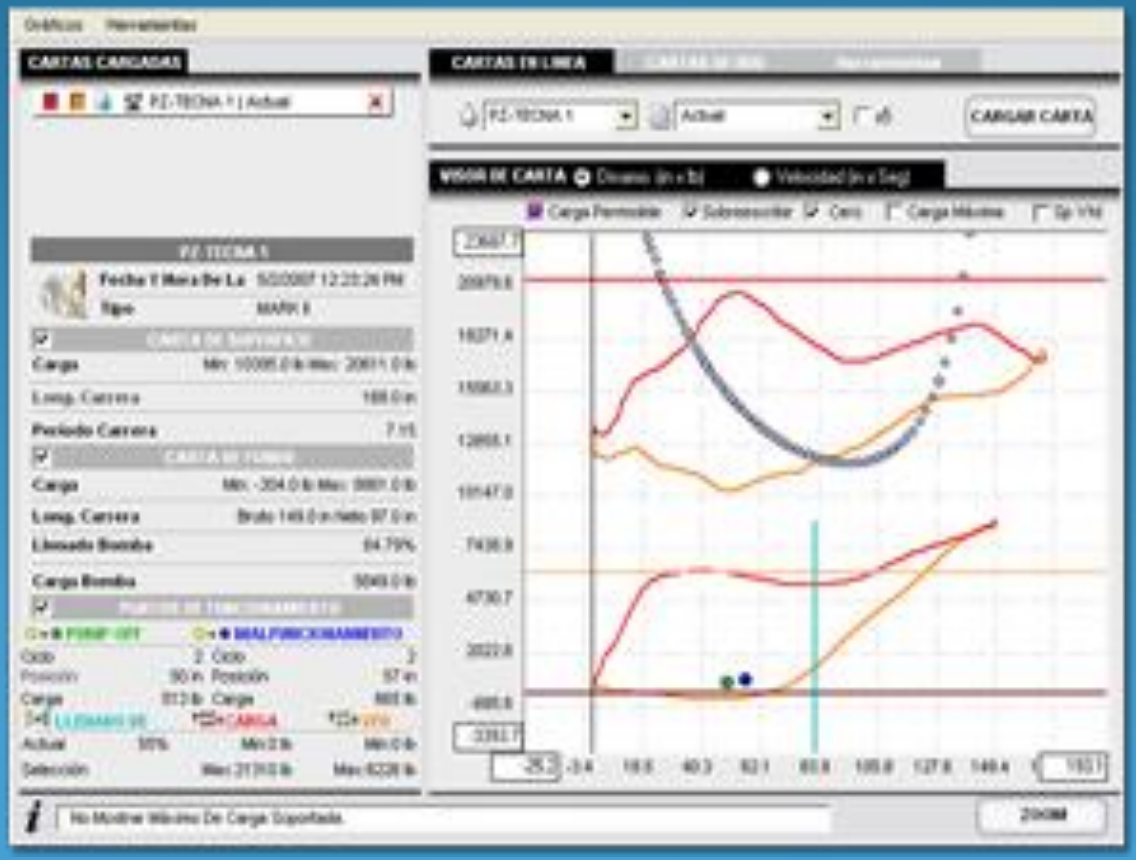
Dinamómetro y cartas dinamométricas.

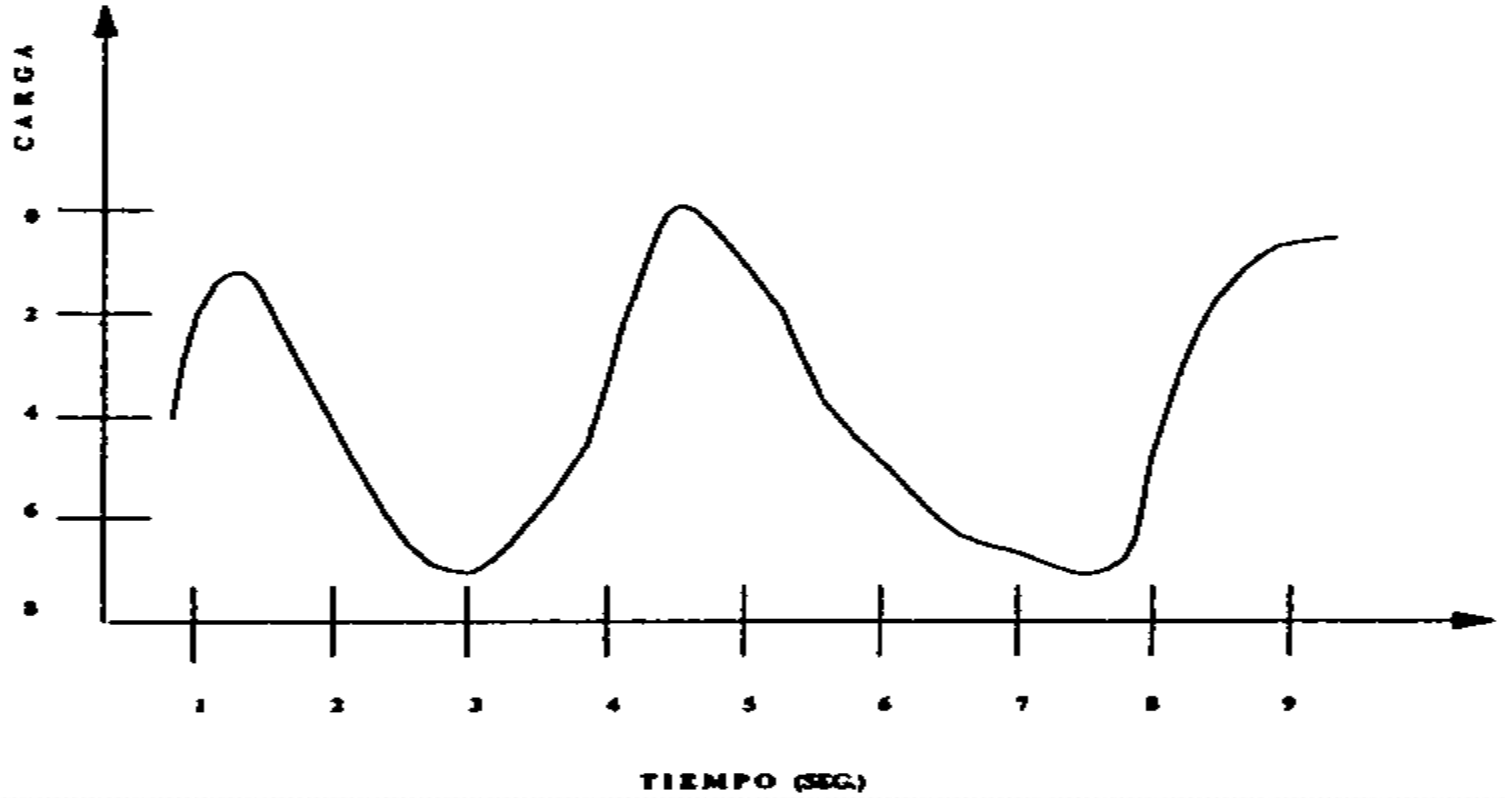


DINAMÓMETRO

La palabra dinamómetro viene del griego; dina, medición de fuerza y metro, magnitud.

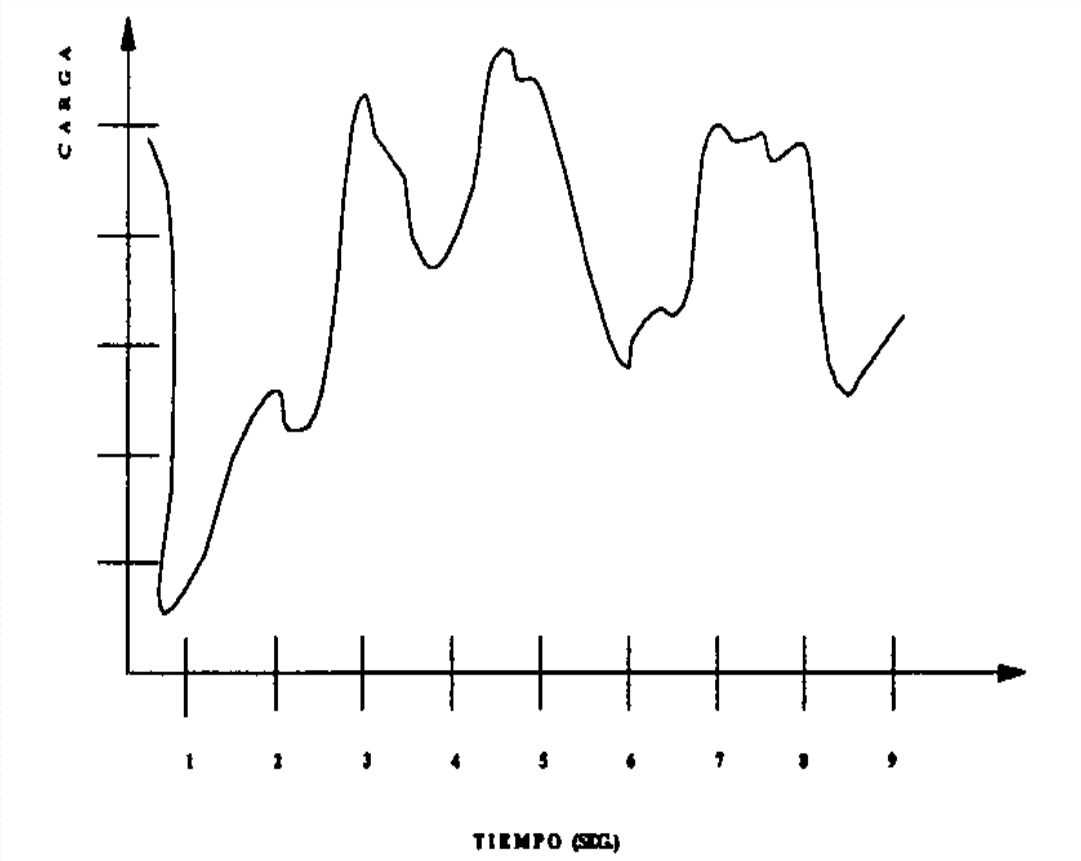
Por tanto, un dinamómetro para la varilla pulida es un dispositivo con el que se toma un registro continuo del patrón de fuerzas a través del desplazamiento de la varilla pulida.

Dicho lo anterior, el dinamómetro es un indicador de peso que registra la carga sobre la varilla pulida y la respectiva posición de la misma; ambos registros se toman con respecto al tiempo.



Registros de cargas-desplazamientos contra el tiempo.

Con este tipo de graficas se toman los datos correspondientes a una carta dinamométrica superficial, la cual debe interpretarse para obtener una carta dinamométrica de la bomba que permita diagnosticar el comportamiento del aparejo de bombeo mecánico.



Los datos superficiales ya antes obtenido de carga y desplazamiento contra el tiempo se meten a un programa de computo que además también requiere información sobre el diseño de la sarta de varillas de succión y otros parámetros relativos al diseño.

Como resultado se obtiene la carta dinamométrica a la profundidad de colocación de la bomba de la cual se determinan sus condiciones de operación.

El dinamómetro se utiliza para hacer dos tipos diferentes de análisis:

De rutina del pozo.

- El objetivo es evaluar todos los datos obtenidos para mejorar la operación de los equipos de bombeo mecánico.
- Guiará a una selección más económica del equipo y a una reducción de los costos de operación.

De los problemas en el pozo.

- La información por si sola del dinamómetro no es suficiente por tanto se necesita de la cooperación del personal para una buena interpretación de datos. El ingeniero de producción tiene como objetivo la determinación y eliminación de la causa de problemas

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

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

El conocimiento completo del comportamiento de bombeo con varillas de succión puede reducir los costos de producción e incrementar la proporción de aceite recuperado.

Dinamómetro electrico Delta II

Es uno de los dinamómetros más importantes y recientemente desarrollados.

Sus principales componentes son:

- Transductor de carga.
- Transductor de posición o desplazamiento.
- Registrador de dos canales.

