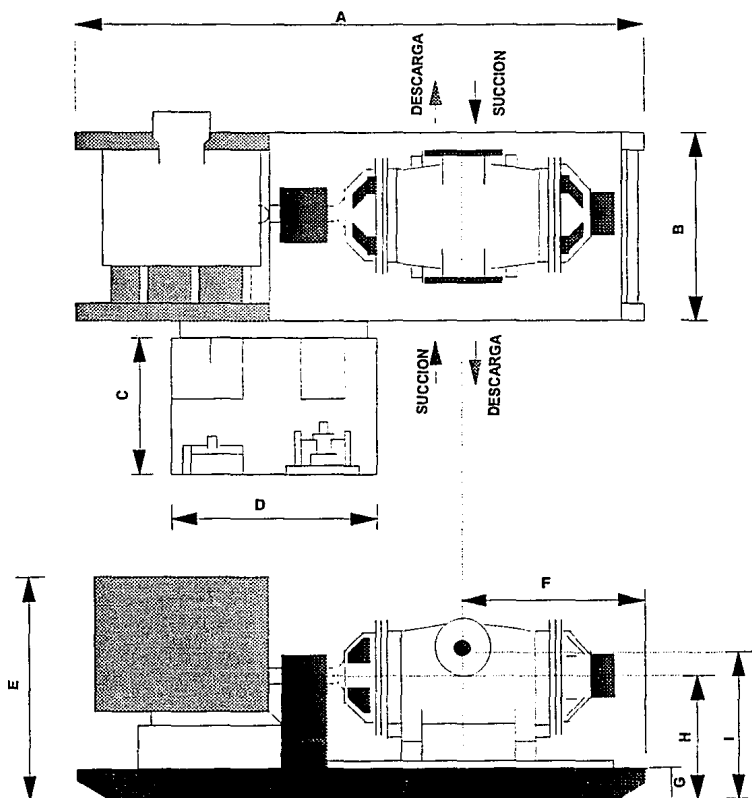


TABLA No. 3: RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMATICO PARA BOMBAS MULTIFASICAS
COMPARACION DE RESULTADOS CALCULADOS CON REPORTADOS POR LA LITERATURA

D A T O S	UNIDADES	EJEMPLO-1 (LITERATURA)	EJEMPLO-1 (CALCULADO)	EJEMPLO-2 (LITERATURA)	EJEMPLO-2 (CALCULADO)	EJEMPLO-3 (LITERATURA)	EJEMPLO-3 (CALCULADO)
PRESION DE SUCCION	(PSIG)	113.6	113.6	113.6	113.6	200.0	200.0
PRESION DE DESCARGA	(PSIG)	212.0	212.0	212.0	212.0	550.0	550.0
TEMPERATURA	(oF)	140.0	140.0	158.0	158.0	140.0	140.0
GASTO DE GAS	(MMP ³ /D)	25.0	25.0	35.0	35.0	7.3	7.3
GASTO DE AGUA	(BPD)	1155.0	1155.0	1890.0	1890.0	1900.0	1900.0
GASTO DE ACEITE	(BPD)	55000.0	55000.0	90000.0	90000.0	7000.0	7000.0

RESULTADOS

CAIDA DE PRESION	(BAR)	6.80	6.78	6.80	6.78	24.12	24.11
	(PSIG)	98.69	98.31	98.69	98.31	350.07	349.67
POR CIENTO DE ERROR	%		-0.39		-0.39		-0.11
TEMPERATURA	(oK)	333.15	333.15	343.15	343.15	333.15	333.15
GASTO DE GAS @ A COND. SUCC.	(M ³ /HR)	3,899	3,908	5,623	5,636	678	678
POR CIENTO DE ERROR	%		0.24		0.24		0.00
GASTO DE LIQUIDO	(M ³ /HR)	372.30	372.31	609.20	609.23	59.00	59.01
POR CIENTO DE ERROR	%		0.00		0.00		0.02
VOLUMEN TOTAL MANEJADO	(M ³ /HR)	4,271.50	4,280.70	6,231.90	6,245.23	737.30	737.26
POR LA BOMBA	(BPD)	644,782.93	646,172.03	940,705.31	942,716.91	111,295.44	111,289.70
POR CIENTO DE ERROR	(%)		0.22		0.21		-0.01
F.G.V.	(%)	91.28	91.30	90.22	90.24	92.00	92.00
POR CIENTO DE ERROR	(%)		0.02		0.02		0.00
R.G.L.	(P ³ /BL)	58.79	58.94	51.83	51.94	64.52	65.54
POR CIENTO DE ERROR	%		0.26		0.21		1.58

TABLA No. 4-3124: PRODUCCION MENSUAL POR CAMPO

NOVIEMBRE DE 1992

DISTRITO: AGUA DULCE

BATERIA: 3124

T_a = 29 °C.

POZO No.	C.R.:SIST.	ACEITE BRUTO			ACEITE NETO			AGUA		GAS DE FORMACION.			GAS INYECTADO			GAS TOTAL MANEJADO			R.G.A.		R.G.L.		DIAS	
		[M ³]	[M ³ /D]	[BPD]	[M ³]	[M ³ /D]	[BPD]	[M ³]	[M]	[M ³ /D]	[MOPCD]	[M ³]	[M ³ /D]	[MOPCD]	[M ³]	[M ³ /D]	[MOPCD]	[M ³ /M ³]	[P ³ /BL]	[M ³ /M ³]	[P ³ /BL]	[OPPD]		
1 147	3124	P.H.	182.7	5.1	18.3	138.4	4.6	29.0	44.3	24.2	29410	970.3	0.3343	278966	6965.3	0.2345	23675	735.	0.2852	210.3	1181.0	1353.1	3316.7	30
2 148	3124	P.H.	674.5	22.5	141.4	222.3	7.4	46.6	452.2	67.6	52390	1746.3	0.7617	201156	6705.3	0.2368	253556	8461.7	0.2895	235.7	1323.3	375.9	2115.7	30
3 149	3124	FL.	251.7	8.5	53.2	86.1	2.9	18.1	147.6	66.1	124740	4158.9	0.1468	0	0.0	0.2866	124740	4158.0	0.1468	1448.8	8134.9	491.7	2765.8	30
4 201	3124	P.H.	361.7	12.1	75.3	246.4	8.2	51.7	117.3	32.1	65870	2195.7	0.7775	243450	8115.6	0.2864	309420	10310.7	0.1641	267.3	1501.1	850.5	4775.5	30
5 2 2	3124	P.H.	33.7	4.2	26.5	33.7	4.2	26.5	7.0	5.3	4663	582.5	0.2226	34870	4638.8	0.1628	41510	5191.3	0.1933	138.3	776.4	1232.3	6919.5	8
6 2 5	3124	P.H.	124.5	4.2	26.2	123.2	4.1	25.8	1.4	1.3	22460	748.7	0.2264	122170	4372.3	0.1438	144490	4821.7	0.1773	182.3	1623.6	1159.9	6557.2	30
7 213	3124	P.H.	225.6	7.4	46.3	165.0	5.3	33.5	61.4	27.5	66990	2233.0	0.6769	263740	8791.3	0.3105	330730	11324.1	0.1493	418.7	2350.0	1489.2	8418.2	30
8 212-C	3124	P.H.	215.0	7.2	45.1	74.0	2.5	15.5	141.0	65.6	49890	1663.0	0.2587	225220	7507.3	0.2651	275110	9176.1	0.3239	674.2	3785.6	1279.6	7184.8	30
9 235	3124	P.H.	279.3	9.3	58.6	66.2	2.2	13.9	213.1	75.3	26400	880.0	0.0311	218580	7286.0	0.2573	244980	8166.0	0.2884	398.8	2239.2	877.1	4925.0	30
10 236	3124	P.H.	106.6	3.6	22.4	96.7	3.2	20.3	9.9	9.3	24610	829.3	0.2296	166220	5540.7	0.1957	188820	6361.0	0.2246	254.5	1429.0	1790.2	10951.7	30
11 238	3124	P.H.	154.7	3.5	22.0	99.0	3.3	26.8	5.7	5.4	24820	827.3	0.2282	142490	4749.7	0.1677	167310	5571.0	0.1970	250.7	1407.7	1598.0	8972.7	30
12 239	3124	P.H.	137.6	11.3	70.8	131.0	11.0	69.4	4.0	2.0	18210	607.0	0.0214	95450	3181.7	0.1124	113660	3788.7	0.1338	55.0	308.9	336.7	1894.9	30
13 259-D	3124	P.H.	695.9	23.2	145.9	664.5	22.2	139.3	31.3	4.5	52910	1763.7	0.0623	326860	10895.3	0.3848	378770	12659.0	0.4471	79.6	447.1	545.8	3964.7	30
14 286	3124	P.H.	130.7	4.4	27.4	123.1	4.1	25.8	7.6	5.8	36690	1023.0	0.3361	160970	5669.0	0.2092	200760	6629.0	0.2363	249.3	1398.9	1536.0	8624.8	30
15 321	3124	P.H.	425.8	14.2	89.3	418.2	13.9	87.7	7.6	1.8	56090	1869.3	0.0666	287390	9913.0	0.3501	353470	11762.3	0.4161	134.1	751.0	890.1	4661.2	30
16 373	3124	FL.	1432.3	47.7	300.3	1341.1	6.5	40.7	1230.2	86.4	98410	3280.3	0.1158	0	0.0	0.0000	98410	3280.3	0.1158	507.0	2846.8	68.7	385.8	30
TOTALES POR BATERIA:			5581.5	182.1	1189.7	3078.9	105.7	684.6	2594.6	44.2	748240	25348.5	0.8959	2718630	94901.0	0.3196	3466870	119160.0	0.2355	243.2	1385.5	621.1	1487.7	

TABLA No. 5.- RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMATICO PARA BOMBAS MULTIFASICAS

DISTRITO: AGUA DULCE.

