

3  
zej.



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO  
PARA UNIDADES DE BOMBEO MECANICO

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A :

**VIRGINIA CABRERA GUZMAN**

DIRECTOR DE TESIS:  
ING. HECTOR DIAZ Z.

México, D. F.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1994



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-075

**SRITA. ELBA VIRGINIA CABRERA GUZMAN**  
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Jesús Héctor Díaz Zertuche, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero petrolero:

**SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICO PARA UNIDADES DE BOMBEO MECANICO**

	<b>INTRODUCCION</b>
<b>I</b>	<b>UNIDAD DE BOMBEO MECANICO</b>
<b>II</b>	<b>CARTAS DINAMOMETRICAS</b>
<b>III</b>	<b>DESCRIPCION DEL EQUIPO DE CONTROL AUTOMATICO</b>
<b>IV</b>	<b>SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICO</b>
<b>V</b>	<b>BENEFICIOS Y VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICO</b>
	<b>CONCLUSIONES</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>

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

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

Atentamente  
"POR MI PAZ HABLARA EL ESPIRITU"  
Ciudad Universitaria, a 26 de octubre de 1993.  
EL DIRECTOR

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS\*EGLM\*ggg\*

*JM*

**Universidad Nacional Autónoma de México**

**Facultad de Ingeniería**

**División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**Departamento de Explotación del Petróleo**

**Tema: Sistemas de Control Automático para Unidades de Bombeo Mecánico**

**Director de Tesis:** Ing. Jesús Héctor Díaz Zertuche

**Jurado:**

**Presidente:** Ing. Salvador Macías Herrera



**Vocal:** Ing. Jesús Héctor Díaz Zertuche

**Secretario:** M. en I. Rafael Rodríguez Nieto



**1er. Suplente:** Ing. Roberto Padilla Sixto

**2do. Suplente:** Ing. Nehemías Herrera Patrón



Ciudad Universitaria, Febrero 1994.

***Dedicado a estas personas formidables que son mis hermanas,  
mis compañeras, mis amigas. Como un reconocimiento a su  
valor y al orgullo con el que han salido adelante en situaciones  
adversas. Con todo cariño por que ellas merecen lo mejor.***

**Patricia,**

**María,**

**Leticia,**

**Margarita,**

**Rocio e**

**Irene.**

***A mi madre la Sra. Consuelo Guzmán Hernández por haberme ayudado a madurar al exigir másde mi como persona y por haberme otorgado su confianza.***

***A mi padre, el Sr. Plutarco Cabrera Pérez como reconocimiento por su trabajo de tantos años y por haberme dado la opurtunidad de superarme.***

***A mi hermano el Ing. José Cabrera Guzmán por su eterna preocupación por el bienestar familiar, con todo mi cariño, respeto y agradecimiento.***

***A mi hermano ldefonso, con cariño.***

***A el Ing. Carlos Alvarda Pérez, mi querido **Monte** por estar conmigo siempre que me hizo falta.***

***A Virginia, la niña que fui hace muhos años.***

## **Agradecimientos Especiales**

**Este trabajo es el resultado de la participación, el apoyo y la comprensión de muchas personas. Todas ellas me ayudaron incluso más de lo yo les pedí. Nunca podré igualar su generosidad pero espero seguir contando con su confianza.**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme estudiar una carrera a través de la Facultad de Ingeniería.**

**A Patricia Cabrera Guzmán por sus enseñanzas y su generosa ayuda aún en los momentos de más trabajo. Gracias por permitirme reencontrarte.**

**A el Ing. Jesús Manuel Pérez Muñoz por sus valiosos consejos para mejorar este trabajo y por aceptar ayudarme aún sin conocerme. Gracias por estar ahí.**

**A el Ing. Sergio Clemente Reyes por facilitarme mucha de la información para este trabajo.**

**A el M. en I. José Angel Gómez Cabrera por la información proporcionada.**

**A el Ing. Carlos Alvarado Pérez por su apoyo, su amistad y su cariño. Sin su ayuda el camino hubiera sido más difícil.**

**A el Ing. Roberto Padilla Sixto quién siempre ha tenido respuestas para mí.**

**A el L. en R.I. Carlos Reyes López por la hospitalidad que me brindó y por compartir conmigo su pertenencias.**

**A toda aquellas personas que colaboraron conmigo en forma directa o indirectamente.**

## INDICE

<b>INTRODUCCION</b>	<b>4</b>
<b>CAPITULO I UNIDAD DE BOMBEO MECANICO</b>	<b>8</b>
I.1 Partes esenciales	9
I.1.1 Bomba subsuperficial	9
I.1.2 Sarta de varillas	12
I.1.3 Equipo superficial de bombeo	13
I.1.4 Reductor de engranes	15
I.1.5 Motor principal	15
I.2 Ciclo bombeo	16
I.3 Geometría de las unidades de bombeo	19
<b>CAPITULO II CARTAS DINAMOMETRICAS</b>	<b>21</b>
II.1 El dinamómetro	21
II.2 Definición de la carta dinamométrica	24
II.3 Obtención de la carta dinamométrica ideal	26
II.4 Factores que deforman la carta dinamométrica	27
II.4.1 Fuerzas de aceleración	29
II.4.2 Efecto armónico	29
II.4.3 Alargamiento y contracción de varillas	30
II.4.4 Vibraciones en las varillas	30
II.4.5 Amortiguamiento	32
II.5 Obtención de la carta dinamométrica de fondo	35
II.5.1 Dinamómetro de fondo	35
II.5.2 Programa de cómputo	38
II.6 Cartas dinamométricas más comunes	42



II.6.1	Embolo atascado	42
II.6.2	Candado de gas	43
II.6.3	Golpeteo de fluidos	45
II.6.4	Bomba desanclada / varillas rotas	45
II.6.5	Fugas a través de la válvula viajera o el émbolo	47
II.6.6	Compresión de gas	47
 <b>CAPITULO III DESCRIPCION DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO</b>		 50
III.1	Antecedentes de los sistemas de control automático	50
III.1.1	Definición del pump-off	51
III.1.2	Breve historia de los equipos de control automático	52
III.1.3	Técnicas de detacción del pump-off	55
III.1.4	Desarrollo de técnicas de control	64
III.1.2	Funcionamiento básico del sistema de detección	69
III.3	Colocación del sistema de control automático en la unidad de bombeo	72
III.4	Sistema integral de control autommático	76
 <b>CAPITULO IV SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICO</b>		 79
IV.1	Sistema operativo	79
IV.2	Información que proporciona el sistema de control automático	85
IV.3	Parámetros de operación del sistema de control automático	90

<b>IV.4 Gráficas que provee el sistema de control pump-off</b>	<b>99</b>
--	-----------

<b>CAPITULO V BENEFICIOS Y VENTAJAS DE LOS SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO</b>	<b>109</b>
--	------------

<b>V.1 Ventajas del sistema de control automático</b>	<b>110</b>
<b>V.2 Beneficios esperados</b>	<b>113</b>
<b>V.3 Estudio estadístico en el uso del sistema de control automático.</b>	<b>118</b>

<b>CONCLUSIONES</b>	<b>122</b>
---------------------	------------

<b>ANEXO</b>	<b>124</b>
--------------	------------

<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>131</b>
---------------------	------------

## INTRODUCCION

Un aspecto importante en la industria petrolera es la extracción de hidrocarburos. A medida que avanza la explotación de los yacimientos, la presión en la formación productora tiende a disminuir gradualmente, pudiendo llegar en ocasiones rápidamente al límite de abandono. Para evitar tal situación desde hace muchos años se desarrollaron varios métodos artificiales de producción.

La selección cualitativa de un sistema artificial de producción depende de varios factores como son: gastos requeridos en la superficie, estado mecánico del pozo, distribución de pozos circunvecinos, disponibilidad de recursos económicos, propiedades físicas y químicas de los fluidos producidos, disponibilidad de energía, profundidad del intervalo productor, si se trata de un pozo vertical o desviado, diámetro y longitud de la línea superficial, relación gas-aceite, porosidad, permeabilidad, presencia de fluidos corrosivos, porcentaje de agua producida, arenamiento, incrustaciones de sales, depósitos de asfaltenos y parafinas, etc. Es común que se utilice alternativamente más de un método artificial de producción y/o recuperación secundaria.

Entre los sistemas artificiales de producción, el bombeo mecánico (BM) es un método ampliamente utilizado en la industria petrolera. Un estudio realizado en Estados Unidos demostró que el 85% de los pozos que operan con sistemas

artificiales de producción, utilizan bombeo mecánico [Brown 1980]. Otro estudio indicó que de los sistemas artificiales de producción instalados de 1983 a 1986, más del 92% fueron de BM [Neely & Tolbert, 1986].

El BM es un sistema artificial de producción muy popular debido a su simplicidad y versatilidad para cubrir un amplio rango de condiciones de operación.

El BM es un sistema en el cual se tiene un motor en la superficie que suministra energía mecánica a toda la instalación. El reductor de engranes disminuye la velocidad de la flecha del motor a una velocidad de bombeo adecuada. La unidad superficial cambia el movimiento rotatorio del motor por un movimiento reciprocante. La sarta de varillas de succión transmite la energía que recibe a la bomba subsuperficial, la cual admite en su interior el fluido del fondo del pozo y lo eleva para ser producido.

Del diseño y funcionamiento efectivo de cada una de las partes que componen la unidad de BM depende la máxima producción de hidrocarburos. Actualmente existe en el mercado una tecnología electrónica para el control, supervisión y vigilancia de operaciones en pozos de BM.

Este sistema utiliza dispositivos electrónicos y sensores que se instalan en la unidad superficial de bombeo, los cuales son conectados a un controlador automático compatible con los sistemas de cómputo.

La información se obtiene en el mismo pozo y es posible realizar diagnósticos in-situ en la unidad de captación de información o bien, si así lo requiere el problema, es enviado por cable o radio a una unidad central de cómputo donde será clasificada por personal capacitado para realizar diagnósticos y posteriormente será regresada al campo donde se tomarán las medidas necesarias en base al diagnóstico recibido.

Si un pozo que tenga este tipo de control automático se encuentra muy alejado de la oficina central y no existe el sistema de comunicación por cable o radio o bien, la topografía del terreno es muy accidentada, que dificulta la comunicación por cable, es posible mandar la información del pozo a la oficina central incluso vía satélite.

En el BM la utilización de cartas dinamométricas como herramientas de diagnóstico es muy confiable, ya que por medio de éstas es posible detectar fallas mecánicas y condiciones de trabajo indeseables.

En los sistemas de control automático los sensores detectan posición y carga sobre la varilla pulida de una manera continua y exacta, pudiéndose generar en el pozo cartas dinamométricas. Además, es posible comparar datos obtenidos con los límites impuestos por diseño en el sistema de bombeo lo que previene fallas y desgaste en el equipo.

Con la instalación de un equipo de control automático es posible aumentar la eficiencia en las operaciones, aumentar la

producción, disminuir fallas en el equipo y obtener considerables ahorros en el consumo de energía. Cabe señalar que los beneficios señalados anteriormente varían en cada pozo.

Este trabajo se presenta una descripción del equipo de BM, incluyendo cada uno de los elementos que contribuyen al movimiento del sistema y las funciones que desempeña para un trabajo óptimo. Se incluye el ciclo de bombeo y las diferentes geometrías de unidades.

También se incluye el principio de operación del dinamómetro y cartas dinamométricas tipo, el diagnóstico de las condiciones de operación de la bomba en el fondo del pozo, además cartas dinamométricas que describen problemas típicos de pozos que operan con BM

Además se define el sistema de control automático para bombeo mecánico denominado pump-off, su desarrollo desde sus inicios hasta la fecha y el principio básico de su operación.

Por otra parte se incluye la descripción del sistema operativo, la información que se obtiene y ejemplos de cartas dinamométricas reales.

## CAPITULO I

### DESCRIPCION DEL EQUIPO DE BOMBEO MECANICO

El bombeo mecánico es un sistema artificial de producción ampliamente aceptado en la industria petrolera debido a su simplicidad de funcionamiento y a su versatilidad para cubrir un extenso rango de operación. En este sistema el movimiento de equipo de bombeo se origina en la superficie y se transmite por medio de una sarta de varillas a la bomba subsuperficial, la cual a su vez admite en su interior los fluidos del yacimiento y los transfiere a la TP para que sean elevados hasta la superficie.

En este capítulo se analiza el comportamiento de cada uno de los elementos dentro del sistema, las interacciones entre ellos y la función que desempeñan. Además se describe el ciclo de bombeo y se mencionan las diferentes unidades de BM.

Aún cuando este capítulo se presente a manera de antecedente, se espera que el contenido global contribuya a un entendimiento completo de todos aquellos factores que deben tomarse en cuenta en el diseño de instalaciones de bombeo mecánico, y a su vez en el diseño de instalaciones de equipos de contro automático.

## **I.1 Partes esenciales**

La figura 1.1 muestra los componentes esenciales de un sistema de bombeo mecánico:

- Bomba subsuperficial
- Sarta de varillas de succión
- Equipo superficial de bombeo
- Reductor de engranes
- Motor principal

### **I.1.1. Bomba subsuperficial**

Este tipo de bomba actúa por medio de varillas de succión y constan esencialmente de cuatro elementos:

1. Barril de trabajo
2. Embolo
3. Válvula de entrada (válvula de pie)
4. Válvula de salida (válvula viajera)



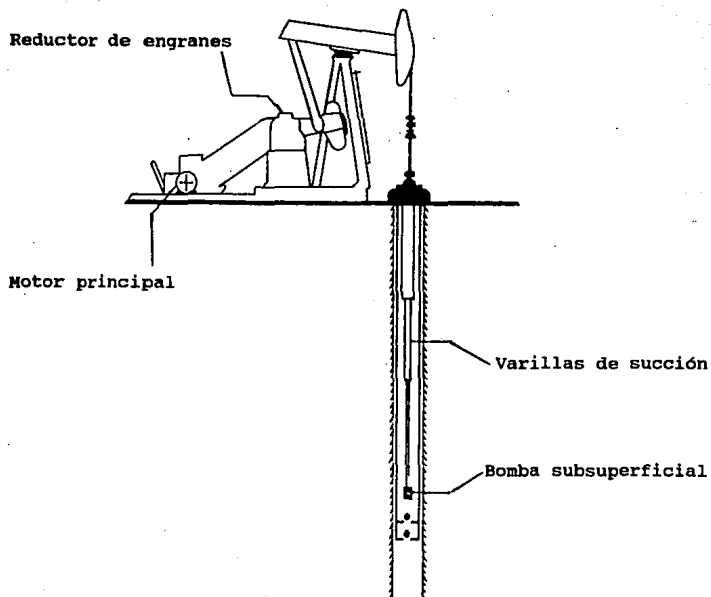


Figura 1.1 Partes esenciales del sistema de bombeo mecánico.

Estas bombas se dividen básicamente en tres categorías:

1. Para tubería de producción (TP)
2. De inserción
3. Para tubería de revestimiento (TR)

### Bombas para TP

Este tipo de bombas maneja mayor volumen de líquido por que su diámetro de émbolo es mayor que el de una bomba de inserción, pero debido a esto la carga de fluido es mayor.

Una desventaja en estas bombas es que el barril forma parte de la TP y al realizar una reparación o si requiere alguna reposición (de la bomba), necesariamente se tiene que extraer completa la TP.

Las bombas de este tipo se recomiendan en pozos con alto nivel de fluido y con verticalidad comprobada.

### Bombas de inserción

Estas bombas se colocan en el extremo inferior de la sarta de varillas como un conjunto que incluye: émbolo, barril y válvula estacionaria y se insertan en un niple de asiento instalado en la TP. Debido a esto, no es necesario extraer la T.P. para reparaciones o sustituciones en la bomba, lo cual constituye una ventaja con respecto a las bombas para TP.

Un aspecto muy importante es la selección del tipo de bomba adecuada para las condiciones particulares de cada pozo, debido a que los costos de producción se incrementan notablemente por fallas frecuentes en la bomba subsuperficial.

### **I.1.2 Sarta de varillas de succión**

La sarta de varillas es un complejo sistema vibratorio que transmite energía del equipo subsuperficial a la bomba subsuperficial. El diseño de una instalación de bombeo incluyendo el equipo superficial y subsuperficial requiere de una selección satisfactoria de la sarta de varillas.

Un diseño óptimo de sarta de varillas consiste esencialmente en determinar la sarta más ligera (y por lo tanto la más económica) que pueda utilizarse sin exceder el esfuerzo de trabajo de las propias varillas. En general se ha observado que no deben permitirse esfuerzos que excedan  $30,000 \text{ lb/pg}^2$ . Este valor disminuye conforme aumentan las propiedades corrosivas del fluido que se va a bombear.

Cuando la bomba subsuperficial está colocada a profundidades mayores de 3 500 pies, es recomendable utilizar sargas de varillas telescopiadas, las cuales consisten en diferentes diámetros de varillas, donde el diámetro más pequeño se coloca en el fondo de la sarta inmediatamente arriba del émbolo debido a que la carga en ese punto es menor. Después se coloca un diámetro mayor que el anterior y así sucesivamente. A menores profundidades donde la carga en las varillas es mayor se utilizan también mayores diámetros. Un arreglo telescopiado da por resultado una carga

mucho menor en el equipo superficial, que la que se obtendría con una sarta de un sólo diámetro y representa un ahorro económico.

Este estudio fue realizado por el Instituto Americano del Petróleo y se menciona en las prácticas recomendadas del API, RP, 11L.

### **I.2.3. Equipo superficial de bombeo**

Un arreglo típico del equipo superficial de bombeo se muestra en la Fig. 1.2.3 La función del equipo es transmitir energía del motor principal a la sarta de varillas de succión, para lograrlo, debe cambiar el movimiento rotatorio de la manivela a un movimiento oscilatorio por medio del balancín y además debe reducir la velocidad del motor principal a una velocidad adecuada de bombeo. La reducción de velocidad se lleva a cabo en el reductor de engranes.

La varilla pulida es la unión directa entre la sarta de varillas y el equipo superficial. Esta varilla pasa a través de un estopero y cerca de su extremo superior hay una grampa soportada por una placa (que a su vez esta soportada por cables flexibles que pasan por la cabeza de caballo y por el extremo del balancín) y que se utilizan para asegurar que la tensión aplicada a la sarta de varillas de succión sea siempre vertical, de modo que no se apliquen momentos de flexión para asegurar el viaje vertical de la varilla pulida a través del estopero y asegurar así un buen sello evitando fugas de fluido en la superficie.

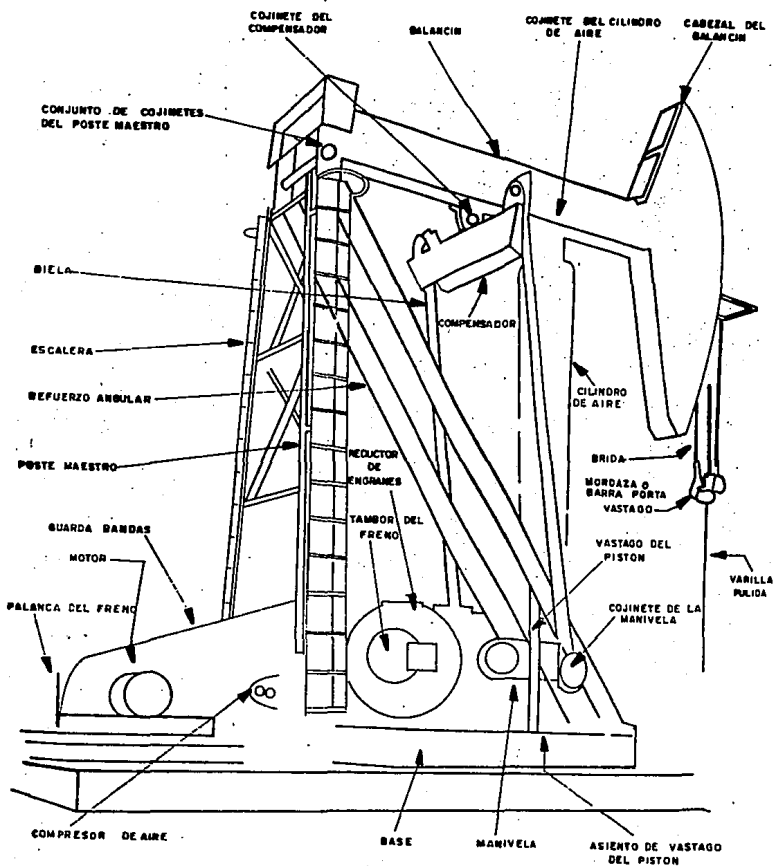


Figura 1.2.3 Equipo superficial de bombeo.