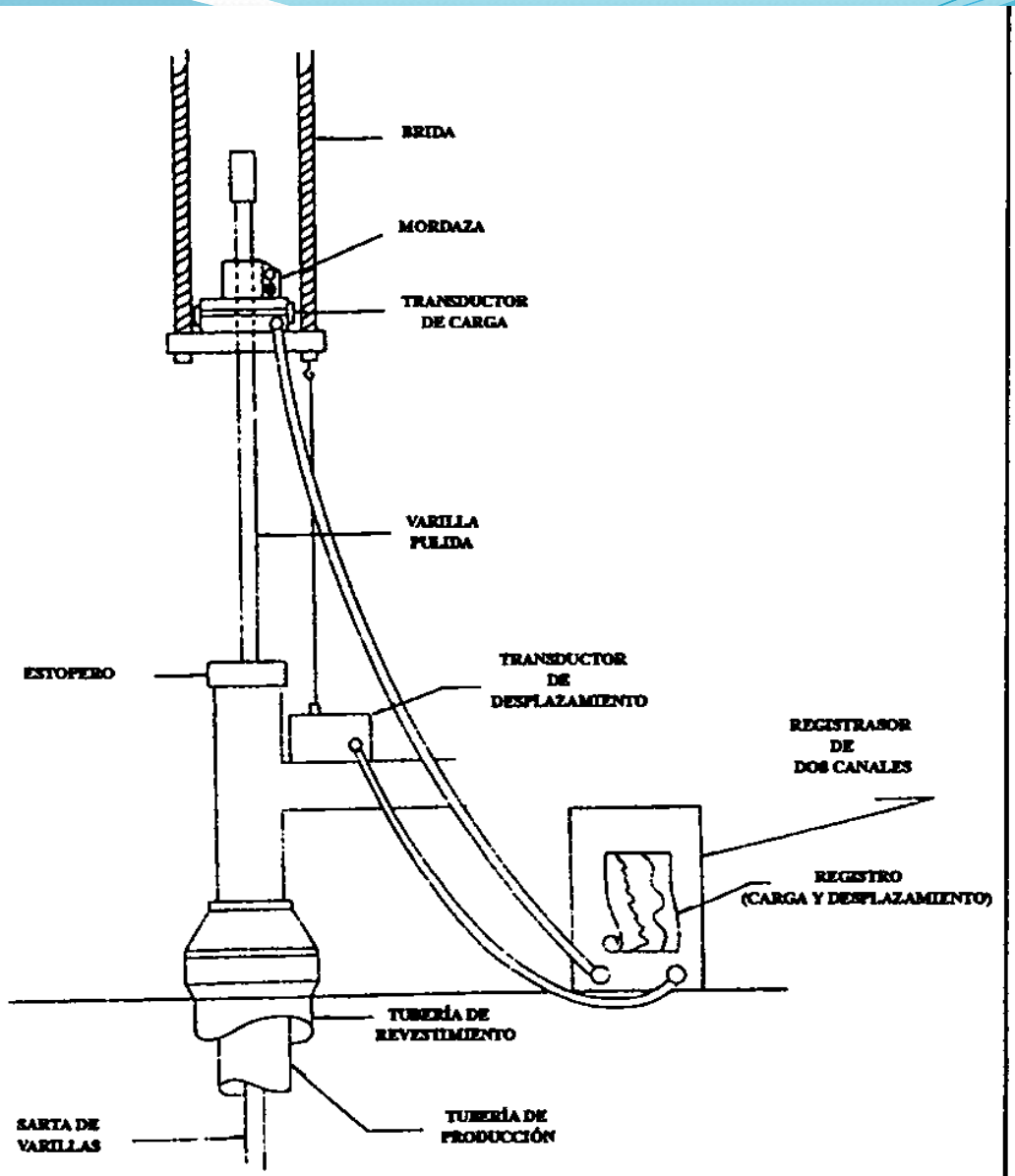


FIG. V. 2 DIAGRAMA MOSTRANDO LA INSTALACIÓN DEL DINAMÓMETRO ELECTRÓNICO DELTA II

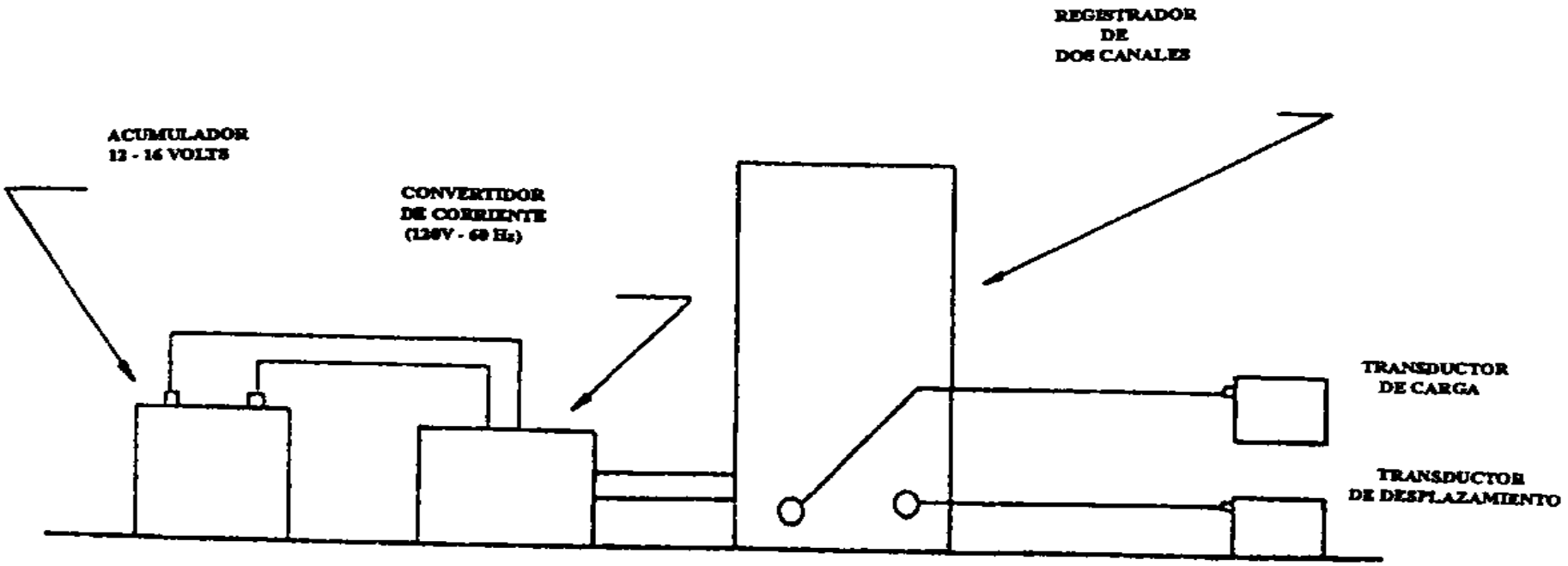


FIG. V. 2 ELEMENTOS QUE INTEGRAN EL DINAMOMETRO ELECTRONICO DELTA II

Transductor de carga.

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

Transductor de posición.

Es un servo-mecanismo el cual acciona a la bobina del potenciómetro. Los cambios de potencial a través de la bobina son grabadas en el lado izquierdo del registrador de dos canales en forma de desplazamiento contra tiempo.

Registrador de dos canales.

Es un sistema de grabación portátil diseñada para medir variables tales como esfuerzos, presiones, velocidades, aceleraciones, etc., éste registrador opera a 60 ciclos y con una potencia de 115 v. obtenida de un convertidor que es operado a partir de una batería de automóvil.

El dinamómetro más simple sería un resorte con una escala y una pluma o estilete unido

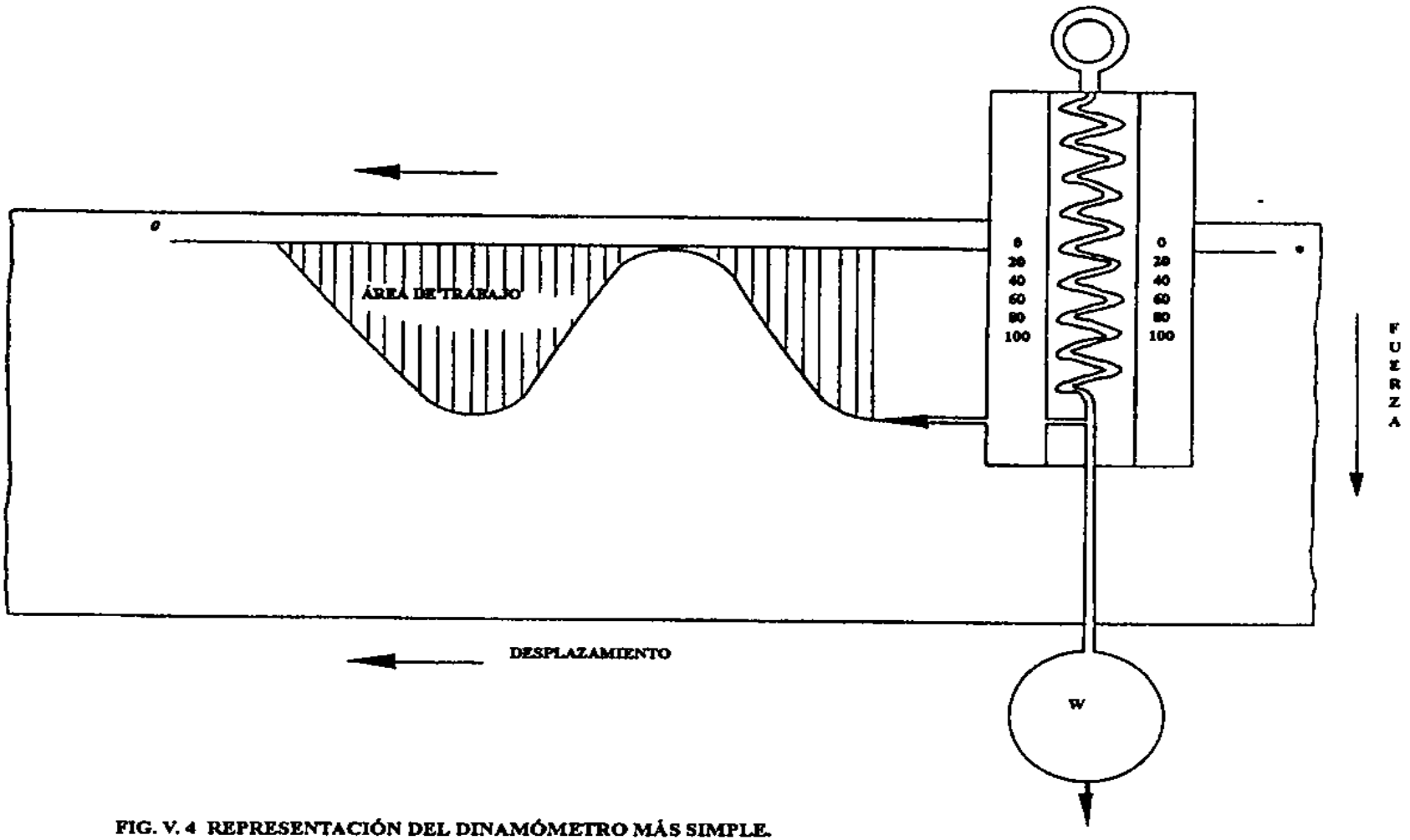


FIG. V. 4 REPRESENTACIÓN DEL DINAMÓMETRO MÁS SIMPLE.

El peso W representa la carga de varillas que alarga al resorte hacia abajo y luego es liberado de dicha carga. El patrón de fuerza describe una curva senoidal, el área bajo la primera mitad del ciclo es positiva y es negativa en la segunda mitad. Debido a que el trabajo se define como la fuerza multiplicada por la distancia sobre la que actúa, el área bajo un diagrama de fuerza continua, es proporcional al trabajo realizado.

A este diagrama de fuerzas vs desplazamiento se le llama carta dinamométrica y de la medida exacta del trabajo efectuado en la varilla pulida, además de que habla de las condiciones de bombeo.

AVANCES DE LA INTERPRETACIÓN DE LA CARTA DINAMOMÉTRICA.

En el año de 1959, el centro de investigaciones de Kansas City, Missouri, desarrolló un procedimiento para una computadora eléctrica analógica, que relacionó el patrón de esfuerzos en la varilla pulida con la carga en la bomba subsuperficial, es decir, la carta dinamométrica que hizo posible el análisis exacto del comportamiento de la bomba. También S. G. Gibbs, desarrolló una técnica para generar una carta dinamométrica de la bomba subsuperficial muy exacta, a partir de una carta dinamométrica superficial, utilizando un modelo matemático para resolver la ecuación de transmisión de ondas de esfuerzos mediante computadora.