CAMPO: MAGALLANES

D A T O S	UNIDADES	MAGALLANES	CR-3120	CR-3121	CR-3122	CR-3123	CR-3124
PRESION DE SUCCION	(PSIG).	36.64	44.02	34.08	35.5	35.5	34.08
PRESION DE DESCARGA	(PSIG).	281.16	298.2	269.8	284.0	298.2	255.6
TEMPERATURA	(oF).	84.2	84.2	84.2	84.2	84.2	84.2
GASTO DE GAS	(MMP ³ /D)	23.3517	7.2996	3.1778	3.9431	4.7157	4.2155
GASTO DE AGUA	(BPD).	4007.9	186.9	1477.4	996.6	821.8	526.1
GASTO DE ACEITE	(BPD).	6232.2	1923.7	1521.2	1196.7	926.2	664.6

RESULTADOS

CAIDA DE PRESION	(BAR)	16.85	17.51	16.24	17.12	18.10	15.26
	(PSIG)	244.29	253.94	235.50	248.26	262.45	221.31
TEMPERATURA	(oK)	302.15	302.15	302.15	302.15	302.15	302.15
GASTO DE GAS @ cond. ent.	(M ³ /HR)	8274.05	2261.37	1185.06	1428.86	1708.82	1572.03
GASTO DE LIQUIDO	(M ³ /HR)	67.89	13.99	19.88	14.54	11.59	7.89
VOLUMEN TOTAL MANEJADO POR LA BOMBA	(M ³ /HR)	8341.94	2275.36	1204.94	1443.40	1720.41	1579.93
	(BPD)	1259215.64	343465.57	181885.25	217881.10	259696.36	238489.97
F.G.V.	(%)	99.19	99.39	98.35	98.99	99.33	99.50
R.G.L.	(P ³ /BL)	684.31	907.41	334.70	551.73	827.93	1118.14
BOMBA SELECCIONADA	El gasto es demasiado grande, la bomba de mayor capacidad es la MP-200 con un gasto entre 103,000 y 290,000 BPD.			MP-200	MP-200	MP-200	MP-200
Qmax QUE PUEDE MANEJAR LA BOMBA EN BASE A LA DELTA P	(M ³ /HR)	1737.64	1730.04	1744.56	1734.51	1723.34	1755.73
	(BPD)	262296.62	261149.60	263341.42	261824.73	260138.08	265028.07
DELTA P DE ACUERDO AL GASTO Y TIPO DE BOMBA	BAR	Gasto mayor del que puede manejar la bomba.		35.00	28.00	18.34	28.00
	PSIG			508.00	406.39	265.92	406.39

TABLA No. 6.- RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMATICO PARA BOMBAS MULTIFASICAS.

DISTRITO: AGUA DULCE.

CAMPO: MAGALLANES

D A T O S	UNIDADES	MAGALLANES	CR-3120	CR-3121	CR-3122	CR-3123	CR-3124
PRESION DE SUCCION	(PSIG.)	36.64	44.02	34.08	35.50	35.50	34.08
PRESION DE DESCARGA	(PSIG.)	281.16	298.20	269.80	284.00	298.20	255.6
TEMPERATURA	(oF)	84.2	84.2	84.2	84.2	84.2	84.2
GASTO DE GAS	(MMP ³ /D)	23.3517	7.2996	3.1778	3.9431	4.7157	4.2155
GASTO DE AGUA	(BPD)	4007.9	186.9	1477.4	996.6	821.8	526.1
GASTO DE ACEITE	(BPD)	6232.2	1923.7	1521.2	1196.7	926.2	664.6

R E S U L T A D O S

CAIDA DE PRESION	(BAR)	16.85	17.51	16.24	17.12	18.10	15.26
	(PSIG)	244.29	253.94	235.50	248.26	262.45	221.31
TEMPERATURA	(oK)	302.15	302.15	302.15	302.15	302.15	302.15
GASTO DE GAS @ cond. ent.	(M ³ /HR)	1654.81	1130.68	1185.06	1428.86	1708.82	1572.03
GASTO DE LIQUIDO	(M ³ /HR)	13.58	7.00	19.88	14.54	11.59	7.89
VOLUMEN TOTAL MANEJADO	(M ³ /HR)	1668.39	1137.68	1204.94	1443.40	1720.41	1579.93
POR LA BOMBA	(BPD)	251843.13	171732.79	181885.25	217881.10	259696.36	238489.97
F.G.V.	(%)	99.19	99.39	98.35	98.99	99.33	99.50
R.G.L.	(P ³ /BL)	684.31	907.41	334.70	551.73	827.93	1118.14
BOMBA SELECCIONADA Y CANT.		5 MP-200	2 MP-200	1 MP-200	1 MP-200	1 MP-200	1 MP-200
Q max. DE LIQUIDO Y GAS	GAS	1723.57	1719.49	1715.77	1716.99	1711.79	1746.95
QUE PUEDE MANEJAR LA BOMBA	LIQUIDO	14.07	10.55	28.79	17.52	11.55	8.78
DE ACUERDO A LA DELTA_P	TOTAL	1737.64	1730.04	1744.56	1734.51	1723.34	1755.73
Y RGL DADAS. (M ³ /HR).	BAR	22.89	35.00	35.00	28.00	18.34	28.00
DELTA_P DE ACUERDO AL GASTO	PSIG	331.92	508.00	508.00	406.39	285.92	406.39
Y AL TIPO DE BOMBA.							

**TABLA No. 7.- TABLA RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON
EL MODELO MATEMATICO PARA EL CALCULO DE CAPACIDADES EN BOMBAS MULTIFASICAS.**

BATERIA	UNIDADES	3120	3121	3122	3123	3124	MAGALL.
GASTO DE ACEITE	[M ³ /HR]	12.754	10.086	7.934	6.141	4.406	41.321
	BPD	1923.7	1521.2	1196.7	926.2	664.6	6232.4
GASTO DE AGUA	[M ³ /HR]	1.239	9.795	6.607	5.449	3.488	26.572
	BPD	186.9	1477.4	996.6	821.8	526.1	4007.9
GASTO DE GAS	[M ³ /HR]	8613.5	3749.8	4652.9	5564.5	4974.3	27555.0
	[P ³ /DIA]	7299600	3177800	3943100	4715700	4215500	23351700
PRESION DE SUCCION	[PSIG]	44.02	37.08	35.50	35.50	34.08	36.64
PRESION DE DESCARGA	[PSIG]	298.20	269.80	284.00	298.20	255.60	281.16
CAIDA DE PRESION	[PSIG]	253.94	235.50	248.26	262.45	221.31	244.29
GASTO DE GAS A COND. DE ENTRADA DE LA BOMBA	[M ³ /HR]	1130.68	1185.06	1428.86	1708.82	1572.03	1654.81
	[P ³ /DIA]	958307.83	1004397.60	1211030.29	1448310.39	1332374.03	1402534.22
VOLUMEN TOTAL MANEJADO POR LA BOMBA	[M ³ /HR]	1137.68	1204.94	1443.40	1720.41	1579.93	1668.39
	BPD	171732.7	181885.6	217881.2	259695.8	238490.4	251843.4
FRACCION EN VOLUMEN DE GAS	[%]	99.39	98.35	98.99	99.33	99.50	99.19
RELACION GAS/LIQUIDO	[P ³ /BL]	907.41	334.70	551.73	827.93	1118.14	684.31
Q _{max} . POR BOMBA DE ACUERDO A LA CAIDA DE PRESION CALC.	[M ³ /HR]	1730.04	1744.56	1734.51	1723.51	1755.73	1737.64
	BPD	261149.54	263341.332	261824.285	260163.835	265027.444	262296.758
CAIDA DE PRESION DE ACUERDO AL TIPO DE BOMBA	[PSIG]	508.00	508.00	406.39	265.92	406.39	331.92
CANTIDAD Y TIPO DE BOMBA		2 MP-200	1 MP-200	1 MP-200	1 MP-200	1 MP-200	5 MP-200