El balancín está soportado por el poste Sampson. El movimiento al balancín se transmite por medio de 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 y en conjunto con las demás dimensiones geométricas de la unidad de bombeo, definen la longitud de carrera de la varilla pulida (ver Anexo).

#### **I.2.4 Reductor de engranes**

Este elemento tiene por función disminuir la velocidad del motor principal a una velocidad de bombeo adecuado. La reducción total de velocidad del motor principal está dada por la relación del diámetro de la polea del motor y el reductor de engranes, debido a que la primera recibe la potencia del motor principal por medio de una banda.

Es muy importante la determinación exacta de la torsión máxima a la que estará sujeto el reductor de engranes ya que la API utiliza como base la torsión máxima permisible para el rango de las unidades de bombeo.

#### **I.2.5 Motor principal**

Existen dos tipos de motores básicamente

1. Motores eléctricos
2. Motores de combustión interna

Los motores eléctricos facilitan el análisis del comportamiento de la unidad de bombeo, debido a que pueden medir la capacidad exacta de energía eléctrica suministrada a la unidad sin interferir con la operación del pozo, además de que tienen un bajo costo inicial, mantenimiento económico y son fáciles de ajustar a sistemas automáticos.

Los motores de combustión interna tienen un control de velocidad más flexible que los anteriores, éstos operan en un amplio margen de condiciones de carga y puede autoalimentarse en algunos campos petroleros.

La selección de un motor para determinada unidad se realiza en base a los recursos locales, suministros, costos de combustible, capacidad de mantenimiento y existencia de personal experimentado, pero sobre todo, el motor seleccionado debe tener suficiente potencia para elevar al ritmo de producción deseado desde el nivel de trabajo del fluido del pozo hasta la superficie.

### **I.3 El ciclo de bombeo**

Las características principales del ciclo de bombeo se ilustra en la figura 1.3. Este ciclo es aplicable a todos los tipos de bombas subsuperficiales. A continuación se describen los cuatro movimientos básicos.

1. Cerca de la carrera descendente el émbolo se mueve hacia abajo. La válvula viajera está abierta permitiendo el paso del fluido al interior de la bomba. La válvula de pie está cerrada y es la que está soportando el peso de la columna de fluido en la TP.
2. El émbolo se mueve hacia arriba cerca del fondo de la carrera descendente. La válvula viajera está cerrada por lo tanto, la carga de la columna de fluido ha sido transferida de la TP a la sarta de varillas.
3. El émbolo se mueve hacia arriba cerca del tope de la carrera ascendente. La válvula viajera está cerrada y la de pie está abierta admitiendo fluidos del pozo. Mientras la columna de fluido ha sido levantada, el barril de la bomba es evacuado, permitiendo la entrada de nuevo fluido.
4. El émbolo se mueve hacia abajo cerca del tope superior de la carrera descendente. La válvula de pie está cerrada por un incremento de presión resultante por la compresión de fluido en el volumen incluido entre la válvula de pie y la válvula viajera. La válvula viajera está abierta.

Después de que el émbolo alcanza el fondo de la carrera descendente, se repite el ciclo.



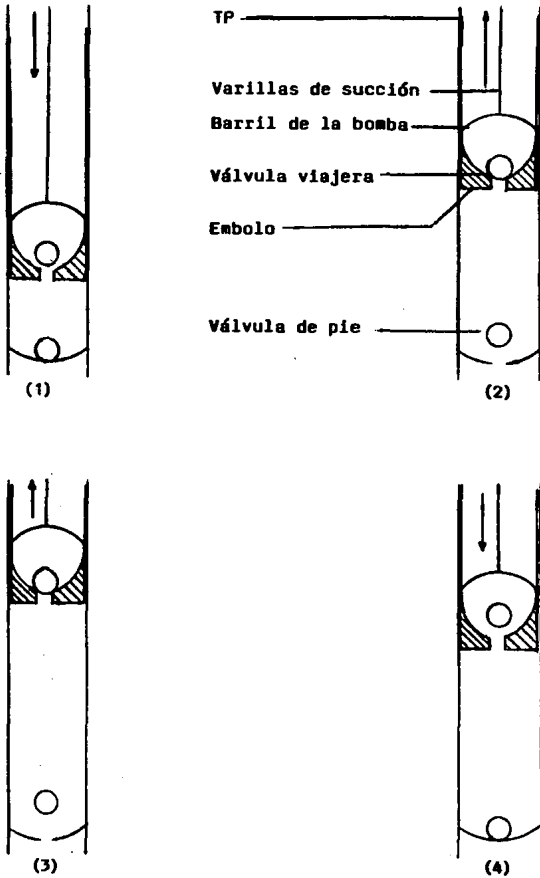


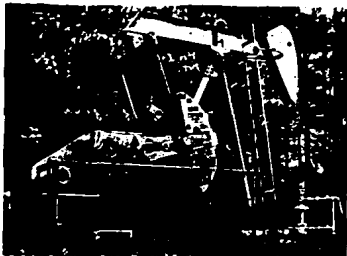
Figura 1.3 Ciclo de bombeo.

#### **I.4 Geometría de las unidades de BM**

Todos los tipos geométricos de unidades de bombeo mecánico se dividen en dos clases diferentes.

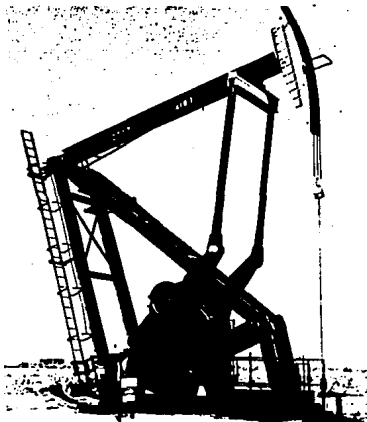
1. Clase I. Es un sistema de palanca el cual tiene el reductor de engranes en la parte trasera con apoyo a la mitad del balancín. Esta clase está representada por la Unidad Convencional. La ventaja de este tipo de unidades es que son muy adaptables, sencillas de operar y requieren un mínimo mantenimiento.
2. Clase III. Este tipo de unidades tiene el reductor de velocidad al frente y está representado por la unidad aerobalanceada y la unidad Mark II, donde el apoyo está localizado en el otro extremo del balancín. La unidad Mark II reduce las necesidades de potencia y torque debido a su geometría y características de contrabalanceo, produciendo además una carrera ascendente ligeramente mas lenta y una carrera descendente más rápida, reduciendo la aceleración donde la carga es mayor, dando por resultado cargas pico menores y alargando la vida útil de la varilla pulida. El peso de la unidad aerobalanceada se reduce debido a que utiliza aire comprimido en vez de contrapesos de hierro.

La figura 1.4 ilustra sistemáticamente estos tipos geométricos de unidades de bombeo dadas por las distribuciones de palancas y localización de los cojinetes con relación a la flecha de la manivela.

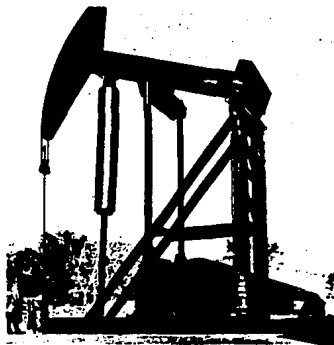


**Unidad Convencional**

**CLASE 1**



**Unidad Mark II**



**Unidad Aerobalanceda**

**CLASE 11**

## CAPITULO II

### CARTAS DINAMOMETRICAS

Las cartas dinamométricas son una herramienta muy poderosa en el bombeo mecánico. Debido a esto, en el siguiente capítulo se hace una recopilación sobre los detalles más importantes de este tema comenzando por el dinamómetro que es el dispositivo mediante el cual se obtiene la información de carga y posición para generar la carta dinamométrica. Posteriormente se hace una breve descripción de la carta, la forma de obtener la carta ideal, se analizan los factores que la deforman y se describen los métodos para obtener la carta de fondo (dinamómetro de fondo y el modelo matemático). Finalmente se analizan algunos de los problemas típicos de bombeo mecánico por medio de sus respectivas cartas dinamométricas.

#### II.1 El dinamómetro

Durante muchos años el dinamómetro mecánico ha sido el principal instrumento utilizado para el análisis de operación de los pozos de bombeo mecánico. Dicho aparato proporciona una gráfica de carga en la varilla puidla contra desplazamiento cuya forma refleja las condiciones de operación de la bomba en el fondo del pozo.

El dinamómetro más simple es un resorte con una escala y un estilite unido a uno de sus dos extremos para registrar las deflexiones del resorte sobre un papel que se desplaza en forma perpendicular el eje del resorte.

En la actualidad existen otros diseños más sofisticados de dinamómetros electrónicos que son compatibles con computadoras personales que incluyen transductores de carga y de desplazamiento y en algunos casos hasta sistema de monitorero, los cuales proporcionan información exacta sobre cargas y posición y en ocasiones genera el perfil completo de la carta dinemométrica, la cual permite diagnosticar in-situ las condiciones del fondo del pozo y de la unidad de bombeo mecánico, como el dinamómetro electrónico Delta 11, el cual consta esencialmente de un registrador de dos canales, un transductor de carga y uno de posición. Requiere además de un convertidor para transformar la corriente alterna del registrador en corriente directa de un acumulador. El transductor de carga colocado entre la mordaza de la varilla pulida y la barra portadora o colgador de la unidad de bombeo, modifica la señal electrónica enviada por el registrador que es proporcional a la carga que soporta. La señal electrónica modificada es amplificada y registrada en papel especial para registro. El transductor de posición opera en forma equivalente al transductor de carga sólo que en este caso se registra la posición de la varilla pulida. Tanto la posición de la varilla pulida como la carga que actúa sobre ella se registran simultáneamente en función del tiempo, en vista de que el papel se desplaza a velocidad constante dentro del registrador. Antes de proceder a tomar un registro del pozo es indispensable que el registrador se encuentre calibrado.

Es posible obtener la siguiente información mediante el uso del dinamómetro:

1. Cargas en la sarta de varillas

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

2. Comportamiento de la bomba subsuperficial

3. Cargas en el equipo superficial

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

## **II.2 Definición de carta dinamométrica**

Una carta dinamométrica es un registro del resultado de todas las fuerzas que actúan a lo largo del eje de la varilla pulida en cualquier instante durante el ciclo de bombeo. Esta curva registra cargas con respecto a la posición de la varilla pulida. Cualquier punto de carga en la curva representa una resultante de fuerzas y es compensado por los factores siguientes:

1. **Peso total de la sarta de varillas de varillas en el fluido.**
2. **Factor de aceleración positivo o negativo.**
3. **Peso total del fluido en la bomba.**
4. **Cualquier fuerza adicional resultante por vibración o acción elástica de la sarta de varillas.**
5. **Todas las fuerzas resultantes entre la sarta de varillas y la TP y entre la sarta de varillas y los fluidos del pozo.**

El efecto de máquina, variaciones en la velocidad de la bomba y el efecto de contrabalanceo fueron tomados en cuenta en los factores mencionados anteriormente.

Cada vez que la bomba realiza una carrera se envía una señal de fuerza a largo de la sarta de varillas a una velocidad de 15,800 pies/seg. hasta la superficie en donde se registra por

medio de un dinamómetro. Cada condición distinta en el fondo del pozo envía una señal de fuerza diferente a la superficie, y en algunos casos un analista experimentado puede determinar el comportamiento de la bomba, interpretando la forma del perfil de la gráfica dinamométrica para diagnosticar:

- Condiciones de trabajo de las válvulas viajera o de pie
- Existencia de golpeteo de fluido y su magnitud
- Compresión de gas
- Varillas rotas
- Bomba desanclada
- Fricción excesiva de las varillas con la T.P.

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

En pozos profundos la naturaleza elástica de la sarta de varillas presenta un patrón de cargas complejo, haciendo casi imposible la interpretación visual de la carta dinamométrica superficial para diagnosticar problemas en el fondo del pozo. Más adelante se explicará el procedimiento para obtener cartas dinamométricas del fondo del pozo.



### II.3 Obtención de la carta dinamoétrica ideal

Este tipo de comportamiento es difícil de encontrar en una instalación de bombeo mecánico ya que se requieren condiciones muy especiales, entre las que destacan:

1. Apertura y cierre oportuno de válvulas
2. Sello perfecto de asientos de válvulas
3. No existe fricción entre las varillas y la tubería de producción
4. El líquido bombeado no contiene gas
5. Velocidad de bombeo sumamente baja
6. No intervienen fuerzas elásticas

El rectángulo formado por la unión de los puntos A, B, C, D, de la Figura 2.3 describe un comportamiento ideal de la operación de la bomba, de acuerdo a la secuencia del ciclo de bombeo; donde  $W_r$  representa el peso de las varilla y  $W_f$  el peso de fluidos.

1. En el punto A, la válvula viajera cierra y se inicia la carrera ascendente del émbolo
2. Del punto A al punto B, la carga de fluido es transferida de la TP a la sarta de varillas.

3. En el punto B, la válvula de pie abre permitiendo la entrada de fluidos del pozo, al barril de la bomba.
4. Del punto B al punto C, la carga del fluido es elevada por el émbolo, al mismo tiempo que se está llenando el barril de la bomba.
5. En el punto C, la válvula de pie cierra y se inicia la carrera descendente del émbolo, permaneciendo cerrada la válvula viajera.
6. Del punto C al D, la carga de fluidos es transferida de las varillas a la TP.
7. En el punto D, la válvula viajera abre y se establece comunicación entre el fluido en el barril y el fluido en la tubería de producción.
8. Del punto D al A, el émbolo desplaza el fluido del barril de la bomba a través de la válvula viajera, hacia la parte superior del émbolo. A partir del punto A el ciclo se repite.

#### II.4 Factores que deforman la carta dinamométrica

La carta dinamométrica real difiere de la ideal debido a que las condiciones de bombeo son muy diferentes a las supuestas en el caso ideal. El patrón de cargas obtenidas se modifica debido a los siguientes efectos:

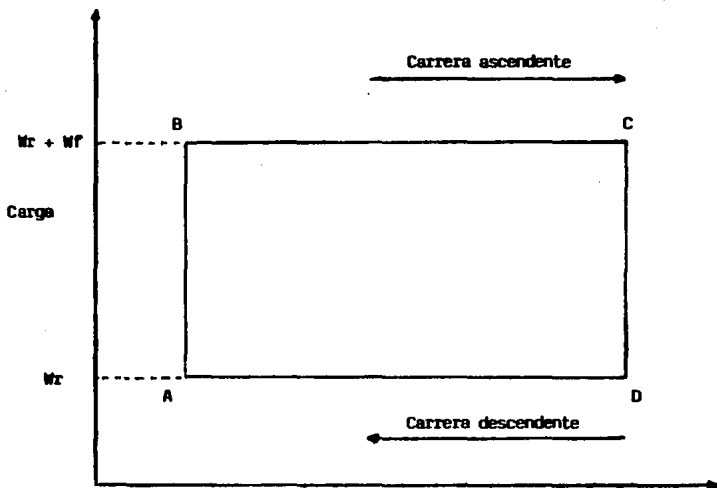


Figura 2.3 Carta dinámométrica ideal.

#### II.4.1 Fuerza de aceleración

La aceleración de la varilla pulida en el movimiento siempre es mayor cuando se inicia su ascenso en el fondo y cuando inicia su descenso en la parte superior. Entonces, el arranque desde el fondo con la máxima equivalente al peso de varillas y fluidos se realiza con aceleración máxima, requiriendo un mayor esfuerzo en la varilla pulida. Conforme esta masa se eleva está sujeta a 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 aceleración se incrementa con signo negativo, por lo cual, se resta el peso estático de 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 el 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. La Figura 2.4.1 nos muestra que este efecto modifica la carta girándola en sentido de las manecillas del reloj.

#### II.4.2 Efecto armónico

El movimiento armónico simple en la varilla pulida 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. Figura 2.4.2

#### II.4.3 Alargamiento y contracción de las varillas

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 varilla, 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 cada vez 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 T.P. y la sarta inicia su descenso. El alargamiento y contracción de las varillas modifica la carta dinamoétrica. Figura 2.4.3

#### II.4.4 Vibraciones en las varillas

Después de que ocurre el alargamiento de las varillas, la válvula viajera cierra y la sarta empieza a vibrar con su frecuencia natural, similarmente, cuando las varillas llegan a

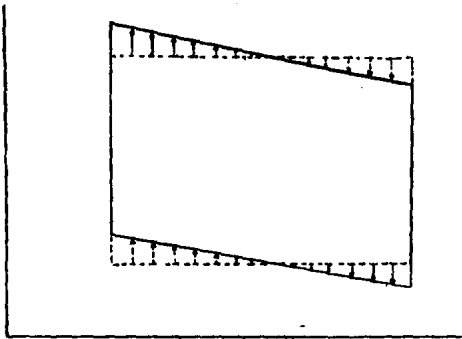


Figura 2A.1 Fuerza de aceleración.

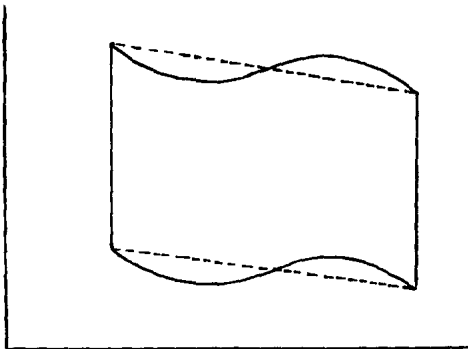


Figura 2A.2 Efecto armónico.

la parte superior de la carrera, comienzan a bajar y quedan liberadas del alargamiento, entonces, la sarta inicia nuevamente su periodo de frecuencia natural de vibraciones. Figura 2.4.4

#### II.4.5 Amortiguamiento

La sarta de varillas continúa oscilando con su movimiento hacia arriba y hacia abajo hasta que la fricción interna amortigue esas vibraciones. 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. No solamente la fricción interna tiende a amortiguar las vibraciones, sino que la fricción externa dada por la masa del fluido también produce una rápida disminución en el patrón de vibraciones. De esta forma, en lugar de tener una vibración de amplitud constante, la fricción tiende a hacer que dichas vibraciones disminuyan rápidamente. Figura 2.4.5

Por todos los factores mencionados anteriormente, la carta dinamoétrica típica queda de la forma mostrada en la Figura 2.4.5

El conocimiento de la carta dinamoétrica y su interpretación pueden maximizar los beneficios de muchos pozos productores, asegurando que la unidad de bombeo y las varillas operen en forma más económica y dentro de sus rangos de carga. Además, que la bomba sub-suerficial esté ejecutando su trabajo con máxima eficiencia.

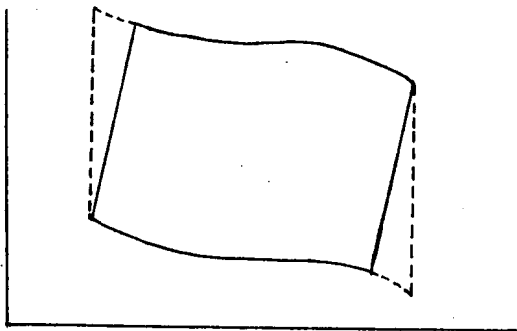


Figura 2.4.3 Alargamiento y contracción de varillas.