Beneficios:

La información que se obtiene con estos métodos, además de ser exacta, permite obtener datos importantes como:

- Existencia de fugas.
- Movimientos de la tubería de producción.
- Cartas dinamométricas a diferentes profundidades a lo largo de la sarta de varillas.
- Mal funcionamiento de anclas o empaques.
- Fricción, etc.

Carta dinamométrica.

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

Mediante el dinamómetro es posible obtener la siguiente información:

1. ***Cargas en el equipo superficial.***

   Debido a que el dinamómetro proporciona una gráfica continua de carga y desplazamiento de la varilla pulida vs tiempo es posible determinar.

a) Cargas máxima y mínima en la estructura de la unidad de bombeo.

b) Torsión en el reductor de engranes y en el motor principal, cuando se conocen los factores de torsión.

c) Trabajo realizado por la varilla pulida para elevar el fluido y vencer la fricción.

d) Contrabalanceo apropiado.

2. ***Cargas en la sarta de varillas.***

a) Carga máxima, mínima, esfuerzos en las varilla y rango de cargas.

b) Número de inversiones de carga por ciclo de la manivela.

3. ***Comportamiento de la bomba subsuperficial.***

   El sistema de bombeo mecánico puede compararse con un sistema de transmisión, la bomba como transmisor y el dinamómetro en la varilla pulida como receptor.

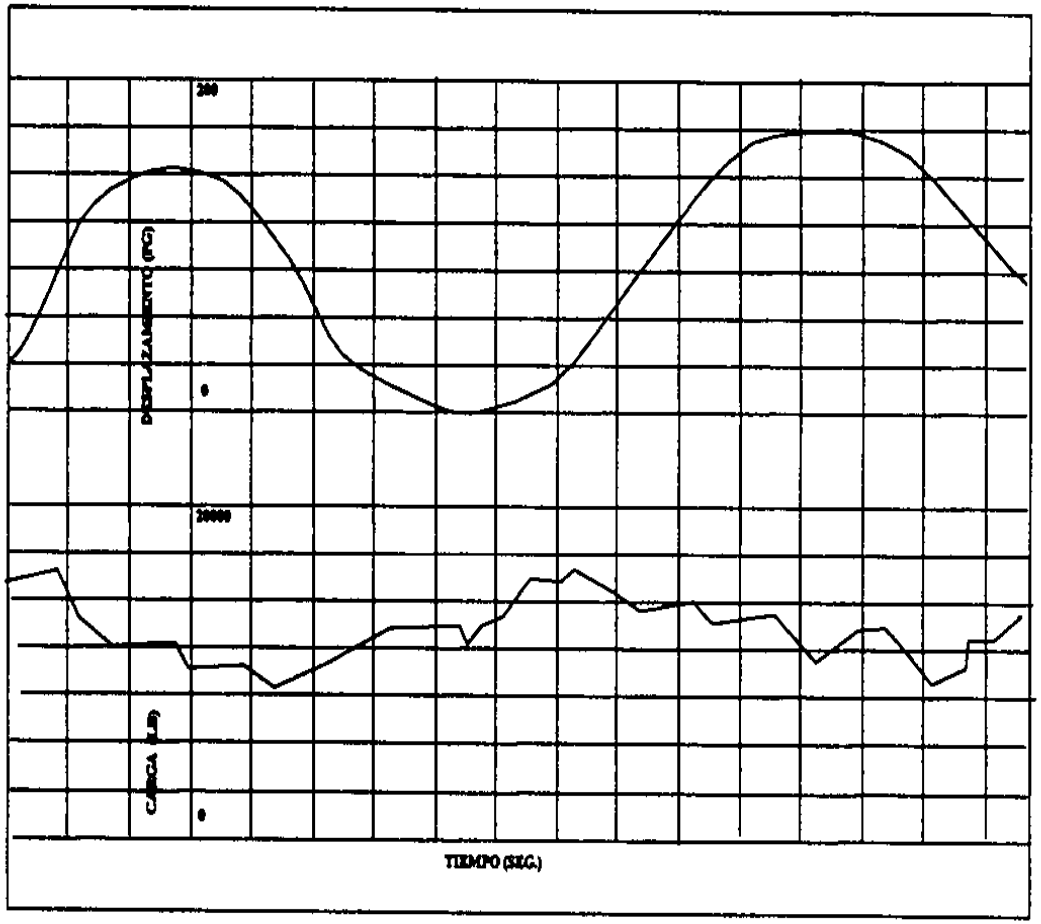


FIG. V. 5 REGISTRO DE CARGA Y DESPLAZAMIETNO VS. TIEMPO OBTENIDO CON EL DINAMÓMETRO ELECTRÓNICO DELTA II.

Cada vez que la bomba realiza una carrera, se envía una señal de fuerza a lo largo de la sarta de varillas a una velocidad de 15800 [pies/segundo], hasta la superficie, donde se registra por medio del dinamómetro. Cada condición distinta en el fondo del pozo, envía una señal de fuerza diferente a la superficie y en algunos casos, un analista experimentado, puede determinar el comportamiento de la bomba, e interpretando la forma del perfil de la gráfica dinamométrica para diagnosticar:

- ✓Condiciones de trabajo de las válvulas viajera o de pie.
- ✓La existencia de golpeteo de fluidos y su magnitud.
- ✓Candado de gas en la bomba.
- ✓Fricción excesiva.
- ✓Si la bomba está o no bombeando en vacío.
- ✓Condición de sobreviaje del émbolo o reducción del viaje del mismo.

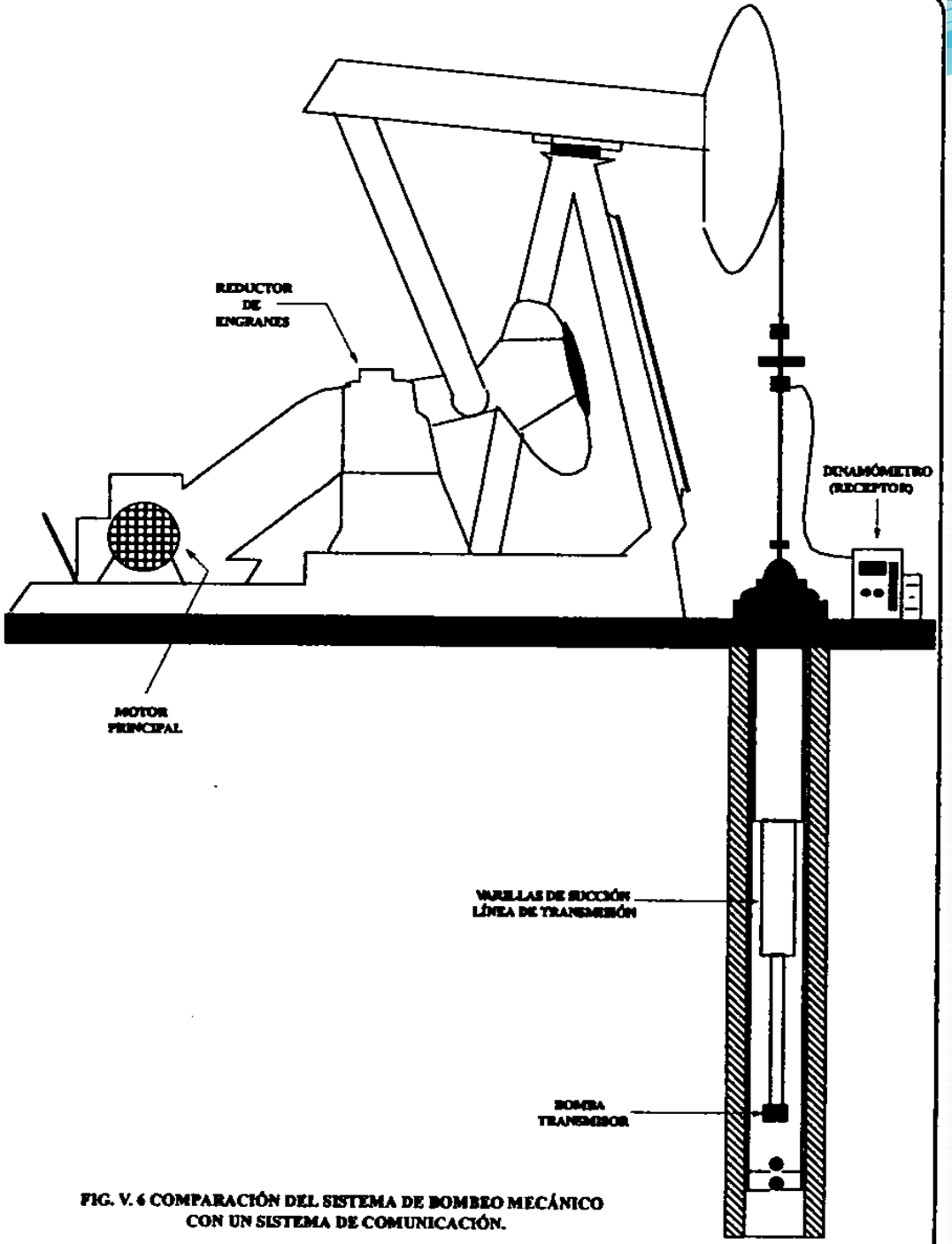


FIG. V. 6 COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO CON UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN.

Limitación de la interpretación visual.

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

En cambio para pozos profundos, la naturaleza elástica de la sarta de varillas presenta un patrón de carga más complejo y la interpretación de la carta para diagnosticar problemas pozo abajo es casi siempre imposible.

La información que puede obtenerse de la interpretación visual es cualitativa y su éxito depende de la experiencia del analista.

CONSTRUCCION DE UNA CARTA DINAMOMETRICA TIPICA.

✓ La construcción se realiza descomponiendo a la carta en sus mas simples elementos y paso a paso se incluyen las deformaciones que sufre, hasta obtener la forma de la carta dinamométrica típica.

✓Supongamos que la varilla pulida de la unidad de bombeo empieza a levantar la carga lentamente hasta la parte superior de la carrera. En este momento la masa concentrada se cambia por otra mas pequeña equivalente al peso de las varillas solas y regresa al fondo de la carrera también lentamente.