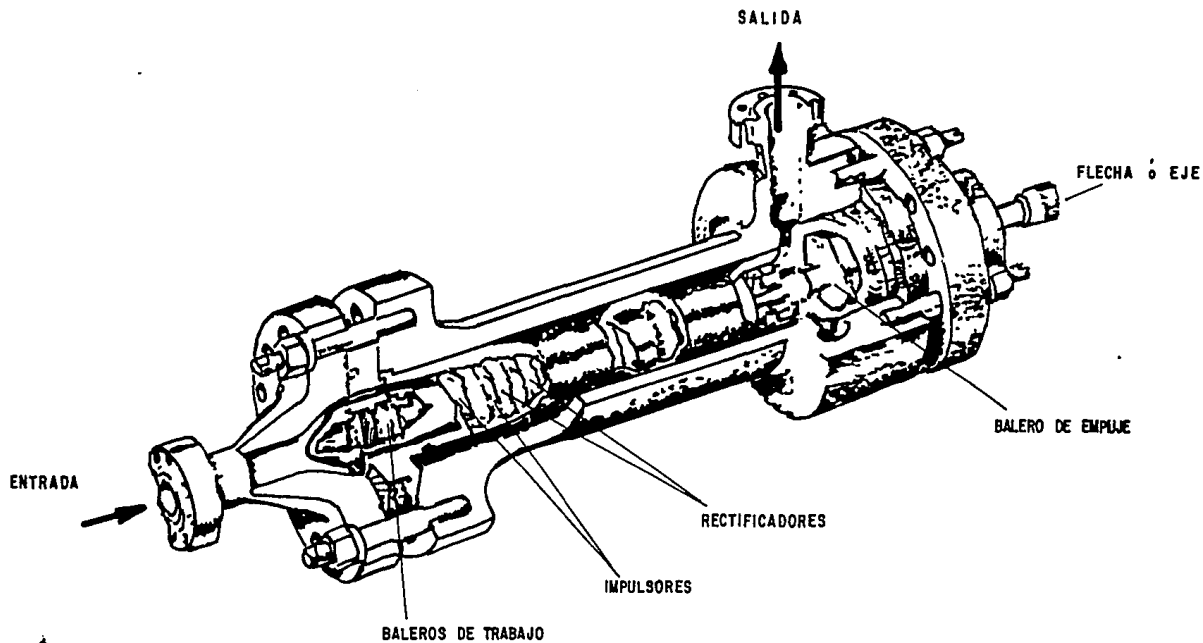


FIG. 1.- BOMBA MULTIFASICA POSEIDON.

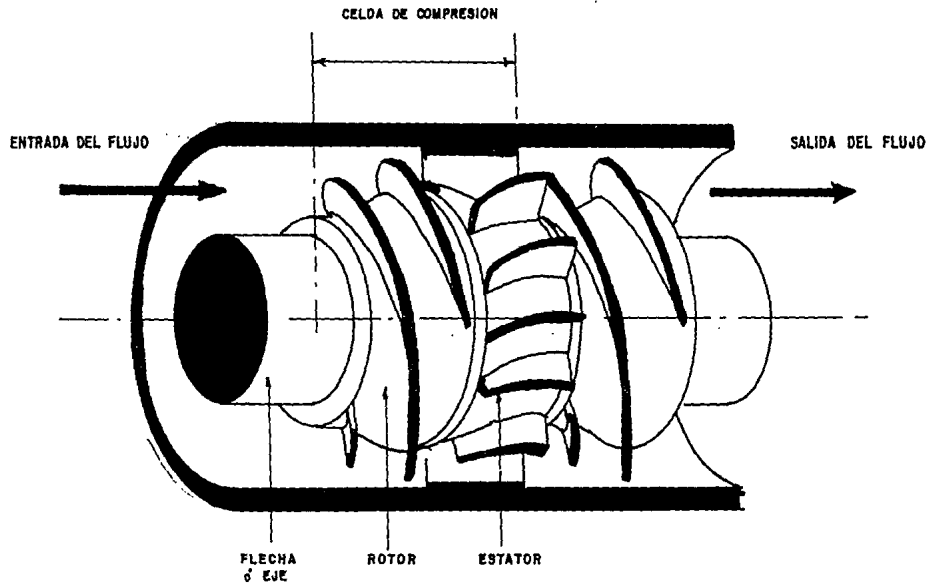


FIG. 2- CELDAS DE COMPRESION HELICOAXIAL

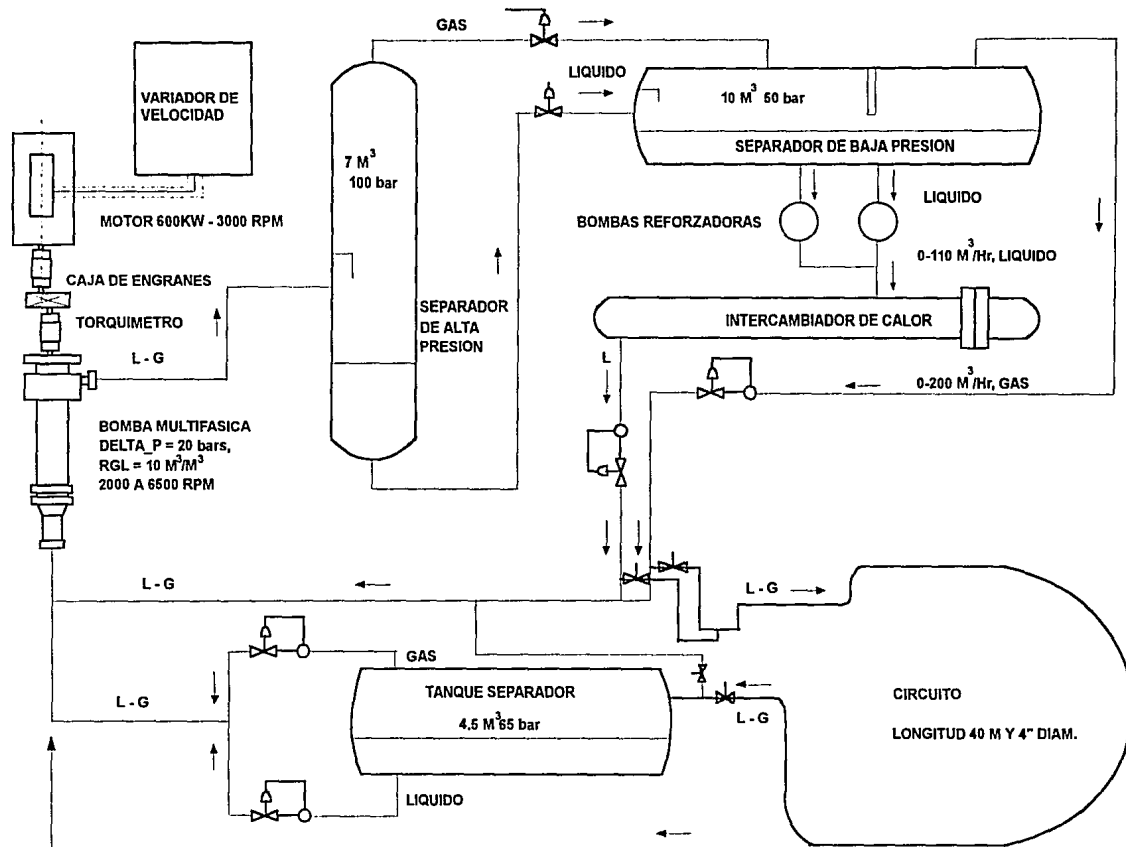


FIGURA 3 .- CIRCUITO DE PRUEBAS MULTIFASICAS EN SOLAIZE (IFP)