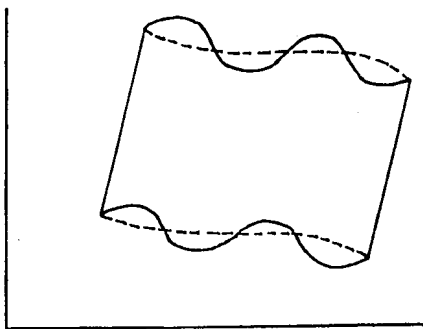


Figura 2.4.4 Vibración.



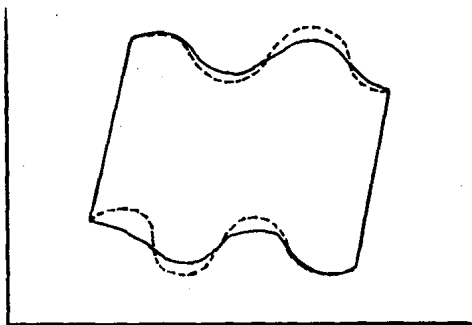


Figura 2.4.5 Amortiguamiento.

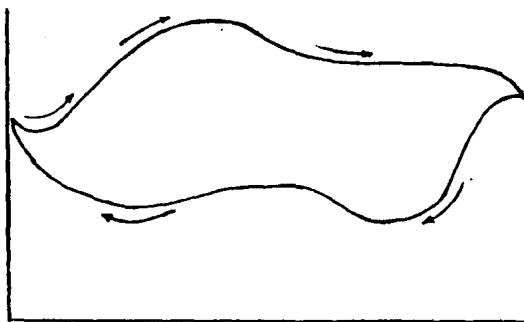


Figura 2.4.6 Carta dinamoétrica típica.

## II.5 Obtención de la carta dinamométrica de fondo

Mediante análisis de los registros dinamométricos, es posible que una persona experimentada detecte muchos de los problemas que se presentan en el pozo, lo que permite tomar medidas correctivas para operar más eficientemente. Sin embargo, a medida que aumenta la profundidad de los pozos, el diagnóstico es cada vez más difícil. 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.

Cualquier diagnóstico hecho por medio de cartas dinamométricas se realiza en base a la carta del fondo del pozo; dicha carta se puede tomar de dos formas:

1. Con el dinamómetro de fondo
2. Con un programa de cómputo

### II.5.1 Dinamómetro de fondo

En el año de 1936 W. E. Gilbert ideó un dinamómetro que se coloca en el extremo inferior de la sarta de varillas y permite obtener un registro representativo de las condiciones de operación de la bomba.

El dinamómetro de fondo consta básicamente de un cilindro corredizo (1) que va montado en una tuerca de extensión (2) y ensartado sobre una varilla calibrada (3) la cual es acoplada con una varilla de extracción (4) de la bomba (5). Un tubo rotatorio (6) es conectado por medio de un asiento autoalineable (7) del extremo superior de la varilla calibrada.

En el extremo inferior de la misma es montado un estilete (8). Dos espirales acanaladas son cortadas en forma opuesta en la superficie exterior del tubo corredizo como se muestra en 2.5.1

Estas partes describen alternamente el movimiento de las varillas con el émbolo. La parte final de este dinamómetro es un tubo cubierto integralmente (10), conectando el mandril con el extremo superior del cuerpo de la bomba. El tubo cubierto es construido con dos ranuras verticales (11) en las cuales están anclados dos hombros de retención de la tuerca de extensión en el extremo inferior. El extremo superior está también anclado en los espirales acanalados del tubo corredizo (13). Debido a esta colocación, el tubo corredizo puede girar con el émbolo de la bomba y el tubo rotatorio con el estilete, el cual se mueve hacia atrás y hacia adelante en cantidad proporcional con el viaje del émbolo. De este modo, cualquier estiramiento o cambio en la longitud de las varillas es registrado.

Sin embargo, el éxito de este aparato ha sido muy relativo, ya que es necesario realizar largas y tediosas operaciones en el pozo para obtener tales registros, como es la extracción total de la sarta de varillas para poder acoplar este aparato cada vez que se va a tomar un registro.

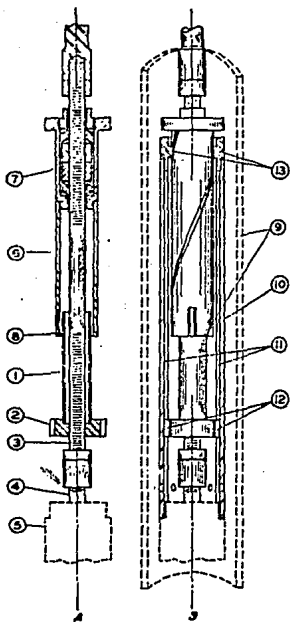


Figura 2.5.1 Dinamómetro de fondo.

## II.5.2 Programa de cómputo

El modelo matemático del programa de cómputo se basa en la consideración de que la sarta de varillas de succión en una instalación de B.M. se comporta como un cuerpo elástico. Los esfuerzos de tensión o compresión aplicadas en uno de los extremos de la sarta se transmiten en forma de ondas, viajando a la velocidad acústica del material de que estén construidas las varillas.

La onda de esfuerzo al llegar al extremo opuesto se refleja viajando ahora en dirección contraria. Dicha onda se desplaza en una y otra dirección, manteniendo la sarta de varillas en vibración. La duración de la onda de esfuerzo depende de tres factores principales: intensidad del esfuerzo inicial, características físicas del material de las varillas y el medio en que éstas se encuentren. Este fenómeno puede representarse por una ecuación diferencial parcial conocida como la ecuación de onda.

Un avance tecnológico en el análisis y diagnóstico en las instalaciones de B.M. 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 Delta II o con cualquier dinamómetro electrónico.

Lo que ocurre en las instalaciones de B.M. 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 decifrarlos a fin de determinar la información original.

El modelo matemático proporciona información de las condiciones de operación en el fondo del pozo, no obstante se consideraron también las condiciones del funcionamiento del equipo subsuperficial, por lo que se incluyeron los cálculos de torsiones y potencias a las que se encuentra sujeta la unidad.

En 1972, el Instituto Mexicano del Petróleo desarrolló un programa de cómputo denominado BOMEK, el cual fue programado en el lenguaje fortran. Dicho programa en base información de la carta dinamométrica superficial es posible obtener la carta dinamométrica de fondo. Este programa fue aplicado en mayo de 1977 por primera vez en Distrito Poza Rica.

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

1. Valores de carga y desplazamiento para intervalos iguales de tiempo.

2. Diámetro, longitud y peso de cada uno de los tramos de varillas que componen la sarta.
  
3. Velocidad de bombeo, longitud de carrera de la varilla pulida, momento máximo de contrabalanceo, desbalance estructural y coeficiente de amortiguamiento.

Se requieren adicionalmente otros datos que no intervienen en el proceso matemático, pero pueden dar una clara idea de las condiciones de cada pozo y que pueden ser de utilidad posteriormente al momento de diagnosticar y para proponer modificaciones para operaciones más eficientes.

En seguida se presenta la tabla 2A que compara la información que se obtiene con un dinamómetro de la bomba y la que se obtiene por medio de un dinamómetro electrónico con la aplicación de dicho programa de cómputo.

TABLA 2A

TIPO DE INFORMACION	DINAMOMETRO DE LA BOMBA	PROGRAMA DE COMPUTO
Cargas y esfuerzos en la v.p.	SI	SI
Fuga en la válvula viajera	SI	SI
Fuga en la válvula de pie	POSIBLE	SI
Compresión y/o expansión de gas en la bomba	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
Presión de entrada en la bomba	NO	SI
Presión de fondo fluyendo	NO	SI
Tubería desanclada	NO	SI
Fuga en la TP	NO	SI
Fricción excesiva de varillas en la TP	NO	SI

Debido a que gran parte de la información se deriva de la carta dinamométrica es conveniente establecer los lineamientos que deben observarse para llevar a cabo la interpretación correcta de ésta. A continuación se presentan algunos de los problemas más frecuentes en el BM, la forma en que se manifiestan en la gráfica dinamométrica.



## II.6 Cartas dinamométricas más comunes

Entre los problemas que es posible detectar por medio de un análisis de la gráfica de la bomba tenemos:

- Embolo atascado
- Candado de gas
- Golpeteo de fluidos
- Bomba desanclada/ varillas rotas .
- Fugas a través de la válvula viajera o émbolo
- Compresión de gas

Cada uno de estos casos genera un perfil típico en las cartas dinamométricas que permiten con alguna experiencia diferenciarlos entre sí. A continuación se realizan diagnósticos en base a la forma de las cartas dinamométricas, se dan recomendaciones para corregir los problemas que se presenten y en algunos casos, se hace un comentario pertinente.

### II.6.1 Embolo atascado

DIAGNOSTICO.-En este carta, durante la carrera ascendente aumenta la carga sobre la varilla pulida y en la carrera

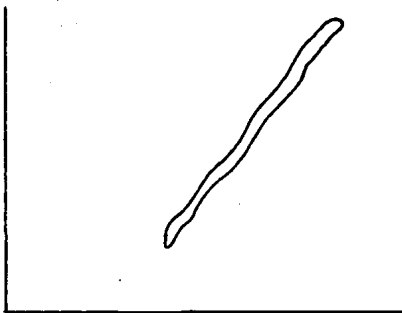
descendente disminuye, la producción de fluidos es nula. La varilla pulida somete a tensión la sarta de varillas y después las suelta, por lo tanto, el émbolo no se mueve. Figura 2.6.1

**RECOMENDACIONES.-** Este problema se puede solucionar inyectando un fluido desincrustante en el espacio anular, que sea capaz de disolver la sustancia que está atascando al émbolo, ya sean parafinas, carbonatos, etc. Si la sustancia que está atascando al émbolo es arena, es necesario extraer el aparejo de producción para limpiarlo.

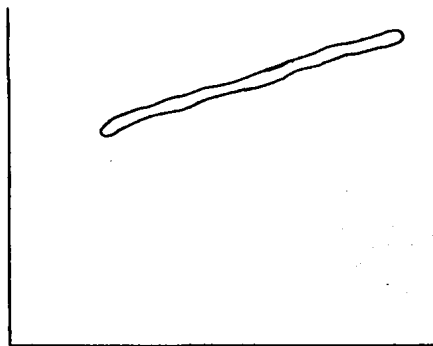
#### **II.6.2 Candado de gas**

**DIAGNOSTICO.-** En este caso, la bomba opera con una eficiencia volumétrica muy baja debido a que el barril de la bomba está lleno de gas, por este motivo, la válvula viajera nunca abre. Por lo tanto, el émbolo está paseando únicamente a la columna de fluidos sin transferirlos a la TP. El resultado es una gráfica como la que se muestra en la Figura 2.6.2. En el límite cuando no se bombea líquido alguno no tiene lugar la acción de las válvulas y el área dentro de la carta puede prácticamente desaparecer. Este problema es causado debido a que se están bombeando líquidos a una mayor velocidad que el gasto que está aportando la formación, o bien, aunque la presión externa sea suficiente hay una relación gas-aceite muy grande.

**RECOMENDACIONES.-** Es posible corregir este problema instalando una válvula charger, reduciendo la velocidad de bombeo o reduciendo la longitud de carrera de la varilla pulida.



**Figura 2.6.1 Embolo atascado.**



**Figura 2.6.2 Candado de gas**

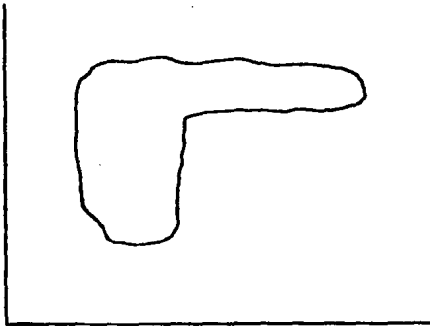
### II.6.3 Golpeteo de fluidos

DIAGNOSTICO.- En ésta carta, conforme el émbolo se mueve hacia abajo, la válvula viajera no abre debido a que no hay presión suficiente para superar la carga estática de fluido en la T.P. antes de que el émbolo toque el líquido relativamente libre de gas en la parte inferior del barril de la bomba. El resultado es una brusca caída de esfuerzos en la sarta de varillas. En éste caso, la válvula viajera nunca abre hasta que siente el golpe del émbolo con el espejo del líquido, generando una carta dinamométrica como la que muestra la Figura 2.6.3

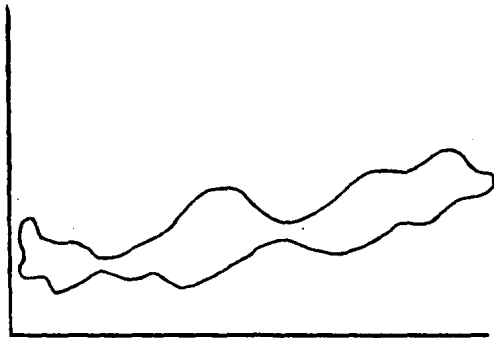
RECOMENDACIONES.- Este problema puede solucionarse instalando una válvula charger o instalar en el pozo un separador de gas.

### II.6.4 Bomba desanclada / varillas rotas

DIAGNOSTICO.- En esta gráfica no es posible determinar puntos de apertura y cierre de la válvula viajera, por lo cual no existe carrera efectiva del émbolo. Lo anterior es una clara indicación de que la bomba no está operando. Otro dato que confirma ésto, es el valor excesivamente pequeño de la potencia hidráulica (1 hp aproximadamente), el cual se encuentra directamente relacionada con el trabajo desarrollado por la bomba. Por todo ésto se deduce que la bomba está desanclada o bien, que las varillas están rotas. Figura 2.6.4



**Figura 2.6.3. Golpeteo de fluidos.**



**Figura 2.6.A Bomba desanclada/ varillas rotas.**

**RECOMENDACIONES.-** Anclar la bomba o verificar si las varillas están rotas. En ambos casos se recomienda que una vez establecida la producción del pozo se tome un nuevo registro para determinar las condiciones de operación.

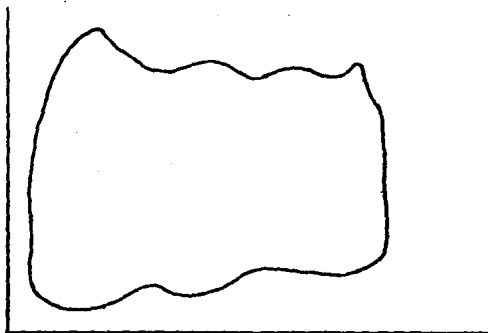
#### **II.6.5 Fugas a través de la válvula viajera o el émbolo**

**DIAGNOSTICO.-** La gráfica de la bomba indica fuga a través de la válvula viajera y/o émbolo. No existe interreferencia de gas debido a que la carrera efectiva del émbolo resulta igual a la carrera total. Sin embargo, la eficiencia volumétrica de la bomba resulta baja (22% aproximadamente), debido a la fuga que se presenta en la bomba. Figura 2.6.5

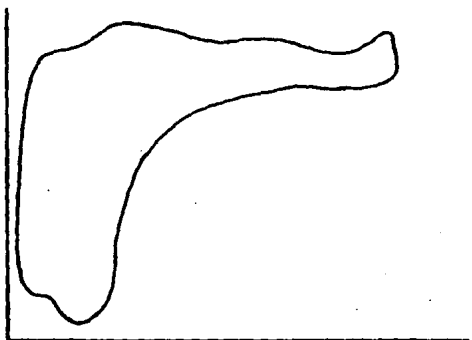
**RECOMENDACIONES.-** Se recomienda extraer la bomba y repararla, instalarla en seguida y tomar un registro nuevo para determinar las nuevas condiciones de operación.

#### **II.6.6 Compresión de gas**

**DIAGNOSTICO.-** La gráfica muestra un ejemplo típico de interferencia de gas. Aproximadamente el 86% de la carrera total del émbolo es de aproximadamente 43 pg., mientras que la carrera efectiva es de 6 pg., por lo cual un pozo con un problema semejante tendrá una producción muy pobre y una baja eficiencia volumétrica de la bomba. Figura 2.6.6



**Figura 2.6.5 Fugas a través de la válvula viajera o el émbolo.**



**Figura 2.6.6 Compresión de gas.**

**RECOMENDACIONES.-** A fin de aprovechar mejor la carrera del émbolo, se recomienda instalar en este pozo un separador de gas para obtener un incremento notable en producción.



## CAPITULO III

### DESCRIPCION DEL EQUIPO DE CONTROL AUTOMATICO

En el presente capítulo se hace un resumen de los diversos procedimientos mediante los cuales se pretendió la automatización del bombeo mecánico. Asimismo, se describen las técnicas de desarrollo que se emplearon hasta los sistemas actuales y su funcionamiento y se define además el término pump-off. Finalmente se describe la colocación del sistema en la unidad de BM y en la oficina de la estación central.

#### III.1 Antecedentes de los sistemas de control

Casi desde el inicio de la explotación comercial del petróleo, el bombeo mecánico ha sido parte importante del proceso de producción, si bien el bombeo mecánico es básicamente simple, éste es ampliamente complejo debido a los efectos de la deformación en la sarta de varillas, la dinámica de la unidad de bombeo y de la sarta de varillas, el gasto de producción del yacimiento, etc.

### **III.1.1 Definición del pump-off**

El término pump-off significa bombeo en vacío, sin embargo en la industria petrolera se le denomina así a las diversas condiciones anómalas que pueden presentarse en la operación de las unidades de BM. Cuando un pozo presenta una o varias de éstas anomalías se dice que está en condiciones pump-off. La condición pump-off involucra cualquiera de éstas anomalías:

- Fallas en el motor
- Fallas de energía eléctrica
- Paro de la unidad de bombeo, por ejemplo cuando la tensión en la varilla pulida sobrepasa los límites de operación previamente establecidos.
- Sobre esfuerzo o atorón en la varilla pulida
- Fugas o represionamiento en las líneas de descarga

Cualquiera de éstos problemas repercute en la producción de hidrocarburos, por ello es muy importante poder detectar el pump-off antes de que se presente o bien, cuando llegue a presentarse saber que acción tomar para que sus efectos sean mínimos.

El control automático pump-off está diseñado para detectar la condición de pump-off y así operar equipos de BM de la forma

más eficiente posible. Existen diferentes técnicas para detectar dicha condición, las cuales más adelante se describirán.

### III.1.2 Breve historia de los equipos de control

Uno de los problemas que se presentaron al inicio de la historia del bombeo mecánico fue la dificultad de seleccionar la capacidad de los sistemas de bombeo y el gasto de producción del yacimiento.

A fin de obtener la máxima producción de un pozo, es necesario mantener el nivel de fluido lo más bajo posible; que además implica la contrapresión más baja posible sobre la formación. Con objeto de asegurar un bajo nivel de fluido es necesario proveer una capacidad del sistema de bombeo excesiva para la capacidad productiva del pozo. Sin embargo, el exceso en la capacidad de bombeo requerido para mantener un bajo nivel de fluido puede conducir a que se tenga una condición de pump-off.

El primer esfuerzo que se hizo para afrontar los problemas del pump-off fue el de accionar manualmente y detener la operación del sistema de bombeo. Esta forma de operar requiere que el encargado estime la cantidad de tiempo de bombeo requerido para obtener la máxima producción del pozo y para controlar manualmente el equipo con el objeto de obtener la mayor cantidad de producción, aún considerando el tiempo de detención de la unidad de bombeo. Las desventajas de este tipo de

operación son obvias debido a que es necesario apagar la unidad manualmente, verificar el nivel de fluido, etc.

El primer intento para controlar automáticamente la operación del sistema de bombeo fue el de instalar mecanismos de relojería, los cuales detenían o iniciaban automáticamente la operación del sistema de bombeo, equivalente a bombeo mecánico intermitente. La primera versión de estos relojes ofrecían operaciones de control a intervalos de una hora, las versiones posteriores ofrecían los intervalos de 15 minutos.