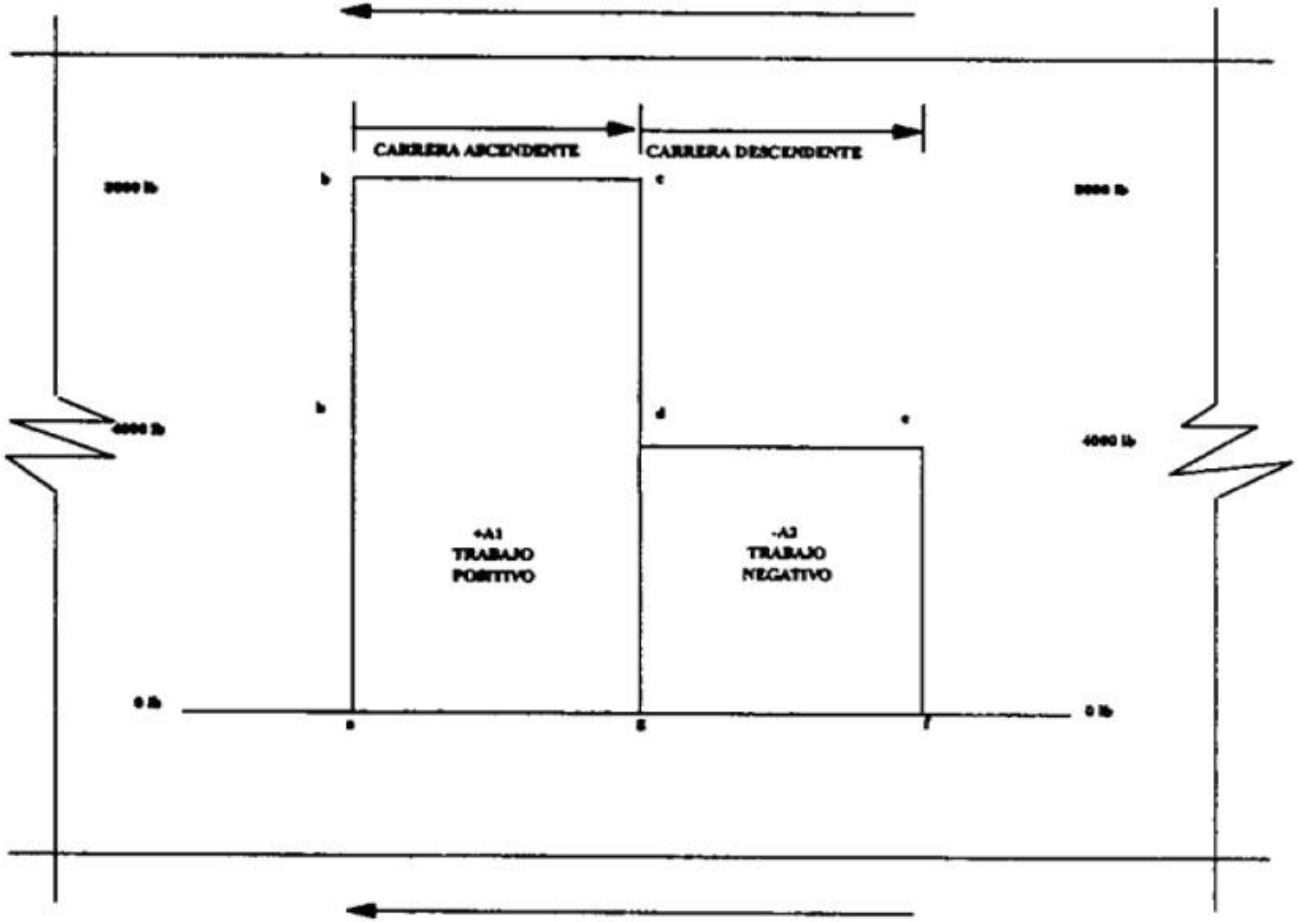


FIG. V. 7 PATRÓN DE CARGAS EN LA VARILLA PULIDA.

✓ El área A1(a, h, b, c, d, g) es proporcional al trabajo positivo realizado por la unidad en la varilla pulida para elevar a las varillas y al fluido . El área A2(d, e, f, g) es proporcional al trabajo negativo realizado por las varillas flotando conforme son jaladas hacia abajo por la fuerza de gravedad.

✓Estas cartas representan movimiento, hacia delante en la carrera ascendente y hacia atrás en la carrera descendente.

✓ la imagen anterior debe doblarse de modo que pueda apreciarse la diferencia entre las areas (A1-A2), es decir, el trabajo neto realizado.

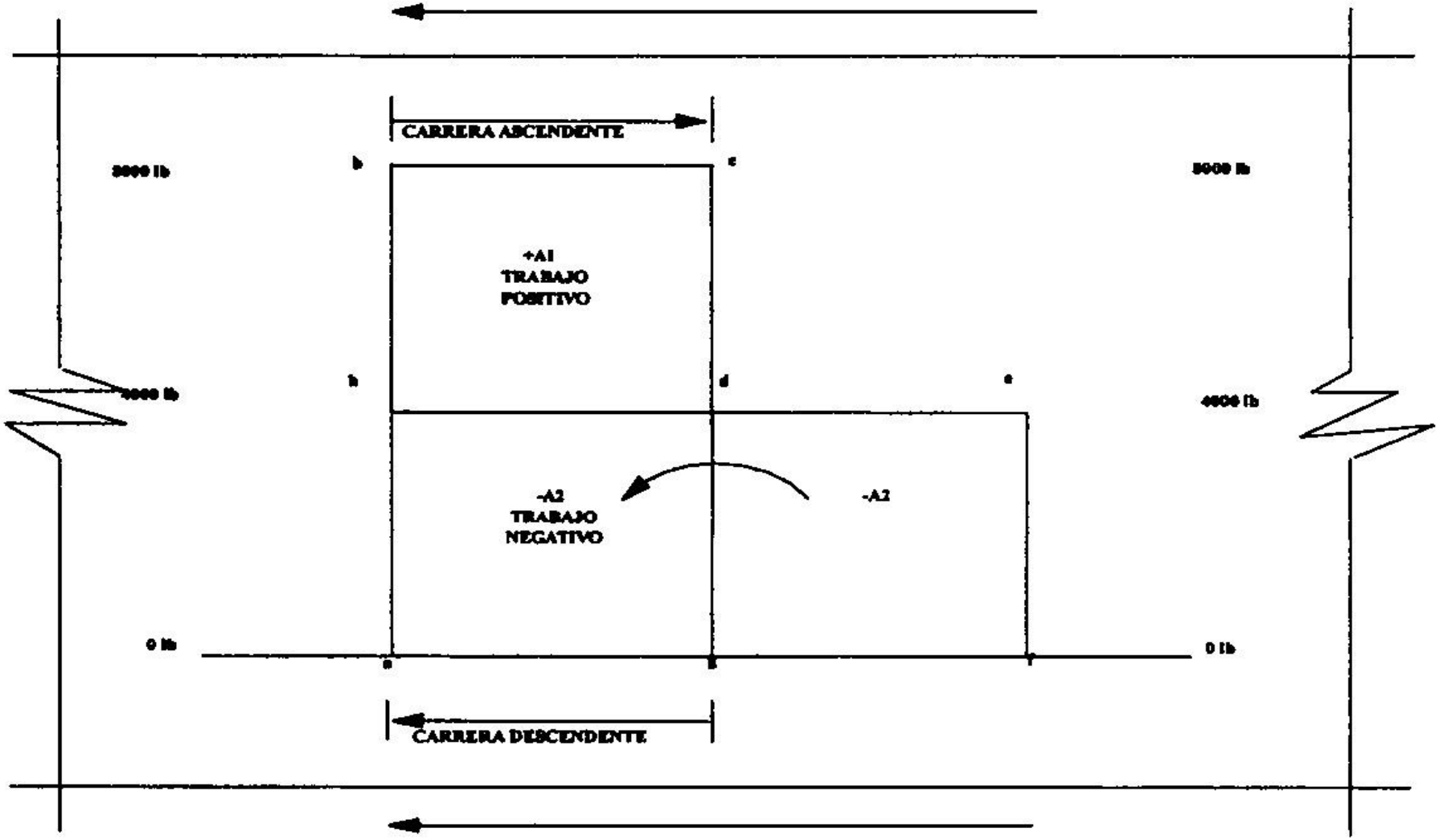


FIG. V. 8 TRABAJO NETO.

- Este rectángulo,(h, b, c, d), describe un comportamiento ideal de la operación de la bomba, de acuerdo a la secuencia del ciclo de bombeo.

COMPORTAMIENTO IDEAL

- En el punto h, la valvula viajera se cierra y se inicia la carrera ascendente del émbolo.
- Del punto h al punto b, la carga del fluido es transferida de la tubería de produccion a la sarta de varillas.
- En el punto b, la valvula de pie abre y permite la entrada de fluidos del pozo, al barril de la bomba.
- De b a c, la carga de fluido es elevada al embolo, al mismo tiempo que se está llenando el barril de la bomba.

- En el punto c, se cierra la valvula de pie y se inicia la carrera descendente del émbolo, permaneciendo cerrada la valvula viajera.
- De c a d, la carga de fluido es transferida de las varillas a la tubería de producción.
- En el punto d, se abre la valvula viajera y se establece la comunicación entre el fluido del barril y el fluido de la tubería de produccion.
- De d a h, el embolo desplaza el fluido del barril de la bomba, a traves de la valvula viajera, hacia la parte superior del embolo. Apartir del punto h el ciclo se repite.

PRINCIPALES CARTAS DINANOMETRICAS

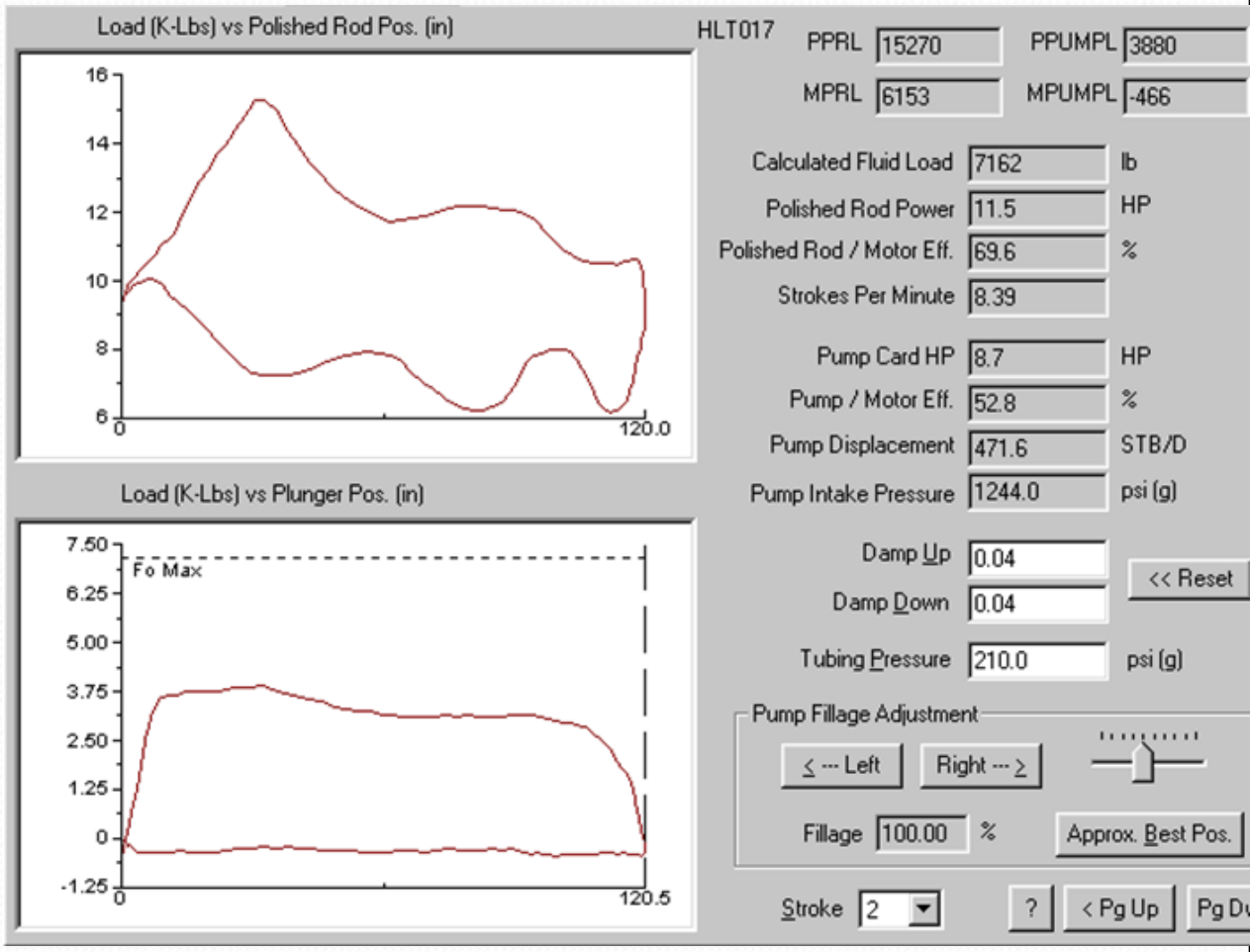
✓ Los principales usos de las cartas dinamométricas de la bomba es identificar y analizar los problemas en el fondo del pozo.

✓Existe una serie de síntomas que permiten confeccionar un diagnostico eficiente al pozo que se estudia, complementándose en la mayoría de los casos con la medición de nivel usando el ecómetro.

