



32  
24  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIAGNOSTICO A POZOS DE BOMBEO MECANICO  
POR MEDIO DEL USO DE CARTAS  
DINAMOMETRICAS

TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A :  
MARCO ANTONIO MARTINEZ CASTAÑEDA

TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

FEBRERO 1990



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.

## INDICE

I	INTRODUCCION .....	1
II	GENERALIDADES .....	3
	Tipos de sistemas artificiales de producción .....	3
	Bombeo Mecánico .....	4
	Bombeo Neumático .....	4
	Bombeo Eléctrico .....	4
	Bombeo Hidráulico .....	6
III	BOMBEO MECANICO .....	9
	Equipo Subsuperficial .....	10
	Bomba subsuperficial .....	11
	Ciclo de bombeo .....	11
	Sarta de varillas de succión .....	13
	Equipo Superficial .....	13
	Unidad superficial .....	14
	Reductor de engranes .....	15
	Motor principal .....	15
	Movimiento básico de bombeo en un sistema no elástico simple .....	17
IV	DINAMOMETRO Y CARTAS DINAMOMETRICAS .....	19
	Dinamómetros .....	19
	Cartas Dinamométricas .....	24
	Limitación de la interpretación visual .....	25
	Construcción de una carta dinamométrica .....	26
	Carta dinamométrica ideal .....	27
	Factores que afectan a las cartas dinamométricas superficiales ...	29
	Cartas dinamométricas típicas .....	34
	Cargas a partir de las cartas dinamométricas .....	35
	Efecto de contrabalanceo de las cartas dinamométricas .....	37
	Potencia en la varilla pulida a partir de las cartas dinamométricas	39
	Torsión a partir de las cartas dinamométricas .....	39
	Diagramas de carga permisible .....	40
	Técnica de diagnóstico .....	43
	Determinación de la carga de torsión .....	45
	Cálculo de la potencia .....	48
	Cálculo de la eficiencia volumétrica .....	48
	Problemas comunes que afectan el comportamiento ideal .....	49
	Un ejemplo completo .....	54

V. ANALISIS Y DIAGNOSTICO A POZOS DE BOMBEO MECANICO .....	57
Interpretación de cartas dinamoétricas .....	57
Aplicaciones de las cartas dinamoétricas .....	59
Carrera efectiva del émbolo .....	66
Comparación de la técnica de diagnóstico con pruebas de campo .....	66
Eficiencia volumétrica de la bomba .....	68
Efectos de la variación de la velocidad del motor principal, de la Unidad de bombeo y de las sargas telescopiadas .....	70
Detección de fugas en la tubería de producción .....	73
Resbalamiento a través del émbolo y fugas en la válvula de pie .....	73
Detección de tuberías desancladas .....	74
Detección de problemas en la separación de gas .....	76
Efecto de la excesiva fricción en las varillas .....	79
Atascamiento de la bomba .....	81
Candado de gas .....	82
Rotura de varillas .....	82
Interpretación de cartas dinamoétricas con la técnica de diagnóstico descrita y con la aplicación del programa de cómputo BOMEC .....	84
Programa de cómputo BOMEC .....	86
Análisis de resultados del programa BOMEC .....	88
Ejemplos .....	90
Ejemplo No. 1 .....	91
Ejemplo No. 2 .....	95
Ejemplo No. 3 .....	99
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	103
NOMENCLATURA	
BIBLIOGRAFIA	

## CAPITULO I

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

El petróleo ha sido utilizado por el hombre desde tiempos remotos. El conocimiento de su existencia se remonta hasta tiempos inmemorables, siendo utilizado por Babilonios, Asirios, Chinos, Aztecas, etc., tomó gran importancia al volverse la principal fuente de energía a partir de la revolución industrial, y hasta nuestros días no se ha encontrado otra fuente de energía que lo sustituya totalmente.

El petróleo es una mezcla compleja de hidrógeno y carbono que se encuentra en el subsuelo impregnando las formaciones de tipo arenoso y calcareo. Asume los tres estados de la materia dependiendo de su composición y de la presión y temperatura a la que se encuentre. Es un recurso no renovable muy apreciado por la humanidad, por lo que debe explotarse racionalmente mediante la creación de nueva tecnología y la aplicación adecuada de la ya existente. Pero sin duda algo muy importante es la conservación de los recursos petroleros existentes.

En la actualidad el aceite se está explotando de zonas muy profundas y el costo de la mano de obra, de los materiales y de la tecnología continúa incrementándose. Por ello, es esencial que se obtenga la máxima eficiencia en dichas operaciones. Para lograrlo se necesita utilizar en forma óptima el equipo y los avances técnicos disponibles, con el propósito de obtener la máxima producción con un mínimo costo.

En México, lo anterior refleja claramente la importancia que tiene la explotación adecuada de los recursos petroleros y la necesidad de desperdiciar menos cantidad de hidrocarburos. Por ello el ingeniero petrolero ocupa un lugar importante en la obtención de dicho objetivo.

Uno de los medios de obtención de hidrocarburos es mediante los sistemas artificiales de producción, entre los que destaca el bombeo mecánico; -- mismo que para una operación adecuada requiere del diagnóstico de su comportamiento, el cual se logra utilizando cartas dinámicas.

En el bombeo mecánico, la correcta interpretación de las cartas dinámicas es esencial para el estudio de un pozo, ya que pueden simplificar la localización de fallas y problemas. En este trabajo se describe la técnica de diagnóstico la cual adaptada a una computadora proporciona un método para evaluar el comportamiento del aparejo en el fondo del pozo, haciéndose ya indispensable en todas las operaciones de producción con bombeo mecánico.

## CAPITULO II

## " G E N E R A L I D A D E S "

Un pozo que ha sido perforado y que este produciendo un determinado gasto de fluidos recibe el nombre de pozo productor y puede clasificarse como:

A).- Fluyente, el cual se define como aquel pozo en el que el aceite fluye del yacimiento a la superficie mediante la energía natural del yacimiento.

B).- Artificial de Producción, el cual tiene por objetivo continuar con la explotación del yacimiento mediante la aplicación de energía adicional a los fluidos en el pozo.

Cuando la energía del yacimiento declina; tal que es insuficiente para elevar los fluidos a la superficie o cuando las producciones obtenidas se han reducido considerablemente es deseable la aplicación de sistemas artificiales de producción para continuar con la extracción de los hidrocarburos.

Un sistema artificial de producción se define como aquel sistema que se aplica cuando la energía natural del yacimiento no permite que el aceite fluya por energía propia y tiene como objetivo mantener una presión de fondo fluyendo reducida de tal manera que la formación productora pueda aportar el gasto de fluidos deseados.

## TIPOS DE SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCION

Se han desarrollado un gran número de sistemas artificiales de producción, algunos de ellos han tenido gran aceptación, otros han pasado desapercibidos, algunos son muy viejos y otros están en proceso de investigación y estudio. A continuación se describen brevemente los métodos más importantes.

**BOMBEO MECANICO.**- Como se muestra en la fig. 2.1, el aparato se integra básicamente de las siguientes partes:

1.- Motor Principal, 2.- Reductor de Engranajes, 3.- Equipo de Bombeo superficial, 4.- Sarta de varillas de succión y 5.- La bomba subsuperficial.

El bombeo mecánico es el principal exponente de los sistemas artificiales de producción, los cuales, tienen la característica de utilizar bombas colocadas en el fondo del pozo para desplazar fluidos a la superficie.

**BOMBEO NEUMATICO.**- Este método es uno de los más populares usados en la industria petrolera, lo cual se debe al perfeccionamiento en sus equipos y a sus avances técnicos. El bombeo neumático puede definirse como un método de levantamiento de fluidos en el cual se usa gas a alta presión que se inyecta por el espacio anular, pasando hacia la tubería de producción a través de válvulas colocadas en uno o más puntos de inyección.

El bombeo neumático se divide en dos tipos:

- A).- Bombeo neumático continuo y,
- B).- Bombeo neumático intermitente.

**BOMBEO ELECTRICO.**- Pertenecen al grupo de sistemas de producción que utilizan bombas subsuperficiales para impulsar los fluidos hasta la superficie. El aparato de bombeo eléctrico tiene como componentes básicos a los siguientes elementos:

1).- Motor eléctrico, 2).- Separador de gas, 3).- Bomba centrífuga, 4).- Protector o sección sellante, 5).- Cable conductor, 6).- Tablero de control y 7).- Transformadores.

Este tipo de bombeo es muy apreciado particularmente por su habilidad para mover grandes cantidades de fluidos del pozo con bajas relaciones -



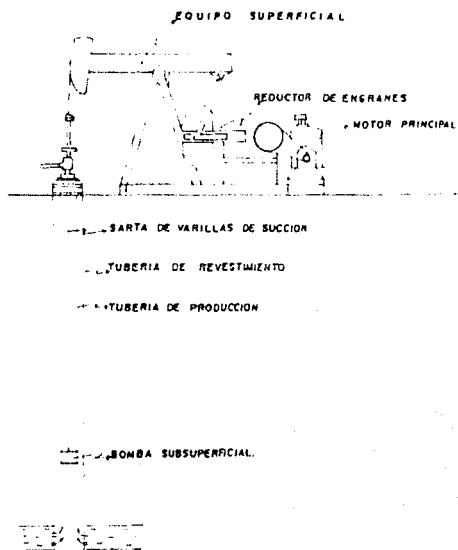


FIG. 2.1 PARTES PRINCIPALES DE UN APAREJO DE BOMBEO MECANICO.

gas-aceite. Su capacidad puede superar los 20,000 bl/d. Fig. 2.2.

**BOMBEO HIDRAULICO.**- El bombeo hidráulico consiste esencialmente de bombas colocadas en el fondo del pozo, las cuales son impulsadas por un fluido motoriz (Fig. 2.3). El bombeo hidráulico se divide en dos tipos.

- Tipo pistón
- Tipo Jet.

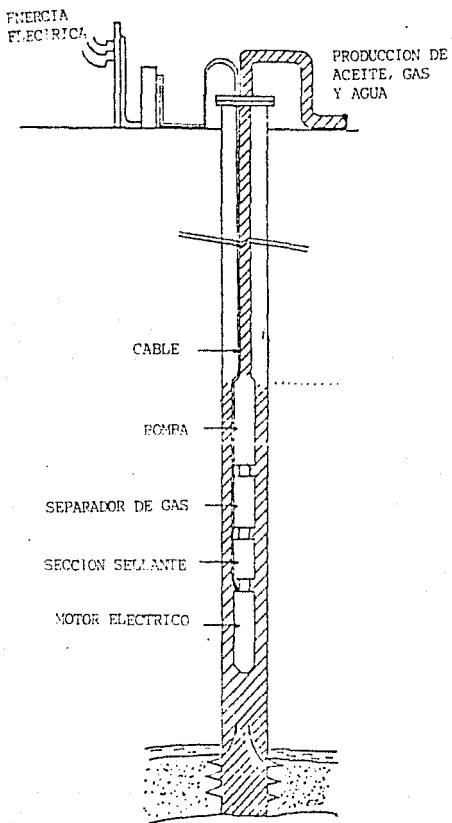


FIG. 2,2 APAREJO DE BOMBEO ELECTRICO.

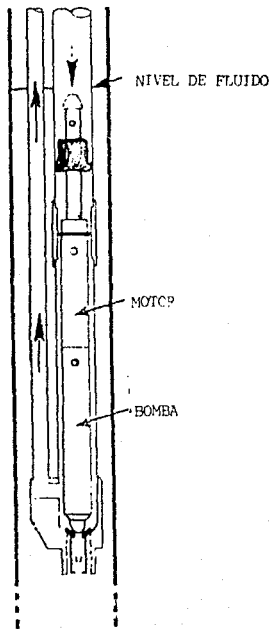


FIG. 2.3 BOMBA HIDRAULICA SUBSUPERFICIAL (TIPO PISTON)

## CAPITULO III

## B O M B E O M E C A N I C O

De los pozos propuestos para producir artificialmente, al 90% se les instala bombeo mecánico. En términos generales el bombeo mecánico se basa en el hecho de que el movimiento del equipo subsuperficial es originado en la superficie y transmitido a la bomba por medio de una sarta de varillas.

El principio del levantamiento de fluidos por medio de una bomba subsuperficial utilizando una sarta de varillas es probablemente el más viejo concepto de elevación artificial de que se tenga conocimiento. El bombeo mecánico tiene aproximadamente una antigüedad de 2000 años y todavía en la actualidad representa un medio importante para levantar fluidos.

La forma en que trabaja el bombeo mecánico es la siguiente: La energía necesaria es transmitida por el motor principal a la sarta de varillas - de succión, el motor trabaja a una cierta velocidad y con un movimiento rotatorio, pero esta velocidad debe ser reducida a una velocidad adecuada de bombeo, - esto se logra por medio del reductor de engranes.

El equipo superficial convierte el movimiento rotatorio del motor principal en un movimiento reciprocante de la varilla pulida por medio de la biela, el balancín y la manivela, el movimiento pasa a la sarta de varillas de succión que transmiten el movimiento superficial y la potencia a la bomba subsuperficial, la cual impulsa los fluidos a la superficie.

Para llevar a cabo el trabajo eficientemente se deben diseñar, seleccionar y operar adecuadamente todos los elementos del sistema, además de hacer ciertas consideraciones importantes. La selección del motor principal, el cual puede ser eléctrico o de combustión interna. Otro aspecto importante, es la reducción de la velocidad del motor principal a una velocidad adecuada de bombeo, así como el diseño de la sarta de varillas.

La cabeza de caballo y la brida hacen que el movimiento de la varilla pulida sea vertical durante todo el tiempo. El movimiento rotatorio del brazo de la manivela se convierte en movimiento reciprocante por medio del balancín. El brazo de la manivela está conectado al balancín por medio del brazo de la biela, mientras que el balancín está soportado por el poste sampson y el cojinete principal.

Las unidades de bombeo están disponibles en un amplio rango de medidas. Las longitudes de la carrera de la varilla pulida varían entre 12 y -- 240 p.p. La longitud de la carrera para cualquier unidad en particular puede variar en tres ó más longitudes diferentes dependiendo de la posición de la conexión de la biela en la manivela. Las condiciones estructurales de las varillas son expresadas en términos de las cargas máximas sobre la varilla pulida.

Uno de los aspectos más importantes del diseño es la selección del contrabalanceo para reducir el tamaño del motor principal y los requerimientos de torsión en la flecha del reductor de engranes. El diseño debe considerar el comportamiento de todos los componentes del sistema.

La cantidad mínima de información que debe ser conocida o su--- puesta, para determinar las cargas y los desplazamientos de la bomba y por tanto lograr el diseño de una instalación de bombeo con varillas de succión debe in--- cluir:

A).- Nivel del fluido, B).- Profundidad de la bomba, C).- Longitud de carrera de la varilla pulida, D).- Diámetro del árbol de la bomba, E).- Densidad relativa del líquido, F).- Diámetro nominal de la tubería de producción anclada o desanclada, G).- Diseño de las varillas de succión y H).- Geometría de la unidad.

#### EQUIPO SUBSUPERFICIAL

El equipo subsuperficial de bombeo mecánico está compuesto únicamente por la bomba subsuperficial y la sarta de varillas de succión, si se de-

sea puede incluirse la tubería de producción.

#### - BOMBA SUBSUPERFICIAL

La función de la bomba subsuperficial es admitir los fluidos de la formación dentro del barril de trabajo y permitir su paso hacia la tubería de producción para que sean elevados a la superficie. Todas las bombas subsuperficiales son impulsadas desde la superficie por medio de una sarta de varillas y una unidad de bombeo superficial.

Normalmente las bombas están compuestas por los siguientes elementos: Fig. 3.1.

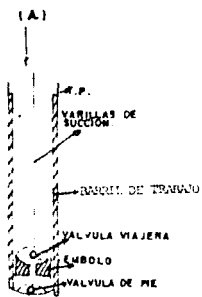
1).- Barril de trabajo, 2).- Émbolo, 3).- Válvula de pie y 4).- Válvula viajera.

#### - CICLO DE BOMBEO

En la fig. 3.1, se muestra un esquema de las diversas etapas del ciclo de bombeo; el cual es válido para cualquier tipo de bomba, es decir, -----  
a).- Bombas de tubería de producción, b).- Bombas de inserción y c).- Bombas de tubería de revestimiento.

El funcionamiento del ciclo de bombeo se describe a continuación. Con referencia a la fig. 3.1 (A), se muestra al émbolo moviéndose hacia abajo en el punto más bajo de su carrera. El fluido se está moviendo hacia arriba a través de la válvula viajera que está abierta, mientras que el peso de la columna de fluidos en la tubería de producción es soportado por la válvula de pie, la cual está cerrada.

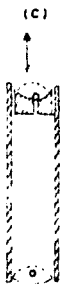
En la fig. 3.1 (B), el émbolo se está moviendo hacia arriba cercano al fondo de la carrera, la válvula viajera ahora está cerrada, consecuentemente, la carga debida a la columna de fluidos se transfirió de la tubería de producción a la sarta de varillas.



EMBOLO MOVIÉNDOSE HACIA ABAJO,  
CARRERA CERCA DEL FONDO.



EMBOLO MOVIÉNDOSE HACIA ARRIBA,  
CARRERA CERCA DEL FONDO.



EMBOLO MOVIÉNDOSE HACIA ARRIBA,  
CARRERA CERCA DE LA CIMA.



EMBOLO MOVIÉNDOSE HACIA ABAJO,  
CARRERA CERCA DE LA CIMA.

FIG. 3.1. CICLO DE BOMBEO



En la fig. 3.1 (C), el émbolo está subiendo, cercano a la parte superior de la carrera ascendente. La válvula viajera está cerrada y la válvula de pie está abierta, admitiendo fluidos de la formación hacia el interior del barril por abajo el émbolo.

En la fig. 3.1 (D), el émbolo se está moviendo hacia abajo cercano a la parte superior de la carrera. La válvula de pie está cerrada por el incremento de presión resultante de la compresión del volumen de fluidos entre las válvulas viajeras y de pie. La válvula viajera está abierta.

Después de que el émbolo llega al fondo de la carrera, el ciclo se repite. Este ciclo de bombeo descrito es ideal, debido a que se considera -- que las válvulas viajera y de pie cierran y abren instantáneamente y no se toman en cuenta otros parámetros que la afectan.

#### - SARTA DE VARILLAS DE SUCCION.

Su función es transmitir el movimiento superficial y la potencia del motor principal a la bomba superficial.

Cuando las bombas estan colocadas a profundidades mayores de -- 3,500 ft, es deseable usar sargas de varillas telescopiadas, consistentes de un conjunto de varillas de diferentes diámetros. Las varillas de diámetro más pequeño son colocadas en el fondo de la sarta, inmediatamente arriba del émbolo, -- dado que, la carga en las varillas es la mínima en ese punto. A menores profundidades, donde las cargas en las varillas son muy grandes, se usan las varillas de diámetro más grande. Este arreglo trae como resultado que se tengan cargas -- más pequeñas sobre el equipo superficial, que las que se tendrían para una sarta no telescopiada, y representa también una reducción en los costos de las varillas de succión.

#### EQUIPO SUPERFICIAL

El equipo superficial lo integran la unidad superficial, el reductor de engranes y el motor principal (fig. 3.2).

- UNIDAD SUPERFICIAL

Su función es cambiar el movimiento rotatorio del motor a un movimiento reciprocante en la varilla pulida.

El enlace directo entre la sarta de varillas de succión y el equipo superficial es la varilla pulida, que pasa a través del estopero y el fluido que ha sido levantado pasa a la tubería de descarga a través de una conexión en forma de "T". La combinación de la varilla pulida y el estopero tiene por objetivo mantener un buen sello para evitar fugas de líquido a la superficie.