Dentro de los usos de estos mecanismos de relojería se requiere llamar al operador para que tome la decisión tanto en la cantidad como en la distribución del tiempo de bombeo requerido para obtener la producción de cierto pozo.

Reconociendo los problemas asociados con el uso de los relojes se desarrolló el "tiempo promedio", mismo que causó que el pozo trabajara durante períodos combinados de 15 a 30 minutos, donde el operador no toma la decisión de la distribución del tiempo y sólo se responsabiliza de la cantidad de tiempo de bombeo requerido para obtener la producción del pozo.

A finales de los 50's y principios de los 60's, comenzó la revolución de la producción automatizada con la unidad LACT [Westerman, 1977] a la vanguardia en el mercado. Durante este período se hicieron grandes esfuerzos para aplicar los servicios de los sistemas de flujo/no flujo y el monitoreo de la corriente del motor para la detección y control del pump-off, conceptos que se describen posteriormente.

Mientras algunos de estos sistemas se encontraron con un gran número de éxitos, los problemas asociados con gas producido, parafina, corrosión, carbonatos, etc., no se detectaban fácilmente. Sin embargo, esta técnica fue ampliamente aplicable.

Con el desarrollo del sistema flujo/no flujo, se hicieron esfuerzos para emplear la corriente del motor en la detección y control del pump-off. Aunque el efecto pump-off es de alguna forma provocado por la unidad de bombeo y el motor, la demanda de corriente es una medición dependiente del balanceo de la unidad por lo que la medición de la corriente es un método válido y de alcance razonable para interpretar el pump-off.

La mayoría de las técnicas recientes para la detección y el control del pump-off se basan en la carga de las varillas como la medición primaria. Debido a que todos los efectos del pump-off son transmitidos hacia la parte alta de la sarta de varillas, la carga de varillas provee la medición más directa de las condiciones de operación de la bomba en el fondo del pozo.

### **III.1.3 Técnicas de detección del pump-off**

A continuación se expone una breve descripción de las técnicas de control del pump-off:

#### **Nivel de fluido**

El sistema emplea un sensor de presión de fondo para detectar reducciones en el nivel de fluido y proporcionar señales de control para apagar el motor de la unidad superficial cuando se ha alcanzado un nivel predeterminado de fluido. Cuando se alcance el nivel preestablecido, el sistema de bombeo se arranca nuevamente. El costo de instalación y mantenimiento de este sistema tiene ventajas obvias.

#### **Flujo/ No flujo**

El sistema contiene un elemento sensor que registra reducciones de flujo por debajo del nivel preestablecido en la línea de descarga. El sensor se conecta a un sistema de relojería que mide la cantidad de tiempo de no-flujo durante un período específico. Cuando el tiempo de no flujo excede el permisible, la unidad de bombeo se detiene para permitir que el flujo se reestablezca. Después de un tiempo preestablecido la unidad de bombeo arranca de nuevo.

### Sensor de vibración

Sobre la estructura de la unidad superficial de bombeo se coloca un detector de vibraciones. El golpeo de fluido está asociado con el pump-off que envía una onda de choque a lo largo de la sarta de varillas y al interior de la unidad superficial. Cuando ocurre una vibración de una magnitud mayor a la preestablecida, la unidad se apaga. Después de un tiempo se enciende la unidad.

### Sensor de corriente del motor

Existen varias formas de utilizar la demanda de corriente del motor para detectar pump-off. Todas las técnicas hacen uso del retraso en la transferencia de cargas de fluido de la válvula viajera a la válvula de pie en la carrera descendente.

La diferencia en la corriente pico del motor se deben a un incremento en las carreras ascendente y descendente, lo que ocurre cuando en el sistema de bombeo las varillas están comprimidas en pump-off. Figura 3.1.3A

Este método requiere que el sistema esté perfectamente balanceado o con varillas ligeramente comprimidas. Cuando la diferencia entre las corrientes pico excede un cierto valor preestablecido, la unidad se apaga. La corriente en un punto en la carrera descendente emplea un marcador de posición, como un interruptor de mercurio para marcar un punto durante la carrera descendente en el cual se muestra la corriente del motor. Figura 3.1.3B Si la corriente muestreada es menor que un valor

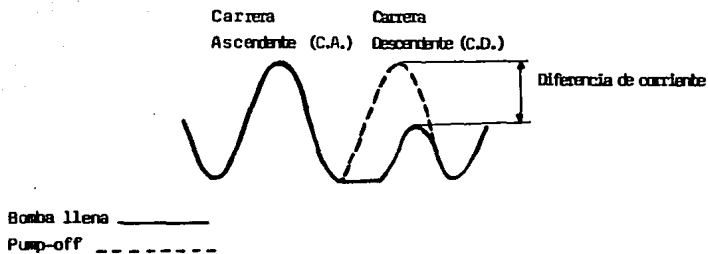


Figura 3.1.3A Diferencia en la corriente pico del motor.

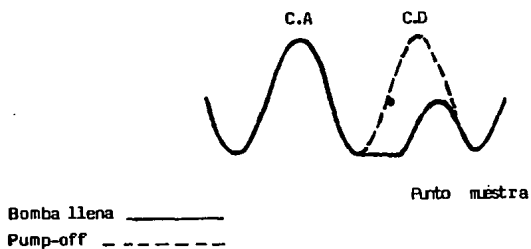


Figura 3.1.3B Corriente del motor en un punto muestra.



preestablecido, la lógica del sistema reconoce la condición de pump-off, y después de un cierto número de carreras o un tiempo de espera, la unidad de bombeo se apaga.

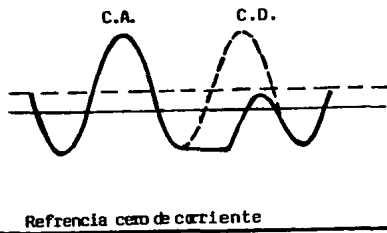
Se puede utilizar un arreglo similar en la carrera ascendente para detectar varillas rotas o válvulas calzadas.

La corriente promedio del motor sobre un período grande de tiempo refleja la reducción de corriente durante la carrera descendente como una reducción en la demanda de corriente promedio. Figura 3.1.3C. Cuando el promedio disminuye por debajo del nivel predeterminado, el controlador detendrá la unidad de bombeo.

El trabajo eléctrico ejecutado en cada carrera es determinado por la integración de la corriente, compensada por voltaje sobre una carrera completa, Figura 3.1.3D. La integración está referida a la corriente magnetizada (corriente mínima). Cuando el valor integrado no alcanza un valor establecido para un periodo de tiempo o para un número de carreras, la unidad se apaga.

### Carga de varillas

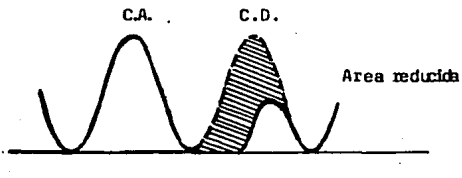
La carga de varillas está afectada directamente por la carga de bombeo. Se puede utilizar un gran número de características de carga de varillas para detectar pump-off, así como fallas en el fondo del pozo. Aunque la carga de varillas es uno de los parámetros mostrados en el dinamómetro, las características de la carga de varillas en pump-off son ampliamente conocidas y comprendida. Un dinamómetro es un buen asistente para ajustar el controlador.



Distribución de la corriente promedio

Bomba llena \_\_\_\_\_  
 Pump-off \_\_\_\_\_

Figura 3.1.3C Corriente promedio del motor.



Referencia mínima de corriente

Bomba llena \_\_\_\_\_  
 Pump-off \_\_\_\_\_

Figura 3.1.3D Trabajo eléctrico en una carrera.

La carga de varillas en un punto de la carrera descendente utiliza un interruptor marcador de posición para analizar la carga de varillas en una posición en la carrera descendente. Figura 3.1.3E. Si la carga del fluido no ha sido transferida de las varillas a la TP en el punto muestreado, la carga de las varillas estará por arriba de un nivel predeterminado y la unidad de bombeo se apagará.

El ritmo de cambio de las varillas mide el ritmo negativo de cambio en las cargas por varillas. En pump-off, el ritmo negativo de cambio se incrementa debido al golpeteo de fluido asociado con el pump-off. Figura 3.1.3F Después de un receso para asegurar la estabilización, la unidad de bombeo se apaga.

El trabajo de la carga por varillas hecho en cada carrera, mide la cantidad de trabajo que se está haciendo durante cada carrera o durante una porción de cada carrera. Figura 3.1.3G. La cantidad de trabajo que se está realizando en la varilla pulida es el área encerrada por una gráfica de carga vs. posición; una integración de estas funciones provee una representación confiable del trabajo que se está haciendo hecho en cada carrera.

Ya que la velocidad de bombeo es bastante estable con respecto al tiempo, una integración de carga vs. tiempo suministra una analogía excelente del trabajo que se está haciendo en cada carrera, Figura 4.5.8. En el pump-off, el trabajo en la varilla pulida disminuye debido a la transferencia tardía de carga de las varillas hacia la TP.

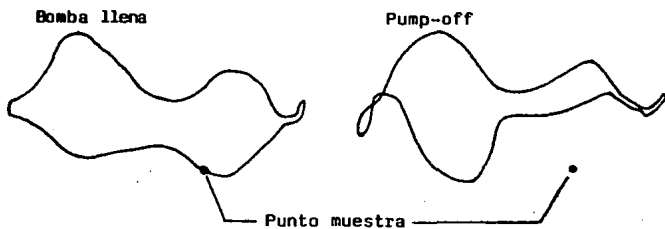


Figura 3.1.3E Carga de varillas en un punto en la carrera descendente.

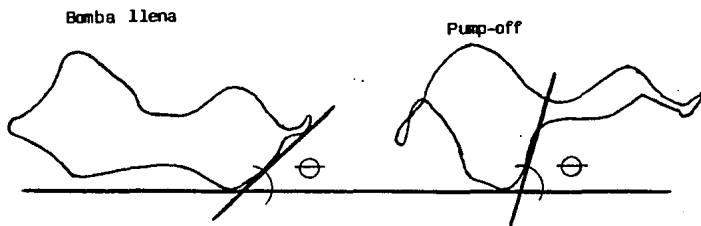


Figura 3.1.3 F Ritmo de cambio en la carga de las varillas.

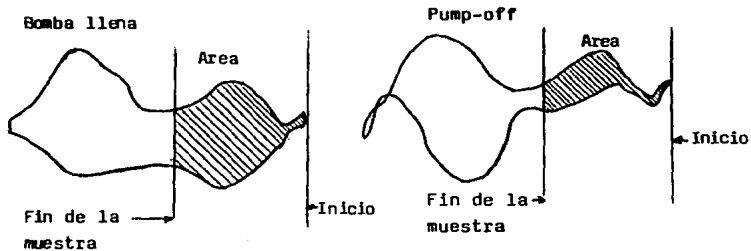


Figura 3.1.3G Trabajo de las varillas en cualquier carrera (carga vs. posición).

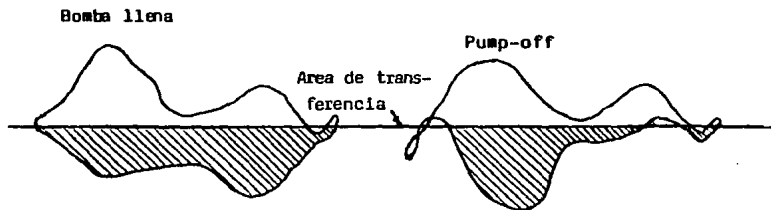


Figura 3.1.3H Carga de varillas en cualquier carrera (carga vs. tiempo).

Cuando el trabajo sobre una carrera es menor que el de una carrera completa, el sistema de bombeo se apaga para permitir que el fluido se acumule en el espacio anular.

El trabajo hecho por la varilla pulida en cada carrera se está convirtiendo en el medio más popular de detección de pump-off debido a que es un método confiable y flexible.

La medición de la carga de varillas para control del pump-off tiene mayores ventajas sobre otros sistemas ya que proporciona formas para la detección directa del mal funcionamiento en el equipo superficial y subsuperficial para el diagnóstico de problemas y análisis del sistema de bombeo en general.

### III.1.4 Desarrollo de técnicas de control

Los primeros intentos para perfeccionar el control automático de operaciones en la industria petrolera fueron sólo parcialmente prósperos debido a la dificultad de percibir una variación que realmente indique la ocurrencia de pump-off para un período extenso de tiempo.

Utilizando la información de carga en las varillas y la posición, se desarrolló una técnica para que detectar la ocurrencia de pump-off. Dos transductores se conectan a la unidad de bombeo, uno para la medición de la carga en la sarta de varillas y otro para medir el ángulo de la posición del balancín en la unidad superficial. Estas dos señales son registradas 12 veces por segundo durante una carrera completa de la varilla pulida.

Los datos de cargas en la varilla y la posición producen una carta dinamométrica superficial como la que se muestra en la Figura 3.1. El área encerrada en la curva representa la transmisión de energía a través de la sarta de varillas. Una aproximación a esto se calcula por computadora utilizando una regla de integración trapezoidal.

Mientras ocurre el pump-off, el trabajo efectivo que se realiza durante la carrera ascendente disminuye debido a que se eleva menos fluido. Una gran parte del trabajo total se utiliza en una carrera completa de la bomba para vencer los efectos de

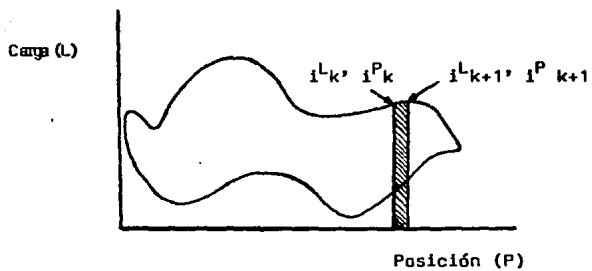
fricción; por esto, el aumento en el trabajo total es detectado debido a que es usualmente significativo y señala una condición de pump-off.

Esta técnica fue probada en el campo utilizando un sistema computarizado portátil que va montado en un camión el cual consta de sistemas de registro. Los resultados indicaron que el pump-off puede distinguirse de otros efectos tales como la interferencia de gas, el cual genera dificultades en el reconocimiento de problemas a los controladores automáticos comerciales.

Trabajos posteriores con el sistema revelan que el mayor cambio en la carga superficial ocurre durante la primera mitad de la carrera descendente. Por lo tanto, el área de trabajo calculada en la carta dinamométrica fue modificada para incluir sólo la parte de la carrera ascendente que experimentó mayor cambio como resultado del pump-off. Figura 3.1.2

Otro tipo de sensores son las celdas de cargas, las cuales se destruían debido a que se ejercieron fuerzas excesivas sobre ellas. La mayoría de estos problemas se debieron principalmente a la falta de sellos adecuados en las celdas, diseños inapropiados y principalmente a falsos contactos en la caja de conexiones; éstos contactos fueron retirados del cuerpo de la celda.

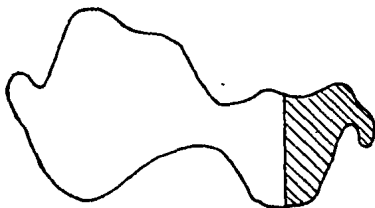




$i$  y  $k$  son subíndices designados para  $P$  y  $L$  en la muestra tomada ( $n$ ).

Figura 3.1 Carta dinamométrica superficial.

Bomba Llena



Pump-off

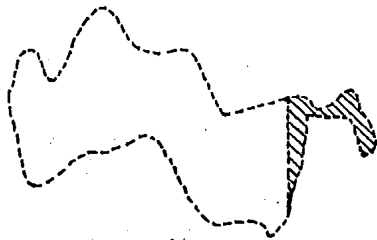


Figura 3.1.A

Técnica de detección del pump-off en la carrera descendente

Debido a que se identificaron todos los puntos débiles en los diseños, y haciendo modificaciones in-situ, el promedio del daño fue reducido significativamente. Sin embargo, algunos de los pozos con cierta altura de fluido presentaron anomalías de bombeo y más problemas de bombas pegadas. Las últimas modificaciones hechas a las celdas tuvieron un mejor desempeño en condiciones severas incurridas cuando las varillas están rotas o la bomba pegada. Un diseño de celda fue desarrollado para resistir sobrecargas incorporando un cable conector; este diseño es muy simple y más económico en mantenimiento.

Otro elemento sobre el cual existió una considerable preocupación fue otro sensor denominado transductor de posición. Los problemas primarios con el transductor de posición estuvieron relacionados con mecanismos internos del potenciómetro. Algunos cambios en las técnicas de fabricación aliviaron muchos problemas. El tiempo de vida útil promedio del elemento de medición del transductor de posición es de tres años.

El mayor problema experimentado con la supervisión del equipo fue la repetición de señales en la línea de comunicación o amplificación. Como resultado, se rediseñó un modelo para producir un repetidor que fuera confiable y además económicamente rentable. Después de esto, el dispositivo de supervisión trabajó sin fallas serias de pérdida de tiempo.

Otra modificación requerida en el equipo fue debido a cambios y adiciones para proteger circuitos de sobrevoltage y también referente a protección electrónica.

### III.2 Funcionamiento básico del sistema de detección

El sistema de control se basa en la detección de golpes de fluido y para ello utiliza sensores o detectores los cuales funcionan debido a un fenómeno conocido como "Efecto Hall". Este fenómeno se produce al aplicar un campo magnético perpendicularmente a la dirección del flujo de la corriente en un conductor, generándose un voltaje perpendicular al flujo de la corriente y al campo magnético aplicado, con la ventaja de que si se mantiene constante la corriente, el voltaje generado será directamente proporcional a la densidad del flujo de corriente aplicado. Un sensor que se base en este fenómeno, aprovecha la detección de esta variación en la densidad del flujo magnético para realizar la medición sin contacto.

Los sensores de este sistema consisten en un generador de efecto Hall encerrado en una pequeña caja de aluminio, colocada en una placa montada que tiene un brazo sujeto a un pivote balanceable. Figura 3.2. En el extremo superior libre se tiene un imán situado opuesto a la cara del generador; aquí se tiene de 1/8 hasta 3/4 pg. de espacio libre entre el imán y el generador. En el extremo inferior del brazo pivote se tiene un pequeño resorte a compresión y un arreglo de tres agujeros, uno de los cuales está ligado a un extremo de una cadena. Figura 3.2.1 El otro extremo de la cadena se fija en la base de la caja de engranes o en el poste Sampson que siempre va opuesto al generador.

Otro sensor es montado también en la base de la caja de engranes y otro imán más grande es ligado a los contrapesos. Este sensor es un interruptor que se utiliza para señalar al operador cuando la unidad de bombeo comienza la carrera descendente, que es donde se manifiesta la carga mínima de fluido y dónde se produce el golpeteo de fluido.

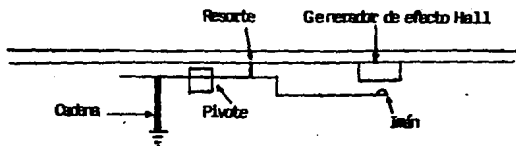


Figura 3.2 Arreglo de sensores.

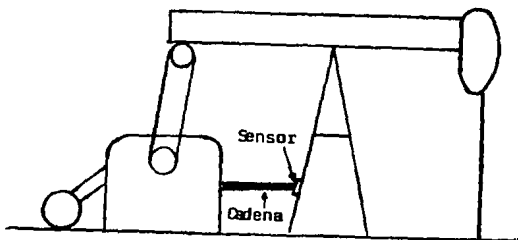


Figura 3.2.1 Colocación del sensor de posición.