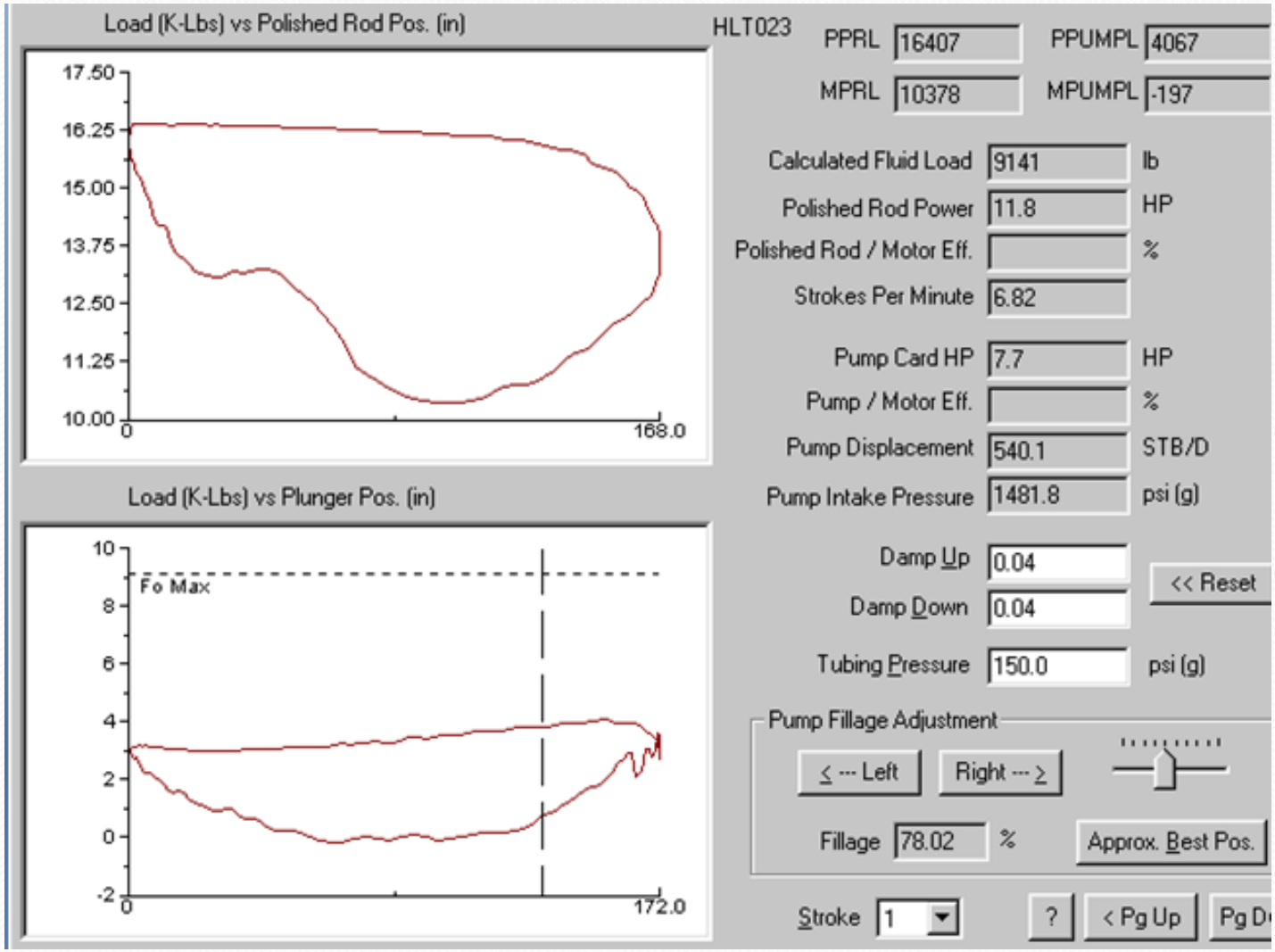
Pérdidas en válvulas.

➢Representación en echometer (fugas en la válvula viajera).

• Se produce cuando el desgaste una o ambas válvulas ocasiona que no exista un cierre perfecto y se produzca un medio de comunicación entre la columna de fluido y el fondo causando que el fluido levantado se regrese.

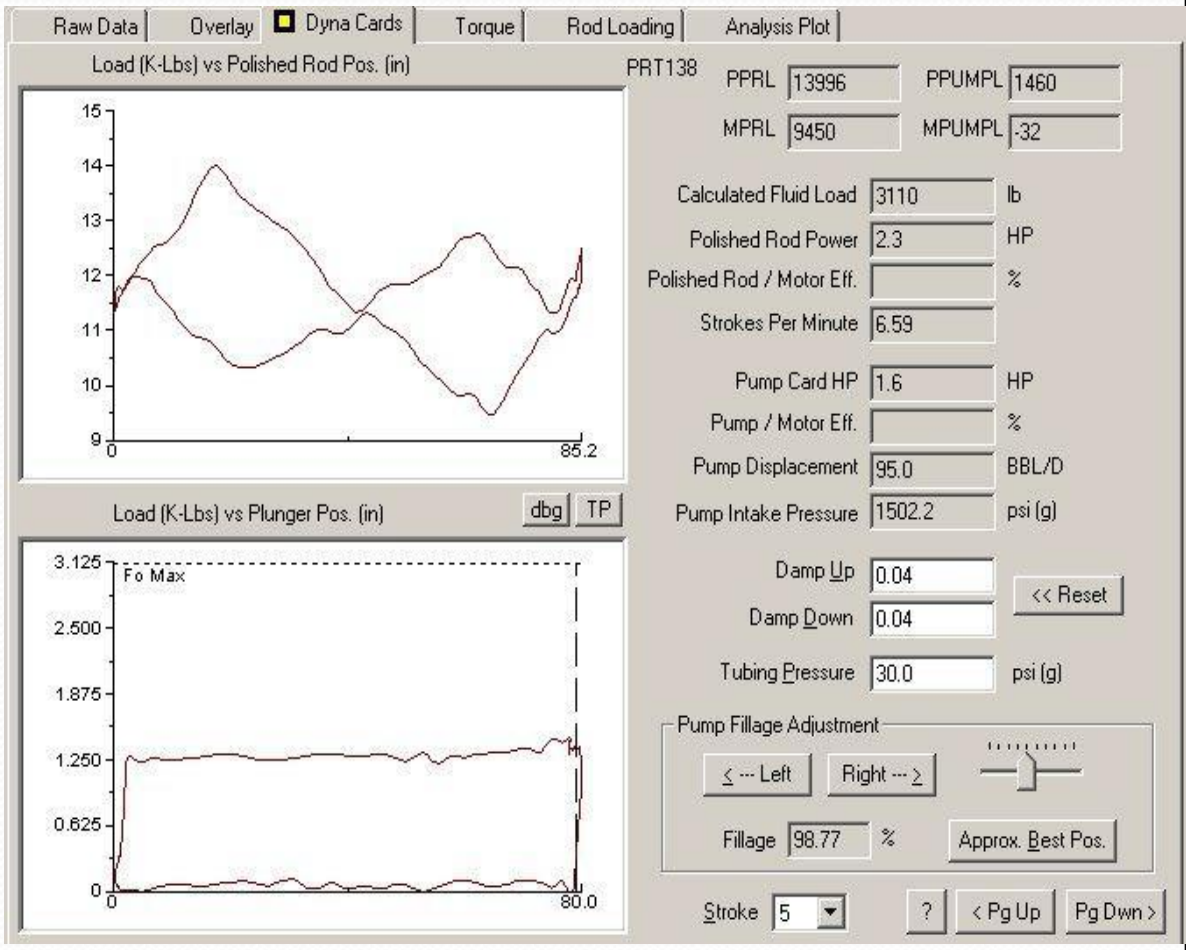


- Representación con el echometer (fugas en la válvula estacionaria).



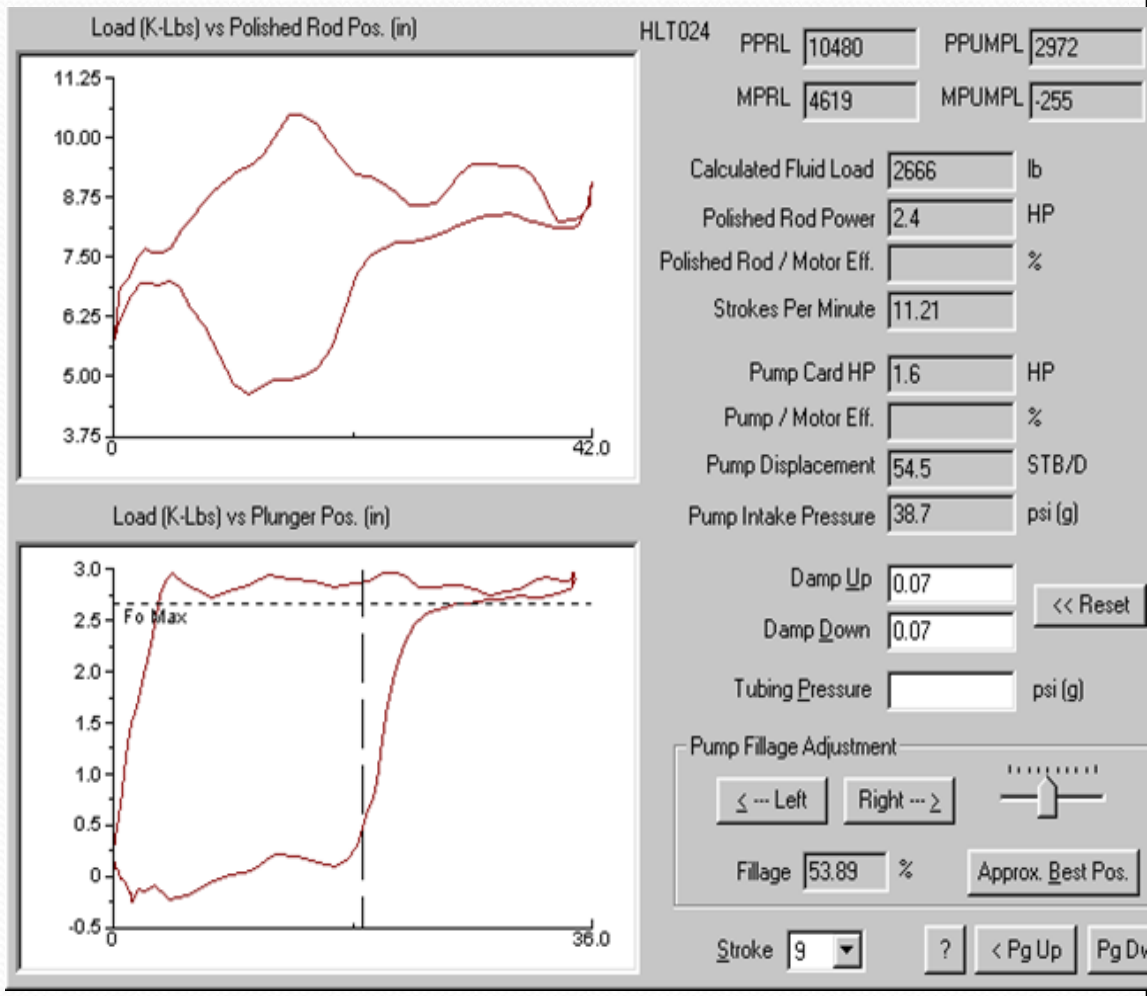
Pérdida de producción por *tubing roto.*

- Cuando en la carta dinamométrica se observa que se produce un perfecto llenado en la bomba, es decir, que la forma de la carta sale normal y el pozo no produce o no tiene la presión suficiente para que su producción avance a la estación o al tanque, existe la posibilidad de que exista una fuga por rotura del tubing, pero se puede verificar con mayor precisión realizando una prueba de hermeticidad.