En la parte superior de la varilla pulida se encuentra la grapa de la varilla pulida, la cual es sujeta por el soporte. El soporte, en tanto, es sujeta por cables flexibles llamados brida, los cuales pasan sobre la cabeza de caballo que va unida al balancín. El diseño apropiado de estos componentes asegura el viaje vertical de la varilla pulida, reduciéndose así, el desgaste y la fricción en el estopero.

El balancín es soportado casi en su centro de gravedad por el poste sampson. El movimiento es transmitido al balancín por la biela, la cual recibe a su vez el movimiento de la manivela. La distancia de la flecha de la manivela al cojinete de la biela define la longitud de la carrera de la varilla pulida. Algunas unidades tienen tres o más posibles sitios para el cojinete de la biela a lo largo de la manivela y por tanto se tiene un correspondiente número de posibles longitudes de carrera de la varilla pulida.

Uno de los aspectos más importantes del diseño de la instalación es la apropiada selección del contrabalanceo. Prácticamente todo el trabajo de elevación de los fluidos se lleva a cabo durante la carrera ascendente del ciclo de bambo, en la que la carga total de varillas y fluidos debe ser acelerada hacia arriba a partir de una velocidad igual a cero. En la carrera descendente, con la carga de fluidos transferida a la tubería de producción, el descenso de las varillas sirve como fuerza impulsora para la instalación. Si la unidad no

fuera contrabalanceada para igualar las cargas en las carreras ascendente y descendente, resultarían condiciones perjudiciales al equipo superficial de bombeo.

Desde el punto de vista del motor principal, una innecesariamente alta demanda de potencia ocurriría durante la carrera ascendente mientras que en la carrera descendente el motor principal sería forzado. Desde el punto de vista de la transmisión de la potencia, innecesariamente altas torsiones, se impondrían sobre la flecha del reductor de engranes en la carrera ascendente.

La relación de diámetros entre las poleas de la unidad y del motor principal determina la reducción total de la velocidad de bombeo en la unidad.

- REDUCTOR DE ENGRANES

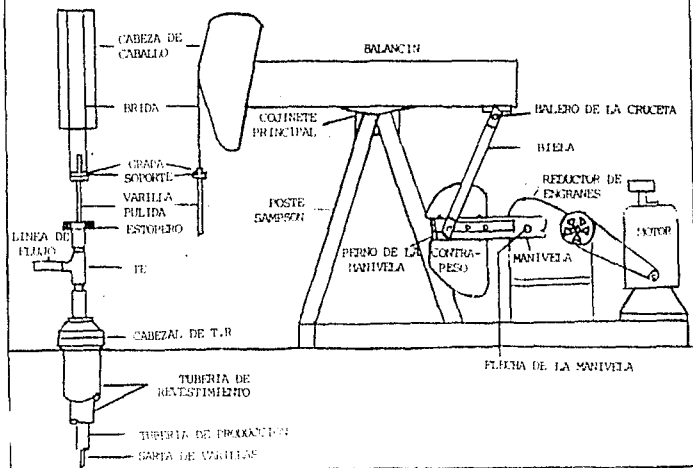
Su función es reducir la velocidad de la flecha del motor principal a una velocidad adecuada de bombeo en la varilla pulida.

- MOTOR PRINCIPAL.

La función del motor principal es proporcionar a la instalación de energía mecánica que es transmitida a la bomba y usada para elevar el fluido a la superficie.

FIG. 3.2

EQUIPO SUPERFICIAL DE UNA INSTALACION DE BOMBEO MECANICO.



## MOVIMIENTO BASICO DE BOMBEO EN UN SISTEMA NO ELASTICO

## SIMPLE

Las fuerzas que intervienen en un sistema de varillas elásticas - en movimiento son complejas, por lo que a fin de comprender los conceptos básicos del bombeo con varillas de succión, es conveniente comenzar por dividir el movimiento en dos componentes y considerar que en la carrera ascendente la carga de varillas y fluidos está concentrada en una masa no elástica, y que en la carrera descendente la carga de varillas sola equivale a una masa de menor peso.

En la fig. 3,3, se muestra el diagrama típico de cargas sobre la varilla pulida, el cual es válido para cualquier tipo de unidad de bombeo mecánico. Tomándose en cuenta los movimientos del ciclo de bombeo a partir del punto - en el que se inicia la carrera ascendente se tiene en la figura las cuatro zonas siguientes:

ZONA I.- Es la parte de la carrera donde la máxima carga de varillas y fluidos se levantan del fondo con máxima aceleración.

Esta zona se extiende desde el fondo hasta algún punto cercano a la mitad de la carrera ascendente. En esta zona el factor de aceleración se suma a la carga estática de varillas y fluidos.

ZONA II.- Es la parte de la carrera ascendente que se extiende -- desde cerca del punto medio hasta el tope de la carrera.

En esta zona aún se tiene la máxima carga de varillas y fluidos, - pero se esta restando el componente de inercia debido a que se esta desacelerando la unidad.

ZONA III.- Se inicia en la parte superior de la carrera descendente, con la válvula viajera abierta y la válvula de pie cerrada, moviéndose hacia abajo hasta algún punto cerca de la mitad de la carrera. En esta zona únicamente se tiene el peso de las varillas menos el componente de inercia. Normalmente en

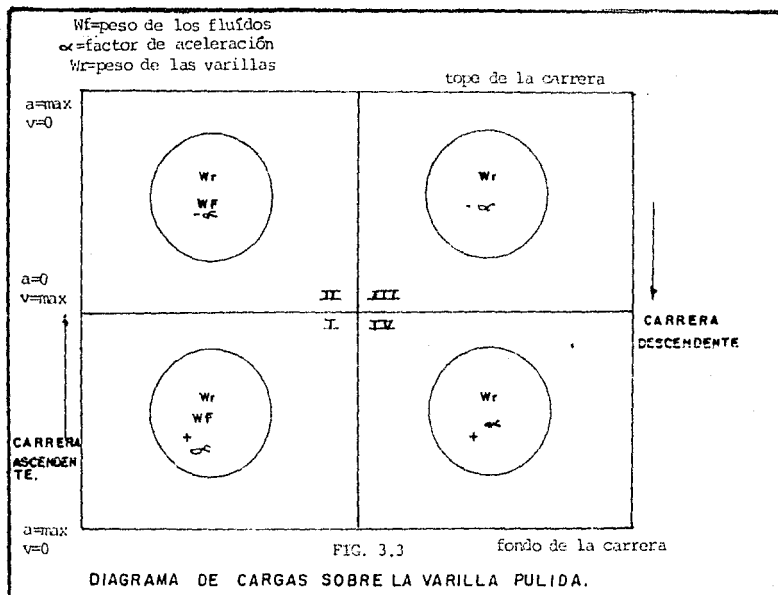
esta zona ocurre la máxima aceleración hacia abajo.

ZONA IV.- Se inicia en algún lugar cerca de la mitad de la carrera descendente y se extiende hasta el fondo de la carrera.

En esta zona, las varillas se desaceleran en su preparación para detenerse en el fondo de la carrera, entonces el componente de inercia se suma al peso de las varillas.

Como conclusiones se puede determinar que:

- 1.- Se tiene el máximo peso sobre la varilla pulida siempre que se inicia la carrera ascendente.
- 2.- Se tiene el peso mínimo sobre la varilla pulida siempre que se inicia la carrera descendente.



## CAPITULO IV

## DINAMOMETROS Y CARTAS DINAMOMETRICAS

## DINAMOMETROS

La palabra dinamómetro viene del griego: dina, medición de fuerza y metro, magnitud, medición de magnitud. De aquí que un dinamómetro para la varilla pulida es un dispositivo con el que se toma un registro continuo del patrón de fuerzas a través del desplazamiento de la varilla pulida.

Por lo anterior el dinamómetro es un indicador de peso que registra la carga sobre la varilla pulida y la respectiva posición de la misma; ambos registros se toman con respecto al tiempo y se dibujan en una gráfica como la de la figura 4.1, de donde se toman los datos correspondientes a una carta dinamográfica superficial, la cual debe interpretarse para obtener una carta dinamométrica de la bomba que permita diagnosticar el comportamiento del aparejo de bombeo-mecánico.

Los datos superficiales registrados de carga contra tiempo y desplazamiento contra tiempo deben de alimentarse a un programa de cómputo que requiere además información sobre el diseño de la sarta de varillas de succión y otros parámetros relativos al diseño. Como resultado se obtiene la carta dinamométrica a la profundidad de colocación de la bomba de la cual se determinan sus condiciones de operación.

Generalmente el dinamómetro se utiliza para hacer dos tipos diferentes de análisis: de rutina del pozo y de los problemas en el pozo.

Cuando se usa en un análisis de la rutina del pozo, el objetivo es determinar si se ha llevado a cabo algún cambio en las condiciones de operación, estos cambios podrían ser atribuidos al pozo mismo o al equipo instalado. La historia operativa puede resultar útil cuando surgen éstas u otras dificultades.

Un concepto erróneo en la operación de los pozos con bombeo mecánico es que si un pozo está produciendo el máximo permisible sin requerir mucho el equipo de reparación en comparación con los pozos vecinos, esta operación es considerada satisfactoria. Sin embargo, en muchos casos se ha mostrado que la mejor aplicación del equipo y el mejoramiento de las prácticas de producción, -- guiará a una selección más económica del equipo y a una reducción de los costos de operación. Así, otro objetivo de un análisis de rutina es evaluar todos los datos obtenidos para mejorar la operación de los equipos de bombeo mecánico.

El análisis de problemas de pozos difiere de los análisis de rutina en que el ingeniero de producción tiene como objetivo la determinación y -- eliminación de la causa de problemas. Debido a que las características de la -- carga en la varilla pulida pueden ser muy parecidas en varias condiciones, la im-- portancia de reunir y utilizar todos los datos disponibles ocupan un lugar predomi-- nante. Algunas veces la determinación del problema se hace por proceso de eli-- minación. Así, la información por si sola del dinamómetro no es suficiente, pero combinada con la cooperación del personal de campo y la apropiada interpretación de todos los datos disponibles se logra un diagnóstico adecuado.

Para llevar a cabo la prueba del dinamómetro en el campo deseable que se conozca información referente de:

a).- La instalación del equipo, b).- Historia operativa del pozo, del equipo en servicio y el conocimiento de las condiciones del yacimiento, c).- Pruebas de los fluidos de producción, preferentemente un día antes de que la --- prueba del dinamómetro se lleve a cabo, d).- Datos diversos, como la velocidad - de bombeo, la longitud de carrera de la varilla pulida, etc.

El conocimiento completo del comportamiento de bombeo con vari-- llas de succión puede reducir los costos de producción e incrementar la propor-- ción de aceite recuperado.

Uno de los más importantes y recientes desarrollos en dinamóme--



tros es el dinamómetro electrónico Delta II que consiste principalmente de los siguientes componentes: transductor de carga, transductor de posición y el registrador de canales. La técnica de análisis descrita en este trabajo está basada en el uso del dinamómetro electrónico Delta II.

TRANSDUCTOR DE CARGA.- Fig. 4.2. Es un registrador de esfuerzos de alta sensibilidad el cual va montado entre la grapa (grampa) de la varilla pulida y el soporte. Las cargas debidas a la compresión cambian la resistencia en el registrador de esfuerzos. Las diferencias resultantes de potencial a través de los registradores son grabadas en el lado derecho del registrador de dos canales en forma de carga contra tiempo. (fig. 4.3)

TRANSDUCTOR DE POSICION.- (Fig. 4.4.) - Es un servo-mecanismo el cual acciona a la bobina del potenciómetro. Los cambios de potencial a través de la bobina son grabadas en el lado izquierdo del registrador de dos canales en forma de desplazamiento contra tiempo. (Fig. 4.3.).

REGISTRADOR DE DOS CANALES.- (Fig. 4.3). Es un sistema de grabación portátil diseñado para medir variables tales como esfuerzos, presiones, velocidades, aceleración, etc. Este registrador opera a 60 ciclos y con una potencia de 115 v. obtenida de un convertidor que es operado a partir de una batería de --autonóvil.

A partir de los registros de carga contra tiempo y de desplazamiento contra tiempo mostrados en la Fig. 4.1., se obtienen los datos que se alimentan a la computadora.

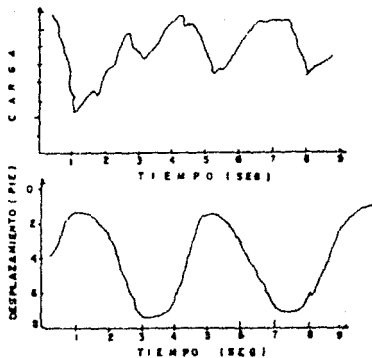


FIG 4.1

REGISTROS DE CARGAS-DESPLAZAMIENTO  
CONTRA EL TIEMPO

LOCKEED ELECTRONICS.  
COMPANY  
LOAD CELL  
MODEL 23/09

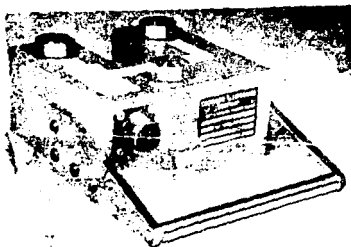


FIG 4.2

TRANSDUCTOR DE CARGA

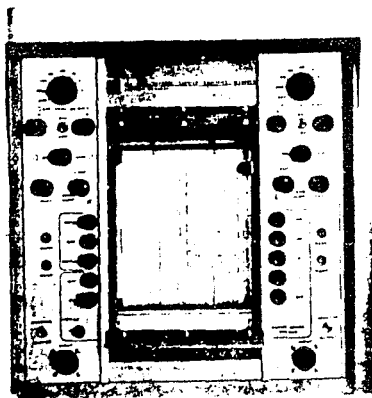
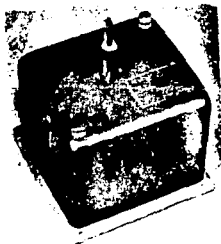


FIG 4.3 REGISTRADOR DE DOS CAVALES



FIG\_4.4\_TRANSDUCTOR DE POSICIONES.

### CARTAS DINAMOMETRICAS

La carta dinamométrica es un diagrama de carga contra desplazamiento resultante del registro de todas las fuerzas que actúan sobre la varilla pulida con respecto a su posición en cualquier instante durante el ciclo de bombeo. El diagrama registrado está dado con la posición de la varilla pulida en la abscisa y la carga en la ordenada.

El dinamómetro es una herramienta sumamente valiosa debido a que mediante su uso es posible obtener la siguiente información:

#### 1.- Cargas en el equipo superficial.

Debido a que el dinamómetro proporciona una gráfica continua de carga en la varilla pulida contra desplazamiento es posible determinar:

- a).- Cargas máxima y mínima en la estructura de la unidad de bombeo.
- b).- Torsión en el reductor de engranes y en el motor principal, cuando se conocen los factores de torsión.
- c).- Trabajo realizado por la varilla pulida para elevar el fluido y vencer la fricción.
- d).- Contrabalanceo apropiado.

#### 2.-Cargas en la sarta de varillas.

- a).- Cargas máxima, mínima, esfuerzos en las varillas y rango de cargas.
- b).- Número de inversiones de carga por ciclo de la manivela.

#### 3.- Comportamiento de la bomba subsuperficial.

La magnitud del patrón de cargas es muy importante, pero también

es de gran interés su forma, ya que este perfil dice mucho acerca del comportamiento de la bomba subsuperficial. El sistema de bombeo mecánico puede compararse con un sistema de comunicación en el que la sarta de varillas actúa como línea de transmisión, la bomba como transmisor y el dinamómetro en la varilla pulida como receptor.

Cada vez que la bomba realiza una carrera, se envía una señal de fuerza a lo largo de la sarta de varillas a una velocidad de 15,800 pies/segundo, hasta la superficie, donde se registra por medio del dinamómetro. Cada condición distinta en el fondo del pozo, envía una señal de fuerza diferente a la superficie y en algunos casos, un análista experimentado, puede determinar el comportamiento de la bomba interpretando la forma del perfil de la gráfica dinamoétrica para diagnosticar uno ó varios de los siguientes aspectos:

- a).- Condiciones de trabajo de las válvulas viajera o de pie.
- b).- La existencia de golpeteo de fluido y su magnitud.
- c).- Cendado de gas en la bomba.
- d).- Fricción excesiva.
- e).- Si la bomba está o no bombeando en vacío.
- f).- Condición de sobreviaje del ánabolo ó reducción del viaje -- del mismo.

#### LIMITACION DE LA INTERPRETACION VISUAL

En pozos someros, donde la carga de varillas y fluido se comporta como una masa concentrada, la carta dinamoétrica superficial es suficiente para determinar las cargas y diagnosticar problemas desde el motor principal hasta la bomba subsuperficial.

En cambio para pozos profundos, la naturaleza elástica de la sarta de varillas presenta un patrón de cargas mucho más complejo y la interpretación visual de una carta dinamoétrica superficial para diagnosticar problemas - pozo abajo, es casi siempre imposible. La información que puede obtenerse de la

interpretación visual es cualitativa y su éxito depende de la experiencia del análista.

#### CONSTRUCCION DE UNA CARTA DINAMOMETRICA

La construcción de una carta dinamoétrica del tipo encontrado en pozos de profundidad somera a media se realiza descomponiendo a la carta en sus más simples elementos y paso a paso se incluyen las deformaciones que sufre, hasta obtener la forma de la carta dinamoétrica típica.

Recordando el concepto de la masa de varillas y fluido concentrada, supóngase que la varilla pulida de la unidad de bombeo, empieza a levantar la carga lentamente hasta la parte superior de la carrera. En este momento la masa concentrada se cambia por otra más pequeña equivalente al peso de las varillas solas y regresa al fondo de la carrera también lentamente. El patrón de cargas registrado en una gráfica sería similar al de la figura 4.5.

El área  $W_1$  (a, b, c, d, g) es proporcional al trabajo positivo -- realizado por la unidad en la varilla pulida para elevar a las varillas y al fluido. El área  $W_2$  (d, e, f, g) es proporcional al trabajo negativo realizado por las varillas flotando conforme son jaladas hacia abajo por la fuerza de gravedad.

Debido a que las cartas dinamoétricas se dibujan en gráficas -- que representan movimiento, hacia adelante en la carrera ascendente y hacia atrás en la carrera descendente, la presentación de la figura 4.5, debe doblarse de modo que pueda apreciarse la diferencia entre las áreas  $W_1$  y  $W_2$ , es decir, el trabajo neto realizado. Representado por el rectángulo h, b, c, d, de la figura 4.5.

Este diagrama de carga contra desplazamiento describe un comportamiento ideal de la operación de la bomba.

## CARTA DINAMOMETRICA IDEAL

De acuerdo a la secuencia del ciclo de bombeo las características del comportamiento ideal en base a la figura 4.5. son:

- 1).- En el punto h, la válvula viajera cierra y se inicia la carrera ascendente del émbolo.
- 2).- Del punto h al punto b, la carga de fluido es transferida de la tubería de producción a la sarta de varillas.
- 3).- En el punto b, la válvula de pie abre y permite la entrada de fluidos del pozo, al barril de la bomba.
- 4).- De b a c, la carga de fluido es elevada por el émbolo, al mismo tiempo que se está llenando el barril de la bomba.
- 5).- En el punto c, cierra la válvula de pie y se inicia la carrera descendente del émbolo, permaneciendo cerrada la válvula viajera.
- 6).- De c a d, la carga de fluido es transferida de las varillas a la tubería de producción.
- 7).- En el punto d, abre la válvula viajera y se establece comunicación entre el fluido en el barril y el fluido en la tubería de producción.
- 8).- De d a h, el émbolo desplaza el fluido del barril de la bomba, a través de la válvula viajera, hacia la parte superior del émbolo.
- 9).- A partir del punto h el ciclo se repite.