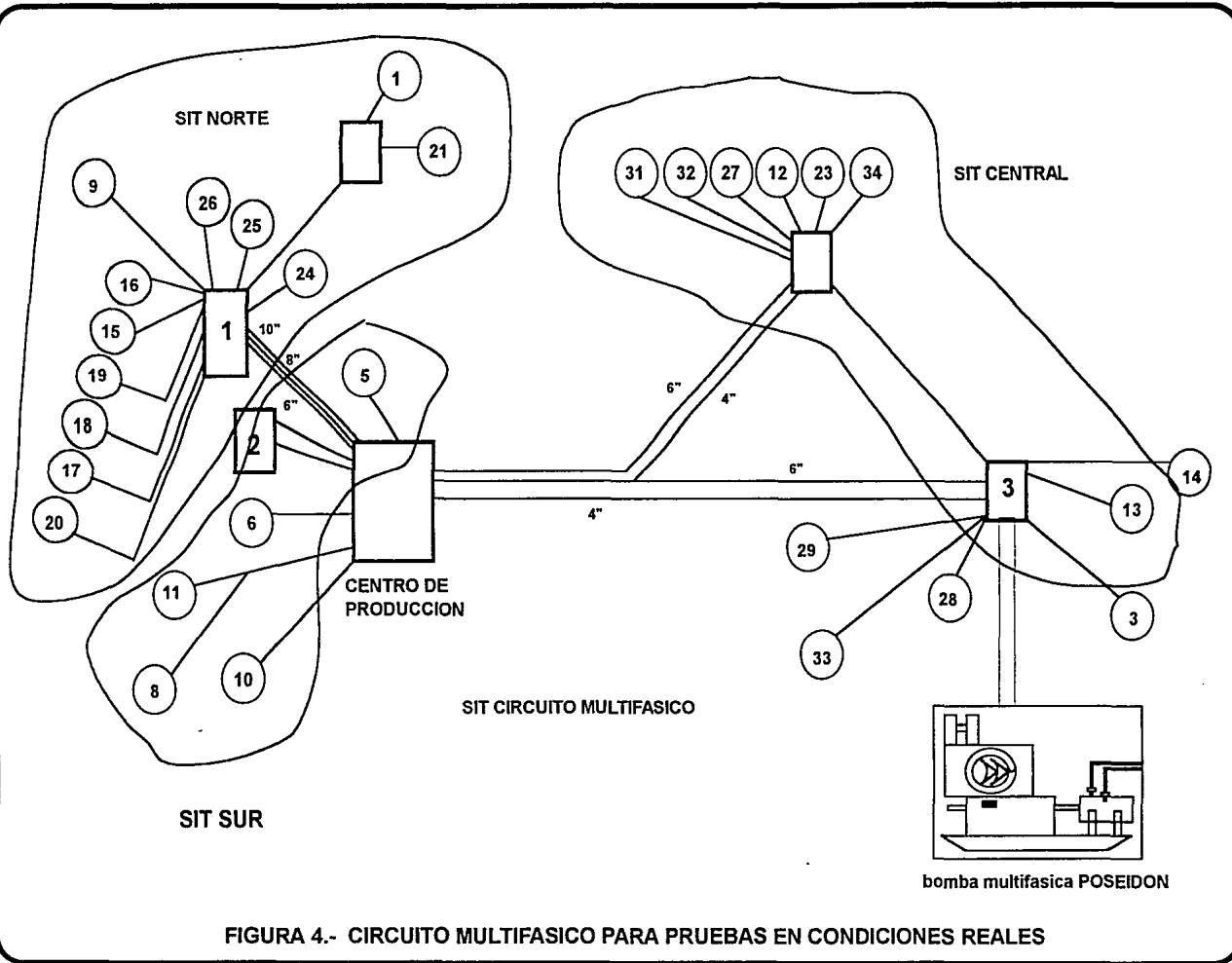
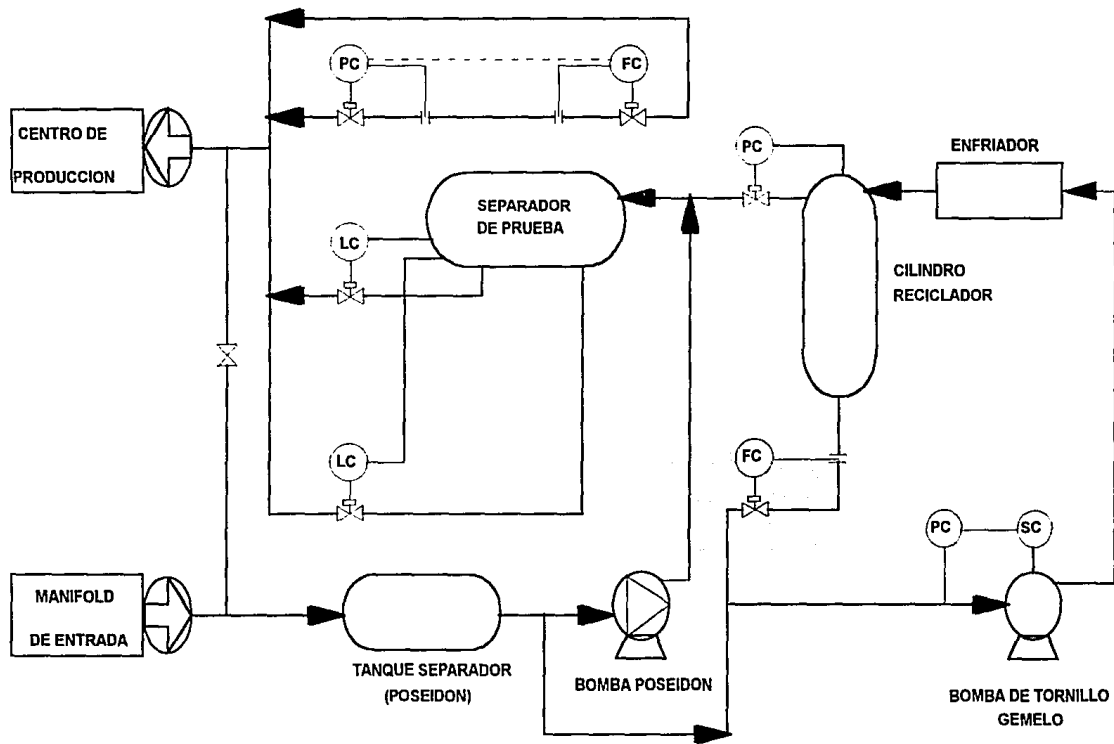


FIGURA 4.- CIRCUITO MULTIFASICO PARA PRUEBAS EN CONDICIONES REALES



**FIGURA No.5: ESQUEMA DEL PROCESO DE FLUJO DEL CIRCUITO DE PRUEBA EN SOLAIZE
(LABORATORIO DEL INSTITUTO FRANCES DEL PETROLEO)**