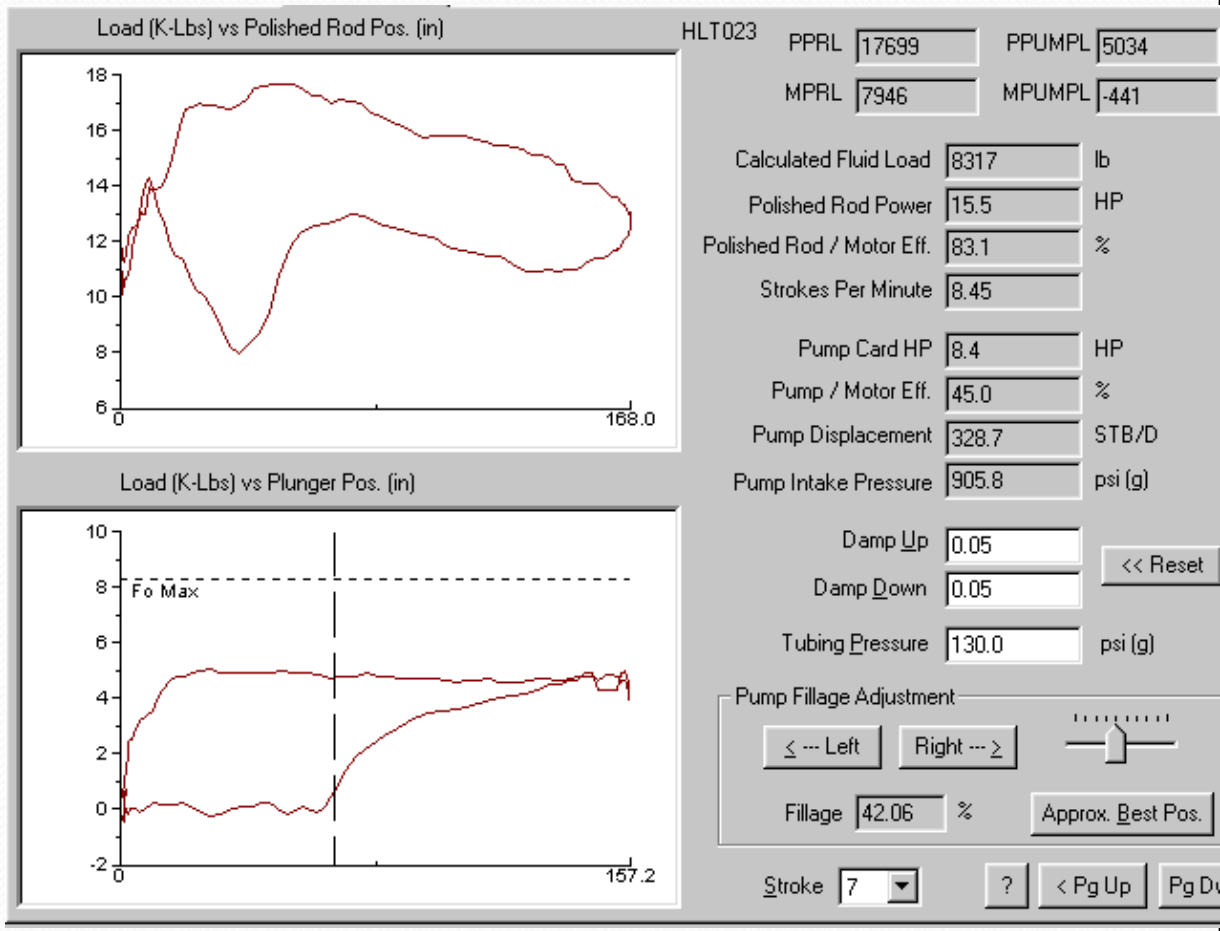
Golpe de fluido.

- Por lo general existen diseños en los que la producción no se equipara con la restauración del pozo y se puede presentar un golpe de fluido por no poseer un buen nivel en el pozo, es decir que el pistón no se llena en su totalidad y cuando el pistón baja pega un golpe fuerte en el fluido.



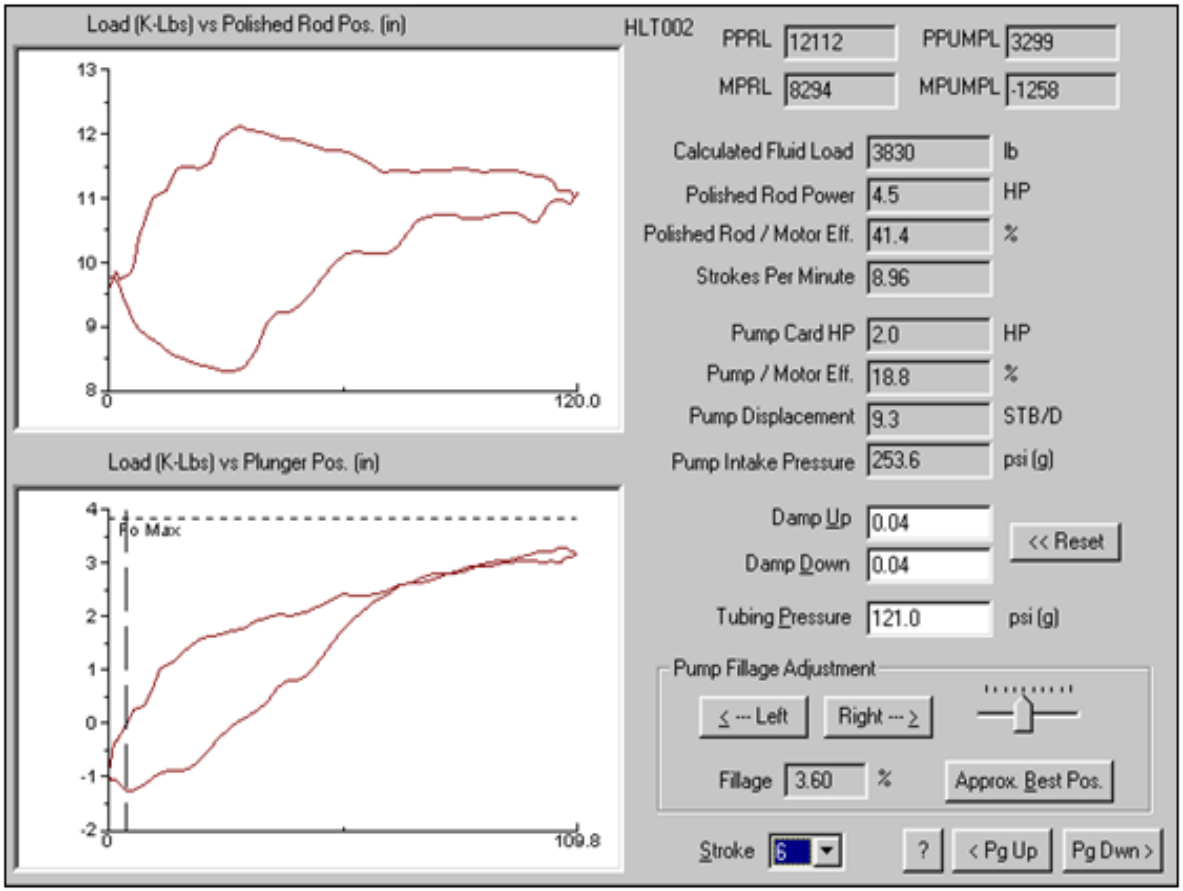
Interferencia de Gas.

- Se produce debido a que existe gas disuelto por debajo de la succión de la bomba, donde buena parte de la carrera del pistón se ocupa en comprimir gas.



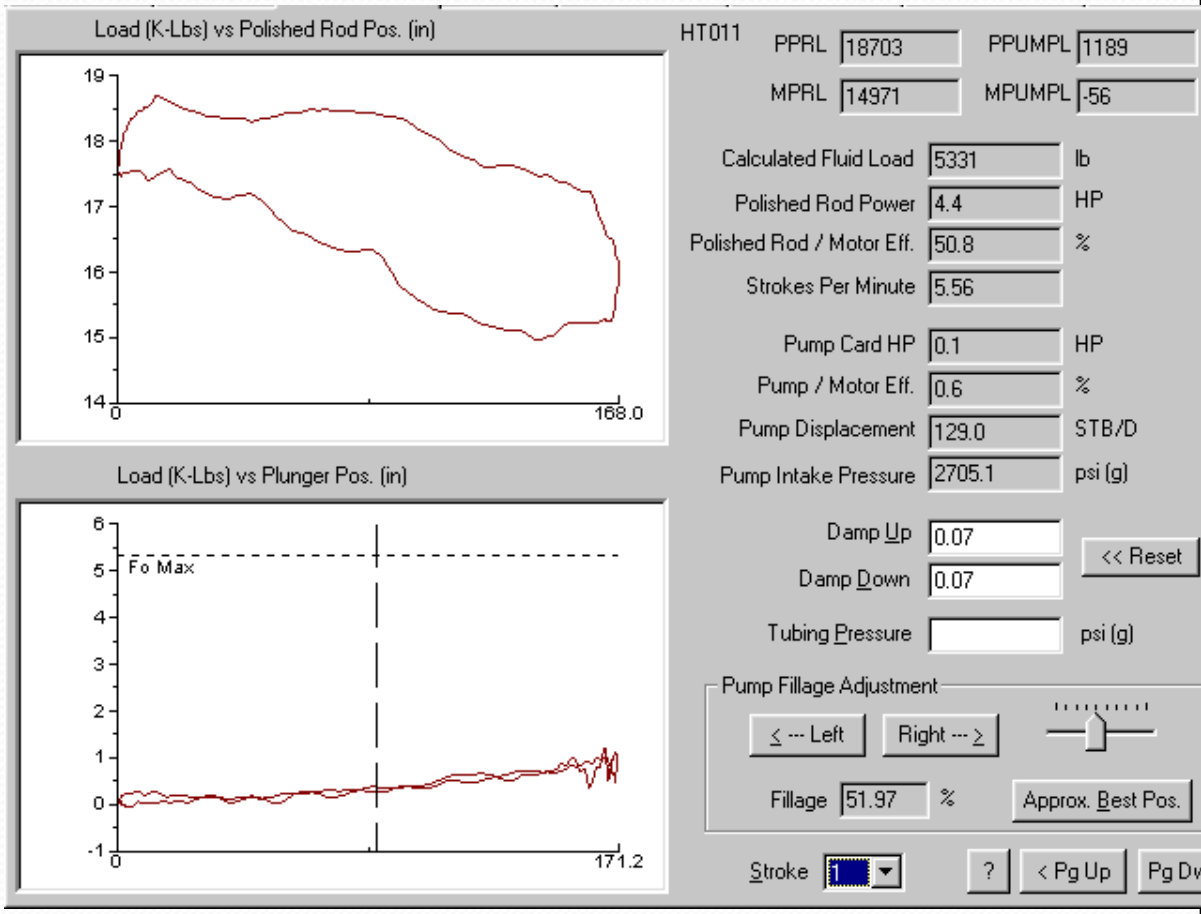
Bloqueo por gas.

- Se produce cuando la cantidad de gas libre es tal, que la presión que se levanta dentro de ella no alcanza a superar la presión de disolución del gas en el petróleo. De tal manera que al subir el pistón se va a expandir la mezcla del petróleo y gas, al bajar nuevamente se va a comprimir, como si estuviera trabajando un resorte dentro de la bomba.



Pesca de varillas

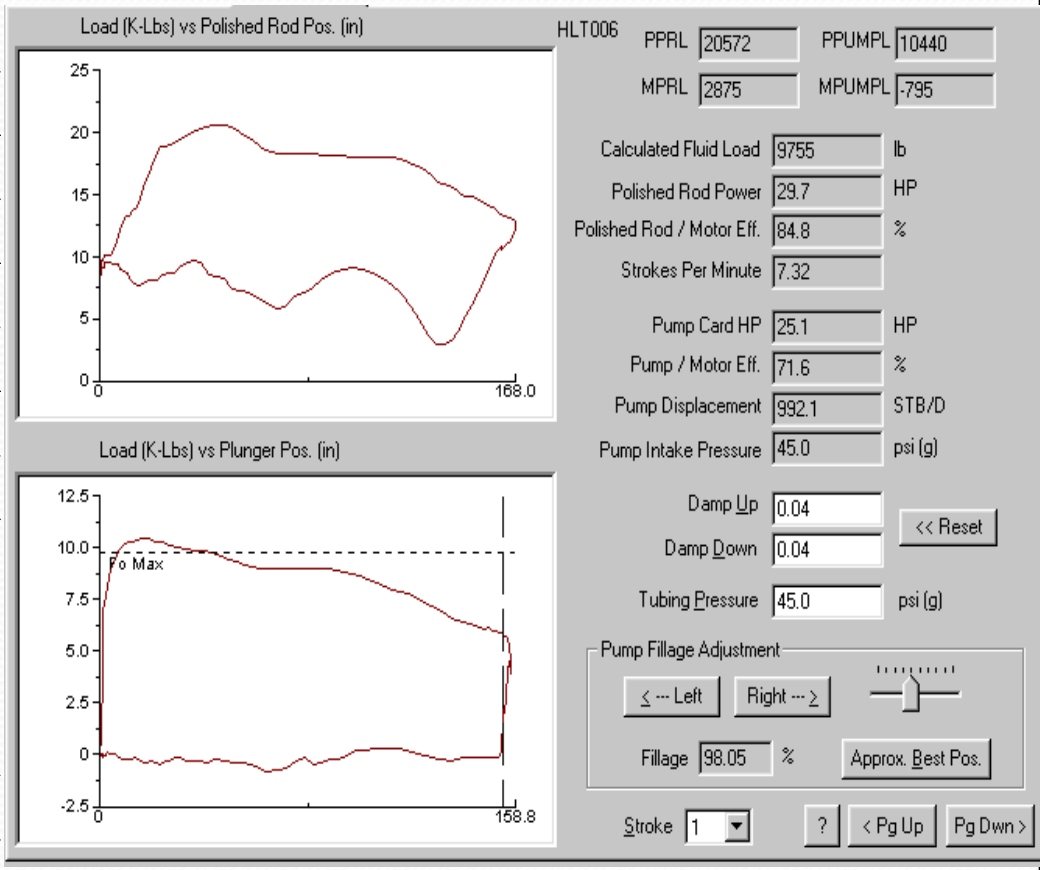
- Es muy evidente porque la bomba no trabaja, por lo tanto el área de trabajo será nula ya que esta desconectada y además el único trabajo que realiza el aparato de bombeo es subir y bajar varillas, aparecen en la cara dinamométrica una línea horizontal, coincidente con la carga de las válvulas.