El comportamiento ideal descrito para la bomba subsuperficial, es difícil de encontrar en una instalación de bombeo mecánico y requiere de condiciones muy especiales, tales como:

- 1.- Que la velocidad de bombeo del pozo sea sumamente baja.
- 2.- Que el líquido bombeado no contenga gas.

DIRECCION DE LA CURVA

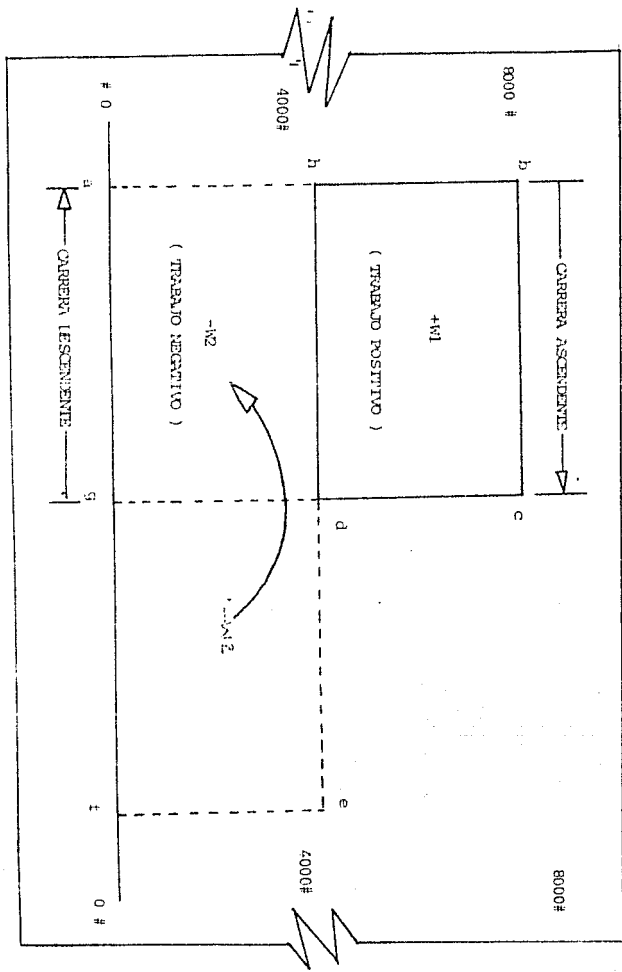


FIG 4.5 RELACION DE TRABAJO EN UNA CARTA DINAMOMETRICA IDEAL



- 3.- Que no existan fuerzas de vibración en el sistema.
- 4.- Que no existan fuerzas de fricción.
- 5.- Que la válvula de pie abra y la válvula viajera cierre instantáneamente al inicio de la carrera ascendente.
- 6.- Que la válvula de pie cierre y la válvula viajera abra instantáneamente al inicio de la carrera descendente.
- 7.- Que no existan fuerzas elásticas.

Como consecuencia de las condiciones anteriores, la forma de la carta dinamométrica ideal está afectada únicamente por los dos factores de carga: la carga de fluido y el peso de las varillas en el fluido.

#### FACTORES QUE AFECTAN A LAS CARTAS DINAMOMETRICAS SUPERFICIALES

Las cartas dinamométricas superficiales deben ser sometidas a un complejo análisis matemático con el objeto de obtener la carta a condiciones de -- profundidad de colocación de la bomba. La carta dinamométrica superficial está formada debido a diversos factores que la afectan, tales como:

1.- EFECTO DE LA ACELERACION.- A fin de visualizar esta modificación, es necesario recordar dos principios elementales de la física:

- 1)- La fuerza requerida para acelerar cualquier masa dada, es directamente proporcional a la aceleración.
- 2)- En el movimiento recíprocante generado por el sistema biela-manivela, donde una masa se mueve de A a B y regrese a A, el mayor valor de aceleración se tiene en el instante en que se inicia el movimiento en A y disminuye a cero en algún punto cercano a la posición media, incrementándose una vez más hasta el máximo en la posición B.

Por lo anterior, la aceleración de la varilla pulida en movimiento siempre es mayor cuando inicia su ascenso en el fondo y cuando inicia su descenso en la parte superior. fig. 4.6. Entonces el arranque desde el fondo con la masa máxima equivalente al peso de varillas y fluido, se realiza con aceleración máxima re

quiriendo un mayor esfuerzo en la varilla pulida. Conforme esta masa se eleva, está sujeta a menos y menos aceleración hasta aproximadamente la mitad de la carrera ascendente, donde la aceleración es cero. Desde este punto hasta la parte superior de la carrera la masa se desacelera, es decir, que el componente de la aceleración se incrementa con signo negativo por lo cual se resta del peso estático de las varillas y fluido.

Cuando la carga de varillas solas inicia su descenso desde la parte superior de la carrera, nuevamente la aceleración es máxima y también se resta del peso estático de las varillas, por lo cual la carga sobre la varilla pulida es mínima. El componente de aceleración disminuye hasta aproximadamente la mitad de la carrera descendente, donde una vez más comienza a sumarse al peso de las varillas que se desaceleran otra vez, hasta llegar al fondo de la carrera.

2.- EFECTO DEL MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE.- El movimiento representado es el movimiento armónico simple en la varilla pulida que tiende a desarrollar la aceleración lineal. En una unidad de bombeo real, la relación biela-manivela nunca se aproxima a infinito, lo cual es necesario para desarrollar el movimiento armónico simple, entonces el patrón de aceleración en la varilla pulida queda modificado por el llamado factor de la máquina y adquiere la forma ilustrada en la figura 4.7.

3.- EFECTO DEL ALARGAMIENTO DE VARILLAS.- Hasta ahora se ha considerado únicamente el movimiento recíprocante de una carga diferencial en un sistema no elástico, pero la sarta de varillas es realmente una masa elástica.

La sarta de varillas elástica y su carga de fluido son elevadas por la varilla pulida, pero la carga total no se mueve hacia arriba simultáneamente como una masa concentrada, sino que cada sección de la sarta de varillas, de abajo hacia arriba, tiende a alargarse ligeramente más que la sección inmediata anterior. Conforme la varilla pulida inicia su movimiento ascendente, las varillas empiezan a alargarse y la carga en la varilla pulida se hace más y más grande. En la parte superior de la carrera, las varillas se contraen con una disminución sucesiva de la carga, la válvula viajera abre, la carga de fluido se transfiere a la -

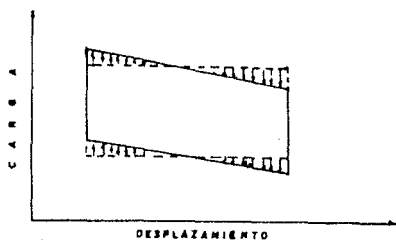


FIG 4.6 . EFECTO DE LA ACCELERACION

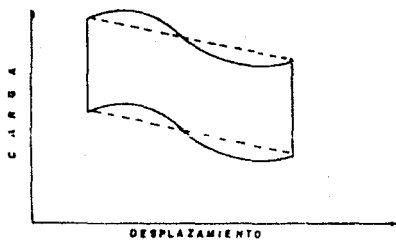


FIG 4.7 . EFECTO DEL MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE.

tubería de producción y la sarta inicia su descenso.

Este alargamiento y contracción de las varillas modifica aún más - la carta dinamométrica, como se muestra en la fig. 4.8.

4.- EFECTO DE LA VIBRACION.- Si una masa elástica de varillas está suspendida en el aire desde la parte superior de una torre alta y se le aplica una fuerza en la parte inferior, la sarta se deflexiona hacia abajo y luego vuelve hacia arriba, es decir que la sarta tiende a vibrar con una cierta frecuencia natural. Esta frecuencia natural es aproximadamente la relación de 237,000 dividido - por la longitud de la sarta.

En un pozo productor, después de que ocurre el alargamiento de las varillas, la válvula viajera cierra y la sarta empieza a vibrar con su frecuencia-natural. Simultáneamente, cuando las varillas llegan a la parte superior de la carrera, comienzan a bajar y quedan liberadas del alargamiento, entonces la sarta empieza nuevamente su período de frecuencia natural de vibraciones. Por lo tanto, en un sistema elástico, el diagrama de cargas se modifica por el patrón de vibraciones de la sarta de varillas. (fig. 4.9).

Si la frecuencia natural de una sarta dada es alta con relación a la velocidad de bombeo, existirán varios picos. Por otra parte, si la frecuencia-natural de la sarta es baja con respecto a la velocidad de bombeo, únicamente se - tendrá un pico.

5.- EFECTO DE AMORTIGUAMIENTO.- Supóngase que la sarta de varillas está vibrando a su frecuencia natural en el aire. Esta seguirá oscilando con su movimiento hacia arriba y hacia abajo hasta que la fricción interna amortigue esas vibraciones. Sin embargo, en realidad la sarta de varillas vibra con una pesada - carga de fluido, durante la carrera ascendente, contra una considerable fuerza de fricción, por lo que la altura de las ondas de esfuerzo será sucesivamente menor - en cada vibración.

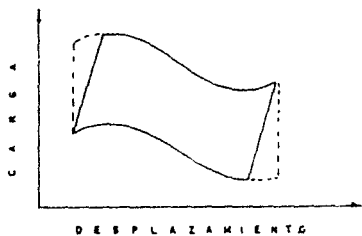


FIG 4.8 EFECTO DE ALARGAMIENTO DE VARILLAS

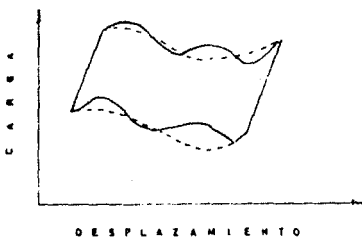


FIG 4.9 EFECTO DE LA VIBRACION



FIG 4.10 EFECTOS DEL AMORTIGUAMIENTO

En otras palabras, no solamente la fricción interna tiende a amortiguar las vibraciones, sino que la fricción externa dada por la masa de fluido, -- también producirá una rápida disminución en el patrón de vibraciones. Entonces, en lugar de tener una vibración de amplitud constante, la fricción tiende a hacer que dicha vibración disminuya rápidamente, modificando el diagrama como se muestra en la figura 4.10.

Aunque todo lo anterior es una simplificación de un tema complejo, se considera que da una idea para entender la naturaleza y estructura de la carta dinamoétrica y lo que ella "dice" del comportamiento de la bomba y del sistema de bombeo mecánico.

#### "CARTAS DINAMOMETRICAS TIPICAS"

En la realidad, para cualquier sistema de bombeo es naturalmente imposible obtener las siete condiciones ideales. Por lo tanto nueve factores de -- carga contribuyen a la forma de las cartas y la mayoría de estas cartas presentan -- muy poco parecido a la carta ideal mostrada en la fig. 4.5. La fig. 4.11., muestra una carta similar a aquellas obtenidas de un pozo con bombeo normal.

La siguiente discusión está basada en un artículo de Russell:

El punto A, representa el final de la carrera descendente y el inicio de la carrera ascendente de la varilla pulida. Conforme la válvula viajera cierra, la varilla pulida empieza a soportar la carga de los fluidos. Esta cantidad -- de incremento de carga es la que se muestra de A a B. El decremento momentáneo en la carga sobre la varilla pulida de B a C es el resultado del resorteo de las varillas, lo cual ocurre cuando estas empiezan a soportar la carga de los fluidos. Conforme las varillas se mueven hacia arriba, en forma aproximada a un movimiento armónico simple, la aceleración por carga se incrementa hasta que se alcanza un máximo en el punto D, teóricamente a la mitad de la carrera ascendente. Del punto D al -- punto E la carga de aceleración decrece conforme la velocidad de las varillas se reduce a cero.

El punto E representa el final de la carrera ascendente y el inicio de la carrera descendente. Conforme las varillas caen, la válvula viajera abre

y la válvula de pie cierra. En el punto F la válvula de pie esta soportando la carga de los fluidos, lo cual provoca un decremento en las cargas sobre la varilla pulida. La carga de aceleración, la cual en la carrera descendente, decrece con las cargas sobre la varilla pulida, se incrementa hasta el punto G, cerca de la mitad de la carrera descendente donde ocurre la mínima carga sobre la varilla pulida. - De los puntos G a A, la carga de aceleración negativa decrece, causando un incremento en la carga sobre la varilla pulida.

No han sido tomados en cuenta aún la influencia de la vibración y de la fricción en la forma de las cartas dinamométricas. Estos factores aunque difíciles de aislar y analizar en la carta, están siempre presentes y contribuyen -- significativamente a la carga total de la varilla pulida.

#### OBTENCION DE CARGAS A PARTIR DE LAS CARTAS DINAMOMETRICAS

Las cargas impuestas a una instalación de bombeo con varillas de succión puede determinarse a partir de las cartas dinamométricas.

El procedimiento se ilustra en la figura 4.12, según la figura, - la nomenclatura es la siguiente:

C = Constante de calibración del dinamómetro, libras por pulgada de altura de la carta.

$D_1$  = Máxima deflexión (a lo largo del eje Y), pg.

$D_2$  = Mínima deflexión, pg.

$A_1$  = Area inferior de la carta,  $pg^2$

$A_2$  = Area superior de la carta,  $pg^2$

$$\text{Máxima carga} = C \times D_1 \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\text{Mínima carga} = C \times D_2 \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\text{Rango de carga} = C(D_1 - D_2) \dots\dots\dots (4.3)$$

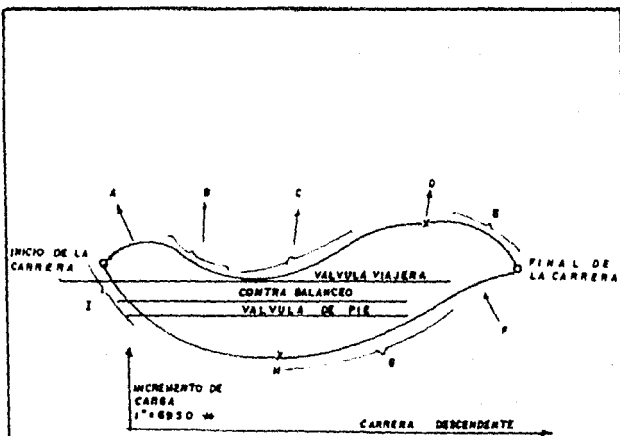


FIG 4.11 CARTA DINAMOMETRICA TIPICA.

A. CIERRE DE LA VALVULA VIAJERA.

F. LA VALVULA DE PIE TOMA UNA SOBRECARGA.

B. CONTRACCION DE VARILLAS.

G. DECREMENTO DE VARILLAS ENBULO - FLUIDO.

C. LEVANTAMIENTO DE VARILLAS Y FLUIDOS

H. CARGA MINIMA

D. CARGA MAXIMA

I. DESACELERACION DEL BALANCIEN

E. DESACELERACION DEL BALANCIEN



$$\text{Promedio de carga carrera-ascendente} = C(A_1 + A_2) / L \dots \dots \quad (4.4)$$

$$\text{Promedio de carga carrera-descendente} = C A_1 / L \dots \dots \dots \quad (4.5)$$

El trabajo entregado por embolada a la sarta de varillas contra la elevación del fluido y contra la fricción =  $A_2$  (convertido a libras-pie de trabajo).

El trabajo por embolada desempeñado por la elevación de las varillas (o caída de las varillas) =  $A_1$  (convertido a libras-pie de trabajo)

#### EFFECTO DE CONTRABALANCEO DE LAS CARTAS DINAMOMETRICAS

El efecto de contrabalanceo se determina de las cartas dinamo--  
metricas para unidades convencionales como sigue:

1.- La línea de contrabalanceo (CB) se obtiene de la carta dinamo--  
métrica deteniendo la unidad de bombeo en la posición del máximo efecto de contra-  
balanceo. Esto ocurrirá cuando el brazo de la manivela sea horizontal en la carre-  
ra ascendente,  $\theta = 90^\circ$  y  $270^\circ$ , donde  $\theta$  es el ángulo medido en dirección de las ma-  
necillas del reloj a partir de las doce.

2.- El contrabalanceo "ideal" C.B.I. es entonces aproximadamente:

$$\text{C.B.I.} = \frac{\text{PPRL} + \text{MPRL}}{2} \dots \dots \dots \quad (4.6)$$

3.- El efecto de contrabalanceo real C.B.R. se calcula como:

$$\text{C.B.R.} = C * D_3 \quad (\text{ver fig. 4.12}) \dots \dots \dots \quad (4.7)$$

4.- El contrabalanceo correcto C.B.C. puede determinarse de la re-  
lación:

$$\text{C.B.C.} = \frac{1}{2} * (\text{promedio de carga en la carrera ascendente} + \text{promedio de carga en la carrera descendente}) \dots \dots \dots (4.8)$$

CB - LINEA CONTRA BALANCEO

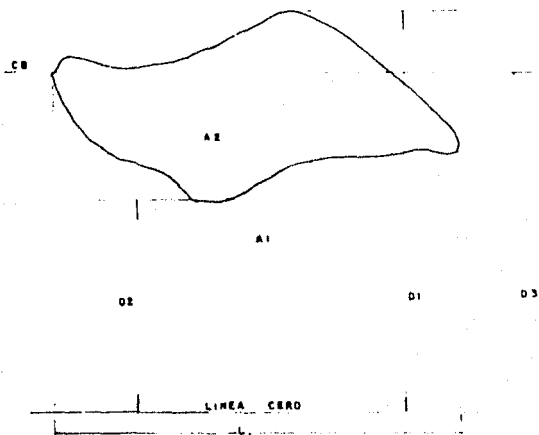


FIG 4.12 CARTA DINAMOMETRICA QUE MUESTRA LAS AREAS Y DEFLEXIONES NECESARIAS PARA CALCULAR LAS CARGAS.

Si la línea de contrabalanceo no ha sido obtenida, entonces el contrabalanceo aproximado puede calcularse como:

$$C.B.C. \text{ (aproximado)} = C^* (A_1 + A_2/2)/L \dots \dots \dots (4.9)$$

Esta ecuación arroja el mismo resultado que la anterior.

#### POTENCIA EN LA VARILLA PULIDA A PARTIR DE LAS CARTAS DINAMOMETRICAS

La potencia en la varilla pulida puede determinarse de la carta dinamométrica en base a la siguiente fórmula:

$$PRHP = C (A_2/L) \times \frac{S \times N}{33,000 (12)} \dots \dots \dots (4.10)$$

Donde: S = Longitud de la carrera (pg)

N = Velocidad de bombeo (epm)

L = Longitud de la carta (pg)

#### TORSION A PARTIR DE LAS CARTAS DINAMOMETRICAS

Un método seguro para la determinación de la torsión instantánea - durante todo el ciclo de bombeo es el método del factor de torsión, el cual utiliza datos de los factores de torsión y datos de la posición de la varilla pulida junto con los datos de momentos de máximo contrabalanceo conforme a la norma API 11B.

El método del factor de torsión utiliza y necesita satisfacer la - norma API 11-E la cual requiere catálogos de unidades de bombeo para determinar la carrera, y los factores de torsión para cada 15° de la posición de la manivela. Los factores de torsión se derivan de la geometría de la unidad de bombeo. La torsión-

instantánea debida a la carga neta del pozo en una posición dada de la manivela es el factor de torsión en esa posición multiplicado por la carga neta del pozo en esa posición multiplicado por la carga neta del pozo en esa posición. La carga neta del pozo es por tanto:

$$W_n = \text{Carga neta del pozo} = (W - B) \dots \dots \dots (4.11)$$

Donde:  $W$  = Carga del pozo en un ángulo específico de la manivela.