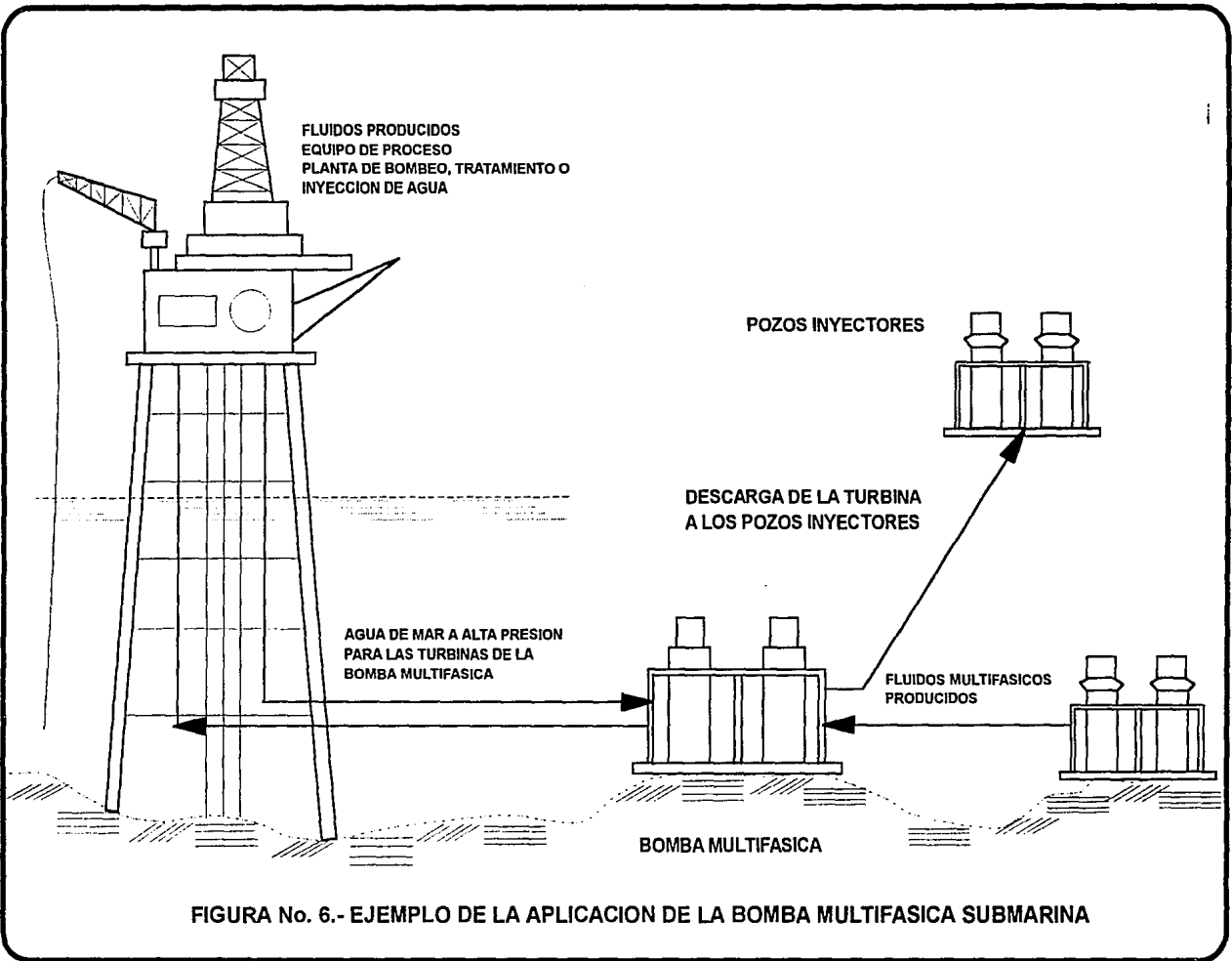


FIGURA No. 6.- EJEMPLO DE LA APLICACION DE LA BOMBA MULTIFASICA SUBMARINA

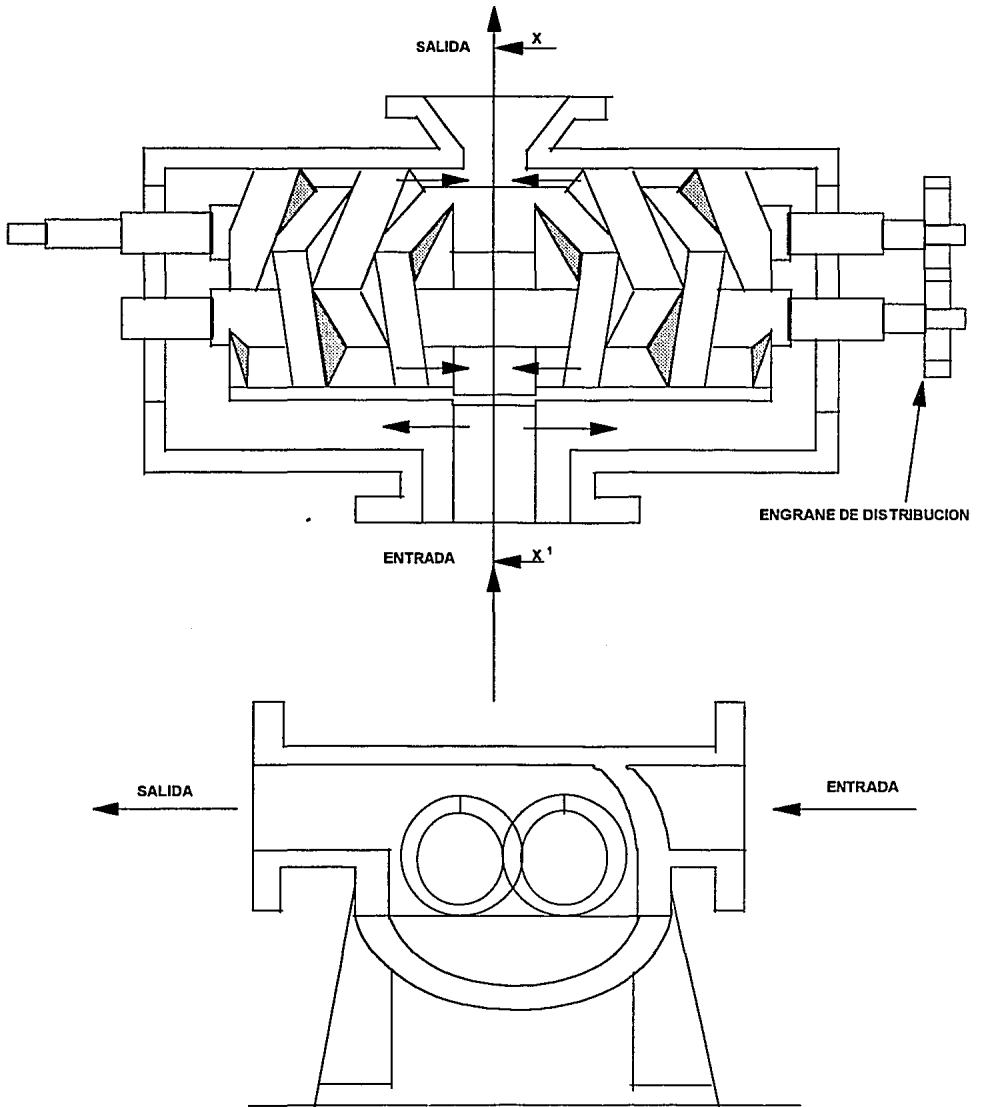


FIGURA No. 7.- BOMBA MULTIFASICA DE TORNILLO GEMELO
(MULTIPHASE SYSTEMS)

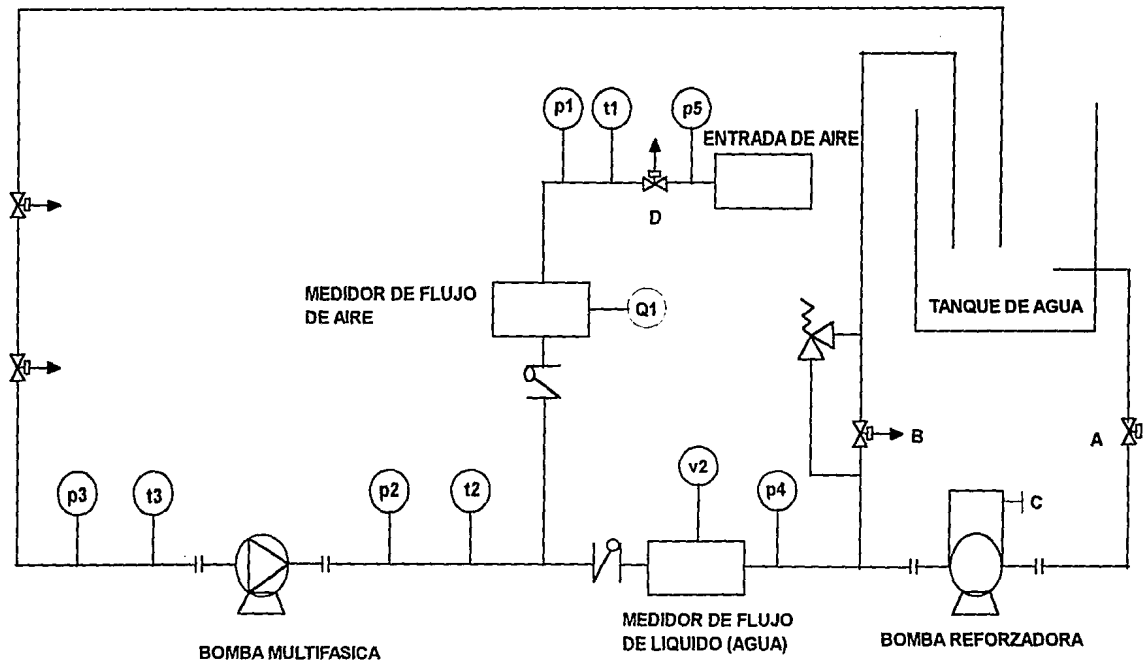


FIGURA No. 8: CIRCUITO DE PRUEBA PARA BOMBAS MULTIFASICAS DE TORNILLO GEMELO (MULTIPHASE SYSTEMS)

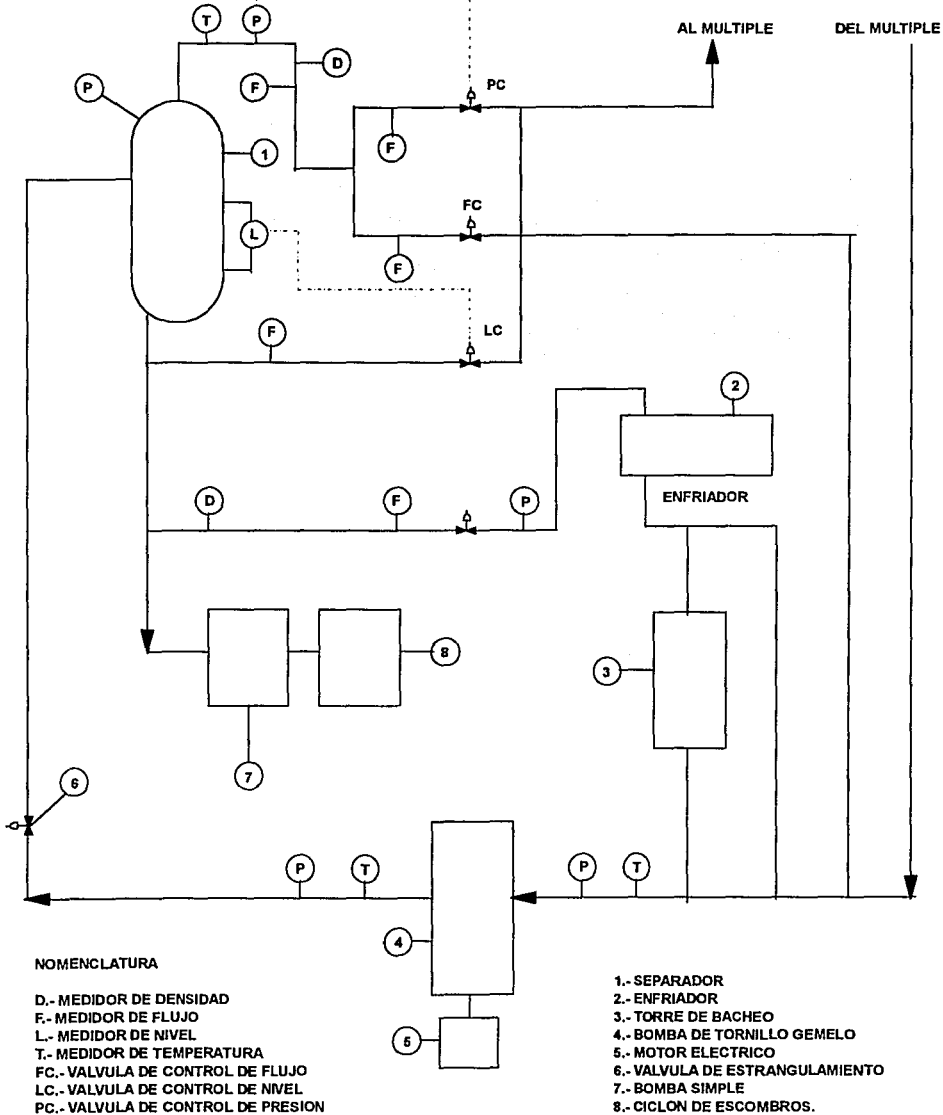
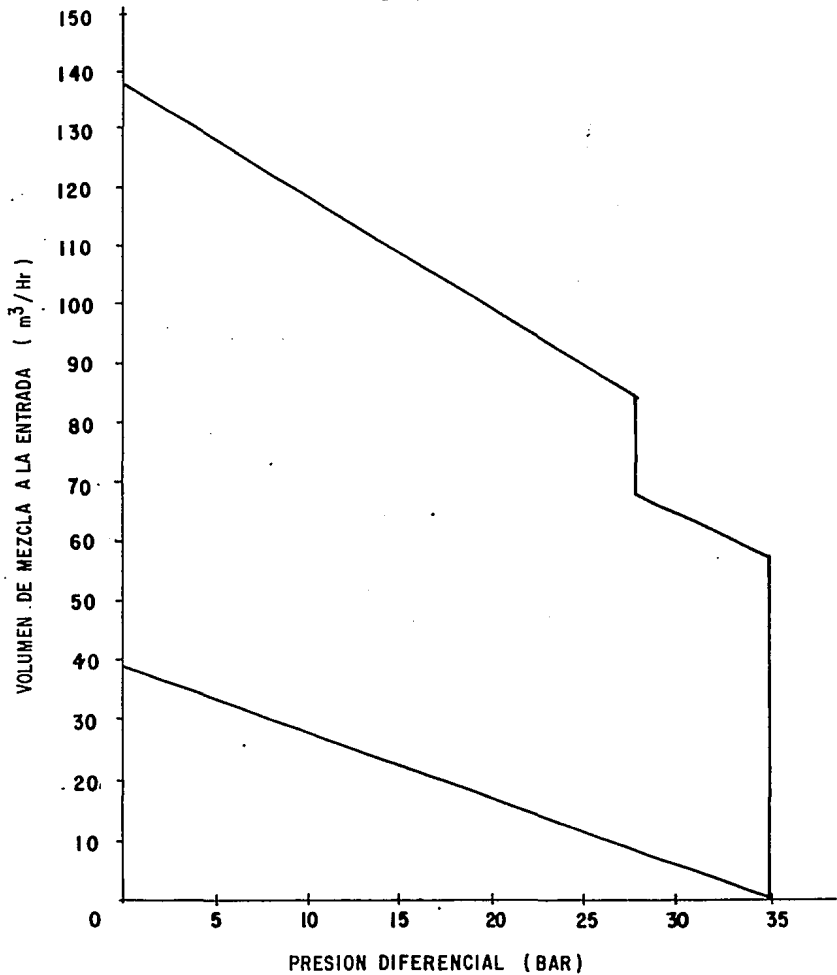