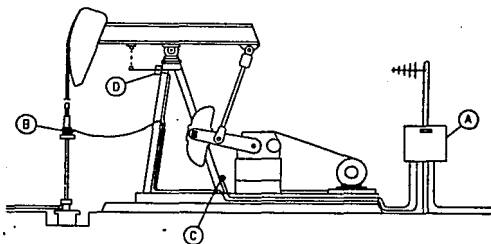
Cuando en el pozo ha alcanzado una condición de pump-off y la bomba comienza a golpear, los interruptores en la caja de engranes y el poste Sampson se moverán en direcciones opuestas. Este movimiento causa un espacio de aire en medio del imán y el generador fluctuante. Estas mismas fluctuaciones incrementan o disminuyen la producción de voltaje del generador, dependiendo si la unidad de bombeo está en la posición de carrera ascendente o descendente. El voltaje de salida es analizado e interpretado por el operador para determinar si ha ocurrido golpeteo de fluidos. Después de detectar un número preseleccionado de golpes de fluido, el control automático manda detener la unidad de bombeo. Una vez que han transcurrido determinado número de minutos, el control manda activar el bombeo hasta que nuevamente se presenta el golpeteo de fluido.

Además de tener un simple y efectivo detector de golpeteo de fluido, el dispositivo hace posible obtener una carta dinamométrica cualitativa por medio del registro de los voltajes de salida del generador y con una gráfica del transductor de posición; éste es un dispositivo electrónico que proporciona una salida utilizable como respuesta a una magnitud física la cual es transformada por el transductor a una señal eléctrica.

Los voltajes de salida generalmente varían de 6 a 12 volts C.D. Una cantidad considerable de energía dejó de ser desperdiciada en los equipo de BM desde que se instalaron éste tipo de controladores, los cuales son fáciles de instalar, simples de calibrar y requieren poco mantenimiento. Este mismo sistema también se ha aplicado a unidades de bombeo tipo Mark 11

### III.3 Colocación del sistema de control en la unidad de bombeo mecánico

Los diferentes dispositivos de los cuales consta el controlador automático son esquematizados en el siguiente diagrama:



A: Control Automático

B: Celda de carga para la varilla pulida

C: Interruptor de posición para control del pump-off

D: Transductor de posición continua para el análisis de las condiciones del pozo

E: Calibrador de esfuerzos

A continuación se presentan las funciones específicas, la colocación, características y especificaciones de los dispositivos más importantes del sistema:

**Celda de carga para la varilla pulida (sensor de carga)**

Esta celda va montada en la grampa de la varilla pulida. La celda de carga lee directamente mediciones de carga sobre la varilla pulida. La celda está compensada por temperatura para prevenir las variaciones diarias de temperatura que puedan afectar las lecturas de cargas. Figura 3.3

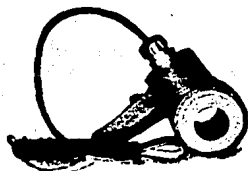
**Especificaciones:**

Temperatura de operación de  $-40^{\circ}\text{F}$  a  $176^{\circ}\text{F}$  ( $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ )

Rango de carga de 0 a 30 000 lb. ó 0 50 000 lb.

Error máximo de  $\pm 0.5\%$

Clase: Calibrada cuantitativamente al esfuerzo



**Figura 3.3 Celda de carga para la varilla pulida.**



### Potenciómetro de posición (sensor de posición)

Montado sobre el poste Sampson y conectada a la unidad superficial a través de una cadena de enlace. El potenciómetro genera datos de posición de la varilla pulida en forma continua y exacta durante las carrera descendente y ascendente. Este sensor no se utiliza para las operaciones de control y detección, pero cuando es necesario un análisis de las condiciones del fondo del pozo sí se requiere. El diseño de doble cojinete provee de una flecha máxima de soporte para alargar la vida útil de éste sensor. Figura 3.3.1

#### Especificaciones:

Temperatura de operación de  $-65^{\circ}\text{F}$  a  $212^{\circ}\text{F}$  ( $-55^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ )

Resolución de  $\pm 0.002$  (0.007")

Resistencia de 5 K ó 10 Ohms

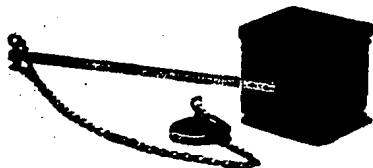


Figura 3.3.1 Potenciómetro de posición.

### Interruptor de posición (sensor magnético)

Montado sobre el patín de la unidad de bombeo, indica la posición para la detección de operaciones del pump-off, midiendo las emboladas por minuto de la bomba. El interruptor genera una señal cuando un imán montado sobre la manivela se mueve a su paso en cada desplazamiento, esto permite sincronizar una señal motriz con la posición en ese instante, con la unidad de bombeo. Figura 3.3.2



Figura 3.3.2 Interruptor de posición.

### III.4 Sistema Integral de Control Automático

El sistema integral de control automático está compuesto por el equipo de control automático para la unidad de bombeo mecánico y el equipo de control remoto de supervisión. Este último equipo sirve como una adquisición remota de información y control y como un brazo de comunicación entre el pozo y la oficina de la estación central.

La figura 3.4 muestra el sistema integral de control automático. Cargas y desplazamientos son medidos en el pozo y transmitidos a la unidad terminal remota (RTU). Su función es recibir las señales de los sensores, procesarlas y por medio de ondas radioeléctricas las envía a la estación central. Entre otras características importantes consta de un circuito interno para la cabeza del pozo, el cual detecta interrupciones de comunicación y revierte el control a la unidad de bombeo.

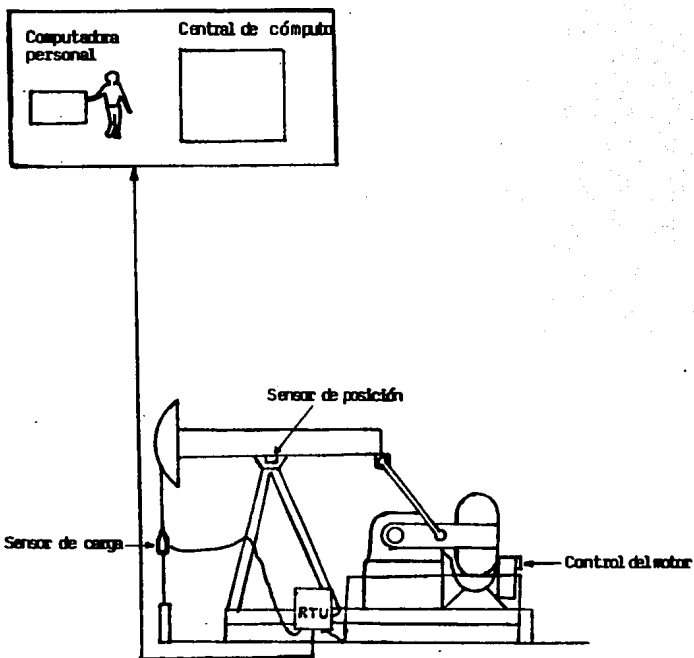
El algoritmo de control del RTU [Neely & Tolbert, 1985] está basado en la integración de datos en el tope de la carrera descendente y de la carga mínima para la misma. Mientras ocurre el pump-off, la válvula viajera cierra después de la carrera descendente y se incrementa el área integral. La suma total de incrementos requiere de un número consecutivo de pump-off para detener la unidad y este número es seleccionado por el operador.

El sistema cuenta con un tablero de control en el cual existe una lámpara de fallas que enciende al momento de detectar

fallas o problemas potenciales. En la parte superior del tablero se encuentra una antena retransmisora de señales. Cuando el pozo se encuentra en un lugar muy lejano o con una topografía muy accidentada que dificulte la comunicación con la oficina central, es posible por medios telemétricos transmitir la información vía satélite.

En algunos casos existe una oficina intermedia entre la oficina central y los pozos. Esta oficina generalmente se le conoce como "Unidad de Cómputo Huésped", debido a que es ahí donde llega toda la información del campo. Este sistema consta de una alarma que reporta fallas, teniendo diferentes rangos de jerarquización de las mismas. De este modo pueden iniciarse diagnósticos y requisiciones en el sitio de inspección si es necesario. Este método es muy conveniente al momento de elegir pozos con problemas debido a la capacidad para resumir este gran volumen de información.

La oficina de la estación central tiene también una antena retransmisora de señal, equipo de radiocomunicación, procesador de datos, impresora y una computadora portátil (móvil).



**Figura 3.4 Sistema integral de control automático.**

## CAPITULO IV

### SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICO

En este capítulo se presenta el sistema de operación conjunta de todo el sistema integral de control y se describe el sistema de operación, además de la información que proporciona el sistema de control automático. El significado de la información que se va a comparar con los valores previamente establecidos por el diseño del aparejo de bombeo y el momento en que se registra ésta información. Se presentan asimismo los parámetros de operación del sistema, dónde se recomiendan algunos rangos de valores para establecer comparaciones posteriores. En ésta parte también se describen brevemente las cartas dinámicas que se obtienen con el sistema de control automático y se analizan algunas cartas dinámicas reales.

#### IV.1 Sistema de operación

El sistema opera con las señales que recibe de los sensores, las cuales son modificadas y enviadas por ondas radioeléctricas a la oficina de la estación central para supervisar, controlar y diagnosticar la operación de las unidades de bombeo mecánico.

El sistema de operación tiene capacidad completa de monitoreo y está dividido en dos partes principales: el control de sistema pump-off y un sistema central de información acumulada. Las funciones básicas que proporciona el sistema son:

- . Monitoreo de cargas y posiciones por medio de sensores.
- . Desarrollo de cartas dinamométricas.
- . Compara datos dinamométricos contra los límites de la unidad instalada y la detiene cuando los límites se exceden.
- . Arranca la unidad de bombeo después de un tiempo seleccionado por el operador permitiendo que los fluidos entren al pozo.
- . Restaura el bombeo al final del período de tiempo seleccionado para bombear los fluidos que entran al pozo durante dicho tiempo apagado.
- . Monitorea todos los datos asignados para determinar los valores máximo y mínimo de carga, tiempo diario de operación, etc.
- . Implementa un dispositivo de acción seleccionada para cuando un dato está excedido entonces, el sistema genera un mensaje de falla para indicar el problema y sugiere la acción a tomar.
- . Sistema de monitoreo de alarma

Las unidades terminales maestras suministran la comunicación del sistema. Una unidad terminal monitorea las pruebas de pozo y alarmas, otra unidad controla el sistema pump-off y los sistemas de comunicación de operación. Seis señales (tres comandos y tres respuestas) se transmiten simultáneamente. La señal de la unidad terminal maestra controla la información obtenida utilizando un sistema de comunicación.

Es posible cambiar el sistema sistema de operación diariamente de acuerdo con el trabajo primario para:

1. Establecer pruebas de pozo y mantener los límites del control pump-off
2. Diagnóstico del pozo
3. Alarmas para advertir el mal funcionamiento y cambios en las condiciones del pozo
4. Avisar fallas en el sistema
5. Preparar reportes de operaciones

El operador analiza toda la información recibida. Los problemas de hardware son referidos al encargado de la automatización, mientras que las fallas del equipo son referidas a los operadores. El operador del sistema de control reporta todos los pozos y otros problemas de operación al encargado de producción. Previamente reporta toda la información enviada para la oficina central de distrito. Conforme el operador del sistema va adquiriendo experiencia, los problemas son



detectados más rápido y con mayor exactitud. Cuando un problema se descubre, puede ser aislado para una reparación instantánea. De esta forma se reduce el tiempo de operación inútil, permitiendo un uso eficiente de energía-hombre.

Las informaciones de carga y posición pueden ser adquiridas 12 veces por segundo en cada pozo que es integrado al control, dónde se grafica para obtener los parámetros de operación del sistema. La velocidad de comunicación (3 900 bites/seg.) es suficiente para manejar cuatro pozos simultáneamente. El software está diseñado para manejar un máximo de cuatro líneas separadas ó 16 pozos simultáneamente, añadiendo a la computadora las interfaces unitarias de cada línea.

La secuencia de información es la siguiente:

L1 W1, L1 W2, P1 W1	P1 W1, L1 W3, L1 W4	P1 W3, P1 W4
L2 W1, L2 W2, P2 W1	P2 W2, L2 W3, L2 W4	P2 W3, P2 W4
.	.	.
.	.	.
.	.	.
Ln W1, Ln W2, Pn W1	Pn W2, Ln W3, Ln W4	Pn W3, Pn W4

donde L1 W1 significa la primera carga del pozo número 1 y P1 W1 significan la primera posición del pozo número 1, etc.

El tiempo requerido para procesar todos los pozos en secuencia en promedio dura 5 seg/carrera de la bomba, siendo entonces la corrida ligeramente mayor de 3 minutos. Este período es demasiado grande para detectar el pump-off, por eso se

desarrolló un procedimiento para asegurar que cada pozo sea revisado con mayor frecuencia. El procedimiento es el siguiente:

El sistema efectúa el paro automático de la unidad cuando la tensión en la varilla pulida excede los límites de operación que fueron previamente establecidos. Esto disminuye el desgaste del equipo y ahorra considerablemente el consumo de energía eléctrica.

El pozo se arranca después que ha sido detenido por un período de tiempo específico, dependiendo del flujo del pozo y de las características del equipo. Después bombeando de 1 a 3 minutos, se revisa una carrera para asegurar que el barril de la bomba se está llenando apropiadamente y que todas las cargas son normales. Si el pozo detecta algún porcentaje específico (50 a 90%) del tiempo esperado de pump-off, el pozo es examinado tan rápidamente como es posible durante el período de tiempo en que es candidato para que ocurra pump-off y es cerrado cuando puede ser establecido el pump-off.

Uno o más pozos pueden estar monitoreándose a la vez, o bien alguna porción de la carrera para examinar su ciclo en el mismo tiempo. Un pozo puede ser monitoreado a cada carrera de la bomba o bien cada n carreras, dependiendo del estudio en cada pozo. En cualquier pozo monitoreado por pump-off, las cargas máxima y mínima son checadas por límites para que no se excedan.

El control tiene dos niveles de alarmas, el primer nivel indica al operador que existe un posible problema, el segundo nivel

indica un problema más severo causado en el pozo y previene de revertir el problema con un control local fraccionador de tiempo.

Cualquier requerimiento de información de carga y posición que describe las cartas dinámicas superficiales y que son utilizadas por el control pump-off puede transmitirse desde la computadora de campo hasta la oficina central, donde un completo análisis del sistema de bombeo se ejecuta utilizando el programa de diagnóstico de varillas de succión. Los resultados se regresan al operador de campo en un lapso de tiempo de 15 a 20 segundos. Las cartas del fondo del pozo son graficadas y las cargas resultantes aparecen en la impresión.

El programa de diagnóstico de varillas de succión se utiliza principalmente para identificar la naturaleza de los problemas del pozo y para confirmar una condición de pump-off en el mismo.

Este sistema también imprime mensajes como la ocurrencia de anomalías, el tiempo promedio de un pozo bombeando actualmente, así como el día anterior y el porcentaje de cambio. Aquellos pozos con un porcentaje de cambio mayor de 10% son señalados en pantalla con un asterisco.

Algunos problemas como fallas debidas a energía, compresión de gas, bombas atascadas y varillas rotas son fácilmente detectados, otros problemas como goteo de válvulas, bombas gastadas, bridas rotas o formación de parafinas son más difíciles de detectar pero con mayor experiencia, son más fáciles de identificar.

Para la detección de parafinas en las líneas de flujo y en el fondo del pozo, dado que la parafina se forma en la línea de flujo, la presión en la TR aumenta y el tiempo de operación disminuye. Por monitoreo minucioso de tiempo, el operador puede detectar alta presión en la línea de flujo como resultado de un depósito de parafinas. Como la parafina se forma en la tubería, la carga alta en la varilla pulida aumenta y la carga baja disminuye. Después de años de estudio, la predicción de la frecuencia de cualquier tratamiento con aceite caliente para los pozos se ha determinado.

La explotación completa del potencial del sistema se puede alcanzar solamente con su correcta aplicación. Un plan de su instalación, utilización y manejo dará como resultado un aprovechamiento óptimo del sistema.

#### **IV.2 Información que proporciona el sistema de control automático**

Entre la información que proporciona el sistema de control automático para establecer comparaciones tenemos:

1. Carga baja
2. Carga alta
3. Carga baja promedio
4. Rango de cargas

### Carga baja

La carga mínima de un pozo que bombea normal ocurre en la carrera descendente, la sarta de varillas es atraída hacia el fondo del pozo, siendo ésta la carga básica en el fluido. Las fuerzas necesarias para mover las varillas, la fricción y arrastre entre las varillas y la tubería, inercia de las varillas, y la flotación de las varillas en los fluidos del pozo, reducen el peso de las varillas.

La carga mínima de la varilla pulida (MPRL) es grabada de la última carrera y/o desde que enciende el equipo.

Mientras el pozo no está bombeando fluidos, el cambio de la carga mínima (baja) será muy pequeño. La carga baja básica es solamente el peso de las varillas en el fluido menos dinámica y fricción. Una vez que la tubería está llena de fluido y flotando en éste, la carga se modificará solo cuando cambie la densidad de los fluidos; así, los cambios de peso son muy pequeños. El nivel de fluidos en el pozo no afectará la carga baja.

### Carga alta

La máxima carga ocurre en la carrera ascendente. En este momento la carga de fluidos se mueve hacia arriba y es acarreada por el émbolo. Existe presión adicional originada por

las fuerzas necesarias para mover las varillas y la carga del fluido, y la fricción entre las varillas y la tubería. Cuando el pozo está apagado por un período de tiempo, el nivel del fluido se eleva en el espacio anular. Debido a que el émbolo sólo tiene que levantar el fluido desde el nivel superior del fluido hasta la superficie, la carga al comienzo será más ligera. Conforme el pozo tiene que bombear más abajo y el fluido tiene que levantarse desde una distancia más grande, la carga por fluido se incrementará, ésta carga alcanza su máximo cuando el nivel del fluido está en la bomba y el émbolo comienza a golpear al fluido.

### Carga baja promedio

La carga promedio ayuda a la detección de problemas durante la carrera ascendente como pueden ser: válvulas atascadas, válvulas que no cierran a tiempo, balines que se ovalaron o que se partieron y no sellan consistentemente.

La mayor carga promedio normal ocurre cuando el nivel del fluido tenga una longitud de columna hidráulica equivalente a la presión estática del yacimiento. El límite del valor de la carga baja baja promedio deberá ser menor que la carga baja promedio cuando el nivel de fluido es alto.

### Rango de cargas

La carga máxima en la carrera ascendente es la carga pico (PPRL). La carga mínima en la carrera descendente es la carga

baja (MPRL). La diferencia entre la carga pico y la carga baja es el rango de cargas. La importancia del rango de cargas de separación radica en que puede indicar cuando el bombeo de la unidad ha cesado o bien, cuando una parte de las varillas se ha desprendido.

La carga pico de la carrera ascendente está compuesta por:

1. El peso de las varillas en el fluido
2. La carga del fluido
3. Fricción y dinámica

Cuando el pozo ha estado fuera de actividad por un cierto período de tiempo, el nivel del fluido se eleva en el espacio anular

La carga baja de la carrera descendente está constituida por:

1. El peso de las varillas en el fluido, menos
2. Fricción y dinámica

Con la bomba llena totalmente, la carga baja es estable. Cuando ocurre golpeteo de fluido, las fuerzas dinámicas son generadas por el repentino liberamiento de la carga; ésto puede causar que las cargas bajas sean menores a las normales. Dichas cargas se reflejan en la carrera ascendente.

Además el sistema proporciona información sobre:

1. Tiempo real de operación por día
2. Fugas en válvulas y TP
3. Emboladas por minuto de la bomba
4. Nivel dinámico en la TR
5. Interferencia de gas en la bomba
6. Cartas dinamométricas
7. Fricción y flotación de las varillas
8. Atascamiento de la bomba
9. Varillas desprendidas
10. Bomba desanclada
11. Eficiencia de la bomba
12. Tiempo de paro y/o arranque de la unidad
13. Duración de la embolada de la bomba
14. Gráficas del torque del reductor de engranes y,
15. Balanceo de la unidad de BM



### IV.3 Parámetros de operación del sistema de control automático

#### Límite de la carga baja

Cuando en el pozo se empieza a tener golpeteo de fluidos, la dinámica de la sarta de varillas se modifica. La liberación repentina de la carga causada por el golpeteo de fluidos puede provocar que la carga baja sea significativamente menor que bajo condiciones de bombeo normal. Fijar adecuadamente el punto de control para la detección oportuna del golpeteo de fluidos, prevendrá golpeteo de fluidos externadamente fuertes y por lo tanto cargas mínimas anormalmente bajas.