$B$  = Desbalanceo estructural de la unidad de bombeo. (cualquier valor positivo o negativo).

Así, la torsión debida a la carga neta del pozo es:

$$T_{wn} = \frac{M}{L} \times W_n \dots \dots \dots (4.12)$$

La torsión debida a la rotación de los contrapesos es  $M \sin \theta$ , -- donde  $M$  es el momento máximo de la manivela y contrapesos alrededor del cigüeñal -- (proporcionado por el fabricante). La torsión neta sobre el reductor de velocidad es la distancia entre la torsión debida a la carga neta del pozo y la torsión requerida o debida a la rotación de los contrapesos.

$$T_{net_n} = \frac{M}{L} (W - B) - M \sin \theta \dots \dots \dots (4.13)$$

#### DIAGRAMAS DE CARGA PERMISIBLE

Todas las unidades de bombeo API están provistas de tablas de factores de torsión y de desplazamiento de varillas aplicables para cada unidad específica. Estas tablas pueden utilizarse para construir el diagrama de carga permisible para dicha unidad. La carga permisible en una unidad de bombeo es la carga necesaria en la varilla pulida para desarrollar una torsión neta en el reductor de engranes igual a su capacidad API con una cantidad fija de contrabalanceo.

Este diagrama puede construirse con los cálculos para cada 15° de la posición de la manivela, suponiendo que el reductor de engranes está funcionando a su capacidad. Este diagrama consta de dos curvas, una mostrando la carga límite en la carrera ascendente y otra mostrando la carga límite en la carrera descendente para todas las posiciones de la varilla pulida. Para prevenir sobrecar-

gas en la caja de engranes no tome valores de la carta dinamométrica que puedan exceder su carga permisible.

En la figura 4.13, se muestra un diagrama de carga teórico permisible. La carga permisible puede determinarse de la ecuación:

$$W_p = \frac{(T_r + M \text{ sen } \theta)}{T F} + B \dots \dots \dots (4.14)$$

Donde:

$W_p$  = Carga permisible, lb

$T_r$  = Capacidad de torsión en la caja de engranes, lb-pg

$M$  = Máximo momento de contrabalanceo.

$\theta$  = Posición de la manivela, grados.

$T F$  = Factor de torsión, correspondiente a la posición de la manivela  $\theta$ .

$B$  = Desbalanceo estructural, lb

Cuando se construye un diagrama de cargas permisibles, las medidas de la carta dinamométrica deben colocarse entre las curvas de la carrera ascendente, y descendente, como se indica en la figura 4.14 en todas las posiciones.

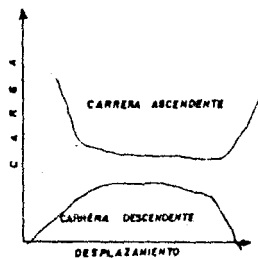


FIG 4.13 DIAGRAMA DE CARGA TEORICA PERMISIBLE

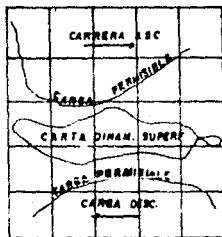


FIG 4.14 DIAGRAMA DE CARGA PERMISIBLE

## TECNICA DE DIAGNOSTICO

Durante muchos años, el dinamómetro mecánico ha sido el principal instrumento utilizado para analizar la operación de los pozos de bombeo mecánico. Dicho aparato proporciona una gráfica de carga en la varilla pulida contra desplazamiento, cuya forma refleja las condiciones de operación de la bomba en el fondo del pozo. Mediante el análisis de estos registros, efectuados por una persona experimentada, es posible detectar muchos de los problemas que se presentan en el pozo, lo que permite tomar medidas correctivas para su operación más eficiente. Sin embargo, a medida que aumenta la profundidad de los pozos, el diagnóstico es cada vez más difícil, de tal manera que aún personas con gran experiencia pueden interpretar erróneamente las gráficas. La razón es que las cargas y desplazamientos registrados en la varilla pulida no corresponden a las cargas y desplazamientos que sufre la bomba en el fondo del pozo.

Un gran avance tecnológico en el análisis y diagnóstico de las instalaciones de bombeo mecánico ha sido dado por el trabajo de S.G. Gibbs y A.B. Neely, quienes desarrollaron un modelo matemático para calcular valores de carga y desplazamiento en cualquier punto deseado a lo largo de las varillas, incluyendo la bomba, a partir de datos de carga y desplazamiento registrados en la superficie. Tales datos se obtienen con un dinamómetro de diseño especial, denominado dinamómetro electrónico Delta II. Al trabajo anterior se le conoce con el nombre de Técnica de diagnóstico. Con la aplicación de este procedimiento puede obtenerse información cuantitativa respecto a las condiciones de operación del sistema, lo que conduce a tomar medidas correctivas para optimizar la operación, tanto de la bomba como de las varillas y del equipo superficial.

En una instalación de bombeo mecánico la sarta de varillas de succión se comporta como un cuerpo elástico. Los esfuerzos de tensión o compresión aplicados a uno de los extremos de la sarta se transmiten en forma de ondas, viajando a la velocidad acústica del material de que están constituidas las varillas. Dicha onda se desplaza en una y otra dirección, manteniendo a la sarta de varillas en vibración. La duración de la onda de esfuerzo depende de tres factores principalmente: la intensidad del esfuerzo inicial, las características fisi-

cas del material de las varillas y el medio en que éstas se encuentran.

Este fenómeno ampliamente estudiado y discutido en la física, puede representarse por una ecuación diferencial parcial conocida como la ecuación de onda.

Lo que ocurre en las instalaciones de bombeo mecánico es comparable a un sistema de transmisión de información. Se tiene un transmisor, constituido por la bomba en el fondo del pozo; una línea de transmisión, formada por la sarta de varillas y un receptor, que es el dinamómetro colocado en la varilla pulida. La bomba continuamente envía señales a la superficie a través de las varillas, sólo que los datos que se reciben están en clave, de manera que es necesario descifrarlos a fin de determinar la información original.

Con el modelo matemático desarrollado por S.G. Gibbs y A.B. Neely - es posible descifrar los datos de carga y desplazamiento registrados en la superficie permitiendo determinar los valores de carga y desplazamiento en cualquier punto de la sarta de varillas.

En vista de que las varillas de succión se encuentran sumergidas - en aceite, es más apropiado representar el fenómeno mediante la ecuación de onda - con amortiguamiento viscoso. Las señales de carga y desplazamiento que se reciben en la superficie se pueden expresar en series truncadas de Fourier en función del tiempo.

El análisis de un pozo en particular no debe hacerse a menos de -- que el ingeniero de producción conozca la historia de producción del pozo, las propiedades PVT del crudo, los problemas de bombeo, etc. La aplicación de la técnica de diagnóstico no siempre es necesaria, muchas veces se puede comparar con cartas de pozos previamente analizados.

Un dato importante en pozos de bombeo mecánico es la presión de entrada a la bomba, ya que mediante un análisis PVT del aceite a esta presión puede calcularse la cantidad de gas libre que existe a las condiciones de operación, lo que permite decidir la conveniencia de aumentar o disminuir la profundidad de la bomba, o bien de la instalación de un separador de gas. Fig. 4.15.



## DETERMINACION DE LA CARGA DE TORSION

Las aplicaciones discutidas hasta aquí son concernientes primariamente a la determinación de las condiciones subsuperficiales de operación. También de gran importancia es la carga sobre el equipo superficial, particularmente la carga de torsión en la caja de engranes de la unidad de bombeo. Por esto es deseable poder determinar las condiciones superficiales y subsuperficiales en un solo análisis computarizado. Se presenta una breve descripción que muestra como los datos en la varilla pulida requeridos para calcular las condiciones subsuperficiales pueden también ser usados para determinar las torsiones de la caja de engranes en la superficie.

La torsión neta en la caja de engranes está compuesta por la torsión causada por la carga del pozo y por la torsión de oposición creada por los contrapesos. La torsión resulta de que la carga del pozo depende del factor de torsión, el cual a su vez depende de la geometría de la unidad de bombeo.

Normalmente el factor de torsión es determinado por una solución que involucra todas las dimensiones de las varillas de la unidad. Sin embargo, si se hace la suposición de que la manivela tiene una velocidad angular constante la simple relación entre la velocidad de la varilla pulida y el factor de torsión puede ser derivada.

$$TF = \frac{V}{w} \dots\dots\dots (4.15)$$

La relación es particularmente bien adaptada al método descrito aquí, ya que la velocidad de la varilla pulida es fácilmente obtenida a partir de la función desplazamiento (modelo matemático) ya requerida para calcular las condiciones subsuperficiales. Así, el factor de torsión puede ser determinado.

$$\overline{TF} = \sum_{n=1}^3 -V_n n \text{ Sen } nwt + \int_0^n n \text{ Cos } nwt \dots\dots (4.16)$$

La fórmula completa para torsión neta puede escribirse como:

$$T_{\text{neto}} = TF (w-B) - M \text{ Sen } \theta \dots\dots (4.17)$$

A partir de la cual se puede hacer el análisis de la torsión. Un análisis típico de la torsión se presenta en la figura 4.16. Esto pertenece a un pozo con 4724 pies de profundidad que esta produciendo con una unidad que tiene -- una longitud de varilla pulida de 168 pg y una velocidad de bombeo de 9.5 carreras/mín. La figura 4.16, a, muestra la carta dinamoéstrica calculada con la técnica de diagnóstico y la figura 4.16, b. muestra la torsión neta correspondiente y la curva de torsión por contrabalanceo desarrollada a partir de la ecuación 4.17.

La unidad esta razonablemente bien contrabalanceada con una carga torsional máxima de alrededor de 520,000 pg-lb.

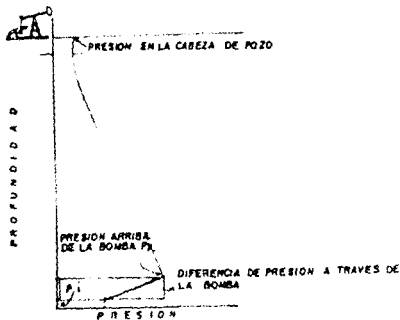
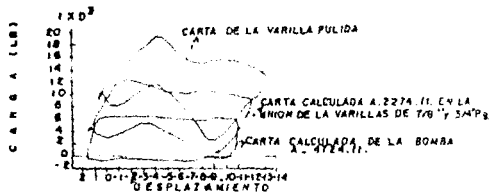
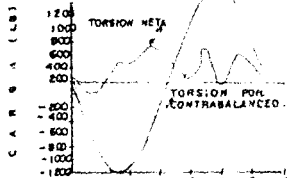


FIG 4.15 RELACION PRESION-PROFUNDIDAD PARA UN POZO DE BOMBEO MECANICO.



(A) CARTAS DINAMOMETRICAS EN POZO USADA PARA EXPLICAR EL ANALISIS TORSIONAL.



B. CURVAS DE TORSION NETA Y DE CONTRABALANCEO

FIG 4.16 CARTAS DINAMOMETRICAS Y SUS CORRESPONDIENTES CURVAS DE TORSION.

## CALCULO DE LA POTENCIA

El trabajo desarrollado por la unidad de bombeo está representado por el área interna de la gráfica superficial del dinamómetro (carga-desplazamiento); por lo que la potencia promedio calculada en función de esta área, está dada por:

$$\frac{HP}{550} = \frac{A_g}{P} \dots\dots\dots (4.18)$$

Siendo P el período de bombeo (seg)

$A_g$  = Área interna de la gráfica superficial

La potencia hidráulica de la bomba se calcula en la misma forma, sólo que a partir de la gráfica de la bomba. Otro dato importante que es necesario conocer es la potencia máxima a que opera el motor primario, este valor se determina en función de la máxima torsión en la flecha del reductor de velocidades mediante la fórmula:

$$HPM = \frac{2 \pi EPM TM}{33 000} \dots\dots\dots (4.19)$$

TM: Torsión Máxima

Las potencias promedio y máximas en la flecha del reductor de velocidades, determinan las condiciones de trabajo del motor primario en comparación con su potencia nominal.

La eficiencia volumétrica de la bomba se calcula de la carta de la bomba, en base a la carrera efectiva y total de la bomba, así:

$$EFIC = \frac{\text{Carrera efectiva} * 100}{\text{Carrera total del émbolo}} \dots\dots\dots (4.20)$$

## PROBLEMAS COMUNES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO IDEAL

En vista de que gran parte de la información que se obtiene, se deriva de la gráfica de la bomba, se considera conveniente establecer los lineamientos que deben observarse para llevar a cabo la interpretación correcta de dicha gráfica. Con este propósito se presentan a continuación algunos problemas ideales más frecuentes en el bombeo mecánico y la forma en que se manifiestan en la gráfica aludida.

La gráfica ideal que indica una operación óptima de la bomba es - aproximadamente de forma rectangular. Fig. 4.17.

1.- En la gráfica 4.18 se indica compresión y expansión de gas -- dentro del barril de la bomba. Este problema ocasiona que la carrera efectiva - del émbolo disminuya notablemente, dependiendo de la cantidad de gas almacenado - dentro del barril. Lo anterior puede deberse a una operación deficiente del se - parador de gas y se corrige colocando la bomba a una profundidad mayor, en donde exista menos gas libre.

2.- La figura 4.19, representa un caso clásico de fuga en la vál - vula viajera o en el émbolo. Esta situación, originada por un asentamiento ina - adecuado de la canica de la válvula viajera o por desgaste excesivo del émbolo y el barril, ocasiona disminuciones notables en la producción de aceite. La form - arqueada de la gráfica se debe a la pérdida de carga al inicio y al final de la carrera ascendente, cuando la velocidad del émbolo es más baja. Obviamente la - medida será extraer la bomba y reponer las piezas defectuosas.

3.- La fig. 4.20, es la gráfica típica de la bomba cuando se pre - sentan fugas en la válvula de pie. Como en el caso anterior, se origina por un asentamiento inadecuado de la canica de la válvula de pie. Esto puede deberse a que la canica y/o el asiento se encuentran deteriorados; o bien, que en el asien - to se haya depositado algún material, como arena, que impida el sello correcto - de la canica. El traspaso de la carga de varillas a la tubería de producción y

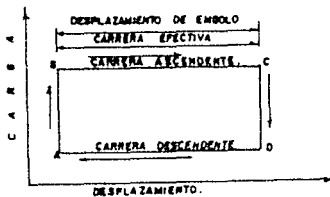


FIG 4.17 GRAFICA IDEAL OBTENIDA A LA PROFUNDIDAD DE LA SONDA

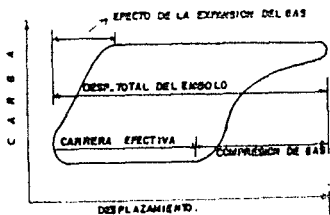


FIG 4.18 GRAFICA DE LA BOMBA INDICANDO COMPRESION Y EXPANSION DE GAS.

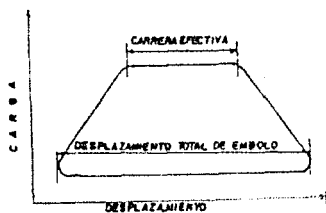


FIG 4.15 GRAFICA DE LA BOMBA INDICANDO FUGA DE LA VALVULA WAJERA O EN EMPOLO

viceversa es gradual, ocasionando la concavidad hacia arriba de la figura,

4.- La fig. 4.21, muestra una gráfica de la bomba para el caso de tubería de producción desanclada. Este problema solo puede detectarse con precisión en pozos que producen poco gas; ya que para aquellos que producen con altas relaciones gas-aceite, puede enmascarse con efectos de compresión y expansión de gas.

5.- La fig. 4.22, muestra los efectos combinados de tubería desanclada y fuga en la válvula viajera o en el émbolo. Este problema puede detectarse, ya que ambos efectos se suman al iniciarse la carrera ascendente y se anulan en la carrera descendente. Al principio de la carrera el problema se agudiza -- mientras que al final tiende a cancelarse.

En general, puede decirse que estos son los principales problemas que afectan la operación de la bomba en el fondo del pozo.

Un factor que dificulta la interpretación de las gráficas, es la fricción excesiva de las varillas de succión con la tubería de producción. Solo en este caso la técnica queda limitada, debido a que resultan gráficas de las -- que no es posible obtener una explicación satisfactoria. El problema es frecuente en pozos que sufrieron desviaciones apreciables durante la perforación.

De la gráfica de la bomba puede obtenerse directamente la carrera total y efectiva del émbolo, la carga del fluido y la fuerza de flotación ejercida sobre las varillas. En la fig. 4.23, se ilustra la forma de obtener esta información.

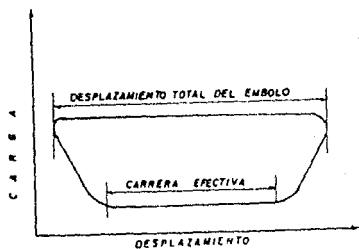


FIG. 4.20 GRAFICA DE LA BOMBA INDICANDO FUSA EN LA VALVULA DE PIF

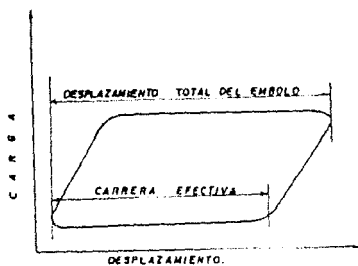


FIG. 4.21 GRAFICA DE LA BOMBA INDICANDO TUBERIA DESAMCLADA



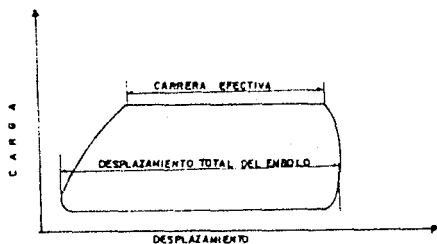


FIG 4.22. GRAFICA DE LA BOMBA INDICANDO EFECTOS COMBINADOS DE TUBERIA DESANCLADA Y FUGA EN LA VALVULA VIAJERA.

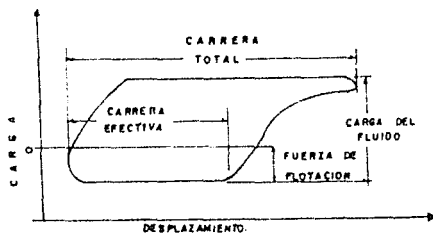


FIG 4.23. DATOS OBTENIBLES DE LA GRAFICA DE LA BOMBA

## UN EJEMPLO COMPLETO

El fin primario en un análisis dinamométrico es la medición de cargas y desplazamientos en la varilla pulida y, a partir de estas mediciones, deducir las condiciones de operación en el fondo del pozo. El rasgo distintivo de la técnica análitica es la manera en la cual los datos superficiales son interpretados para ya no depender únicamente de la interpretación visual, la cual está en función de la experiencia y de las habilidades del personal.

Para ilustrar la técnica, se analizarán los datos de la figura 4.24 registrados en una unidad de bombeo mecánico real. Estos datos son mostrados en forma de cargas y desplazamiento contra el tiempo y fueron medidos con el dinamómetro electrónico Delta II en un pozo de 8525 ft de profundidad con una sarta de varillas telescópicas, operando con una unidad convencional que tenía una longitud de carrera de la varilla pulida de 74 pg y una velocidad de bombeo de 15.4 carreras/mín.

Para un ciclo completo, las ordenadas en estas curvas son leídas en el computador en compañía de los datos del diseño de la varilla, la velocidad de bombeo, el factor de amortiguamiento, etc. para producir el conjunto de curvas dinamométricas mostradas en la fig. 4.25.