FIGURA No. 9.- CIRCUITO DE PRUEBA - BOMBA DE TORNILLO GEMELO

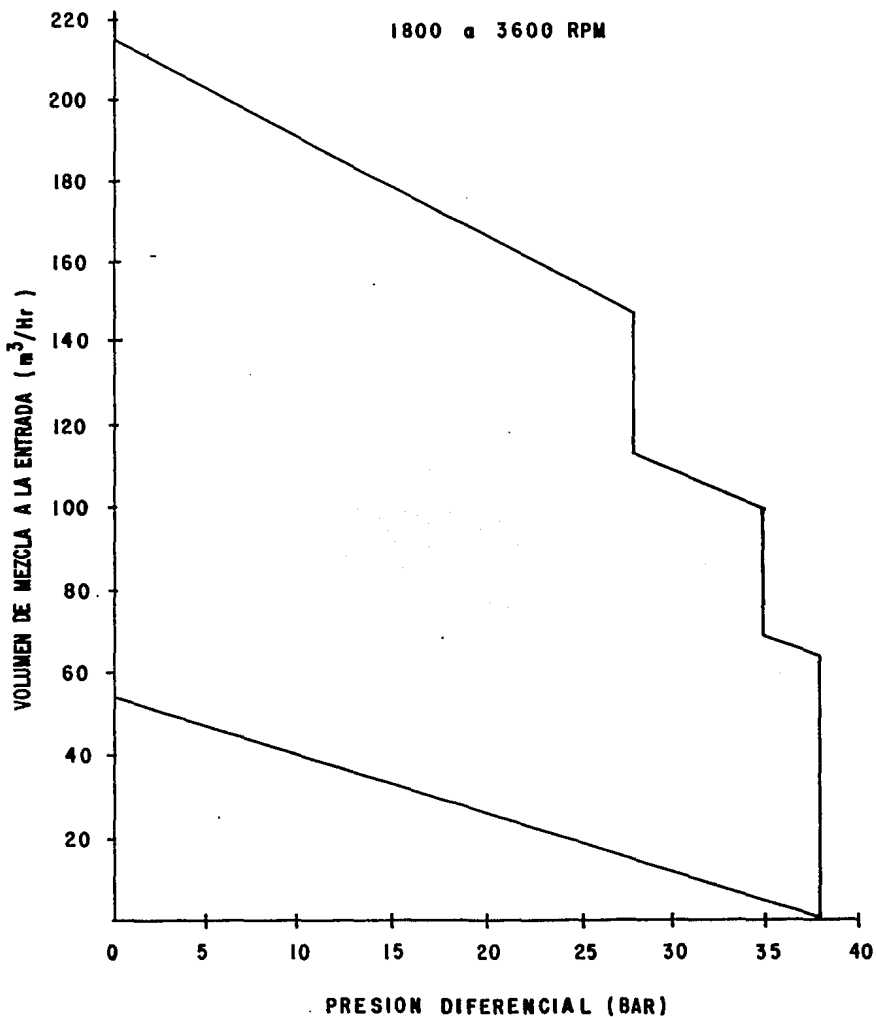
10-A- GRAFICA DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA
MULTIFASICA MP-5

2000 a 3600 RPM



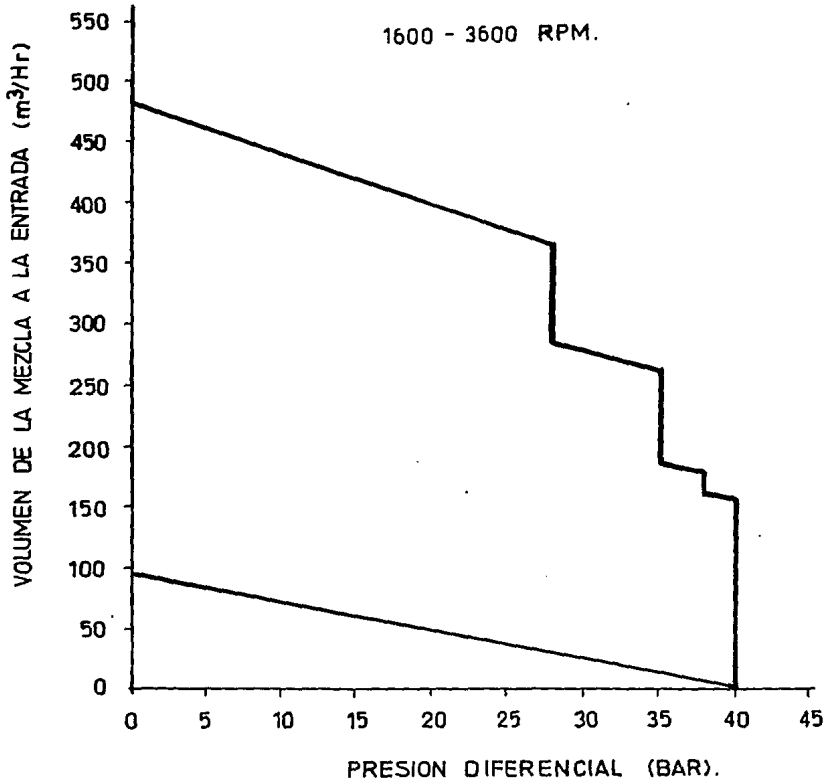
**10-B: GRAFICA DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA
MULTIFASICA MP-10.**

1800 a 3600 RPM



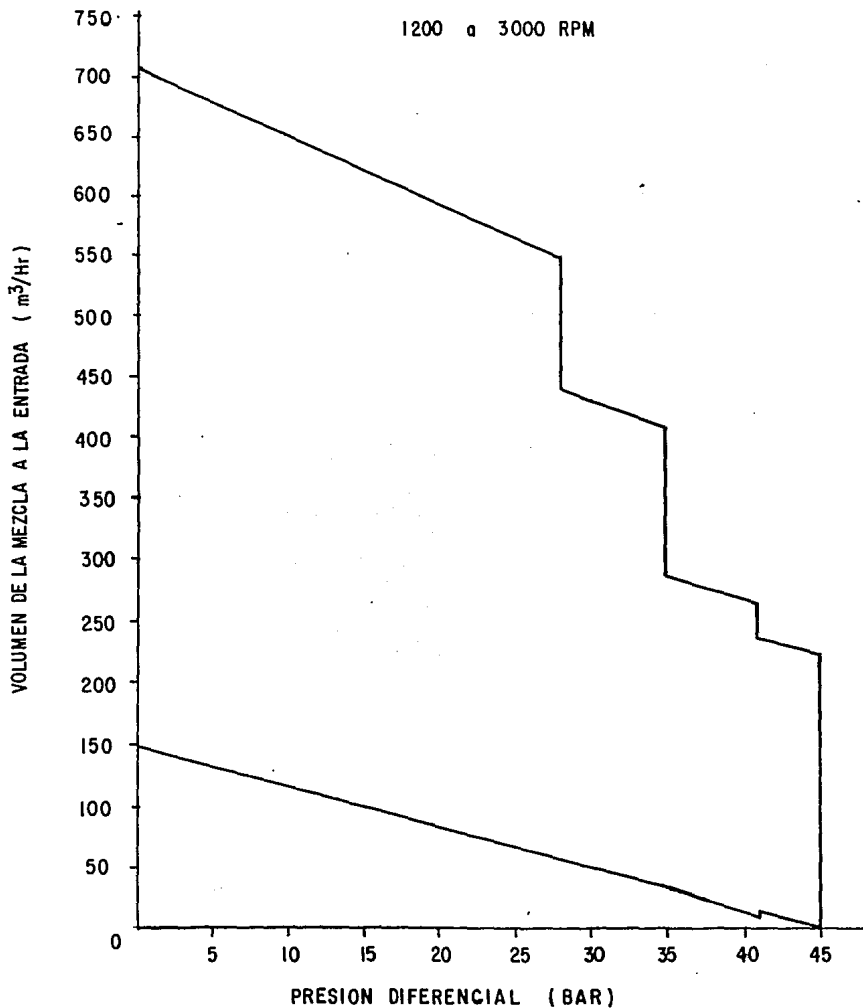
10-C: GRAFICA DE COMPORTAMIENTO DE
LA BOMBA MULTIFASICA MP-20