Debido a que la carga de fluido es parte del control pump-off, el límite de carga baja debe ser establecido debajo del límite observado para carga mínima bajo condiciones de pump-off.

Nótese que en pozos someros, la carga baja puede tomar valores de cero. En este caso, el control automático puede ajustarse para fijar en cero la carga baja y no obtener cargas negativas. En casos como este pueden presentarse problemas como:

#### 1. Bomba pegada

Si el émbolo se pega en el barril de la bomba, la sarta de varillas no podrá bajar. Las varillas permanecerán arriba y la carga puede llegar a ser muy baja, causando que las varillas posiblemente se separen de la barra soporte en la carrera

descendente. Fijar los límites considerablemente por debajo de la carga baja observada puede ser apropiado si la adherencia no es severa.

## 2. Parafina o incrustaciones

La parafina o incrustaciones en el pozo pueden afectar la carga baja. Debido a que pueden ser parcialmente soportadas por la sarta de varillas en la carrera descendente, la parafina y / o las incrustaciones pueden soportar completamente las varillas causándoles una posible separación de la barra soporte en la carrera ascendente. Si el límite de la carga baja es establecido apropiadamente, puede ser detectado como una condición de pump-off mucho antes de causar un problema.

## 3. Desprendimiento de varillas

Una parte de las varillas cerca de la bomba, puede cambiar la carga baja en muy poco tiempo debido a que el peso de flotación de las varillas descansa esencialmente en el fluido. Las partes de la sarta y la varilla pulida causarán que la carga en las varillas sea cero.

Las partes de las varillas como cualquier otro punto en la sarta, afectarán la carga baja en proporción a las varillas unidas a la barra soporte, así como la carga baja límite puede o no detectar este problema.

## **Límite de la carga máxima**

La máxima carga es grabada para la última carrera y para la carga más alta alcanzada. Para conocer la máxima carga de la última carrera y la máxima carga desde que la unidad fue encendida, el control del pump-off proporciona parámetros de medidas de carga.

El límite de carga máxima debe fijarse a un valor ligeramente mayor que el esperado para una carga máxima normal. Para tener una idea razonable de la carga máxima cuando el pozo esta en pump-off por golpeteo de fluidos, se recomienda suponer que el nivel de fluido está a la profundidad de la bomba. En estos casos pueden presentarse los siguientes problemas:

### **1. Incrustaciones**

Las cargas que excedan el promedio de la unidad sólo pueden presentarse cuando algo está colgando o se pega al pozo y las varillas o el émbolo son incapaces de moverse. Si este problema se presenta, es aconsejable fijar el límite de carga alta alrededor de 1000 a 1500 libras arriba de la carga pico normal.

### **2. Parafinas**

Si existen incrustaciones de parafinas o recubrimientos, causarán un incremento en la contrapresión, lo cual hará que vaya aumentando gradualmente la carga máxima. El límite de la carga máxima debe ser fijado en algún valor en el cual sean

detectables las incrustaciones de parafinas antes de que se conviertan en un problema grave.

#### Límite de la carga mínima promedio

Los controladores automáticos promedian la carga de una carrera completa y la almacenan para comparaciones posteriores. La carga promedio para un llenado completo de la bomba, será menor que la carga promedio bajo condiciones de golpeo de fluido.

Esto se debe a que bajo el golpeo de fluido, la carga en la carrera descendente permanece alta hasta que es liberada por la presión a través de la válvula viajera.

#### Número de excesos de carga antes de que una acción sea tomada

Algunas condiciones de problemas requieren que la acción sea tomada a la primera vez que se presenta. Otras condiciones no requieren respuesta inmediata. El número de ocurrencias consecutivas debe ser anticipadamente establecido según las condiciones del área donde se localicen los pozos de interés. Por ejemplo:

#### **Problemas de atascamiento**

Una bomba atascada o sarta atrapada puede causar que las cargas se aproximen a las fuerzas de ruptura de varillas o dañar la unidad. Si se anticipó el problema, una simple carga excesiva debe ser detectada y la unidad debe ser detenida. El número de

veces que ocurra una carga excesiva antes de detener la unidad debe ser 1.

#### Parafina o incrustaciones

En este caso, el límite de la carga alta es utilizado para detectar el incremento gradual de la carga pico; así, el número de veces que la carga excesiva sea detectada debe ser lo suficientemente grande para indicar al operador que se están teniendo incrustaciones de parafinas o arenamientos. El número de veces que se detecte el aumento en la carga pico debido a este problema, antes de tomar una acción, se considera razonable de 10.

#### Límite del rango de separación

Ya que la carga pico es afectada por el nivel del fluido en el espacio anular y por fuerzas dinámicas de golpeteo, y las cargas mínimas son afectadas por fuerzas dinámicas de golpeteo, la carga de separación está sujeta a grandes cambios. Es importante fijar el valor de esta carga de tal manera que se pueda detectar cuando ha cesado el bombeo o cuando se presentan roturas en las partes bajas de las varillas.

Se recomienda fijar el límite del rango de cargas a dos terceras o a tres cuartas partes del rango actual de cargas observada. El número de veces que el rango de cargas puede ser menor que el valor fijado antes de llevar a cabo una acción es normalmente 10 veces, ya que este parámetro detecta una condición en la cual ningún fluido está siendo bombeado. La acción a tomar debe ser apagar el equipo.

### Sensor de falla

Cuando la celda de carga o la posición del sensor dejan de enviar valores razonables, la lógica del sistema asume que el sensor ha fallado. Ya que es imposible controlar la unidad con valores de carga erróneos y la información de posición, hay dos opciones:

1. Continuar bombeando con base en el tiempo que se tiene calibrado en el mecanismo de relojería (con bombeo mecánico intermitente)
2. Apagar la unidad

Para continuar el bombeo basados en los mecanismos calibrados de relojería durante la operación normal, el controlador monitorea constantemente que el pozo esté bien en sus tiempos y promedios, almacenándose estos valores de mecanismos de relojería calibrada en el software. En este caso, también puede establecerse un valor fijo para el tiempo de corrida. En cualquiera de los casos cuando los sensores fallan, la unidad opera basada en uno de esos dos tiempos. Si la celda ha fallado, todas las funciones de protección y de control serán desactivadas en el controlador; si el sensor de posición ha fallado, los límites de las cargas continuarán bajo supervisión.

En otros casos, es preferible apagar la unidad hasta que sea restablecida manualmente.

### Reestablecimiento del sensor de posición

Algunas veces las pérdidas de la señal del sensor de posición es temporal. Después de que el control ha sido transferido, y la unidad está trabajando con mecanismos de relojería calibrado en el software, el sensor de posición puede empezar a mandar señales normales.

### Retardo en el bombeo

Cuando la unidad comienza a funcionar después de un tiempo apagado, la primera carrera puede ser la misma que la última carrera antes de apagarla, ya que la bomba fue llenada sólo parcialmente cuando la unidad arrancó en ese tiempo apagado. También durante este tiempo, fluido y gas pueden estar presentes a la entrada de la bomba. Por estas razones, las primeras carreras después del encendido de la unidad no son representativas de las condiciones normales de bombeo. Para conocer las nuevas condiciones de operación, debe ser programado un tiempo de retardo en el bombeo. Aproximadamente el retardo es de 30 segundos.

### Apagado instantáneo

Si el controlador detecta una condición de "apagado instantáneo" después del tiempo apagado, comenzará otro ciclo. El tiempo apagado puede ser muy pequeño para las condiciones del pozo u otros problemas que pueden presentarse. Es posible fijar el número de apagados instantáneos ya que es preferible a tener la unidad estática. El uso del programa de tiempos apagados permitirá al operador escoger un tiempo apagado realista.

### Límites de operación

Los límites de operación pueden ser fijados para ayudar en el control de pozos difíciles. Los pozos fluientes a los cuales se les ha puesto recientemente la bomba y los pozos que presentan problemas de interferencia de gas son ejemplos de pozos difíciles. El poner un control de apagado de bombeo en un punto adecuado, puede resultar muy difícil, ya que estos pozos se comportan erráticamente.

### Ciclo mínimo de tiempo

En pozos con interferencia de gas el dinamómetro está cambiando continuamente. Esto da origen a ciclos de tiempo corrido muy cortos. Fijar un tiempo mínimo de trabajo por ciclo dará al operador la seguridad de que la unidad corre un tiempo mínimo antes de permitir la marcha en vacío. Esta opción sólo será utilizada en pozos problemáticos. Esta situación puede ocurrir aproximadamente dos ciclos antes de que una acción sea tomada. Cuando este número es excedido es posible programar el encendido de luz de falla en el control.

### Ciclo máximo de trabajo

En la instalación del control de la bomba de varillas ideal, la capacidad de la unidad de bombeo es ligeramente mayor que la capacidad del pozo. Pero como la bomba sufre desgaste, los tiempos de trabajo son cada vez mayores hasta que eventualmente la bomba está trabajando las 24 horas del día. Si la bomba es cambiada, la capacidad del pozo será mayor que la unidad de bombeo y la producción será diferida. O si el pozo está en otro proyecto de recuperación secundaria, la capacidad del pozo puede crecer y llegar a ser mayor que la capacidad del equipo.



El operador debe especificar el ciclo máximo de trabajo, de modo que sea notificado cuando el equipo está trabajando más de lo esperado. Cuando el ciclo máximo es excedido, significa que las condiciones del pozo han cambiado y deben ser investigadas.

#### Tiempo de trabajo máximo diario

A manera de prevenir al operador de que la unidad esté trabajando tiempo completo o casi todo el tiempo, el tiempo de trabajo diario puede establecerse en ceros para observarlo directamente. Cuando el tiempo es excedido es posible detectarlo con la luz indicadora de falla.

#### Restablecimiento de la pérdida de potencia

Cuando ocurre una falla de potencia, la unidad se apaga y durante este tiempo el nivel del fluido aumenta en el espacio anular y puede ocurrir segregación de fluidos. Ya que estas condiciones afectan la capacidad de la carga y el tiempo de trabajo, cuando se restablece la potencia y el bombeo se reanuda, es recomendable fijar un tiempo de recuperación de la falla; tiempo en el cual la carga y el número de carreras no serán monitoreado por el controlador.

El tiempo de recuperación de potencia está en función del tiempo de duración de la falla, por lo tanto, es posible limitar el tiempo de establecimiento en minutos por cada minuto del tiempo de falla con multiplicador. Por ejemplo, si se fija el multiplicador a 1, dará un tiempo de restablecimiento de

1/10 por cada minuto de duración de la falla. De esta manera, se puede ahorrar tiempo de espera para que se restablezca el bombeo.

Si la falla de potencia es lo suficientemente larga, el nivel del fluido del pozo alcanzará una altura máxima igual a la presión del yacimiento. Debido a que ésta será la altura máxima que el fluido puede alcanzar, será la base para el límite máximo de tiempo de recuperación de la falla de potencia.

#### **IV.4 Gráficas que provee el sistema de control pump-off**

- a) Gráficas en por ciento. Se utilizan solamente para establecer el punto del pump-off.
- b) Gráficas de carga. Se utilizan para establecer el límite de cargas y para diagnosticar problemas en el pozo.
- c) Gráficas del fondo del pozo. Se utilizan para mostrar el nivel de fluido que se bombea y para diagnosticar problemas en la misma.
- d) Gráficas de torsión neto. Muestra la torsión en la caja de engranes para las carreras ascendente y descendente.

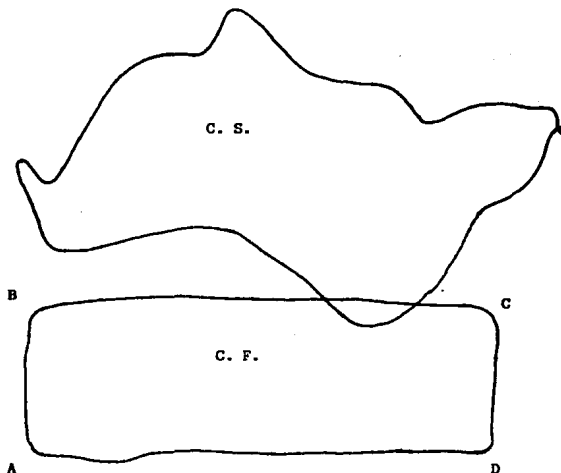
- e) Gráficas de cargas permisibles. Estas muestran a la gráfica de carga con relación a las limitaciones físicas de la unidad de bombeo.
  
- f) Gráfica de arranque. Es tomada cuando la unidad se arranca después de un tiempo apagado.
  
- g) Gráfica de apagado. Muestra lo que aconteció en el pozo por 60 segundos previos al cierre.
  
- h) Gráfica de acción lista. Muestra los más recientes 60 segundos de actividad en el pozo.

A continuación se presentan algunos ejemplos de cartas dinamométricas superficiales y de fondo reales.

**Llenado completo de líquido (con tubería anclada)**

Con aceite sin gas disuelto y agua, el fluido es casi incompresible. Esto causa que la transferencia de carga de la válvula viajera a la válvula de pie casi sin que se mueva el émbolo.

La carta dinamométrica del fondo del pozo tendrá una apariencia casi perfectamente rectangular.



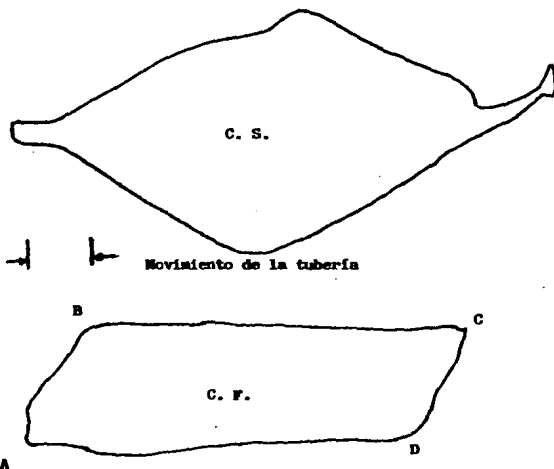
Carta Superficial (C.S.)

Carta de Fondo (C.F.)

### Llenado completo de líquido (con tubería desanclada)

Conforme inicia la carrera ascendente, la carga de fluido descansa en la válvula de pie y es soportada por la TP que se está alargando debido a dicha carga. Cuando el émbolo se mueve hacia arriba, la carga en la TP se reduce de modo que se mueve hacia arriba junto con el émbolo. El émbolo no carga el total de la columna de fluido hasta que la TP está totalmente contraída.

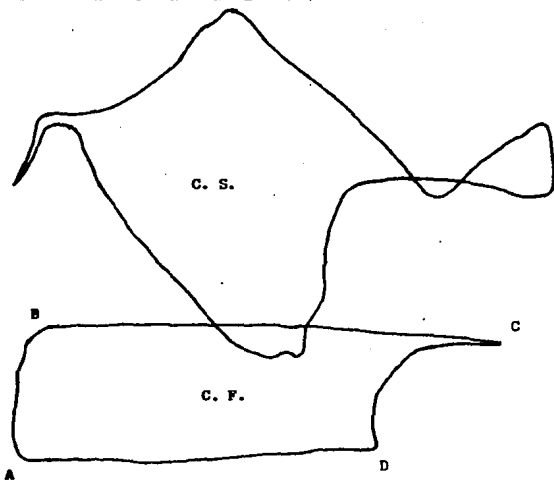
En la carrera descendente, la carga de fluido se transfiere nuevamente a la TP y descansa sobre la válvula de pie. Esta carga produce alargamiento en la TP hasta que soporta la carga total del fluido. El émbolo se mueve hacia abajo junto con la TP. Este movimiento de la tubería representa la pérdida de carrera del émbolo debido a que éste no se mueve hacia abajo en el barril hasta que la TP detiene su movimiento.



### Golpeteo de fluido (con tubería anclada)

El fluido en el pozo es insuficiente para llenar el barril de la bomba y la presión de succión es muy baja, así que el volumen restante del barril se llena con gas. El émbolo se mueve hacia abajo en el barril y el gas se comprime abajo del émbolo hasta que éste golpea al fluido. La carga en la válvula viajera se libera repentinamente. Esto se llama golpeteo de fluido.

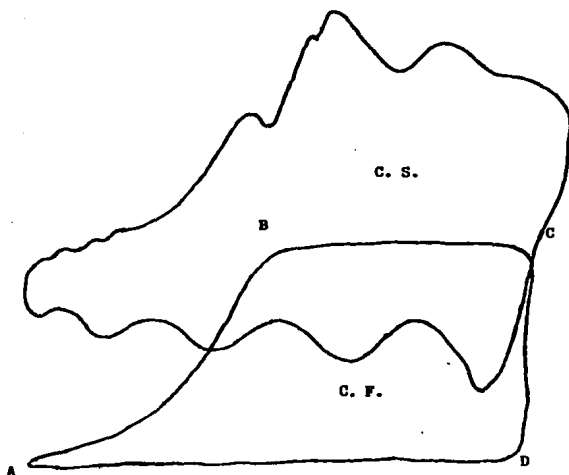
Esta liberación de carga es similar a la que ocurre al inicio de una carrera con llenado completo, con el émbolo esencialmente estacionario. Sin embargo, debido a que el émbolo se detiene cuando ocurre la liberación de carga y las varillas continúan en movimiento, el impacto sobre las varillas es muy dañino debido a que entran en compresión y pandeo. El choque de cargas sobre la unidad también es indeseable.



### Bomba con válvula charger (con golpeteo de fluido)

Este diseño transmite el fluido de una cámara superior a una inferior en dos etapas. La carga del fluido queda soportada por una válvula superior mientras ocurre la transferencia.

Con el llenado parcial de la cámara inferior, la transferencia llena parcialmente la cámara superior. En la carrera ascendente el gas se comprime conforme el émbolo se aproxima al espejo de fluido, de modo que el golpeteo de fluido ocurre durante la carrera descendente. Con el llenado completo, la bomba produce una gráficas típicas de llenado completo. La Figura 4.4 muestra la válvula charger.



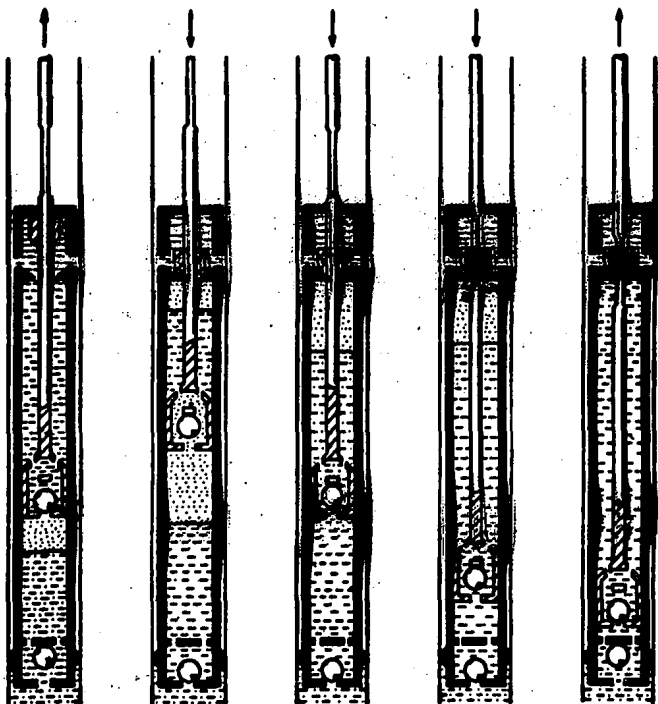
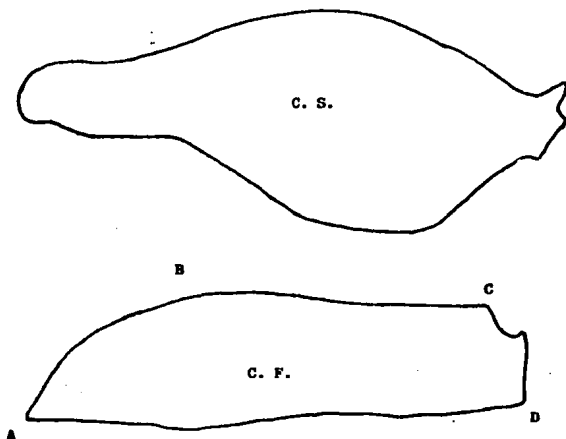


Figura 4.4 Válvula Charger. Elimina interferencia de gas y previene el golpeteo de fluido durante las carreras ascendente y descendente.