Considerable información puede obtenerse del análisis de estas curvas. Por otro lado, se muestran las curvas dinamométricas en la superficie, en los puntos de unión de la sarta de varillas telescópicas y en la bomba. El esfuerzo máximo es de  $28000 \text{ lb/pg}^2$  en las varillas de 1pg,  $29600 \text{ lb/pg}^2$  en la varilla 7/8 y  $30000 \text{ lb/pg}^2$  en la varilla de 3/4. (máxima carga sobre la varilla pulida entre el área de la varilla.)

Lo anterior revela un buen diseño en el cual los esfuerzos máximos están razonablemente balanceados en cada intervalo de varillas.

La carta dinamoétrica de la bomba indica una carrera total de la -  
 bomba de 7.1 ft, una carrera neta del émbolo de 4.6 ft y una carga de fluidos de -  
 3200 lb. En base a la carrera total y efectiva del émbolo se calcula la eficien-  
 cia volumétrica, la cual fue de 65%.

A partir de la carga de fluido y el tamaño de la bomba se estimó -  
 una presión de entrada de 690 lb/pg<sup>2</sup>. La forma de la carta dinamoétrica indica -  
 una compresión de gas en el fondo, también indica que el ancla de la TP funciona -  
 adecuadamente. Fue calculado también un gasto de líquido de 200 bl/d que al ser -  
 comparado con la producción medida de 184 bl/d indica que no hay fugas en la TP o  
 en las líneas de flujo.

Este ejemplo ilustra una gran cantidad de información de fondo que  
 se puede obtener a partir de un simple análisis de las cartas dinamoétricas. ---  
 Cualquier operación de bombeo mecánico puede diagnosticarse e interpretarse por me-  
 dio de esta técnica.

El ejemplo es particularmente apropiado ya que la extraña forma de  
 la carta de la varilla pulida ocasionaría problemas con la simple interpretación -  
 visual debido a que la carta dinamoétrica de la bomba no se asemeja a la carta di-  
 namométrica superficial.

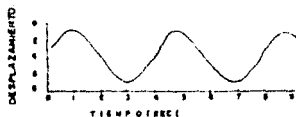
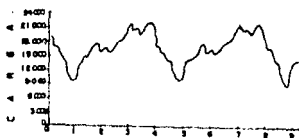


FIG. 4.24 CARTA DINAMOMETRICA DE CARGAS Y DESPLAZAMIENTO CONTRA EL TIEMPO.



FIG. 4.25 CARTA DINAMOMETRICA QUE RESUME LAS CONDICIONES DE UN POZO DE BOMBEO

## CAPITULO V

ANALISIS Y DIAGNOSTICO A POZOS DE BOMBEO  
MECANICO

## INTERPRETACION DE CARTAS DINAMOMETRICAS

En cualquier sistema involucrando contacto entre sus partes móviles se pierde energía para vencer la fricción. En un sistema de bombeo, sin embargo, la excesiva fricción puede ocurrir por muchas razones. En la figura 5.1, se muestra una carta para la cual existe un aumento continuo de la carga en la carrera ascendente, esto indica alguna restricción en el pozo.

La fig. 5.2, indica para un mismo pozo dos cartas tomadas en un intervalo de diez minutos. La manera impronunciable en que la válvula de pie recibe la carga, indica una pegadura del émbolo. Para pozos someros, la pegadura del émbolo puede ser detectada por la sensación en la varilla pulida y notando el movimiento desigual de la sarta de varillas.

La fig. 5.3, muestra otros casos de excesiva fricción. En cualquier momento en el que la carta dinamoétrica muestre una área grande indicando una gran cantidad de trabajo por ciclo para una pequeña cantidad de fluido producido, y en cualquier instante donde la carta dinamoétrica sea desigual y errática de ciclo en ciclo, deberá sospecharse de la fricción. Diversos problemas en el pozo producen cartas con rasgos característicos. Un ejemplo notable es el golpeteo de fluido que resulta de fallas en el llenado completo del cuerpo de la bomba en la carrera ascendente, el golpeteo del fluido causa pandeo innecesario y flexión de la sarta de varillas reduciendo considerablemente la vida de la misma. La fig. 5.4., muestra una carta típica para esta condición, caracterizada por un súbito decremento en la carga cerca del final de la carrera descendente, el decremento ocurrirá en diferentes posiciones de la varilla pulida de ciclo en ciclo.

Suponiendo una sumergencia suficiente de la bomba bajo el nivel dinámico del fluido, el golpeteo de fluido es causado debido a que el volumen de fluido extraído es mayor que la capacidad de producción de la formación. Por tanto, la solución es reducir la longitud de la carrera, la velocidad de bombeo o el tamaño del émbolo, reduciendo por tanto el desplazamiento del émbolo de la bomba. Debe notarse que muchos fabricantes de bombas recomiendan que la velocidad del émbolo sea inferior a un límite aproximado máximo de 4.7 pies/seg.

La compresión de gas resulta de un llenado parcial del barril de la bomba con gas, el cual se indica en la carta de la fig. 5.5. La carta para la compresión del gas es similar a la del golpeteo de fluido, siendo la diferencia esencial de que el decremento de carga no es súbito en el caso de la compresión de gas. Es posible que en la bomba se presente un cargado de gas; como resultado de fallas de las válvulas al abrir. Esta situación se muestra en la carta de la fig. 5.6. El área pequeña indica prácticamente ningún trabajo realizado por la bomba, puesto que el movimiento de la bomba refleja compresión del gas atrapado en la carrera descendente y la expansión del gas en la carrera ascendente. Schmoer da dos razones para las pérdidas de eficiencia causadas por la interferencia de gas. La primera, la válvula viajera no abre al comienzo de la carrera descendente del émbolo, esta acción es retrasada hasta que el émbolo comprime el gas en la bomba a una presión igual a la carga hidrostática del fluido en la tubería. Segunda, la válvula de pie no abre al comienzo de la carrera ascendente, esta apertura es retrasada hasta que la presión dentro de la bomba se reduce a la presión de fondo.

Existen dos soluciones para los problemas que involucren gas en la bomba. Primero, la distancia entre la válvula de pie y el émbolo al final de la carrera descendente debe reducirse al mínimo. Segundo, los problemas del gas son minimizados por el uso de dispositivos que restringen la adición del gas al barril de la bomba, por ejemplo, separadores de gas o separadores de fondo. Si se presenta una carrera incompleta o una sobrecarrera del émbolo de la bomba ésta se reflejará claramente en la carta dinamoétrica del pozo. La in-

clinación ascendente de la carta de izquierda a derecha indica una carrera incompleta. La inclinación descendente de la carta de izquierda a derecha indica una sobrecarrera del émbolo, figs. 5.7 y 5.8, respectivamente. La carrera incompleta resulta de la carga excesiva. La sobrecarrera debido a la aceleración, ocurre a altas velocidades de bombeo.

Otros problemas comúnmente encontrados son: fugas en las válvulas de pie y viajera, vibraciones (fig. 5.9), velocidades de bombeo sincrónicas (fig. 5.10), y condiciones anormales de carga.

#### APLICACIONES DE LAS CARTAS DINAMÉTRICAS

Además de la información que puede ser obtenida registrando simplemente la carga sobre la varilla pulida en un ciclo de bombeo, el dinamómetro puede ser aplicado a la solución de problemas específicos, involucrando condiciones de contrabalanceo y otros fenómenos de bombeo.

Fagg proporciona algunos métodos para verificar las condiciones de las válvulas. Para probar la válvula viajera, la unidad se deberá parar cerca del centro de la carrera ascendente. Si el cable se jala al mismo tiempo, la línea representada en la carta por la aguja principal representa el peso de las varillas de succión más el peso del fluido sobre el émbolo.

Cualquier reducción en la carga sobre la varilla pulida indica fuga del fluido a través de la válvula viajera o el émbolo. La proporción de la fuga puede ser determinada a partir del tiempo requerido de la carga para alcanzar el peso muerto de las varillas. Como se muestra en la fig. 5.11, que indica un émbolo con fuga en la válvula viajera.

La válvula de pie también puede ser revisada parando la unidad cerca del final de la carrera descendente, e inmediatamente jalando el cable. Como en este punto en el ciclo de bombeo la válvula de pie debería estar cerrada y la válvula viajera abierta, la línea así registrada representa el peso muerto de las varillas. Si la carga permanece constante con el tiempo, no hay fuga a través de la válvula de pie. Si la carga se incrementa como en la fig.

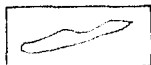


FIG 5.1 RESTRICIONES  
EN EL POZO.

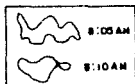


FIG 5.2 LEMBOLO PERADO



FIG 5.3 FRICCIÓN EXCESIVA  
EN EL SISTEMA DE  
BOMBEO\*

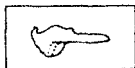


FIG 5.4 PERDIDA  
DE FLUIDO



FIG 5.5 COMPRESIÓN  
DE GAS.

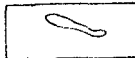


FIG 5.6 CANDADO DE  
DE GAS.





FIG 5.7 CARRERA INCOMPLETA

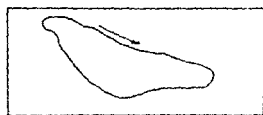


FIG 5.8 SOBRECARRERA DEL ENBOLO

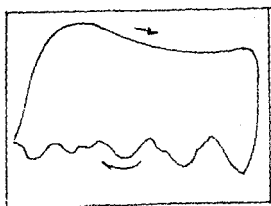


FIG 5.9 VIBRACIONES.

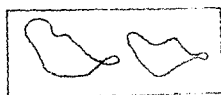


FIG 5.10 CARTA DINAMOMETRICA REAL PARA UN POZO SIENDO BOMBEADO A VELOCIDAD SINERONICA (SEGUNDO ORDEN)

5.12, la indicación es de que esa fuga está ocurriendo a través de la válvula de pie y que un poco de la carga de fluido está siendo transferida al ómbolo y a la sarta de varillas.

Fagg, ha delineado un método aproximado para calcular el torque instantáneo, requiriendo sólo información disponible de una carta dinamoétrica. Este método supone movimiento armónico simple de las varillas, por ejemplo, velocidad angular uniforme de la manivela. Haciendo uso de la ecuación  $T = (W-C) (S/2) \text{ SEN } \theta$ . La cual supone a la biela en posición vertical en todo momento e ignorando la geometría de la instalación superficial. Aún con estas limitaciones, el método es suficientemente seguro para algunos propósitos, y puede ser empleado rápida y fácilmente por el ingeniero de campo.

El método puede ser mejor comprendido en la referencia a la fig. 5.13. La fuente esencial de información es la carta dinamoétrica, incluyendo líneas representando el efecto de contrabalances y la carga cero. Si los puntos A y B representan el comienzo de la carrera ascendente y de la descendente, respectivamente y sea  $\theta$  el ángulo entre la manivela y la vertical medido en el sentido de las manecillas del reloj a partir de la posición de la manivela en el comienzo de la carrera ascendente. Si A y B son proyectados verticalmente sobre la línea de carga cero y se dibuja un semicírculo en esta proyección como un diámetro, los puntos sobre la carta dinamoétrica, corresponden a los ángulos de la manivela que pueden ser determinados. Esto se hace construyendo líneas rectas o radios para dividir el semicírculo en segmentos iguales cada 15 grados, y entonces proyectando verticalmente la intersección de las líneas con el semicírculo. Las intersecciones de estas proyecciones con la curva de carga representan valores instantáneos de carga de la varilla pulida W a varios ángulos  $\theta$  de la manivela. El torque instantáneo es entonces calculado de:

$$T = (W-C) (S/2) \text{ sen } \theta \dots\dots\dots 5.1.$$

En la determinación de los cargas correspondientes a los ángulos de la manivela, estas deberán ser tomadas del hecho de que en la carrera ascendente (punto A al punto B) el ángulo de la manivela varía de  $0^{\circ}$  a  $180^{\circ}$  y en la carrera descendente (punto B al punto A) el ángulo de la manivela varía de  $180^{\circ}$



FIG 5.11 CARTA INDICANDO FUGA EN LA VALVULA VIAJERA.



FIG 5.12 CARTA INDICANDO FUGA EN LA VALVULA DE PIE.

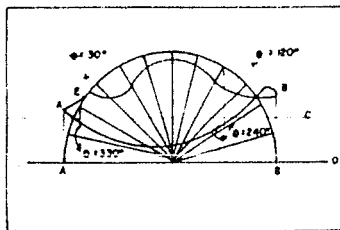


FIG 5.13 METODO APROXIMADO PARA CALCULAR LA TORSION INSTANTANEA.

a  $360^{\circ}$ .

La efectividad del contrabalanceo puede ser gráficamente demostrada dibujando la torsión instantánea contra el ángulo de la manivela en todo el ciclo de bombeo. La fig. 5.14 muestra la curva de torsión para un pozo el cual está bajo-contrabalanceado. Aquí el torque máximo es excesivamente alto en la carrera ascendente. En cambio la fig. 5.15 la muestra para un pozo sobre-contrabalanceado, donde se tiene que la torsión máxima ocurre en la carrera descendente, para un pozo el cual está contrabalanceado adecuadamente, la curva de torsión tendrá aproximadamente iguales los máximos torques en la carrera ascendente y en la descendente, como se muestra en la fig. 5.16. Esto permite la mínima carga de torsión posible que será colocada en el reductor de engranes. Si una carta dinamométrica se tiene disponible de un pozo, el correcto contrabalanceo es considerado generalmente el promedio entre la mínima y la máxima carga, como se muestra en la carta. El contrabalanceo existente puede entonces ajustarse conforme más converja. Para obtener la continuación del correcto contrabalanceo, otra carta deberá ser tomada una vez de que el contrabalanceo ha sido ajustado, y una curva de torsión deberá ser graficada a partir de la última carta.

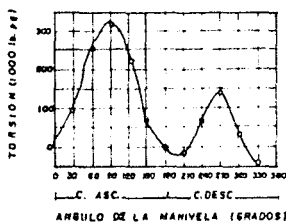


FIG 5.14 CURVA DE TORSION PARA UN POZO BAJO CONTRABALANCEADO

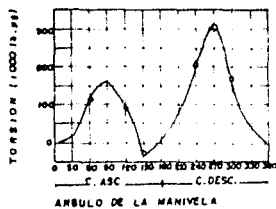


FIG 5.15 CURVA DE TORSION PARA UN POZO SOBRE CONTRABALANCEADO.

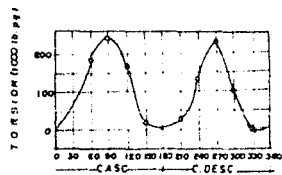


FIG 5.16 CURVA DE TORSION PARA UN POZO CORRECTAMENTE CONTRABALANCEADO.

## CARRERA EFECTIVA DEL ÉMBOLO

La fig. 5.17, muestra la carta superficial y de fondo para un pozo con una profundidad de 7400 pies y un émbolo de la bomba de 1.5  $\mu$ g de diámetro. -- El pozo tiene una sarta de varillas telescópicas y la tubería de producción está desanclada. El suelo fue usado como referencia cero en el modelo matemático del sistema de bombeo con varillas de succión.

El desplazamiento relativo de la carta dinamoétrica superficial - se debe al alargamiento de las varillas resultante de su propio peso estático y de los efectos de la sobrecarrera del émbolo. Dicho alargamiento es función de la -- composición de las varillas y de la velocidad de bombeo. La carrera efectiva del émbolo es igual a la carrera de la varilla pulida más la sobrecarrera del émbolo - menos el alargamiento de las varillas - menos el alargamiento de la tubería de producción. En el ejemplo, aunque el pozo está siendo bombeado con una carrera de la varilla pulida de 64  $\mu$ g, la carrera efectiva del émbolo es de solo 20  $\mu$ g y el desplazamiento neto de la bomba es de 47 bl de fluido por día; con un gasto real de - 34 bl/día, la eficiencia de bombeo es de 72%. ( $34/47 \times 100$ ).

## COMPARACION DE LA TECNICA DE DIAGNOSTICO CON PRUEBAS DE CAMPO

En el siguiente caso, las condiciones de fondo se conocen de una - prueba de campo. La fig. 5.18 muestra una carta dinamoétrica tomada de un pozo - que tiene una profundidad de 8900 pies, con una longitud de carrera de la varilla pulida de 74  $\mu$ g y una velocidad de bombeo de 12 carreras/día. A la profundidad - de colocación de la bomba se tiene una presión de entrada mayor a la presión de -- burbujeo, la forma de la carta dinamoétrica generalmente debe tener forma rectangular. El conocimiento de la presión de entrada y la composición del fluido tam- -- bién permiten hacer una buena estimación de la carga de la columna de fluido.

La fig. 5.18b, muestra las cartas dinamoétricas obtenidas con la - técnica de diagnóstico para el pozo con las mismas condiciones de bombeo. Una com- -- paración visual indica que las cartas en la varilla pulida son casi iguales. El -

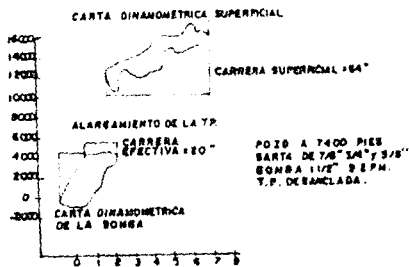


FIG. 5.17 CARRERA EFECTIVA DEL ENBOLO

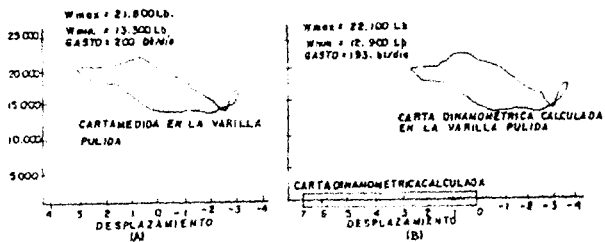


FIG. 5.18 COMPARACION DE CARTAS DE CAMPO CON LAS DE TECNICAS DE DIAGNOSTICO.

gasto de producción calculado con la técnica de diagnóstico tiene una buena tolerancia con lo que respecta al gasto real medido con pruebas de producción.

#### EFICIENCIA VOLUMÉTRICA DE LA BOMBA

La forma de la carta dinamoétrica también permite estimar la eficiencia volumétrica de la bomba como se muestra en la figura 5.19 a, que es el caso en el cual la eficiencia volumétrica es de aproximadamente 100%. Esta condición ocurre en instalaciones en las cuales la cantidad de gas es pequeña ó no entra gas a la bomba, ó la presión de entrada a la bomba es mayor que la presión de burbujeo.

Las figuras 5.19, b, c y d, muestran eficiencias volumétricas, -- sin considerar las pérdidas debido al resbalamiento en la bomba de 75, 50 y 25% -- respectivamente. Generalmente, la disminución de la eficiencia se debe a las -- grandes cantidades de gas libre en la cámara de la bomba. Es interesante notar -- el efecto de la disminución de la eficiencia volumétrica en las cargas impuestas a la varilla pulida. La forma de la carta varía como resultado de la lentitud -- con la que se transfiere la carga de fluido, a y de, la sarta de varillas. Esto afecta la forma de las ondas de fuerza que viajan en toda la sarta de varillas y puede causar cambios significativos en las cargas máximas y mínimas impuestas a -- la varilla pulida.