Alta Aceleración del Fluido (Inercia del Fluido)

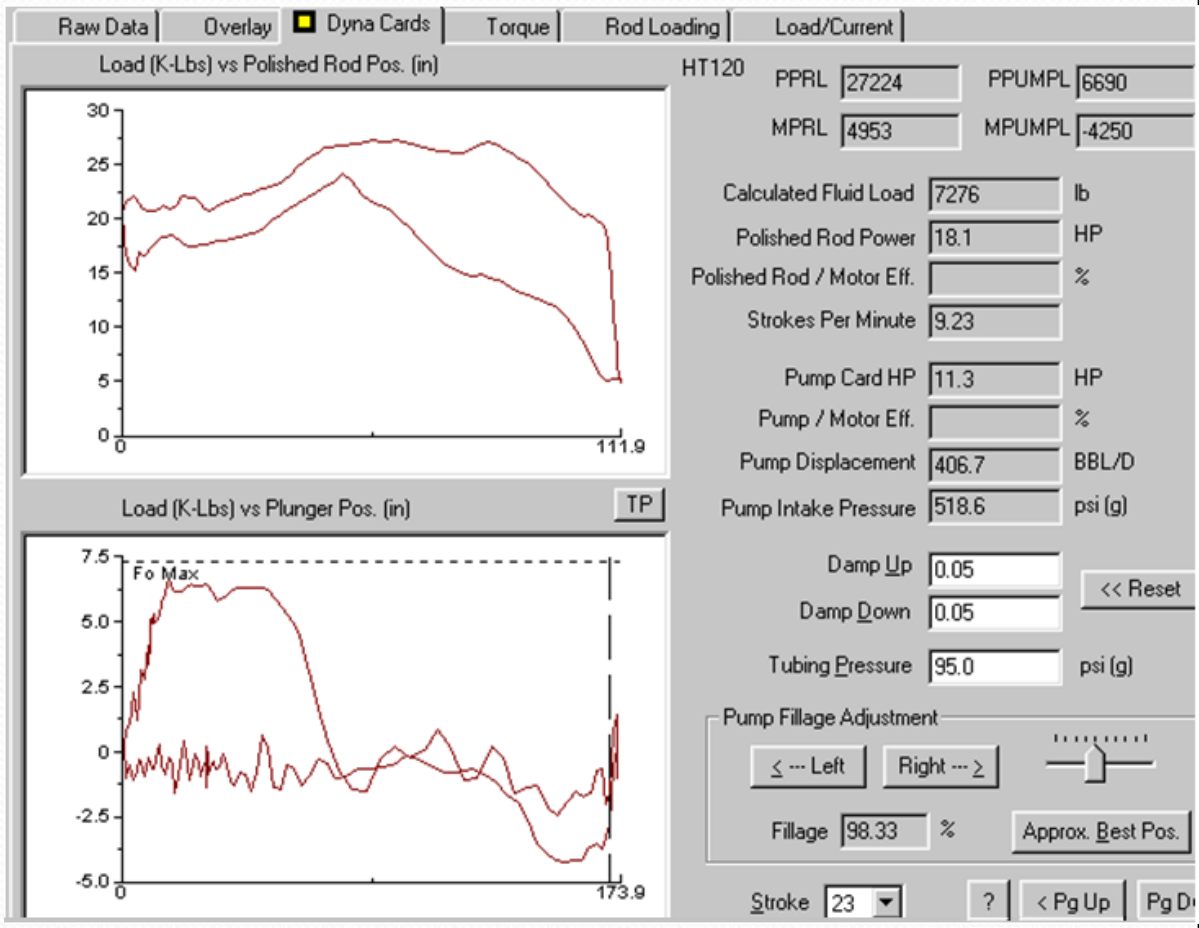
- Se presenta en pozos que tienen grandes pistones y son someros (<4000ft), la presión sobre el pistón no es constante en la carrera ascendente. Cuando la válvula viajera cierra al principio de la carrera ascendente, el pistón recoge y acelera toda la columna de fluido esto coloca una onda de presión en el fluido, en la tubería que viaja por la tubería reflejándose en superficie y baja de nuevo.

- La inercia del fluido en la tubería hace aumentar la carga del pistón mientras este realiza la carrera ascendente y acelera el fluido



Barril de la Bomba Gastado o partido.

- Una fuga del liquido pasa el pistón causando una caída de carga hasta que el pistón llegue a la sección gastada y se establece de nuevo un buen sello entre el pistón y el barril.



Principios de movimiento

- Suponiendo que se tienen las mismas consideraciones anteriores, excepto que la velocidad de bombeo tiene algun valor normal. En este caso, el patron de cargas rectangulares se modifica.

- Es necesario recordar dos principios elementales de la fisica:
  - La fuerza requerida para acelerar cualquier masa dada, es directamente proporcional a la aceleracion.
  - En el movimiento reciprocante generado por el sistema biela-manivela,donde una masa se mueve de A a B y regresa a A, el mayor valor de aceleracion se tiene en el instante en que se inicia el movimiento en A y disminuye a cero en algun punto cercano a la posicion media, incrementandose una vez mas hasta el maximo en B.

- El arranque desde el fondo con la masa máxima, requiriendo un mayor esfuerzo en la varilla pulida. Conforme esta masa se eleva, esta sujeta a menos y menos aceleración hasta aproximadamente la mitad de la carrera ascendente, donde la aceleración es cero. Desde este punto hasta la parte superior de la carrera , la masa desacelera, por lo cual, se resta del peso estático de varillas y fluido.

- Cuando la carga de varillas inicia su descenso desde la parte superior de la carrera, nuevamente la aceleración es máxima y también se resta del peso estático de las varillas, por lo cual, la carga de las varillas pulidas es mínima.

- El componente de aceleración disminuye hasta aproximarse a la mitad de la carrera descendente, donde una vez mas comienza a sumarse al peso de las varillas que se desaceleran otra vez hasta llegar al fondo de la carrera.

- Es el movimiento armónico simple en la varilla pulida, que tiende a desarrollar una aceleración lineal.

- En una unidad de bombeo real, la relación biela-manivela nunca se aproxima a infinito, lo cual es necesario para desarrollar para desarrollar el movimiento armónico simple, entonces, el patrón de aceleración en la varilla pulida queda modificado por el llamado factor de la maquina.

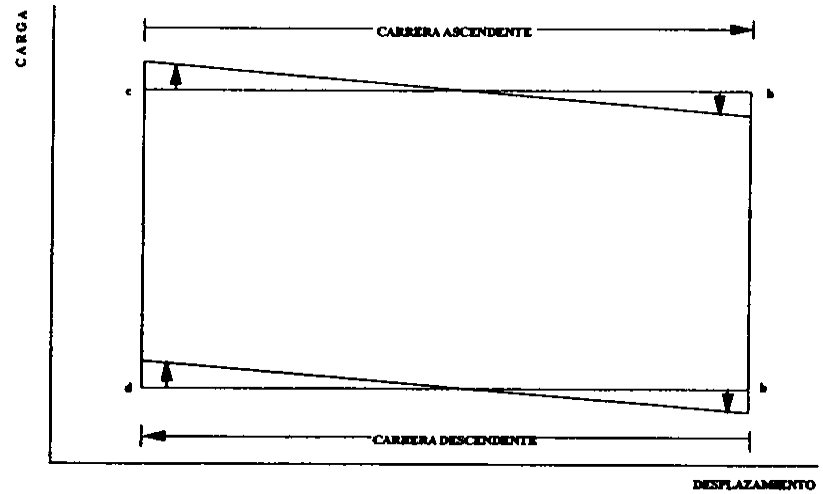


FIG. V. 9 MODIFICACIÓN A LA CARTA DINAMOMÉTRICA POR EFECTOS DE ACELERACIÓN.

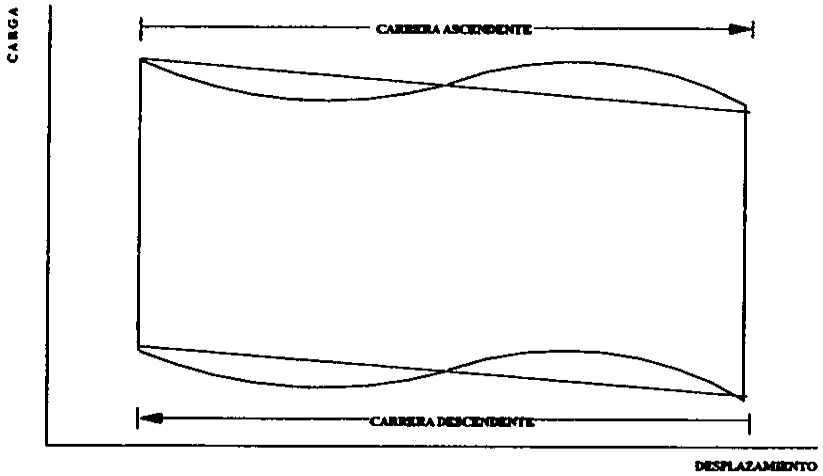


FIG. V. 10 MODIFICACIÓN A LA CARTA DINAMOMÉTRICA POR EFECTOS DEL FACTOR DE MÁQUINA.

Movimientos a considerar para una carta dinamométrica.

- Son: ***alargamiento de las varillas, movimiento armónico de las varillas y amortiguamiento.***

- Los siguientes movimientos nos dan un idea para entender la naturaleza y estructura de una carta dinamométrica y lo que esta nos dice del comportamiento de la bomba y del sistema de bombeo mecánico.

ALARGAMIENTO DE LAS VARILLAS

- La sarta de varillas elástica y su carga de fluidos son elevadas por su varilla pulida, pero la carga total no se mueve hacia arriba simultáneamente como una masa concentrada, sino que cada sección de la sarta de varillas, de abajo hacia arriba, tiende a alargarse ligeramente mas que la sección inmediata anterior.

- Conforme la varilla inicia su movimiento ascendente, las varillas comienzan a alargarse y la carga en la varilla se hace cada vez mas grande.

- En la parte superior de la carrera, las varillas se contraen con una disminución sucesiva de la carga, la válvula viajera se abre y la carga de fluido se trasfiere a la tubería de producción y la sarta inicia su descenso.

- En la imagen se muestra este alargamiento y contracción de las varillas que modifica nuestra carta dinamométrica.