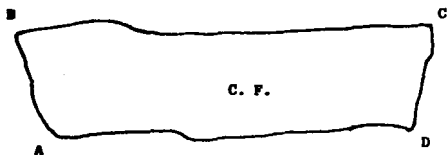
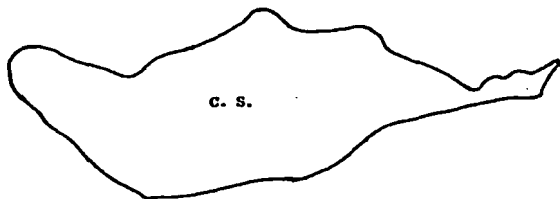
**Válvula viajera desgastada o émbolo (con llenado completo y tubería anclada)**

El fluido que resbala a través de un émbolo o una válvula viajera desgastada iguala la presión por debajo del émbolo, de manera que el aumento de carga queda retrasado hasta que el émbolo se mueve suficientemente rápido para compensar la carga. Conforme el émbolo reduce su velocidad al final de la carrera, el resbalamiento nuevamente iguala la presión de modo que pierde la carga.



**Válvula de pie desgastada (con llenado completo y tubería anclada)**

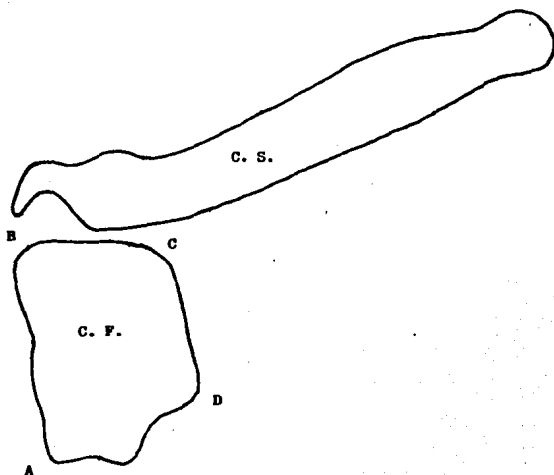
El fluido que se resbala pasa a través de una válvula de pie desgastada, transfiriendo nuevamente la carga y empujándola a la válvula viajera conforme el émbolo reduce su velocidad. Durante carrera descendente, la liberación de cargas se retrasa hasta que el movimiento del émbolo compensa el resbalamiento de fluido que pasa por la válvula de pie.



**Sarta de varillas flexible ( $F_o/Skr > 0.5$  ; con llenado completo y tubería anclada)**

Esta clase de carta dinamoétrica de fondo indica que la sarta de varillas tiene mucho alargamiento y que utiliza la mayoría de la carrera superficial para levantar el fluido. Note la extremadamente corta carrera efectiva del émbolo. Esta carta se llama comunmente de viaje bajo; se observará cuando el cociente  $F_o/Skr$  es menor o igual a 0.5.

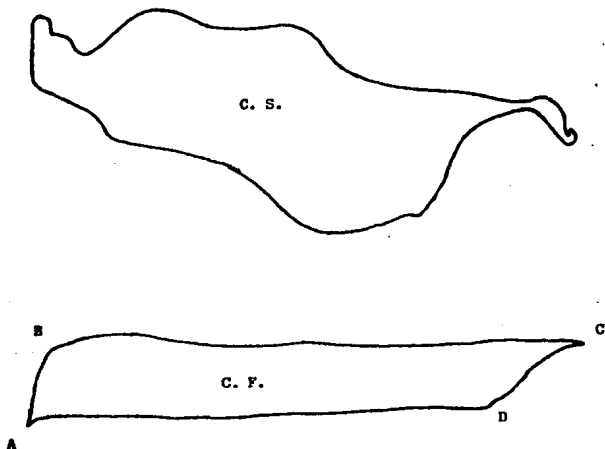
Una sarta de varillas de fibra de vidrio o de alta resistencia con una bomba grande a baja velocidad dará esta clase de carta.



### Interferencia de gas (con tubería anclada)

El gas en la cámara de la bomba permite que el émbolo se mueva hacia abajo en el barril hasta comprimirse lo suficientemente para abrir la válvula viajera y transferir la carga a la válvula de pie. Debido a la separación de gas en el fondo del pozo, la cantidad de gas que se extrae de la cámara de la bomba puede cambiar en cada carrera.

En la carrera ascendente, si el fluido en la TP por arriba de la bomba está muy gasificado y compresible, el émbolo puede moverse hacia arriba mientras está levantando esta carga que se expande.



## **CAPITULO V**

### **BENEFICIOS Y VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICO**

#### **V.1 Ventajas del sistema de control automático**

Entre las ventajas del sistema de control automático sobresalen las siguientes:

Protege al motor principal para prevenir cualquier arranque cuando se presenta la condensación en motores ventilados.

Es posible controlar cualquier pozo, incluyendo todas las geometrías de las superficiales y unidades de carrera larga.

Los parámetros y los datos son almacenados en una memoria imborrable para protegerlos en caso de pérdida de corriente.

Alerta al operador cuando se presenta alguna condición anormal de trabajo en las unidades, evitando daño a las instalaciones y disminuyendo tiempos apagados en el

equipo. La alerta puede ser debido a: Fallas de energía eléctrica, falla del motor, sobretensión en la varilla pulida o sobre esfuerzo, paro de la unidad debido a otras razones y fuga o represionamiento en las líneas de descarga (opcional).

El tablero está diseñado para ser utilizado fácilmente por los operadores de campo. Los mensajes en pantalla son de fácil comprensión y el teclado cuenta con teclas específicas para funciones decisivas y claras y no requiere equipo adicional para la configuración o visualización de algún parámetro.

El control automático define la falla detectada y la acción que debe tomar el operador en un análisis rápido de la situación. Debido a esto, el tiempo dedicado a la investigación y diagnóstico es mínimo.

Genera archivos y reportes de parámetros y gráficas para observar las condiciones de operación de los equipos, permitiendo un análisis detallado de los pozos.

Puede operar en un amplio rango de temperaturas bajo condiciones extremas.

Consta de un amplio rango de voltage de entrada protegiendo al controlador contra campos de potencia y sobrecargas de voltage.

**TABLA 5A**

<b>Artículos Técnicos</b>	<b>Ahorro de Energía</b>	<b>Ahorro de operaciones por Mantenimiento</b>	<b>Aumento en la Producción y otros beneficios</b>
"Successful Application Of Pump-Off Controllers"	10% a 35%	Reducción de 10% a 35%	Amba de 3% aumentó la producción
"Denver Unit Well Surveillance And Pump-Off Control System"	Disminución de 18% en KW/H/BBL	No establecido	4% de aumento en la producción
"Pump-Off Controller Application For Midway-Sunset Cyclic Steam Operations"	Disminución en 45% en consumo de energía	No establecido	No aumenta la producción pero se tiene mayor eficiencia en la misma
"Shell Expands Computer Production Control"	Disminución de 20% a 25% en energía eléctrica	Se indica que ha habido un aumento sustancial de fallas debido a que se tiene un porcentaje grande de agua producida. Esto no ocurre en pozos con porcentajes de agua normales	4% de aumento en la producción
"Pump-Off controllers Improve Sucker Rods Economics"	Aumento en un promedio de 25%	Disminución de 98% en fallas por varillas y 86% en cambios de bombas subsuperficiales	Disminución de la producción por problemas de campo. 41% de incremento en la eficiencia de bombeo
"Experience with Pump-Off Controllers in the Premian Basin"	20% de disminución en energía consumida	Reducción en 25% en costos de extracción	Aumento de 1% a 4% en la producción
"Analysis Indicates Benefits Of Supervisory Pump-Off Control"	Se espera una reducción en la eficiencia de la energía que no puede ser anticipada debido al incremento de fluidos producidos	Disminución de 14% en fallas del equipo de bombeo mecánico	3% de aumento en la producción
"Computerized Automation Of Oilfield Production Operations: An Extensiv Five Year Study Into The Cost & Benefits"	Disminución de 11.3% en el consumo de energía por barril de fluido producido	Disminución de 28.8% en fallas subsuperficiales por barril de fluido producido	Aumento en la producción de 3.8% a 13.9%

## V.2 Beneficios esperados

Aunque existen excelentes artículos técnicos que han documentado los beneficios económicos y operativos de la instalación del control pump-off en equipos de bombeo mecánico, la industria petrolera recién comienza ahora a reconocer plenamente los beneficios íntegros que se pueden obtener con la instalación de esta tecnología. En la Tabla 5.A se presentan algunos artículos técnicos dónde se pueden comparar los beneficios obtenidos con la instalación del sistema de control pump-off.

Al revisar los reportes de los beneficios obtenidos por la instalación del control pump-off, es notable un rango muy consistente de ahorro de energía y mejoramiento de operaciones. Generalmente los beneficios esperados cuando se instala un control son los siguientes:

### 1. Ahorro de energía

El ahorro de energía resulta de la reducción del tiempo de operación de la unidad de bombeo, manteniendo sin embargo, la producción normal del pozo. La suma total de energía ahorrada está en función de cómo el pozo ha sido bombeado previamente a la instalación del control.

Típicamente los pozos son sobre bombeados para obtener la máxima producción sin considerar el exceso de costos por energía utilizada.



Los métodos para incrementar la producción pueden ser:

- a) Producir por un mecanismo de tiempo calibrado
- b) Veinticuatro horas de operación por día.
- c) Periodos de control de operación encendido/apagado.

Además, la habilidad para establecer el punto de cierre del pozo cerca del primer golpe de fluido (el barril de bomba no completó el llenado) o para seleccionar un número consecutivo de golpes de fluido, garantiza que el pozo esté en pump-off antes del cierre. La bomba no puede obtener un llenado máximo antes de que los fluidos fluyan del yacimiento hacia el pozo debido a que son limitados por la diferencia de presión entre la presión estática y la presión de fondo fluyendo.

La suma de energía ahorrada es además acrecentada por el control en el pozo así como este tiempo máximo de bombeo y el tiempo mínimo de detención de la unidad, los cuales son obtenidos sin pérdidas en la producción.

## 2. Incremento en la producción

Generalmente el incremento en la producción del pozo es el resultado del control pump-off, que suministra inmediatamente información de operación como la siguiente:

a) Detección anticipada e identificación de problemas potenciales de bombeo, concediendo al operador minimizar el tiempo debido a fallas, y con esto prevenir la pérdida de producción.

b) El control puede incrementar automáticamente el ciclo de bombeo o aumentar el tiempo de operación efectiva del equipo para compensar por un decremento en la eficiencia de bombeo por tuberías que gotean o escurrimiento de valvulas, manteniendo de ese modo la máxima producción.

Del monitoreo diario del tiempo de operación en un pozo estable, el operador puede estar atento por problemas potenciales cuando el tiempo diario de operación cambia significativamente. El operador también puede planear un catálogo del incremento diario en el tiempo de operación por medio del monitoreo.

### 3. Ahorro por mantenimiento

Dos beneficios resultan de monitorear un pozo por un controlador de bombeo:

a) El control está diseñado para detectar golpes de fluido

cuando comienza el pump-off y puede ser establecido por el operador para limitar la cantidad de golpes de fluido que van a ser admitidos. Esto previene desgaste y daño en todos los componentes del sistema de bombeo, alargando la vida útil del equipo de operación por los efectos perjudiciales de los golpes de fluido. También reduce el número de ciclos de bombeo, aumentando la vida útil del equipo de bombeo.

b) El control automático pump-off monitorea las cargas alta y baja de varillas y empareja cargas; así que si el sistema de bombeo tiene un componente que está fallando (bomba pegada, varillas rotas, tuberías goteando, etc.) el control cerrará el pozo.

Esto previene además daños al equipo y puede proporcionar también ahorro de energía si la unidad no produce algún fluido.

#### 4. Ahorro en el mantenimiento

Debido a que un microprocesador del control automático puede proporcionar mensajes de falla refiriéndose a problemas encontrados, se determinan con facilidad acciones correctivas como por ejemplo que tipo de equipo debe ser suministrado a un pozo, es posible prevenir fallas y obtener un ahorro considerable en mantenimiento.

Varios equipos del control proveen mensajes de falla y el problema posible correspondiente como son:

Fallas en el control

- a) falla en el panel del control del motor
- b) falla en la polea unidad de bombeo

Medida de la carga baja

- a) Rotura en la sarta de varillas
- b) Alto nivel de fluido
- c) Falla en las válvulas de la bomba
- d) Candado de gas

Tiempo máximo de operación diario

- a) Tuberías goteando
- b) Fugas en las válvulas de la bomba
- c) Excesivo desajuste del émbolo

Carga alta

- a) Depositación de parafinas en las varillas de succión en la carrera ascendente
- b) Arenas o incrustaciones pegadas al émbolo de la carrera ascendente

#### Carga baja

- a) Parafinas o émbolo pegado en la carrera descendente
- b) Desprendimiento de varillas

Cuando los registros del control son enviados a una central de monitoreo y control, la información es inmediatamente clasificada en la oficina de campo. El monitor muestra alarmas mientras ocurren las fallas y se imprimen como reporte de alarmas, igualmente se reporta por monitoreo el trabajo diario. Esto permite que sólo aquellos pozos con problemas se les conceda mejor atención.

#### V.3 Estudio estadístico del uso en el sistema de control automático

Un estudio extensivo realizado para analizar los efectos del sistema de control pump-off en Estados Unidos, contó con 554 pozos de los cuales 125 producen por bombeo mecánico en ocho áreas diferentes.

**TABLA 5B**

Area	No. de pozos	No. de reparaciones por año antes de la instalación del control		No. de reparaciones por año después de la instalación del control	
		Bomba	Varillas	Bomba	Varillas
<b>A</b>	100	155	93	63	62
<b>B</b>	96	44	35	72	52
<b>C</b>	97	78	55	69	29
<b>D</b>	27	27	26	24	9
<b>E</b> Varillas de fibra de vidrio	61	73	75	60	107
Varillas de acero	49	59	30	42	26
<b>F</b>	64	36	18	47	31
<b>G</b>	36	8	1	6	6
<b>H</b>	16	15	17	14	10
<b>TOTAL</b>	<b>554</b>	<b>495</b>	<b>350</b>	<b>396</b>	<b>332</b>

**TABLA 5C**

Area	Antes de la instalación del control automático		Después de la instalación del control automático	
	Producción (BPD)	Tiempo de operación (Hr)	Producción (BPD)	Tiempo de operación (Hr)
<b>A</b>	210	164	235	16.8
<b>B</b>	111	14.8	120	14.3
<b>C</b>	117	14.1	144	13.3
<b>D</b>	110	17.0	111	16.5
<b>E</b> Varillas de fibra de vidrio	228	18.7	285	19.1
Varillas de acero	126	17.2	129	17.6
<b>F</b>	179	16.5	191	9.5
<b>G</b>	333	18.0	339	19.5
<b>H</b>	168	20.9	154	17.7

La tabla 5B resume los datos de fallas en las ocho áreas de estudio. Se observa que las fallas en las bombas subsuperficiales declinaron 20% debido a que antes de la instalación del sistema de control pump-off se tenía anualmente un promedio de fallas de 495, mismas que se redujeron a 395 después de instalado el sistema. También las fallas relacionadas con el émbolo disminuyeron en 5% de 350 antes de la instalación a 320 después de ella.

En la Tabla 5C se compara la producción de fluidos y el tiempo de operación en las 8 áreas estudiadas. La comparación en función de barriles producidos por hora de operación de la unidad antes y después de la instalación, fue desarrollada para medir el consumo de energía eléctrica. Debido a que se requirió un esfuerzo excesivo para obtener un registro riguroso del consumo de energía en cada pozo, se desarrolló un parámetro que proporciona una indicación aceptable de la eficiencia para dicha medición. En ésta tabla, el incremento de fluido es aproximadamente de 10% con sólo un incremento de 2% de tiempo de operación.

Si bien éstos beneficios fueron mucho mayores que los anticipados originalmente para justificar la instalación de un sistema de control automático se recomienda tener en cuenta el 3% de incremento en la producción aunado con el 14% de disminución de fallas en el equipo. La reducción en el consumo de energía eléctrica no se recomienda que sea incluida en justificaciones económicas futuras debido a que actualmente se tiene un aumento considerable en el costo de energía.



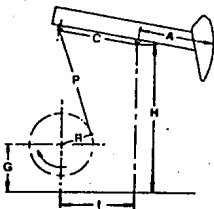
## CONCLUSIONES

1. La condición de pump-off se presenta debido a que alguno o varios componentes del aparejo de producción está trabajando en forma anómala o bien bajo condiciones severas de operación que sobrepasan los límites establecidos.
2. El control automático proporciona una medida continua y exacta de carga y posición para detectar la condición de pump-off
3. Este sistema puede detener automáticamente la unidad de bombeo cuando se exceden los límites de operación establecidos en diseño.
4. Existen diversas técnicas para detectar la condición de pump-off y estas pueden ser: Nivel de fluido, vibración excesiva en la sarta de varillas, demanda de corriente del motor y cargas en las varillas. Esta última es la técnica más utilizada debido a que no se necesita equipo especial para realizar la medición y hace la detección en forma directa.
5. La instalación de este sistema permite una vigilancia continua del pozo, lo que permite alargar la vida útil de los componentes del aparejo de BM.

6. Con este sistema se pueden obtener aumentos considerables de producción además de ahorros en mantenimiento.

7. Se recomienda realizar una evaluación técnica y económica del área o de los pozos en los que se vaya a instalar un control automático con el propósito de justificar su uso.

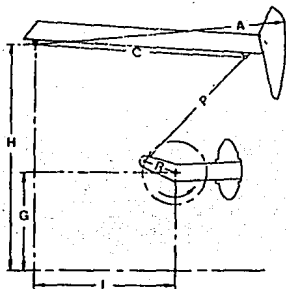
# A N E X O



**DIMENSIONES GEOMETRICAS API PARA LAS UNIDADES DE BOMBEO CONVENCIONALES**

- A.** Distancia entre el cojinete central y la varilla pulida.
- C.** Distancia enter el cojinete igualador y el cojinete central.
- R.** Distancia entre el eje de la manivela y el cojinete del muñón para la longitud de carrera 1, 2 ó 3.
- I.** Distancia enter la manivela y el cojinete central.
- P.** Longitud de la biela.
- H.** Altura del poste Sampson.
- G.** Altura de la manivela.