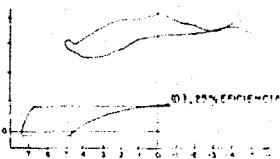
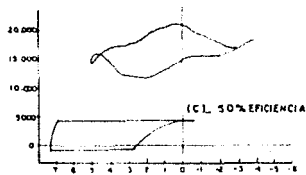
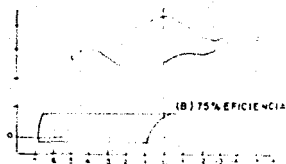
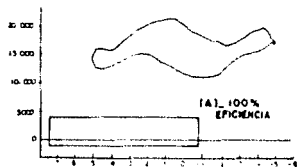


FIG. 1.17 EFICIENCIA RELATIVA DE UN S.M.P.

EFFECTOS DE LA GEOMETRIA DE LA UNIDAD DE BOMBEO, DE LA VELOCIDAD -  
DEL MOTOR PRINCIPAL Y DE LA SARTA DE VARILLAS TELESCOPIADA EN LA  
FORMA DE LA CARTA DINAMOMETRICA

Una aplicación extremadamente importante es la evaluación del comportamiento de los diferentes tipos de unidades de bombeo superficial. El modelo matemático está diseñado para calcular los valores de carga-desplazamiento a lo largo de la sarta de varillas, independientemente del tipo de unidad de bombeo superficial que se tenga, usando para ello simplemente las dimensiones de las varillas involucradas en el movimiento de la varilla pulida.

El comportamiento del sistema de varillas de succión, está afectado por el tipo de movimiento impulsor producido por la unidad de bombeo, ya que dichas unidades producen efectos significativos de las cargas sobre la varilla pulida y en las torsiones sobre el reductor de engranes para las mismas condiciones de operación.

Para ilustrar una aplicación típica de esta técnica, la fig. 5.20, muestra cartas dinamoétricas producidas por una unidad convencional y por una unidad aero-balanceada. Se puede notar que la carga máxima soportada por la varilla pulida en la unidad convencional es ligeramente mayor que la carga máxima soportada por la varilla pulida en la unidad aero-balanceada. Un efecto similar se puede observar en la carga mínima, ya que para una unidad convencional, ésta es ligeramente menor que para la unidad aero-balanceada.

Por lo que se puede concluir que, las diferencias geométricas de las unidades producen variaciones en las cargas máximas y mínimas y en las formas de las cartas dinamoétricas para las mismas condiciones de operación.

Las variaciones de velocidad del motor principal, también ejercen una influencia significativa en el comportamiento de los sistemas de varillas de succión. La solución matemática puede usarse para estudiar estos efectos, como se muestra en la figura 5.21. La figura 5.21, A, muestra las cartas dinamoétricas obtenidas con la técnica de diagnóstico en las cuales las variaciones de velocidad del motor principal son despreciadas.

La figura 5.21 b, simula una carta tomando en cuenta las variaciones de velocidad del motor principal para la misma condición. Es útil notar que la carga máxima para el caso de la velocidad constante es ligeramente más alta, y la carga mínima es ligeramente menor. El caso de la velocidad constante es algunas veces ideal, sin embargo, se puede aproximar en pozos con un buen contrabalanceo y con inercia rotacional grande.

Las variaciones de la velocidad del motor principal tienden a suavizar las cargas impuestas en la varilla pulida y usualmente actúan para disminuir el rango de carga.

El diseño de las cartas de varillas telescopiadas es uno de los problemas más interesantes que se han tenido en muchos años. La pregunta que surge en instalaciones de varillas telescopiadas es la siguiente: Cual es el porcentaje que se necesita de cada diámetro de varillas para producir esfuerzos balanceados.

Una ventaja de la técnica de diagnóstico es que permite calcular valores de carga en cualquier punto deseado a lo largo de la sarta de varillas, lo cual es útil para verificar y en su caso modificar el diseño de la sarta de varillas telescopiadas. La fig. 5.22 muestra una carta dinamo-métrica calculada en la unión de las varillas de 7/8 y de 3/4 en un pozo que tiene una profundidad de 4500 pies.

Con esta carta es posible calcular el esfuerzo en las uniones de las varillas y así determinar si el porcentaje de cada diámetro de varilla es el adecuado. Es importante notar que la carga máxima ocurre siempre en la varilla pulida y no en alguna profundidad intermedia, como ha sido cuestionado en el pasado.

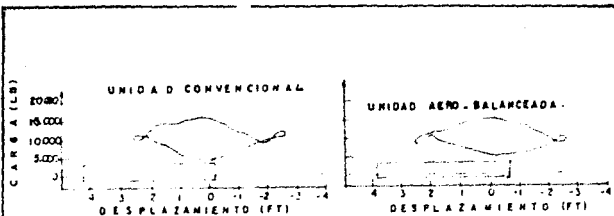


FIG 5.20 CARTAS DINAMOMETRICAS PARA DIFERENTES TIPOS DE UNIDADES (CONVENCIONAL Y AERO-BALANCEADA)

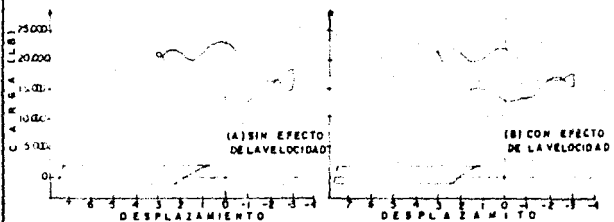


FIG 5.21 EFECTO DE LA VARIACION DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR PRINCIPAL



FIG 5.22 CARTAS DINAMOMETRICAS PARA UNA COMBINACION DE DOS VARILLAS EN UNA SARTA TELESCOPIADA.

## DETECCION DE FUGAS EN LA SARTA DE PRODUCCION

Una fuga en la sarta de producción es un problema serio en cualquier pozo. La fuga se acompaña siempre con una disminución de la producción -- del pozo, y puede ser el resultado de muchas deficiencias. Con esta técnica analítica, el comportamiento de la bomba se muestra gráficamente. Así, se puede determinar si la disminución de la producción se debe a una fuga en la tubería de producción, una bomba en malas condiciones o una deficiencia en el pozo mismo.

En realidad, una fuga en la tubería de producción se deduce cuando el gasto que se calcula en la bomba subsuperficial es mayor que el gasto medido en la superficie. Esta diferencia en gasto indica que todo el líquido que está pasando a través de la bomba no está llegando a la superficie. Un ejemplo específico se ilustra en la figura 5.23. La carta dinamoétrica de la bomba indica un excelente comportamiento y se calculó un desplazamiento del émbolo de --- 152/bl/d. Sin embargo, este pozo fue aforado midiendo solo 42 bl/d, lo cual indica que mucho del líquido que pasa a través de la bomba se pierde antes de que llegue a la superficie.

Debido a esta comparación, una fuga en la sarta de producción -- puede detectarse. Las investigaciones mostraron que la válvula de circulación, la cual conectaba al espacio anular con la línea de flujo no funcionaba adecuadamente y parte de la producción se estaba fugando hacia el espacio anular. La reparación de esta válvula incrementó el gasto de producción a 140 bl/d. Este tipo de fallas es bastante común y ha sido encontrado con la técnica de diagnóstico.

## RESBALAMIENTO A TRAVÉS DEL ÉMBOLO Y FUGA EN LA VALVULA DE PIE

La figura 5.24, muestra una condición en la que está ocurriendo un excesivo resbalamiento a través del émbolo. La forma de la carta puede ser rápidamente explicada. Debido al movimiento impuesto a la varilla pilada por la unidad de bombeo, la velocidad del émbolo es nula en el fondo y en la parte superior de la carrera. El fluido se está fugando a través del émbolo más rápidamen

te de lo que el émbolo esta desplazando fluidos.

Consecuentemente, la carga total de fluido no esta siendo mantenida en la válvula viajera. Cercano al punto medio de la carrera ascendente donde la velocidad del émbolo es máxima, la fuga no es suficiente para prevenir la completa transferencia de carga a la válvula viajera.

Se nota que la misma forma de la carta se obtendría, si en vez -- del excesivo resbalamiento a través del émbolo, la válvula de pie estuviese fugando. La carga dinamoétrica mostrada en la figura 5.25, fué obtenida de un pozo que tenía fuga en la válvula de pie. La fuga se observó por la poca transferencia de carga de la válvula viajera a la válvula de pie y de la válvula de pie a la válvula viajera, lo cual puede notarse al comienzo y al final de la carrera -- descendente.

Con la técnica de diagnóstico fué posible cubrir estos casos de fugas en la válvula de pie y de resbalamiento a través de la bomba, incluso antes de que los operadores de campo se dieran cuenta de algún descenso en la producción.

#### DETECCION DE TUBERIA DESANCLADA

Los efectos en el anclaje de la tubería de producción son frecuentes y no se descubren hasta después de que han causado daño a las tuberías. Muchos anclajes de tubería de producción normalmente en uso no se les puede probar su efectividad a menos de que dicho anclaje sea sacado a la superficie. Aún entonces no hay una forma concluyente de verificar si el ancla está o no trabajando durante la operación de producción.

Debido a una circunstancia inesperada, se estableció que los resultados de la técnica de diagnóstico ofrecen un medio para probar la efectividad del anclaje de la TP mientras el pozo produce y sin que se tenga que sacar di

cho anclaje. El método es más eficiente para detectar el movimiento de la tubería de producción en instalaciones que tienen pequeñas cantidades de gas pasando a través de la bomba. Un rasgo especial del desarrollo matemático es que permite detectar el movimiento de la tubería de producción, mismo que afecta la manera en que la carga de fluido es transferida a y de la sarta de varillas, ya que los desplazamientos de la bomba son medidos con respecto a un sistema coordinado fijo en el suelo. Si la TP está desanclada y se mueve en relación con el suelo, entonces la carta dinamométrica de la bomba referida a la TP como sistema coordinado tendrá forma diferente a aquella carta referida al suelo como sistema coordinado.

Para una carta dinamométrica de la bomba, la cual es rectangular con respecto a la tubería de producción, con la técnica analítica se tendrá una carta dinamométrica en forma de paralelogramo. La forma de paralelogramo se debe principalmente al alargamiento y acortamiento de la TP desanclada durante el período en que la carga de fluido es transferida a y de la TP.

En la figura 5.26 se muestra la forma de la carta dinamométrica a la profundidad de la bomba en relación a ambos sistemas coordinados para un pozo con alta eficiencia y con cantidades despreciables de gas pasando a través de la bomba.

Deberá notarse que la tubería de producción es un cuerpo elástico que, cuando está desanclada vibra durante la aplicación intermitente de carga de fluido. Así, en las cartas calculadas con respecto al suelo, los segmentos durante los que se aplica rápidamente la carga, son la carga pico, por esto, el alargamiento de la tubería de producción indicado por la carta calculada será usualmente mayor que el alargamiento calculado tomando como base la carga estática del fluido ó aplicada lentamente.

Un ejemplo se muestra en la figura 5.26 b, se puede ver claramente la forma del paralelogramo. En pozos que tienen anclajes efectivos, la tubería de producción está muy restringida en su movimiento. Como resultado, las cartas dinamométricas de la bomba son las mismas con respecto a ambos sistemas -

coordenados. La figura 5.26 A, muestra una carta de la bomba calculada en un pozo con una TP anclada. La forma rectangular de la carta indica que el anclaje está operando adecuadamente.

El método de detección del movimiento de la tubería de producción es menos eficiente en pozos que tienen cantidades apreciables de gas pasando a través de la bomba. En estos pozos los efectos de la expansión y la compresión de gas libre pueden confundirse con movimiento de la tubería de producción. Afortunadamente, es posible frecuentemente distinguir entre el movimiento de la TP y los efectos de la expansión y compresión del gas libre por la forma de la carta de la bomba. Un buen espaciamiento del émbolo minimiza los efectos de la expansión del gas durante el levantamiento de la carga de varillas; de aquí que, el excesivo movimiento del émbolo durante este período puede confundirse con el movimiento de la tubería de producción.

Es interesante notar que el uso del método analítico para la detección del movimiento de la tubería de producción no fue anticipado, pero se deriva del intento de comprender por qué algunas cartas dinámicas de la bomba tienen forma de paralelogramo en lugar de la forma rectangular esperada.

#### DETECCION DE PROBLEMAS EN LA SEPARACION DE GAS

En el bombeo de varillas de succión es deseable minimizar la cantidad de gas libre que debe manejar la bomba, debido a que el gas disminuye el volumen disponible para el líquido en la bomba, esto trae como consecuencia una disminución de la eficiencia volumétrica de la bomba; por esto, es deseable conocer perfectamente cualquier problema de la separación de gas en el fondo.

La forma de la carta dinámica de la bomba es uno de los mejores indicadores. Como la técnica analítica proporciona la forma de la carta de la bomba, la detección de los problemas de la separación de gas en el fondo es aparentemente fácil. La forma de la carta que generalmente es rectangular, figura 5.27 A, indica una cantidad despreciable de gas libre pasando a través de la -



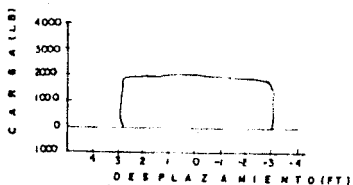


FIG 5.22 CARTA DE LA BOMBA INDICANDO UNA PRODUCCION DE 132 bl/dia. LA PRUEBA DE PROD. DIO SOLO 42 bl/dia 'Fuga en la sarta de Produccion'



FIG 5.24 RESBALAMIENTO DEL EMHOLO

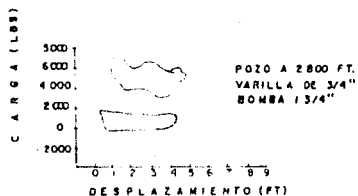
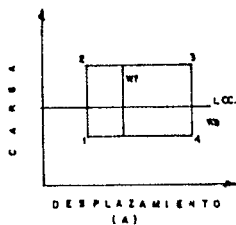


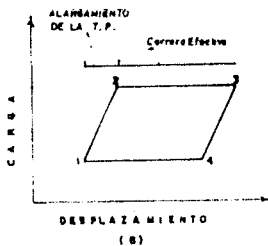
FIG 5.25 FUGA EN LA VALVULA DE FIE.



L.C.C. = LINEA DE CARGA CERO

Wf = FLOTACION DE LAS VARILLAS

Wf = CARGA DE FLUIDOS



100-26 CARTA DINAMOMETRICA PARA UN POZO

MOSTRANDO PARA (B) DESPLAZAMIENTO CON RESPECTO AL SUELO COMO SISTEMA COORDENADO, (A) DESPLAZAMIENTO CON RESPECTO A LA TP. COMO SISTEMA COORDENADO

bomba. La forma rectangular surge debido a que el fluido en el barril de la bomba es virtualmente incompresible; de aquí que la carga transferida de la parte superior a la parte inferior durante la carrera del émbolo, ocurre con un movimiento despreciable del émbolo.

Si existe gas libre en la bomba, o el fluido en la cámara no es incompresible, la forma de la carta dinamométrica sería mostrada en la fig. 5.27-b, la cual indica segmentos de compresión y expansión de gas. En la distancia -- que la bomba viaja durante las fases de compresión y expansión, se pierde carrera y por tanto la producción de líquido disminuye. El gas en el barril de bomba --- constantemente se está expandiendo durante la carrera ascendente, y se comprime cuando se inicia la carrera descendente, dándose en este último caso un súbito de cremento en la carga sobre la varilla pulida.

#### EFFECTO DE LA EXCESIVA FRICCIÓN EN LAS VARILLAS

Una manera conveniente de relacionar la técnica de diagnóstico -- con la sarta de varillas es por medio de una analogía con una línea de comunicación. Los datos que indican las condiciones de operación de fondo son recibidos por el dinamómetro en la varilla pulida después de desplazarse hacia arriba de la bomba a través de las varillas de succión.

Las varillas de succión transmiten estos datos con gran fidelidad, sin embargo, si los datos son distorsionados por la excesiva fricción en el camino, pueden ser inadecuados para la aplicación de la técnica de diagnóstico. En verdad, la única manera concebible para que la técnica de diagnóstico falle es -- que los datos sean transformados y distorsionados mientras se desplazan a través de las varillas de succión. El factor que puede crear estas distorsiones es la -- excesiva fricción causada por pozos desviados o tuberías de producción curvados.

Una notable muestra del efecto adverso causado por la excesiva -- fricción en la varilla se muestra en la figura 5.28 a, estas cartas se calcularon en un pozo que tenía un empacador para anclar la tubería de producción. La carta dinamométrica de la bomba que se obtuvo no es realista ni interpretable. Cuando-

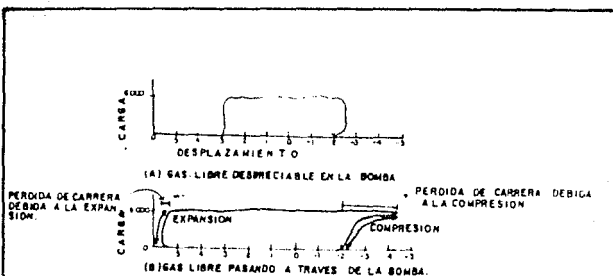
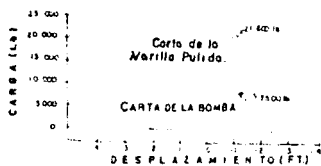
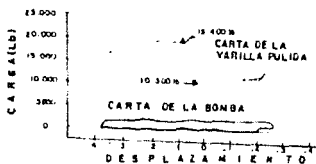


FIG. 143 EFECTO DEL GAS LIBRE EN LA FORMA DE CARTA DINAMOMETRICA.



(A) POZO EQUIPADO CON EMPACADOR.



(B) POZO CON ANCLAJE EN LA TP TIPO TENSION.

FIG. 144 EFECTO DE LA EXCESIVA FRICCION EN LAS VARILLAS CAUSADA POR T.P. CURVEADAS.

se obtuvo dicha carta se supuso que la distorsión debida a la fricción de las varillas estaba presente.

Más tarde, cuando se sacó la bomba del pozo, se notó un severo desgaste en el acoplamiento de las varillas. Esto indicó que la tubería estaba curvada por su propio peso, como si descansara sobre el emparador. Cuando el pozo se colocó en producción se equipó con un anclaje a la TP tipo tensión. La figura 5.28 b, muestra las cartas de la varilla pulida y la de la bomba después de que se instaló el ancla de tensión.

Como se indicó, las cargas superficiales son menos severas y la carta de la bomba calculada es y tiene forma más razonable.

Quando la técnica analítica se aplica correctamente y con datos verídicos, la única forma en que se puede producir una carta de la bomba incorrecta es porque esté presente una excesiva fricción de las varillas. Por lo tanto, una carta de la bomba no interpretable ni realista frecuentemente implica fricción de las varillas que deberá ser corregida.

#### ATASCAMIENTO DE LA BOMBA

La figura 5.29, muestra las condiciones de carga en el fondo del pozo que ocurren como resultado del atascamiento del émbolo de la bomba en el fondo de la carrera. La tubería de producción no está anclada y consecuentemente el alargamiento de la misma es evidente.

## CANDADO DE GAS

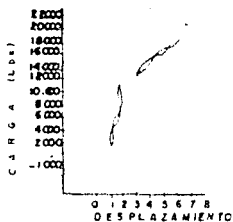
Un candado de gas se forma debido a un pobre espaciamiento del émbolo y a un espacio anular no ventilado, como se observa en la figura 5.30. --- Cuando la bomba tiene un candado de gas, la válvula viajera permanece cerrada durante todo el ciclo de bombeo, tal que la carga de fluido nunca es removida del émbolo, requiriendo para ello que la válvula viajera permanezca cerrada.

En esta condición, se almacena energía en el gas como energía de presión en la carrera descendente y, es regresada al sistema como expansión de gas en la carrera ascendente. Esto trae como resultado que se tenga poco trabajo realizado por la bomba, reduciendo la eficiencia volumétrica de la bomba, como se indica por la pequeña área de la carta de la varilla pulida.