1600 - 3600 RPM.



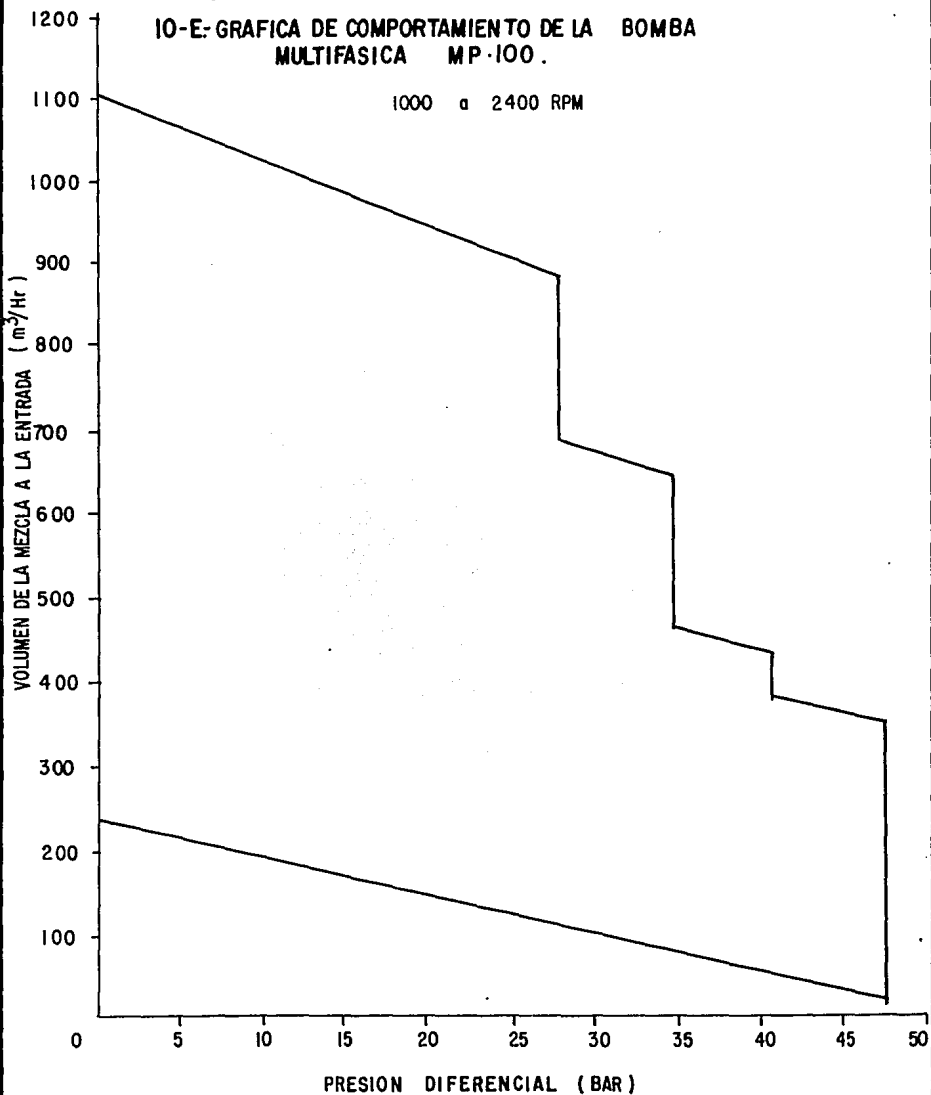
10-D- GRAFICA DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA MULTIFASICA MP-40

1200 a 3000 RPM



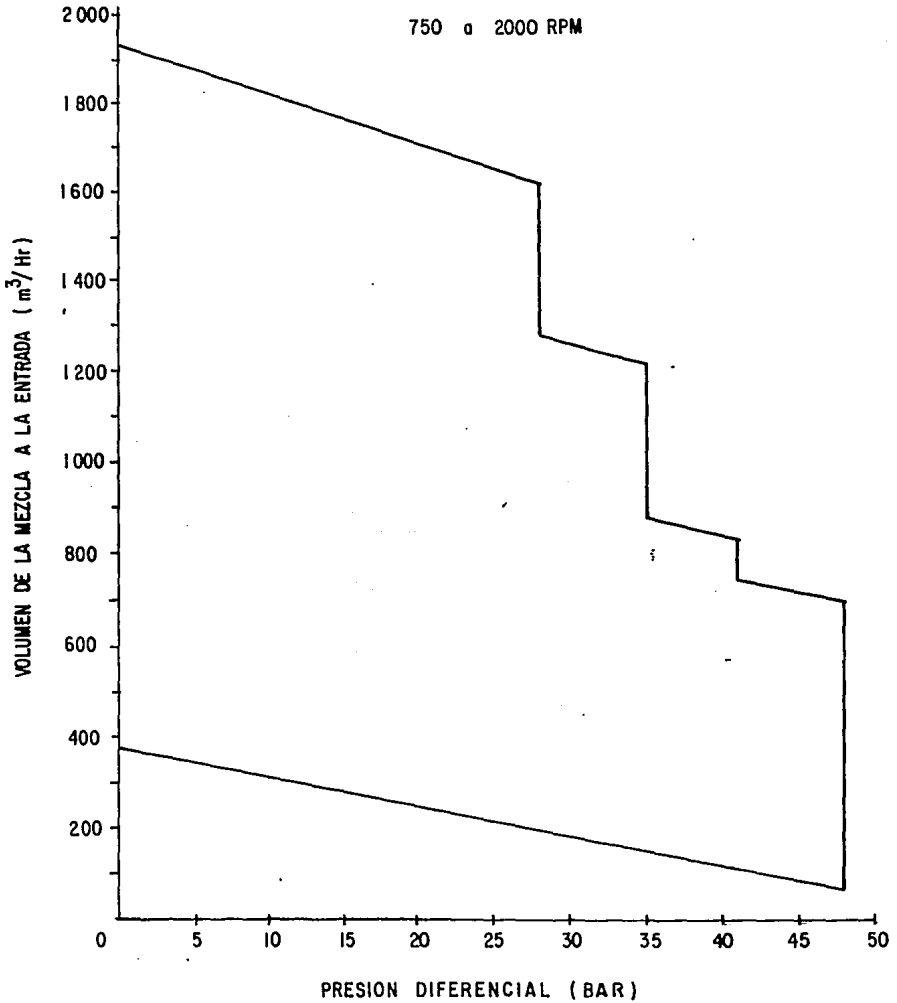
10-E- GRAFICA DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA
MULTIFASICA MP-100.