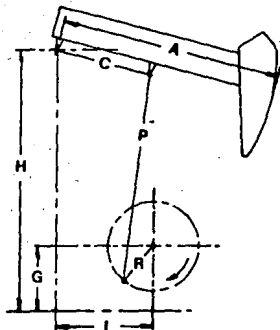
Model	A	C	I	P	M	S	RT, RR, RR	S.U.	T.P. @ 207
LAMBDA DE CAMPAÑA									
C-170-365-188	910	120.03	120	148.3	237.88	88.88	47, 41, 35	-1830	88.237/88
C-170-305-168	910	120.03	120	148.3	237.88	88.88	47, 41, 35	-1830	88.237/88
C-180-365-188	910	120.03	120	148.3	237.88	88.88	47, 41, 35	-1830	88.237/88
C-180-305-168	910	120.03	120	148.3	237.88	88.88	47, 41, 35	-1830	88.237/88
C-170-437-144	180	120.03	120	148.3	237.88	88.88	47, 41, 35	-430	88.237/44
C-170-365-144	180	120.03	120	148.3	237.88	88.88	47, 41, 35	-430	88.237/44
C-180-365-144	180	120.03	120	148.3	237.88	88.88	47, 41, 35	-430	88.237/44
C-180-305-144	180	120.03	120	148.3	237.88	88.88	47, 41, 35	-430	88.237/44
C-180-305-164	180	120.03	120	144.3	238.88	89.88	47, 41, 35	-320	88.437/64
C-180-255-164	180	120.03	120	144.3	238.88	89.88	47, 41, 35	-320	88.437/64
C-180-215-164	180	120.03	120	144.3	238.88	89.88	47, 41, 35	-320	88.437/64
C-180-215-144	180	120.03	120	144.3	238.88	89.88	47, 41, 35	-320	88.437/64
C-180-265-120	152	120.03	120	148.3	238.88	89.88	47, 41, 35	170	58.127/20
C-180-305-120	155	111.07	111	133.3	213	75	42, 36, 30	-125	57.037/20
C-180-305-120	155	111.07	111	133.3	213	75	42, 36, 30	-125	57.037/20
C-180-294-120	155	111.07	111	132	211	75	42, 36, 30	55	57.037/20
C-1300-236-120	155	111.07	111	132	211	75	42, 36, 30	55	57.037/20
C-180-213-120	135	111.07	111	132	211	75	42, 36, 30	0	57.037/20
C-1700-213-120	135	111.07	111	132	211	75	42, 36, 30	0	57.037/20
C-2280-213-120	155	111.07	111	132	211	75	42, 36, 30	0	57.037/20
C-1800-236-100	128	111.07	111	132	211	75	42, 36, 30	130	47.487/80
C-1700-236-100	128	111.07	111	132	211	75	42, 36, 30	130	47.487/80
C-1300-305-100	128	111.07	111	132	211	75	42, 36, 30	130	47.487/80
C-1200-213-100	128	98.05	98	114	180	63	37, 32, 27	0	48.277/80
C-1200-173-100	128	98.05	98	114	180	63	37, 32, 27	0	48.277/80
C-1300-245-88	111	111.04	111	133	211	75	42, 36, 30	800	40.988/88
C-1300-245-88	111	111.04	111	133	211	75	42, 36, 30	800	40.988/88
C-1300-213-88	111	98.05	98	114	180	63	37, 32, 27	450	41.818/88
C-1300-213-88	111	98.05	98	114	180	63	37, 32, 27	450	41.818/88
C-1800-173-88	111	98.05	98	114	180	63	37, 32, 27	450	41.818/88
C-1140-118-88	111	84.05	84	93.75	150.13	53.38	32, 27, 22	115	40.388/88
C-1300-245-74	98	98.05	98	114	180	63	37, 32, 27	800	25.997/74
C-1200-200-74	98	98.05	98	114	180	63	37, 32, 27	800	25.997/74
C-1800-200-74	98	98.05	98	114	180	63	37, 32, 27	800	25.997/74
C-1200-173-74	98	84.05	84	96	152.38	53.38	32, 27, 22	450	25.487/74
C-1800-173-74	98	84.05	84	96	152.38	53.38	32, 27, 22	450	25.487/74
C-1800-143-74	96	84.05	84	93.75	150.13	53.38	32, 27, 22	300	25.487/74
C-1140-143-74	96	84.05	84	93.75	150.13	53.38	32, 27, 22	300	25.487/74
C-1800-173-64	84	84.05	84	93.75	150.13	53.38	32, 27, 22	350	21.028/64
C-1140-173-64	84	84.05	84	93.75	150.13	53.38	32, 27, 22	350	21.028/64
C-1800-143-64	84	72.06	72	84	132	43	27, 22, 17	360	20.538/64
C-1140-143-64	84	72.06	72	84	132	43	27, 22, 17	360	20.538/64
C-800-118-64	84	64	64	74.5	116	41	24, 20, 16	0	20.838/64
C-1140-173-54	72	72.06	72	84	132	43	27, 22, 17	300	26.225/54
C-1140-133-54	72	64	64	74.5	116	41	24, 20, 16	330	26.435/54
C-800-133-54	72	64	64	74.5	116	41	24, 20, 16	330	26.435/54
C-800-119-54	72	64	64	74.5	116	41	24, 20, 16	330	26.435/54
C-1370-76-54	64	51	51	64	103	39	21, 16, 11	105	25.805/54
C-1370-69-54	64	51	51	64	103	39	21, 16, 11	105	25.805/54
C-800-133-48	64	64	64	74.5	116	41	24, 20, 16	440	23.514/48
C-800-109-48	64	56.05	56	63.63	105	37	21, 16, 11	320	23.204/48
C-1370-109-48	64	56.05	56	63.63	105	37	21, 16, 11	320	23.204/48
C-1370-95-48	64	56.05	56	63.63	105	37	21, 16, 11	320	23.204/48
C-1370-109-48	57	51	51	64.00	103	39	21, 16, 11	180	22.984/48
C-1370-95-48	57	51	51	64.00	103	39	21, 16, 11	180	22.984/48
C-400-75-48	64	48.17	48	57.5	98.5	37	18, 14, 10	0	22.198/48
C-400-75-48	41	41	41	51	64	39	18, 14, 10	180	20.584/48
C-1370-69-42	51	51	51	64	103	39	21, 16, 11	280	20.584/42
C-1370-76-42	51	51	51	64	103	39	21, 16, 11	280	20.584/42
C-1400-69-42	53	47	47	56	93	39	18, 14, 10	280	19.824/42
C-1400-76-42	53	47	47	56	93	39	18, 14, 10	280	19.824/42
C-1370-69-42	56	48.17	48	57.5	98.5	37	18, 14, 10	150	20.274/42
C-1370-76-42	56	48.17	48	57.5	98.5	37	18, 14, 10	150	20.274/42
C-400-69-42	56	48.17	48	57.5	98.5	37	18, 14, 10	150	20.274/42
C-400-76-42	56	48.17	48	57.5	98.5	37	18, 14, 10	150	20.274/42
C-400-69-36	48	48.17	48	57.5	98.5	37	18, 14, 10	275	17.373/36
C-1400-69-36	47	47	47	56	93	39	18, 14, 10	315	17.643/36
C-1370-69-36	48	48.17	48	57.5	98.5	37	18, 14, 10	275	17.373/36
C-1370-76-36	48	48.17	48	57.5	98.5	37	18, 14, 10	275	17.373/36
C-1400-69-36	45	38.22	38	48.5	88.5	31	15, 8	150	14.532/36
C-1370-76-36	45	38.22	38	48.5	88.5	31	15, 8	150	14.532/36



#### DIMENSIONES GEOMETRICAS API DE LAS UNIDADES DE BOMBEO MARK II

- A. Distancia enter el conjunto de cojinetes del poste Sampson y la varilla pulida.
- C. Distancia entre entre el conjunto de cojinetes del poste Sampson y el cojinete del yunque transversal.
- I. Distancia enter el eje de la manivela y el conjunto de cojinetes del poste Sampson.
- P. Longitud de la biela.
- H. Altura del poste Sampson.
- G. Altura del eje de la manivela.
- R. Distancia del eje de la manivela al cojinete del muñón.

	A	C	I	P	N	G	R1, R2, R3	AMOUNT OF PAID	S.U.	T.F. @ 10% - G.V.	
										LESS OF CASH	
M-1824D-427-216	384	306	228	234.375	328.875	115.875	60.06, 71.06, 62.06		22	-7450	93.736/216
M-1280D-427-216	384	306	228	234.375	328.875	115.875	60.06, 71.06, 62.06		22	-7450	93.736/216
M-912D-305-216	384	306	228	234.375	328.875	115.875	60.06, 71.06, 62.06		22	-7450	93.736/216
M-912DS-365-216	384	306	228	234.375	328.875	115.875	60.06, 71.06, 62.06		22	-7450	93.736/216
M-1280D-427-192	384	306	228	228.06	328.875	115.875	71.69, 62.69, 53.69		19.5	-7160	86.868/192
M-912DS-427-192	384	306	228	228.06	328.875	115.875	71.69, 62.69, 53.69		19.5	-7160	86.868/192
M-912D-305-192	384	306	228	228.06	328.875	115.875	71.69, 62.69, 53.69		19.5	-7160	86.868/192
M-840D-305-192	384	306	228	228.06	328.875	115.875	71.69, 62.69, 53.69		19.5	-7160	86.868/192
M-486D-305-192	384	306	228	228.06	328.875	115.875	71.69, 62.69, 53.69		19.5	-7160	86.868/192
M-912D-427-168	334	270	202.56	193.5	276.875	89.875	63.56, 56.56, 49.56		19	-6860	75.24/168
M-912D-365-168	334	270	202.56	193.5	276.875	89.875	63.56, 56.56, 49.56		19	-6860	75.24/168
M-912D-305-168	334	270	202.56	193.5	276.875	89.875	63.56, 56.56, 49.56		19	-6860	75.24/168
M-840D-305-168	334	270	202.56	193.5	276.875	89.875	63.56, 56.56, 49.56		19	-6860	75.24/168
M-486D-305-168	334	270	202.56	193.5	276.875	89.875	63.56, 56.56, 49.56		19	-6860	75.24/168
M-912D-365-144	312	258	186	182.375	252.875	89.875	53.75, 47.75, 41.75		23	-6680	63.923/144
M-840D-365-144	312	258	186	182.375	252.875	89.875	53.75, 47.75, 41.75		23	-6680	63.923/144
M-486D-365-144	312	258	186	182.375	252.875	89.875	53.75, 47.75, 41.75		23	-6680	63.923/144
M-912D-305-144	312	258	186	182.375	252.875	89.875	53.75, 47.75, 41.75		23	-6300	63.923/144
M-840D-305-144	312	258	186	182.375	252.875	89.875	53.75, 47.75, 41.75		23	-6300	63.923/144
M-486D-305-144	312	258	186	182.375	252.875	89.875	53.75, 47.75, 41.75		23	-6300	63.923/144
M-912D-365-120	312	258	186	182.375	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-840D-365-120	312	258	186	182.375	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-486D-365-120	312	258	186	182.375	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-912D-305-120	312	258	186	173.75	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-840D-305-120	312	258	186	173.75	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-486D-305-120	312	258	186	173.75	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-912D-256-120	312	258	186	173.75	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-840D-256-120	312	258	186	173.75	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-486D-256-120	312	258	186	173.75	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-912D-216-120	312	258	186	173.75	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-840D-216-120	312	258	186	173.75	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-486D-216-120	312	258	186	173.75	252.875	89.875	45.13, 39.13, 33.13		24	-6130	53.616/120
M-912D-173-100	312	258	186	173.75	252.875	89.875	37.63, 31.63, 25.63		24	-3700	45.492/100
M-840D-173-100	312	258	186	173.75	252.875	89.875	37.63, 31.63, 25.63		24	-3700	45.492/100
M-486D-173-100	312	258	186	173.75	252.875	89.875	37.63, 31.63, 25.63		24	-3700	45.492/100
M-912D-144-88	222	186	124	135.75	188.375	73	31.5, 26.5, 21.5		24.5	-2170	38.328/88
M-840D-144-88	222	186	124	135.75	188.375	73	31.5, 26.5, 21.5		24.5	-2040	38.328/88
M-486D-144-88	222	186	124	135.75	188.375	73	31.5, 26.5, 21.5		24.5	-2040	38.328/88
M-912D-112-88	222	186	124	135.75	188.375	73	31.5, 26.5, 21.5		24.5	-1830	38.328/88
M-840D-112-88	189	162	111	112.19	147.3	52.25	32.25, 27.25, 22.25		27	-1535	36.974/88
M-486D-112-88	189	162	111	107.94	147.3	52	24.19, 19.99, 15.19		28	-1420	36.974/88
M-912D-200-74	222	186	124	130.5	188.375	73	27.25, 22.25, 17.25		24.5	-1860	33.523/74
M-840D-200-74	222	186	124	130.5	188.375	73	27.25, 22.25, 17.25		24.5	-1860	33.523/74
M-486D-200-74	222	186	124	130.5	188.375	73	27.25, 22.25, 17.25		24.5	-1860	33.523/74
M-912D-173-74	222	186	124	130.5	188.375	73	27.25, 22.25, 17.25		24.5	-1860	33.523/74
M-840D-173-74	222	186	124	130.5	188.375	73	27.25, 22.25, 17.25		24.5	-1860	33.523/74
M-486D-173-74	222	186	124	130.5	188.375	73	27.25, 22.25, 17.25		24.5	-1860	33.523/74
M-912D-144-74	189	162	111	107.94	147.3	52	24.19, 19.99, 15.19		27	-1440	33.523/74
M-840D-144-74	189	162	111	107.94	147.3	52	24.19, 19.99, 15.19		28	-1420	33.523/74
M-486D-144-74	189	162	111	107.94	147.3	52	24.19, 19.99, 15.19		28	-1420	33.523/74



**DIMENSIONES GEOMETRICAS DE LAS UNIDADES DE BOMBEO AEROBALANCEADAS**

- A. Distancia entre el conjunto de cojinetes del poste Sampson y la varilla pulida.
- C. Distancia entre el conjunto del cojinete del poste Sampson y el cojinete igualador.
- I. Distancia entre el eje de la manivela y el conjunto de cojinetes del poste Sampson.
- P. Longitud de la biela.
- G. Altura de la manivela.
- R. Distancia entre el eje de la manivela y el cojinete del muñón.



UNIDAD	A	C	I	P	H	G	R1, R2, R3	M	S
A-2560D-470-240	336	134.5	130	261.5	303.5	42	47, 39.44	114.8	150
A-1824D-470-240	336	134.5	130	267.5	303.5	36	47, 39.44	114.8	150
A-1280D-470-240	336	134.5	130	267.5	303.5	36	47, 39.44	114.8	150
A-912D-470-240	336	134.5	130	267.5	303.5	36	47, 39.44	114.8	150
A-1824D-427-216	308	121.5	114.5	246	282	36	41.75, 36.63, 32	92	140
A-1280D-427-216	308	121.5	114.5	246	282	36	41.75, 36.63, 32	92	140
A-912D-427-216	308	121.5	117.5	252	282	30	41.75, 36.63, 32	92	140
A-1824D-427-192	276	121.5	114.5	216	252	36	41.75, 36.63, 32	102.8	112
A-1280D-427-192	276	121.5	114.5	216	252	36	41.75, 36.63, 32	102.8	112
A-912D-427-192	276	121.5	117.5	222	252	30	41.75, 36.63, 32	102.8	112
A-1280D-305-168	231	88	84	208	244	36	31.25, 26.19, 22	75.54	112.81
A-912D-305-168	231	88	84	214	244	30	31.25, 26.19, 22	75.54	112.81
A-640D-305-168	231	88	85	216	244	28	31.25, 26.19, 22	75.54	112.81
A-912D-427-144	200	88	84	184	214	30	31.25, 26.19, 22	87.3	90
A-640D-427-144	200	88	85	186	214	28	31.25, 26.19, 22	87.3	90
A-640D-305-144	208	77	74.5	186	214	28	26.19, 22, 18.94	64.16	95.16
A-456D-305-144	208	77	74.5	186	214	28	26.19, 22, 18.94	64.16	95.16
A-640D-365-120	175	77	74.5	159	187	28	26.19, 22, 18.94	76.2	88
A-456D-365-120	175	77	74.5	159	187	28	26.19, 22, 18.94	76.2	88
A-456D-256-120	184	69	66	159	187	28	22, 18.94, 16.31	55.25	77
A-320D-256-120	184	70	68	159	187	28	22.38, 19.38, 16.75	55.25	77
A-320D-305-100	155	70	68	132	160	28	22.38, 19.38, 16.75	65.6	76
A-228D-173-100	151	56	54	122	149	27	18.25, 15.75, 13.75	45.49	85.75
A-228D-246-86	131	56	54	122	149	27	18.25, 15.75, 13.75	52.5	73
A-160D-200-74	120	50	48	114	141	27	15.25, 13.25, 11.25	50.7	63
A-114D-173-64	115	48	46.5	114	132	18	13.31, 11.25	31.7	63

## BIBLIOGRAFIA

1. Brown, K. E. *The Tecnology of Artificial Lift Methodos.* volume 2A. Chapter 2 "Beam Pumping Design and Analysis". Editorial Petroleum Publishing Company. 1980
2. Craft, B.C. & Holden, R. *Well Design.* Chapter 5 "Sucker Rod Pumping". Editorial Prentice-Hall, Inc. 1962.
3. Díaz, Z. H. *Apuntes de Producción de Pozos II.* Facultad de Ingeniería, UNAM. 1984.
4. Wind, T. E. W. *Fundamentos de Producción y Mantenimiento de Pozos Petroleros.* Editorial Limusa, 1a. edición 1978.
5. Hunter, J.D. & Hubell, R.S. and Reiter, C.R. "Denver Unit Well Surveillance and Pump-off Control System". *J. Pet. Tech.* (Sept 1978).
6. Miller, P.D. "New Pump-Off Controller Saves Energy, Reduces Wear". *World Oil.* (Jan 1985).
7. Westerman, G. W. "Successful Application of Pump-Off Controllers". SPE paper no. 6858 Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado. Oct. 9-12, 1977.
8. Westerman, G.W. "Pump-Off Controllers Match Pump Capacity to Production". *Oil and Gas Journal.* Nov. 21, 1977.
9. Jentsh, W. A. Jr. "Computerized Atomation of Olfield Production Operations: An Extensive Five-Year Study Into

- the Cost and Benefits". SPE paper no. 15392 Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana. Oct. 5-8, 1986.
10. Neely, A.B. & Tolbert H.E. "Experience With Pump-Off Control in the Permian Basin". SPE paper no. 14345 Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada. Sept. 22-25, 1985.
  11. Blackeord, T. A., Dunn, J.R. and Joseck, R.R. " Analysis Indicates of Supervisory Pump-Off Control". Oil and Gas Journal, July 1, 1991.
  12. Swartzlander, H.R. "Remote Units Eliminate Unproductive Pumping". Oil and Gas Journal, Sept. 3, 1990.
  13. García Maldonado, Juan A. y Gutiérrez Acosta, Teóduo. "Sistemas Automatizados Para la Supervisión de la Perforación". Ingeniería Petrolera, Junio, 1987.
  14. *Equipment and Software to Control and Monitor Rod Pumped Wells*. Publication of Baker CAC.
  15. *Benefits of Rod Pump Control*. Publication of Baker CAC's. Marketing Services Department.
  16. Petróleos Mexicanos. Subdirección de Producción: Gerencia de Desarrollo Tecnológico & Baker CAC: The Baker Hughes Controls Company. *Curso Sobre Operación de Controladores de Bombeo Mecánico e Interpretación de Diagramas Dinamométricos*. Poza Rica, Veracruz. Mayo 17-22, 1993.
  17. Gordillo Macías Diana. *Sistemas Artificiales de Producción*. Tesis Profesional. UNAM, 1992.

18. **Worton, Harry N. *Sensores y Analizadores*. Editorial Gustavo Gil, S.A. 1989.**
19. **Company Bethlehem Steel. Instrumentation. "Dynamometer Card Interpretation"**
20. **Zúñiga Puentes, Horacio. Instituto Mexicano del Petróleo. Subdirección de Explotación. Estudio de registros del dinamómetro electrónico Delta II. Reporte de Avance No. 1 "Procedimiento para la Interpretación de Registros del Dinamómetro Electrónico Delta II." Reporte de avance No. 2 "Transferencia de la Tecnología a la Zona Sur y al Distrito de Poza Rica".**