## ROTURA DE VARILLAS

La figura 5.31, se obtuvo de un pozo que tenía varillas rotas. - En la carta dinamoétrica calculada, cuando se tiene una sarta de varillas rota la carga máxima superficial, es menor que aquellas que se tendría únicamente con la sarta de varillas en buenas condiciones.

Consecuentemente, el peso estático de las varillas al restarse - en los cálculos resulta una carga negativa en la carta dinamoétrica de la bomba. En el ejemplo mostrado, se puede deducir que el rompimiento es aproximadamente a 1800 ft arriba de la bomba; por ejemplo, sea la carga de -3000 lb, mientras que la carga debida a la flotación sea aproximadamente de -1000 lb y que la sarta de varillas tenga un peso de 1.14 lb/ft. Así, el rompimiento de las varillas ocurrirá a 1800 ft arriba de la bomba (2000 dividido entre 1.14).



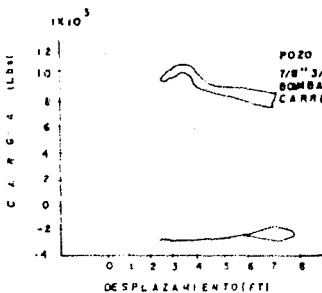
POZO 5200 FT.  
 7/8" y 3/4" Serie de Varillas  
 BOMBA 1 1/2" 128 EPM Carrera no.  
 T. P. DESANCLADA

FIG. 5.20 BOMBA ATASCADA.



POZO A 7700 FT.  
 7/8" y 3/4" 5/8" Serie de Varillas  
 Bomba 1 1/2" 10 EPM. Carrera 74"

FIG. 5.21 CANDADO DE GAS



POZO DE 7200 FT.  
 7/8" 3/4" y 5/8" Serie de Varilla.  
 BOMBA 1 1/2" 154 EPM  
 CARRERA 64"

FIG. 5.22 ROTURA DE VARILLAS.

INTERPRETACION DE CARTAS DINAMOMETRICAS CON LA TECNICA DE  
DIAGNOSTICO DESCRITA Y CON LA APLICACION DEL PROGRAMA DE  
COMPUTO BOMEC

El bombeo mecánico como uno de los principales sistemas artificiales de producción proporciona un gran beneficio económico, por tanto se debe observar el adecuado funcionamiento de sus instalaciones. La experiencia - señala que cuando una instalación de bombeo mecánico se ha diseñado correctamente, no hay necesidad de realizar intervenciones periódicas. Una operación adecuada prolonga la vida útil de las instalaciones y reduce los costos de - mantenimiento.

Para llevar a cabo un buen diseño es necesario, además de utilizar el método apropiado, contar con la mayor información posible acerca de las características del pozo y de los fluidos que se manejan. En muchos casos tal información es definitiva al tomar decisiones sobre la conveniencia o no de - instalar equipo especial dentro del pozo tendiente a mejorar el funcionamiento de la unidad de bombeo.

La técnica del dinamómetro electrónico Delta II, permite detectar muchos de los problemas que se presentan en las unidades de bombeo mecánico, por lo que es posible optimizar su funcionamiento, mediante correcciones - sucesivas efectuadas de acuerdo a los resultados obtenidos en cada caso.

La técnica del dinamómetro electrónico Delta II combinada con - la aplicación del Programa de Computo BOMEC se aplicó en pozos del distrito Poza Rica, los cuales fueron seleccionados de acuerdo a los diferentes problemas que presentaban, con el objeto de verificar si la gráfica de la bomba proporcionada por el programa revelaba fielmente lo que estaba ocurriendo en el - pozo.

En resumen, los resultados obtenidos con el programa BOMEC coincidieron con las condiciones reales de operación, lo que proporciona mayor - confianza al efectuar los diagnósticos.



Una vez en la localización del pozo al cual se le va a tomar el registro y hechas las conexiones correspondientes de los transductores, se enciende el registrador de dos canales durante tres minutos antes de iniciar la operación del equipo. En seguida se colocan las plumillas del registrador en la posición cero y se ajusta la sensibilidad del aparato de acuerdo al rango de carga y desplazamiento que se espera manejar.

Después de que se instalan los transductores y se pone en operación la unidad de bombeo, se debe esperar diez minutos para que el pozo se estabilice, hecho lo anterior se procede a tomar el registro. Estos registros contienen las variaciones de carga que soporta la varilla pulida con sus correspondientes variaciones de desplazamiento, y constituyen la información básica que requiere el programa BOMEC para su procesamiento.

Los valores anteriores se obtienen de los registros a intervalos iguales de tiempo. A fin de que las cartas dinamométricas sean lo suficientemente claras, se recomienda obtener de los registros un mínimo de 30 valores de carga y un máximo de 60, con sus correspondientes valores de desplazamiento de la varilla pulida.

El programa de cómputo BOMEC, después de ser procesado proporciona: la carta dinamométrica a la profundidad de la bomba, la carta dinamométrica superficial, los esfuerzos máximos y mínimos que soportan cada uno de los tramos que constituyen la sarta de varillas, la potencia promedio del motor y la potencia hidráulica de la bomba.

La carta dinamométrica a la profundidad de la bomba es el resultado más importante que proporciona el programa BOMEC. De la interpretación y análisis detallado que se haga de ella puede obtenerse información tan valiosa como la siguiente: presencia de gas en la bomba, golpeteo de fluidos, fuga en la válvula viajera, fuga en la válvula de pie, carrera efectiva del émbolo, tubería desanclada, eficiencia volumétrica de la bomba, rotura de varillas, excesiva fricción de las varillas con la tubería de producción y tubería de producción desanclada.

No obstante que una gran cantidad de información puede obtenerse de dicha gráfica, es necesario que el ingeniero de producción, posea además experiencia, conocimiento del sistema de bombeo mecánico y habilidad para llevar a cabo una interpretación correcta, que puede ser en muchos casos una tarea sencilla, sobre todo si un solo efecto incide sobre la bomba o cuando la magnitud de éste sobrepasa de otros presentes. Sin embargo en ocasiones la interpretación puede llegar a ser muy difícil; esto sucede cuando dos o más efectos combinados están presentes en la operación de la bomba, alterando apreciablemente la forma de la gráfica.

Es necesario indicar que la técnica del dinamómetro electrónico Delta II se desarrolló para aplicarlo a pozos profundos en donde la cartadinamométrica superficial, obtenida con el dinamómetro mecánico resultaba sumamente difícil y en algunos casos, imposible de interpretar. Cuando los pozos son someros, la carta dinamoétrica a la profundidad de la bomba es muy similar a la gráfica obtenida en la superficie, por lo que en algunos casos es suficiente interpretar la gráfica obtenida con un dinamómetro mecánico.

#### PROGRAMA DE COMPUTO "BOMB"

El modelo matemático de la técnica de diagnóstico, se programó para procesarlo por medio de una computadora electrónica, ya que solo este medio proporciona posibilidades de resolver, de una manera práctica, las ecuaciones que la integran.

Los datos que se requieren para el procesamiento del programa son los siguientes:

a) Valores de carga y desplazamiento para intervalos iguales de tiempo, obtenidos de los registros tomados con el dinamómetro electrónico Delta II.

b) Diámetro, longitud y peso de cada uno de los tramos de varillas que integran la sarta.

c) Velocidad de bombeo, longitudinal de carrera de la varilla pu lida, momento máximo de contrabalanceo, desbalance estructural y coeficiente de amortiguamiento. Obtenidos de datos proporcionados por los fabricantes de las unidades de bombeo.

d) Además de la información anterior se requieren datos adicionales que no intervienen en el proceso matemático, pero que dan una idea clara de las condiciones en las que se encuentra cada pozo y que posteriormente pueden ser de gran utilidad al momento de hacer el diagnóstico y proponer soluciones para una operación más eficiente.

Entre los datos anteriores podemos mencionar a los siguientes: diámetro de la tubería de revestimiento y producción, temperatura de fondo del pozo, relación gas-líquido, densidad del agua y del aceite, gasto de agua y de aceite, fecha, número de pozo, etc.

Los resultados que se obtienen con la aplicación del programa BOMEC son los siguientes:

- 1.- Datos generales de las condiciones del pozo.
- 2.- Carta dinamoétrica superficial.
- 3.- Carta dinamoétrica de la bomba.
- 4.- Gráfica de torsión en la flecha del reductor de engranes.
- 5.- Esfuerzos máximos y mínimos sobre las juntas entre tramos de varillas de diferente diámetro.
- 6.- Potencias promedio y máxima del motor.
- 7.- Potencia hidráulica de la bomba.
- 8.- Impresión de un formato, que deberá llenarse de acuerdo a los resultados del análisis de la gráfica de la bomba. que incluye lo siguiente:
  - a) Carrera total del émbolo
  - b) Carrera efectiva del émbolo
  - c) Eficiencia volumétrica de la bomba
  - d) Fuerza de flotación sobre las varillas

- e) Interferencia de gas
- f) Golpeteo de fluidos
- g) Condiciones de la válvula viajera
- h) Condiciones de la válvula de pie
- i) Condiciones del émbolo
- j) Condiciones del anclaje de la TP

9.- Resultado del análisis de la gráfica de torsión.

a).- Momento máximo de contrabalanceo ideal.

10.- Recomendaciones

Las condiciones de operación de la bomba en el fondo del pozo, se deducen de la interpretación de la gráfica carga-desplazamiento correspondiente a la profundidad de la bomba.

#### ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROGRAMA

Para mostrar las ventajas que ofrece el uso del programa en relación con otros trabajos, se muestra en la tabla 5.1 una comparación entre la información que se obtendría utilizando un dinamómetro mecánico y la que se obtiene con el dinamómetro electrónico Delta II aplicando el programa BOMEK.

TABLA 5.1. Comparación entre la información obtenida con un dinamómetro mecánico y la proporcionada por el programa BOMEK.

TIPO DE INFORMACION	DINAMOMETRO MECANICO	DINAMOMETRO DELTA II Y BOMEK
Cargas y esfuerzos en la varilla pulida.....	SI	SI
Análisis de torsiones .....	SI	SI
Fuga en la válvula viajera .....	POSIBLE	SI
Fuga en la válvula de pie .....	POSIBLE	SI
Detección de compresión y/o expansión de gas en la bomba .....	POSIBLE	SI
Golpeteo de fluidos .....	POSIBLE	SI
Cargas y esfuerzos intermedios en la sarta de varillas .....	NO	SI
Carrera total del émbolo .....	NO	SI
Carrera efectiva del émbolo .....	NO	SI
Eficiencia volumétrica de la bomba .....	NO	SI
Detección de tubería desanclada .....	NO	SI
Fuga en la tubería de producción .....	NO	SI
Fricción excesiva de las varillas con la tubería de producción .....	NO	SI

Como puede verse, el programa "BOMEK" proporciona información detallada de las condiciones de operación del equipo de bombeo mecánico.

## EJEMPLOS

A continuación se muestran tres ejemplos obtenidos de pozos reales, a los cuales se aplicó la técnica de diagnóstico para pozos de bombeo mecánico.

Los valores de carga contra desplazamiento fueron obtenidos con el dinamómetro electrónico Delta II, luego estos datos se alimentaron a una computadora junto con algunos datos de producción y del diseño de la sarta de varillas.

La computadora arroja como resultados la carta dinamo-métrica superficial y la carta dinamo-métrica a la profundidad de colocación de la bomba. Al final de cada ejemplo se encuentra la hoja de resultados, la cual debe ser llenada por el ingeniero de producción de acuerdo a los diferentes perfiles que presentan dichas cartas dinamo-métricas. Una vez hecho lo anterior se pueden sugerir una o varias recomendaciones tendientes a eliminar las anomalías existentes con el objeto de mejorar las condiciones de bombeo.

INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO

SUBDIRECCION DE EXPLOTACION

DEPARTAMENTO DE PRODUCCION

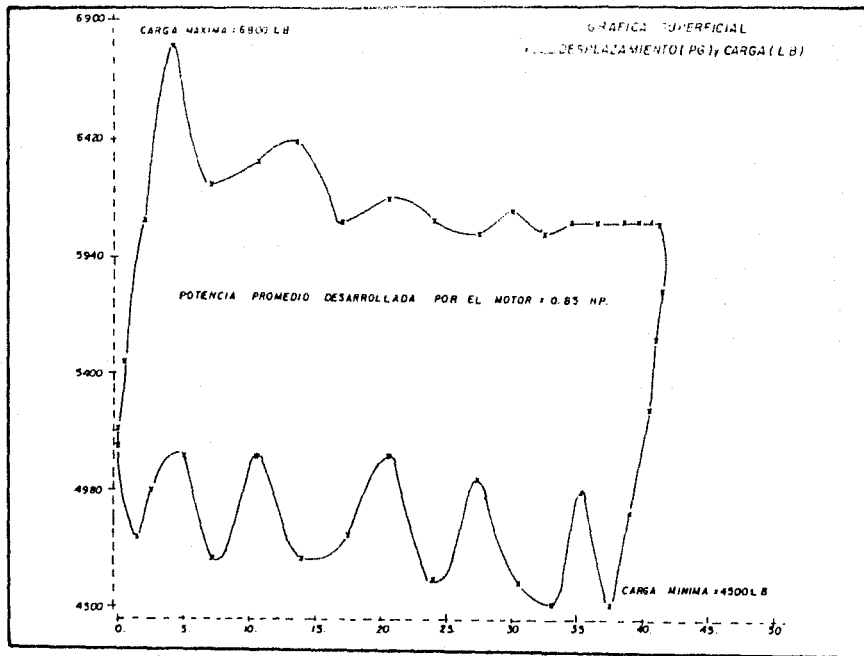
PROGRAMA "BOMEC".

TECNICA DE DIAGNOSTICO PARA POZOS DE BOMBEO MECANICO

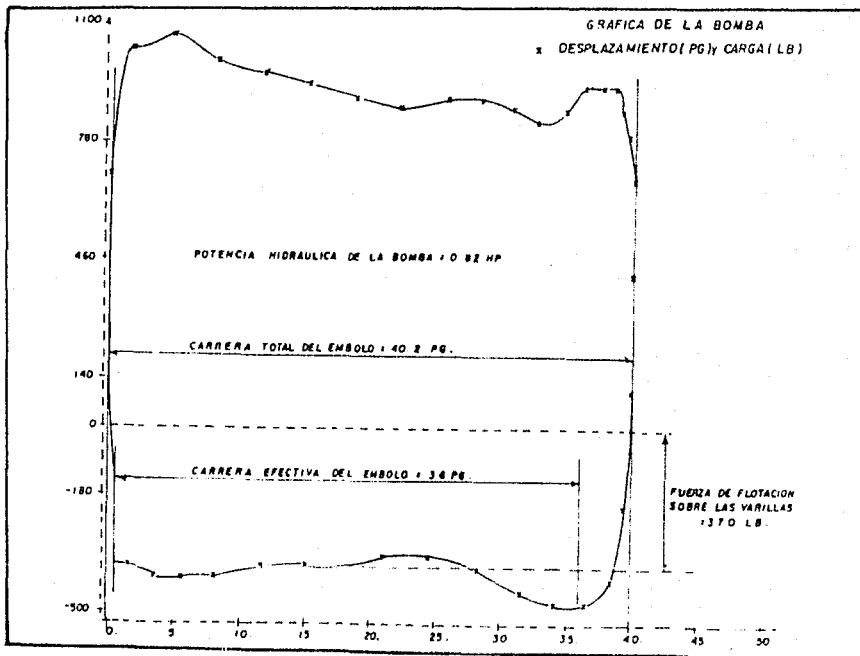
D A T O S

FECHA.-----	
POZO.-----	
PROFUNDIDAD TOTAL.-----	929 M.
UNIDAD DE BOMBEO.-----	
MOTOR.-----	
LONG. CARRERA VAR. PULIDA.-----	41.4 PG.
x VELOCIDAD DE BOMBEO.-----	6.2 SPM
x MOM. MAX. DE CONTRABALANCEO.-----	300000. PG-LB. DATO ARBITRARIO
x DESBALANCE ESTRUCTURAL.-----	0. LB.
DIMENSIONES VAR. PULIDA.-----	
BOMBA (TAMAÑO Y DESCRIPCION API)-----	
DIAM. DEL ENBOLO.-----	1-3/4 PG.
AJUSTE DEL ENBOLO.-----	
GASTO DE ACEITE.-----	7 M3/DIA
GASTO DE AGUA.-----	8 M3/DIA
DENS. REL. DEL ACEITE.-----	
DENS. REL. DEL AGUA.-----	
VISC. DEL ACEITE.-----	30 SSU.
RELACION GAS-LIQUIDO.-----	
DIAMETRO DE T.P.-----	2-7/8 PG.
DIAMETRO DE T.R.-----	6-5/8 PG.
TEMP. FONDO DE POZO.-----	
x SARTA DE VARILLAS.-----	1525 FT-7/8, 1200 FT 3/4

x DATOS NECESARIOS PARA EL PROCESAMIENTO DEL PROGRAMA.







## ESFUERZO EN LAS VARILLAS.

DIAM. (PG)	LONG. (PIES)	EFZO. MAX. (LB/PGZ)	EFZO. MIN. (LB/PGZ)
.875	1525.	11308.	7484.
.750	1200.	7027.	3269.

## CALCULO DE POTENCIAS.

POTENCIA	PROMEDIO DEL MOTOR.	.85 Hp.
POTENCIA	MAXIMA DEL MOTOR.	
POTENCIA	HIDRAULICA DE LA BOMBA.	.82 Hp.

## RESULTADOS DEL ANALISIS DE LA GRAFICA DE LA BOMBA.

PRESION DE ENTRADA A LA BOMBA	NO DETERMINADA
CARRERA TOTAL DEL EMBOLO.	40.2 PG.
CARRERA META DEL EMBOLO.	36 PG.
EFICIENCIA VOLUMETRICA DE LA BOMBA.	90%
FUERZA DE FLOTACION DE LAS VARILLAS.	370 LB.
PRESION DE FONDO FLUYENDO.	NO DETERMINADA
INTERFERENCIA DE GAS.	NO PRESENTE
GOLPETEO DE FLUIDO.	NO PRESENTE
VALVULA VIAJERA.	PERFECTO ESTADO
VALVULA DE PIE.	PERFECTO ESTADO
EMBOLO.	PERFECTO ESTADO
ANCLA DE L.A.T.P.	

## RESULTADOS DEL ANALISIS DE LA GRAFICA DE TORSIONES.

MOMENTO MAX. DE CONTRABALANCEO IDEAL. -----

RECOMENDACIONES. SE RECOMIENDA UTILIZAR LA MAXIMA CARRERA DE LA VARILLA PULIDA Y AJUSTAR LA VELOCIDAD DEL BOMBEO PARA QUE EL NIVEL DE TRABAJO DEL FLUIDO SE MANTENGA A UNA PROFUNDIDAD DE 750 M. APROXIMADAMENTE, VERIFICAR EL NIVEL CON EL ECOMETRO.