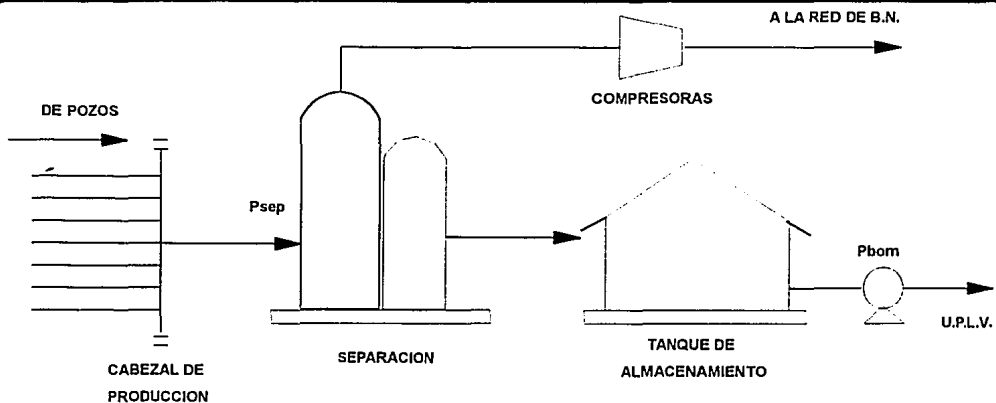
1000 a 2400 RPM



10-F: GRAFICA DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA
MULTIFASICA MP-200

750 a 2000 RPM





BATERIA	PRESION DE SEP.		PRESION DE BOMBEO	
	KG/CM ²	PSI	KG/CM ²	PSI
3120	3.1	44.02	21.0	298.20
3121	2.4	34.08	19.0	269.80
3122	2.5	35.50	20.0	284.00
3123	2.5	35.50	24.0	298.20
3124	2.4	34.08	18.0	255.60
MAGALLANES		36.64		281.16

FIG.11.- INSTALACION ACTUAL EN BATERIAS CAMPO MAGALLANES

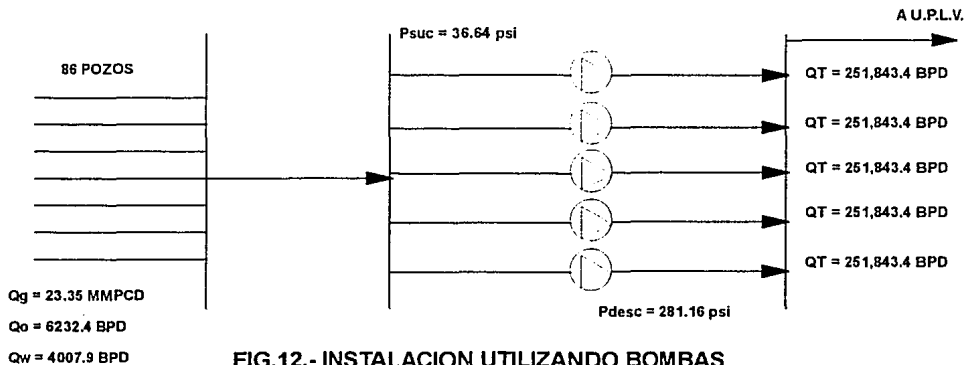


FIG.12.- INSTALACION UTILIZANDO BOMBAS MULTIFASICAS. CAMPO MAGALLANES.

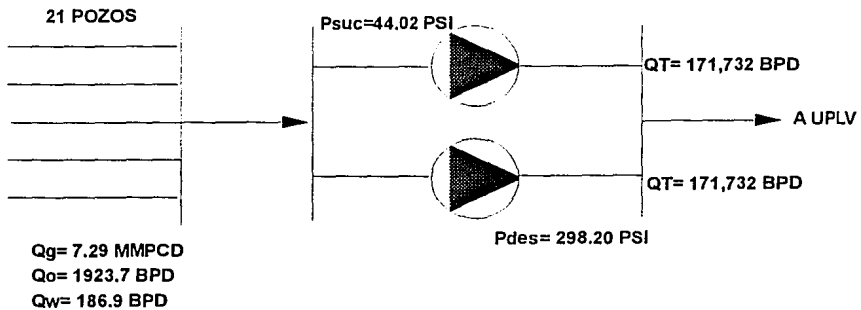


FIG. 12 a.- BOMBAS MULTIFASICAS MP-200
BATERIA 3120

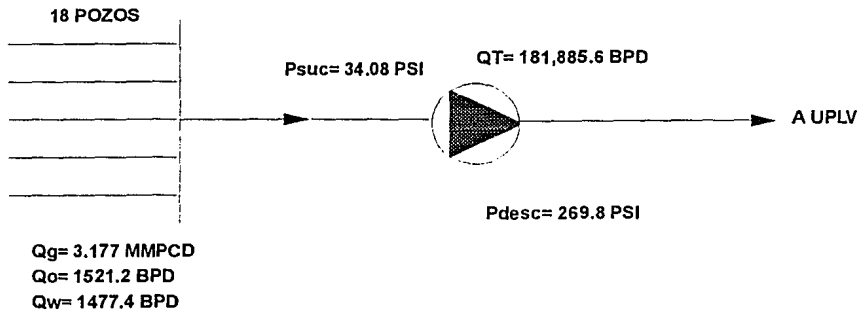


FIG. 12 b.- BOMBA MULTIFASICA MP-200
BATERIA 3121

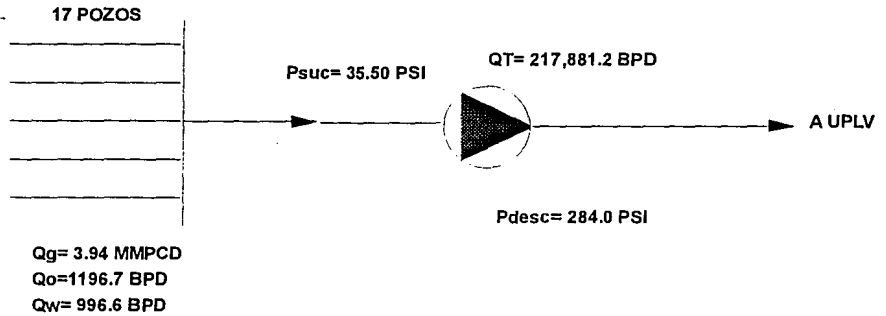


FIG. 12 c.- BOMBA MULTIFASICA MP-200
BATERIA 3122

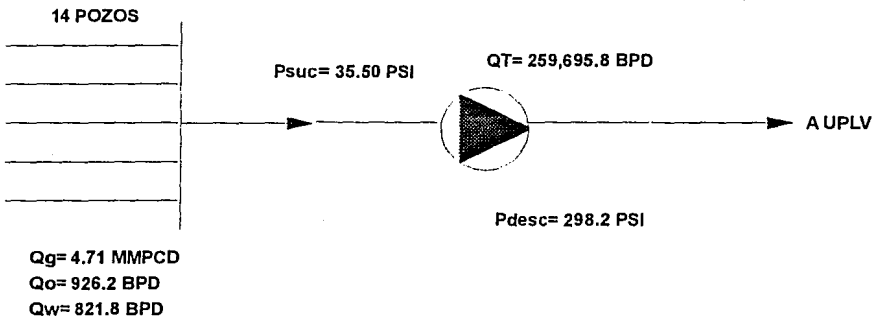


FIG. 12 d.- BOMBA MULTIFASICA MP-200
BATERIA 3123

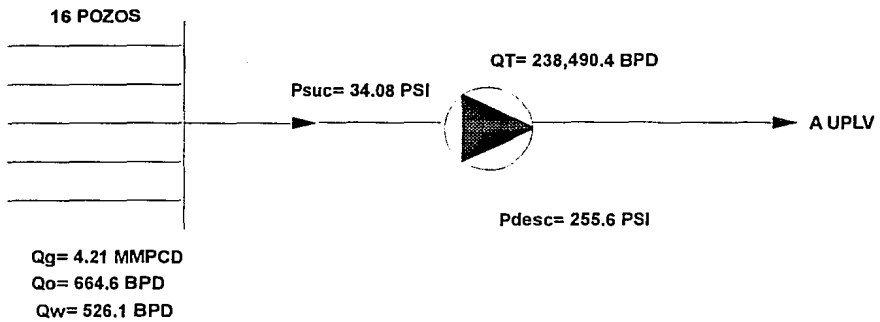


FIG. 12 e.- BOMBA MULTIFASICA MP-200

BATERIA 3124

90% FGV = 9:1 RGL

95% = 19:1 RGL

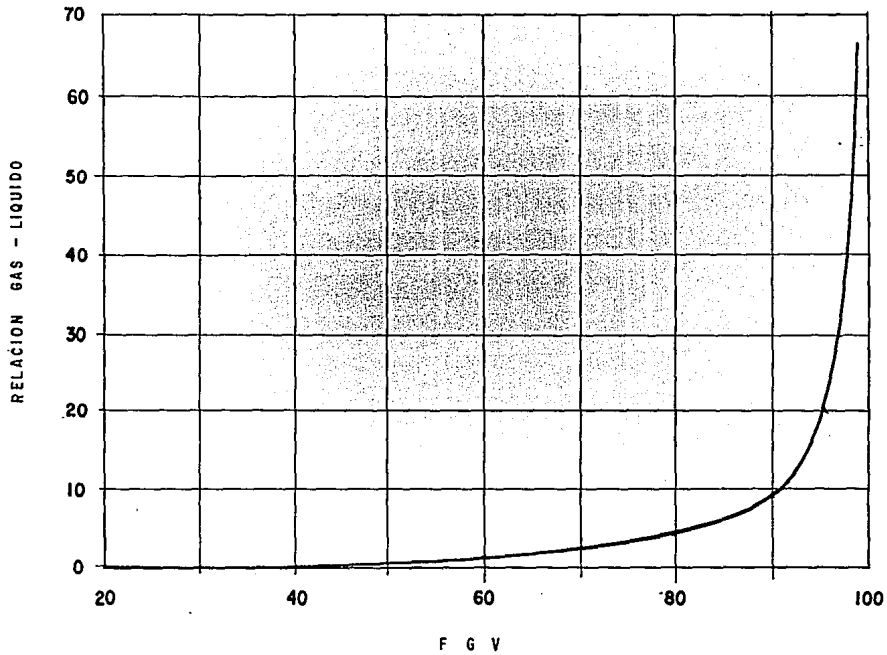


FIG. 13 .- FRACCION DE GAS EN VOLUMEN VS. RELACION GAS LIQUIDO.