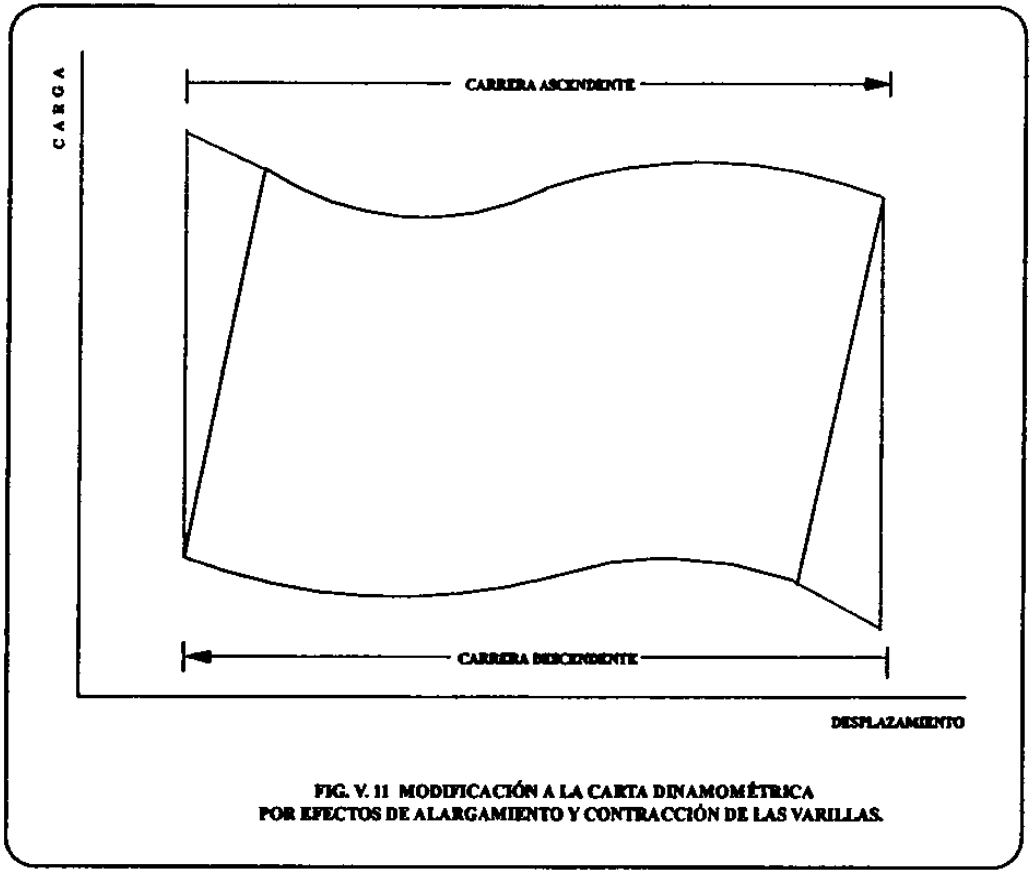


FIG. V. 11 MODIFICACIÓN A LA CARTA DINAMOMÉTRICA
POR EFECTOS DE ALARGAMIENTO Y CONTRACCIÓN DE LAS VARILLAS.

MOVIMIENTO ARMONICO DE LAS VARILLAS

- Si una masa elástica de varillas esta suspendida en el aire desde la parte superior y se le aplica una fuerza en la parte inferior, la sarta tiende a vibrar con cierta frecuencia.

- En un pozo productor despues de que ocurre el alargamiento de las varillas la valvula viajera se cierra y la sarta empieza a vibrar con una cierta frecuencia natural.

- Similarmente, cuando las varillas llegan a la parte superior de la carrera, comienzan a bajar y quedan liberadas del alargamiento, entonces, la sarta nuevamente comienza a vibrar.

- Por lo tanto, en un sistema elastico, el diagrama de cargas se modifica por el patron de vibraciones de la sarta de varillas.

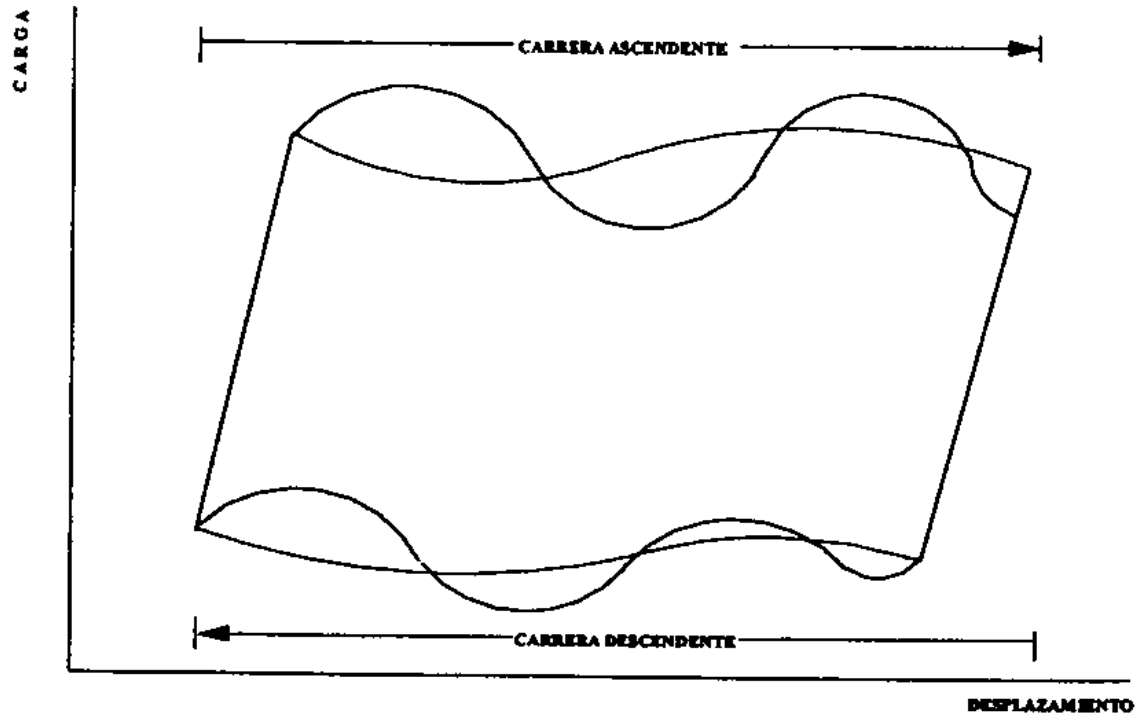


FIG. V. 12 MODIFICACIÓN A LA CARTA DINAMOMÉTRICA POR EFECTOS DE VIBRACIONES DE LA SARTA.

AMORTIGUAMIENTO

- Para este caso supongamos que la sarta de varillas esta vibrando a su frecuencia natural. Ésta seguirá oscilando con su movimiento hacia arriba y hacia abajo hasta que la fricción amortigüe esas vibraciones.

- Sin embargo, en realidad la sarta de varillas vibra con una pesada carga de fluido, esto 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 producirá una rápida disminución en el patrón de vibraciones.

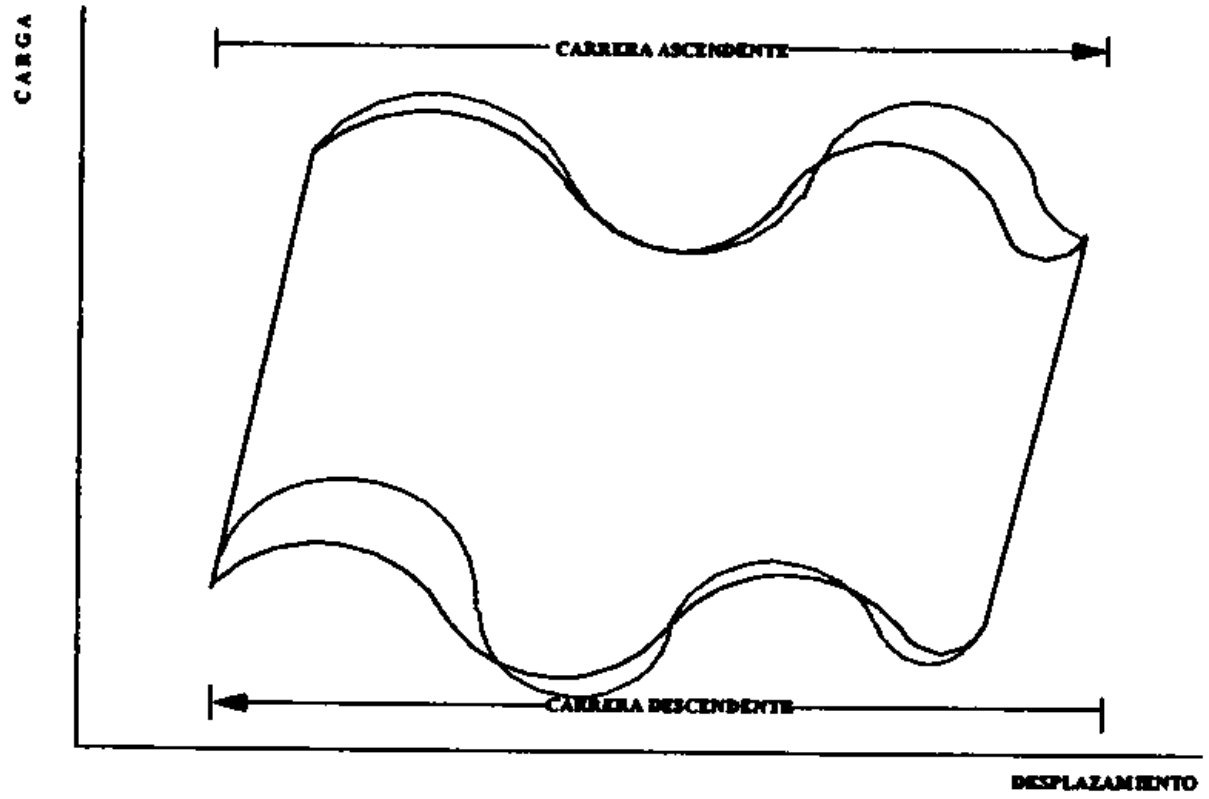


FIG. V. 13 MODIFICACIÓN A LA CARTA DINAMOMÉTRICA POR EFECTO DE AMORTIGUAMIENTO.

CALCULO DE PARAMETROS Y PARTES DE LA CARTA

Un pozo tiene instalada una bomba cuyo émbolo es de 1 ¾ pg en una sarta de varillas telescopiadas compuesta de 3,500 pies de varilla de 3/4 pg y 2,000 pies de varilla de 7/8 pg. Las pruebas sobre las válvulas de pie y viajera dan valores de 8910 lb para la carga de la varilla (W_m) y 12,370 lb para la carga del fluido más las varillas (W_{fm}). Usando el método sugerido por Agnew, calcular la presión de fondo (P_w) y el nivel neto del pozo (LN).

La presión de fondo es:

$$P_w = \frac{W_f - W_{fm}}{A_P}$$

La carga del fluido es:

$$W_f = 0.433 * \gamma * L * A_p$$

Donde:

Wf : carga del fluido

Wfm : carga del fluido medido

Ap: Area del embolo

L : nivel real de la bomba

γ : densidad relativa.

- De la tabla de un embolo de 1 ¾ pg.
- A_p=2.405 pg2

- L=L1 + L2=3,500+2,000= 5,500 pies

- W_r= L1*m1 + L2*m2
- Donde: Wr es el peso de las varillas

- De tabla para varilla de ¾ y 7/8 pg. Determinamos el peso unitario de cada sección de la sarta.
- m1=1.63 lb/pie y m2=2.16 lb/pie

- Wr=3,500 pies*1.63 lb/pie + 2,000 pie*2.16 lb/pie
- Wr=10,025 lb

$$\gamma = 7.87\left(1 - \frac{W_{rm}}{W_r}\right) = 7.87\left(1 - \frac{8{,}910}{10{,}025}\right) = 0.875$$

$$W_r = 0.433 * 0.875 * 5{,}500 * 2.405 = 5{,}012\ lb$$

$$W_{fm} = W_{rfm} - W_{rm}$$

$$W_{fm} = 12{,}370 - 8{,}910 = 3{,}460\ lb$$

Wrm: peso de las varillas medido
Wr: peso de las varillas
Wfm: carga del fluido medido
Wrfm: peso total de las varillas en el fluido medido

Finalmente:

$$P_w = \frac{5{,}012 - 3{,}460}{2.405}$$

$$P_w = 645\ lb/pg^2$$

Para el nivel de fluido neto:

$$LN = L - \frac{P_w}{0.433\gamma}$$

Entonces:

$$LN = 5{,}500\ pie - \frac{645\ lb/pg^2}{0.433\ \ lb/pg^2/pie\ * 0.875} = 3{,}797.6\ pie$$

CONCLUSION

- *El conocimiento de la carta dinamométrica y su análisis, nos pueden maximizar los beneficios de muchos pozos productores, asegurando que la unidad de bombeo y varillas operen de una forma mas económica y dentro de sus rangos de carga, además de que bomba subsuperficial esta ejecutando su trabajo con máxima eficiencia.*