-----  
-----  
-----

INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

SUBDIRECCION DE EXPLOTACION

DEPARTAMENTO DE PRODUCCION

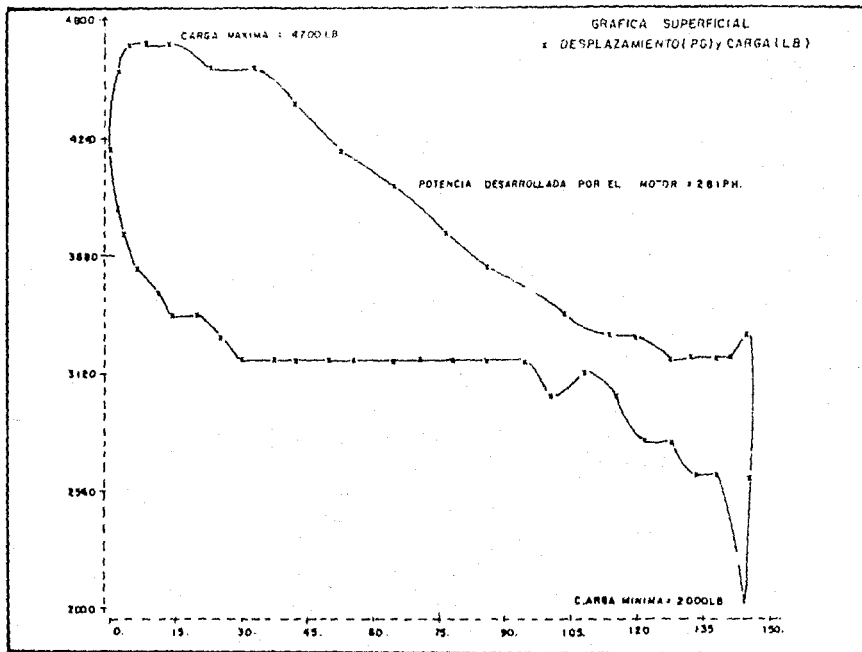
## PROGRAMA "BOMEC".

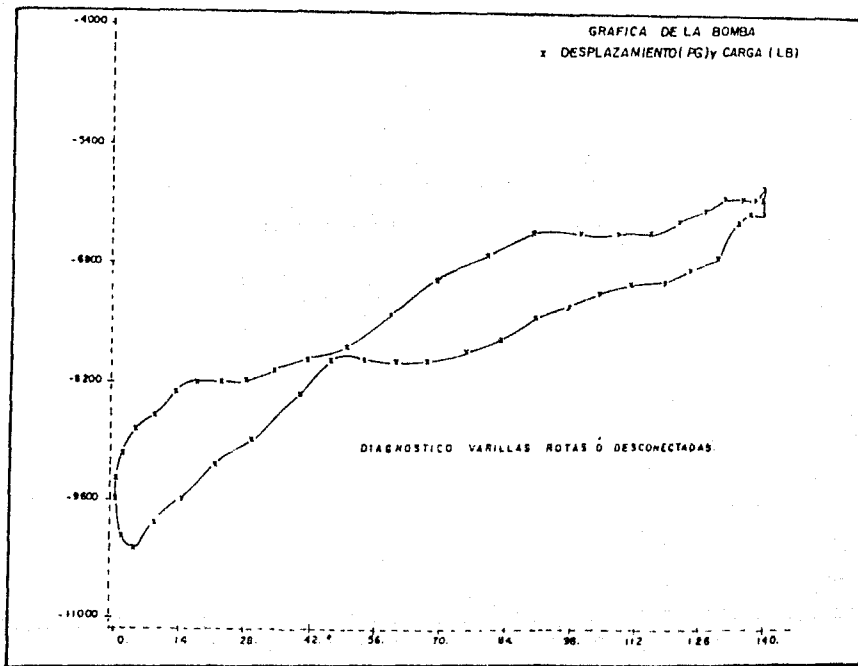
TECNICA DE DIAGNOSTICO PARA POZOS DE BOMBEO MECANICO

## D A T O S

FECHA.....	-----	
POZO.....	-----	
PROFUNDIDAD TOTAL.....	-----	2112 MTS.
UNIDAD DE BOMBEO.....	-----	AMERICAN C456G/0305
MOTOR.....	-----	SARGENT-ECONO-PAC
LONG. CARRERA VAR. PULIDA.....	-----	145.0 PG.
* VELOCIDAD DE BOMBEO.....	-----	9.8 SPM.
* NOM. MAX. DE CONTRABALANCEO.....	-----	800000. PG-LB DATO ARBITRARIO
* DESBALANCE ESTRUCTURAL.....	-----	0. LB.
DIMENSIONES VAR. PULIDA.....	-----	1-1/2, 147 PG.
BOMBA (TAMAÑO Y DESCRIPCION API).....	-----	SARGENT-RIHM 2-1/2
DIAM. DEL EMBOLO.....	-----	2 PULG.
AJUSTE DEL EMBOLO.....	-----	0,005
GASTO DE ACEITE.....	-----	0,0 M3/DIA
GASTO DE AGUA.....	-----	0,0 M3/DIA
DENS. REL. DEL ACEITE.....	-----	
DENS. REL. DEL AGUA.....	-----	1,05
VISC. DEL ACEITE.....	-----	100 SSU.
RELACION GAS-LIQUIDO.....	-----	60 M3/M3
DIAMETRO DE T.P.....	-----	2-7/8 PG.
DIAMETRO DE T.R.....	-----	6-5/8 PG.
TEMP. FONDO DE POZO.....	-----	
* SARTA DE VARILLAS.....	-----	1450, 1PG.-1700, 7/8PG.-1950, 3/4PG.

DATOS NECESARIOS PARA EL PROCESAMIENTO DEL PROGRAMA.





ESFUERZO EN LAS VARILLAS.

DIAM. (PG)	LONG. (PIES)	EFZO. MAX. (LB/PG2)	EFZO. MIN. (LB/PG2)
1.000	1450.	5984.	2546.
.875	1700.	63.	-1992.
.750	1950.	-7266.	-13446.

CALCULO DE POTENCIAS.

POTENCIA PROMEDIO DEL MOTOR.----- 2.81 Hp.  
 POTENCIA MAXIMA DEL MOTOR.-----  
 POTENCIA HIDRAULICA DE LA BOMBA.----- 2.49 Hp.

RESULTADOS DEL ANALISIS DE LA GRAFICA DE LA BOMBA.

PRESION DE ENTRADA A LA BOMBA -----  
 CARRERA TOTAL DEL EMBOLO.-----  
 CARRERA NETA DEL EMBOLO.-----  
 EFICIENCIA VOLUMETRICA DE LA BOMBA.-----  
 FUERZA DE FLOTACION DE LAS VARILLAS.-----  
 PRESION DE FONDO FLUYENDO.-----  
 INTERFERENCIA DE GAS.-----  
 GOLPETEO DE FLUIDO.-----  
 VALVULA VIAJERA.-----  
 VALVULA DE PIE.-----  
 EMBOLO.-----  
 ANCLA DE LA T.P.-----

RESULTADOS DEL ANALISIS DE LA GRAFICA DE TORSIONES.

MOMENTO MAX. DE CONTRABALANCEO IDEAL.-----

RECOMENDACIONES. SE RECOMIENDA EXTRAER EL APAREJO DE MOTOR  
MECANICO EN VISTA DE QUE LAS VARILLAS ESTAN  
ROTAS O DESCONECTADAS  
 -----  
 -----  
 -----  
 -----

INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO

SUBDIRECCION DE EXPLOTACION

DEPARTAMENTO DE PRODUCCION

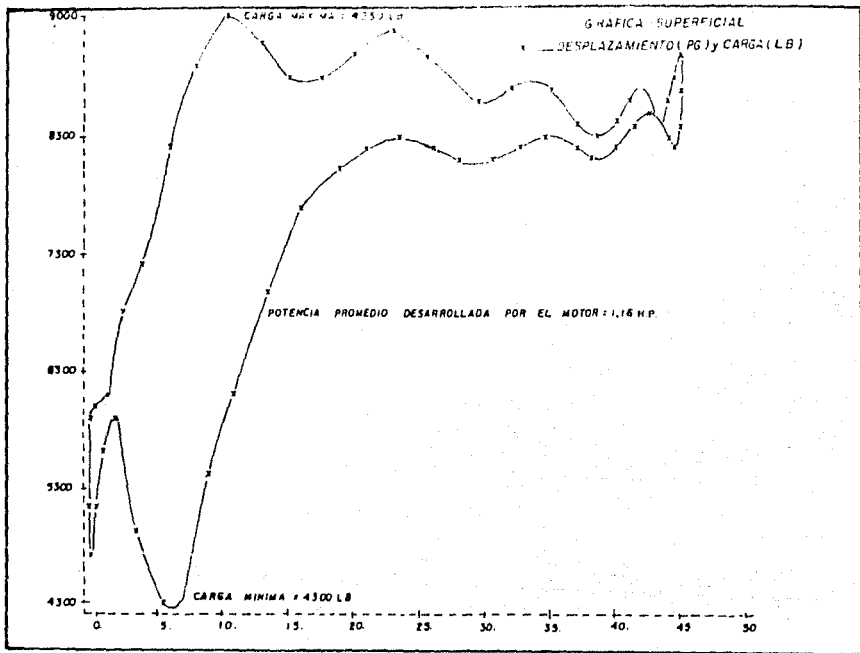
PROGRAMA "BOMEC".

TECNICA DE DIAGNOSTICO PARA POZOS DE BOMBEO MECANICO

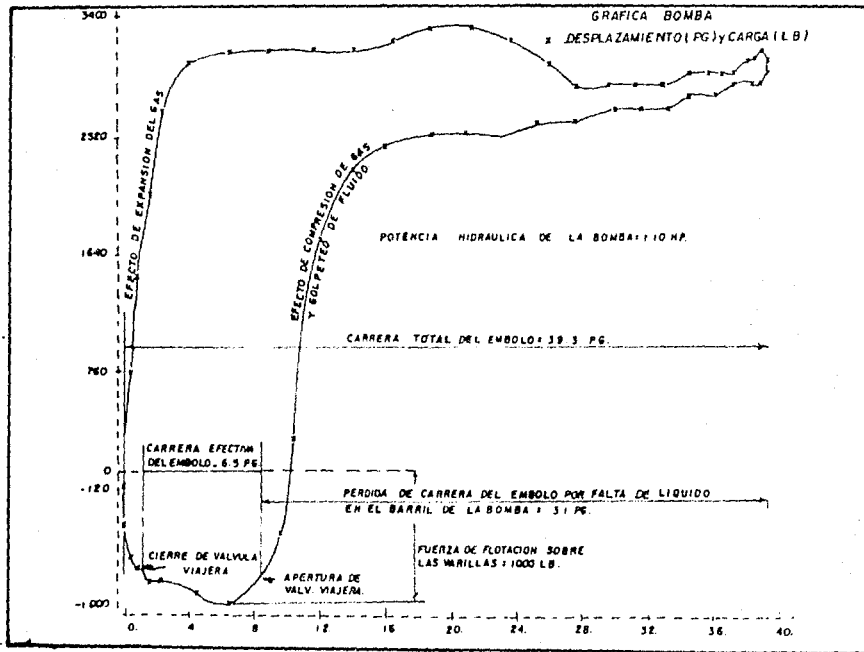
D A T O S

FECHA.....	-----	
POZO.....	-----	
PROFUNDIDAD TOTAL.....	-----	883.5 M.
UNIDAD DE BOMBEO.....	-----	
MOTOR.....	-----	
LONS. CARRERA VAR. PULIDA.....	-----	45.0 PG.
* VELOCIDAD DE BOMBEO.....	-----	8.1 RPM.
* MOM. MAX. DE CONTRABALANCEO.....	-----	300000. PG-LB DATO ARBITRARIO
* DESBALANCE ESTRUCTURAL.....	-----	0. LB.
DIMENSIONES VAR. PULIDA.....	-----	
BOMBA (TAMAÑO Y DESCRIPCION API).....	-----	
DIAM. DEL EMBOLO.....	-----	1-3/4 PG.
AJUSTE DEL EMBOLO.....	-----	
GASTO DE ACEITE.....	-----	2 M3/DIA
GASTO DE AGUA.....	-----	0 M3/DIA
DENS. REL. DEL ACEITE.....	-----	
DENS. REL. DEL AGUA.....	-----	
VISC. DEL ACEITE.....	-----	20 SSU.
RELACION GAS-LIQUIDO.....	-----	
DIAMETRO DE T.P.....	-----	
DIAMETRO DE T.R.....	-----	
TEMP. FONDO DE POZO.....	-----	
* SARTA DE VARILLAS.....	-----	2641FT-7/8

\* DATOS NECESARIOS PARA EL PROCESAMIENTO DEL PROGRAMA.







## ESFUERZO EN LAS VARILLAS.

DIAM. (PG)	LONG. (PIES)	EFZO. MAX. (LB/PGZ)	EFZO. MIN. (LB/PGZ)
.875	2641,	15383,	7151,

## CALCULO DE POTENCIAS.

POTENCIA PROMEDIO DEL MOTOR. --- 1,16 Hp.  
 POTENCIA MAXIMA DEL MOTOR. ---  
 POTENCIA HIDRAULICA DE LA BOMBA. --- 1,10 Hp.

## RESULTADOS DEL ANALISIS DE LA GRAFICA DE LA BOMBA.

PRESION DE ENTRADA A LA BOMBA. NO DETERMINADA  
 CARRERA TOTAL DEL EMBOLO. 39,3 PG.  
 CARRERA NETA DEL EMBOLO. 6,5 PG.  
 EFICIENCIA VOLUMETRICA DE LA BOMBA. 16,5%  
 FUERZA DE FLOTACION DE LAS VARILLAS. 1400 LB.  
 PRESION DE FONDO FLUYENDO. NO DETERMINADA  
 INTERFERENCIA DE GAS. LEVE  
 GOLPETEO DE FLUIDO. PRESENTE  
 VALVULA VIAJERA. BUEN ESTADO  
 VALVULA DE PIE. BUEN ESTADO  
 EMBOLO. BUEN ESTADO  
 ANCLA DE LA T.P. ---

## RESULTADOS DEL ANALISIS DE LA GRAFICA DE TORSIONES.

MOMENTO MAX. DE CONTRABALANCEO IDEAL. ---  
 RECOMENDACIONES. EL REGISTRO DE EQUIPETO DETERMINO NIVEL DE LIQUIDO A 800 M. APROX. POR LO QUE EL GOLPE-  
 TEO DE FLUIDO SE DEBE A FALTA DE APORTACION  
 DEL POZO. SE RECOMIENDA OPERAR EL POZO EN  
 FORMA INTERMITENTE Y ESTUDIAR LA POSIBILIDAD  
 DE HACER UN FRACTURAMIENTO A LA FORMACION.  
 ---  
 ---

## CAPITULO VI

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- La técnica de diagnóstico a pozos de bombeo mecánico desarrollada por S.G Gibbs y A.B Nelly constituye una valiosa herramienta para determinar el comportamiento del aparejo en el fondo del pozo.

2.- El programa de computo BOMEK permite detectar problemas tales como fricción excesiva de las varillas con la tubería de producción, fugas en las válvulas viajera y de pie, detección de tubería desanclada, golpeteo de fluidos -candado de gas, rotura de varillas y otros problemas relacionados con la operación de la unidad de bombeo mecánico; lo que conduce a establecer criterios para mejorar las condiciones de operación.

3.- Aunque no resulta fácil incluir cifras que ilustren los beneficios que se pueden obtener con la técnica de diagnóstico, es fácil aceptar que dicha aplicación tiene gran trascendencia ya que solo basta con apreciar la magnitud de los problemas que pueden resolverse a fin de mejorar las operaciones de los pozos de bombeo mecánico.

4.- La interpretación de la carta dinamoétrica, la técnica de diagnóstico y el programa BOMEK son de utilidad ya que permiten diagnosticar en forma ágil y confiable el tipo de problema existente y preparar oportunamente el tipo de operación a realizar, evitando tiempos de espera por refacciones o cualquier otro contratiempo que se presente.

Se recomienda utilizar el dinamómetro electrónico Delta II y el programa BOMEK para el diagnóstico de la operación de los pozos con bombeo mecánico, así como establecer un programa para el registro periódico de los mismos a fin de mantenerlos trabajando satisfactoriamente.

## NOMENCLATURA

A <sub>1</sub>	Area de la carta dinamométrica ( $pg^2$ )
A <sub>1</sub>	Area inferior de la carta dinamométrica ( $pg^2$ )
A <sub>2</sub>	Area superior de la carta dinamométrica ( $pg^2$ )
B	Desbalance estructural de la unidad de bombeo (lb)
C	Constante de calibración del dinamómetro
C.B	Línea de contrabalanceo
C.B.C.	Contrabalanceo aproximado (lb)
C.B.I.	Contrabalanceo ideal (lb)
C.B.R.	Contrabalanceo real (lb)
D <sub>1</sub>	Máxima deflexión de la carta dinamométrica (pg)
D <sub>2</sub>	Mínima deflexión de la carta dinamométrica (pg)
E.P.M.	Emboladas por minuto.
F <sub>b</sub>	Fuerza de flotación de las varillas (lb)
H <sub>p</sub>	Potencia de la unidad de bombeo (hp)
H <sub>pm</sub>	Potencia máxima en la unidad de bombeo (hp)
I <sub>f</sub> = $\alpha$	Factor de aceleración
L	Longitud de la carta dinamométrica (pg)
M	Momento máximo de contrabalanceo
MPRL	Carga mínima sobre la varilla pulida (lb)
n	número de términos considerados en la serie de Fourier
N	Velocidad de bombeo (epm)
PPPL	Carga máxima sobre la varilla pulida (lb)
PRHP	Potencia en la varilla pulida (hp)
S	Longitud de carrera de la varilla pulida (pg)
t	Tiempo (seg)
TF	Factor de torsión (lb*pg)
TM	Torsión máxima (lb*pg)
Tr	Capacidad de torsión en la caja de engranes (lb*pg)
T <sub>wn</sub>	Torsión debida a la carga neta del pozo (lb*pg)
TP	Tubería de producción
TR	Tubería de revestimiento
V	Velocidad instantánea de la varilla pulida (pies/seg)
w	Velocidad angular (rad/seg)
W	Carga del pozo en un ángulo específico de la manivela (lb)
W <sub>f</sub>	Carga de fluidos (lb)
W <sub>m</sub>	Carga neta del pozo (lb)
W <sub>p</sub>	Carga permisible (lb)
W <sub>r</sub>	Carga de las varillas (lb)
T <sub>wneta</sub>	Torsión neta (lb*pg)
$\pi$	3.1416
$\theta$	Ángulo de la manivela (grados)
V, f	Coefficientes de Fourier asociados a la función desplazamiento (ft)

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

- 1.- Agnew Bob G.: "The Dynamometer as a Production Tool" API Drilling and Production Practice 1957
- 2.- Brown K.E et., al.: "The Technology of Artificial Lift Methods" Penn Well Books, Vol. 2a
- 3.- Craft B.C, Holden W.R and Graves E.D.: "Well Design: Drilling and Production". Prentice Hall 1962
- 4.- Diaz Zertuche Héctor.: "Apuntes de Producción de Pozos II" Facultad de Ingeniería 1988
- 5.- Eickmeier J.R.: "Diagnostic Analysis of Dynamometer Cards" J.P.T January 1967
- 6.- Gibbs S.G.: "Predicting the Behaviour of Sucker Rod Pumping Systems". J.P.T March 1968
- 7.- Gibbs S.G. and Neely A.B.: "Computer Diagnosis of Down-Hole Conditions in Sucker Rod Pumping Well". J.P.T 1966
- 8.- Herbert W.F.: "Sucker Rod Pumps Now Analyzed With Digital Computer". Oil and Gas Journal, February 1966
- 9.- I.M.P.: "Estudio de Registros del Dinamómetro Electrónico Delta II (Reportes de Avance I y II) México 1973
- 10.- Johnson-Fagg Engineering Company.: "Boletín DYN 657" Tulsa Tulsa Okla
- 11.- Patton L. Douglas.: "A Computer Technique for Analysing Pumping Well Performance" J.P.T March 1968
- 12.- Petróleos Mexicanos.: "El Petróleo". Pemex 1984