

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

**PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA
DE PETROLEO Y PETROQUIMICA**



TITULACION PROFESIONAL EXTRAORDINARIA
NUEVO METODO DE DISEÑO DE BOMBEO MECANICO
Y APLICACION DE MINICOMPUTADORAS

Trabajo Profesional para optar el Título de:
INGENIERO DE PETROLEO

ROBERTO EDMUNDO WONG SANCHEZ

Lima - Perú
1983

PREFACIO

El propósito de este trabajo es presentar un nuevo método de diseño para unidades de bombeo mecánico. Con este método tenemos factores de seguridad un poco más altos que con los diseños convencionales. En muchos casos se han encontrado unidades malogradas por sobrecarga debido a que han estado subdimensionadas para el pozo en que fueron diseñadas.

El método que se presenta está basado en un API., se ha modificado para su mejor desarrollo y con la finalidad de que esté al alcance de diseño de personal con poco ó con ningún conocimiento de ingeniería. Se pueden hacer verificaciones rápidas del equipo de un pozo.

En la segunda parte, se da el método para ser utilizado con un programa para minicomputadora. De esta manera el diseño de unidades de bombeo se hace mucho más sencillo y en un mínimo de tiempo; con esto se corrobora lo que se menciona líneas arriba, de que los diseños pueden hacerlo personas con pocos conocimientos de ingeniería. Una vez cargado el programa en la computadora (el diseño), teniendo todos los datos, es completamente fácil de ejecutar, con sólo presionar 2 ó 3 teclas.

Para concluir, deseo dar las gracias a todas las personas que con su apoyo y aportación me han ayudado en la

elaboración del presente trabajo. Principalmente a mi esposa, Elena, que con su continua colaboración y estímulo han hecho posible el contenido de este trabajo y otros más. Quiero expresar también mi reconocimiento a la Sra. L. de Cornejo, que se encargó de tipear el original del presente trabajo. Y finalmente quiero rendir homenaje y agradecimiento a mis padres Juan y Mercedes, que incularon en mí el interés por el estudio haciendo posible la culminación de mi profesión.

R. E. Wong Sánchez

DISEÑO DE BOMBEO MECANICO

CONTENIDO

PREFACIO

PRIMERA PARTE

I	- INTRODUCCION	1
II	- DESCRIPCION Y FUNCION DEL EQUIPO DE BOMBEO MECANICO.	3
III	- TIPOS DE GEOMETRIA DE UNIDADES DE BOMBEO.	9
IV	- ANALISIS DE LAS ECUACIONES MATEMA- TICAS USADAS.	17
V	- PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.	24

SEGUNDA PARTE

I	INTRODUCCION	32
II	BREVE DESCRIPCION DE LA HP-41CV	33
III	DESCRIPCION DEL PROGRAMA Y DIAGRA- MA DE FLUJO	35
IV	EJECUCION DEL PROGRAMA	41
	BIBLIOGRAFIA	43
	APENDICES	44

PRIMERA PARTE

I INTRODUCCION

En las operaciones del Noroeste de Perú más o menos un 80% de los pozos de petróleo son producidos con el sistema de BOMBEO MECANICO. Debido a la gran preferencia de este método es por lo mismo que ha ido perfeccionando la técnica del diseño de sarta de varillas, cálculos para obtener el tamaño adecuado de la unidad de bombeo, mejores motores y también se mejoren continuamente las bombas de subsuelo.

El presente es un trabajo para el diseño completo de un sistema de Bombeo Mecánico, vale decir, sarta de varillas, tamaño de unidad con respecto al torque, cargas máximas y mínimas, potencia del motor y desplazamiento de la bomba de subsuelo.

El objetivo de una instalación de bombeo a varillas es el levantamiento de fluido de una formación a la superficie en un rate deseado. Por lo tanto, los factores de diseño primario a ser considerados son (1) rate de producción, y (2) levante neto del fluido.

Un conocimiento de estos factores hace posible la determinación del tamaño del émbolo óptimo para la instalación, es decir, el tamaño del émbolo con el cual se obtendrá mínima carga sobre las varillas y el equipo de superficie, mínimo torque en la caja de reducción, y mínima potencia del motor.

El método que se presenta aquí está basado en el último me-

todo de diseño publicado por la AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, y es el API : RP11L de marzo de 1979. Se creó la SUCKER ROD PUMPING RESEARCH, INCORPORATED y se contrató los servicios de MIDWEST RESEARCH INSTITUTE en KANSAS, para realizar los trabajos necesarios y de investigación. Los cálculos de diseño están basados en correlaciones de los datos de prueba que fueron obtenidos durante la fase de investigación del proyecto, donde se usó un computador analógico electrónico.

El trabajo de investigación fué limitado para problema simulado en la cual el tubing se asumió que estaba anclado. Por lo tanto, el resultado de la prueba reflejó solo esta condición. Sin embargo de los muchos casos conocidos en la cual el tubing no estaba anclado se incluyó una fórmula la cual, indica la experiencia, da una aproximación muy cercana del viaje relativo del émbolo con respecto a la bomba.

II - DESCRIPCION Y FUNCION DEL EQUIPO DE BOMBEO MECANICO

Para un buen diseño y análisis es necesario conocer y comprender las partes componentes de una instalación de bombeo. Estas partes son :

- 1.- La fuerza motriz.
- 2.- Equipo de bombeo de superficie.
- 3.- La sarta de varillas de succión.
- 4.- La bomba de subsuelo.

No obstante, que cada componente será tratado como una unidad separada, debemos tener en cuenta que la instalación es en realidad una unión muy compleja de los componentes y esos componentes simples no pueden diseñarse independientemente de los otros. Por lo tanto, el diseño completo de una instalación de bombeo se convierte en un difícil asunto de ensayo y error.

LA BOMBA DE SUBSUELO

La función de la bomba es admitir fluido de la formación dentro de la sarta de producción y levantarlo luego a la superficie. Cualquier bomba debe contener cuatro elementos esenciales. Estos elementos son : barril, émbolo, válvula estacionaria y válvula viajera. En la carrera ascendente la carga de fluido sobre el émbolo origina el cierre de la válvula viajera y el fluido es desplazado de la tubería a la

superficie. También el movimiento del émbolo origina un decremento de presión sobre la válvula estacionaria, la cual se abre y admite flúido de la formación. Cabe hacer notar, que en la carrera ascendente la carga de flúido es soportada por el émbolo y por lo tanto por las varillas. Al comienzo de la carrera descendente el émbolo comienza a caer a través del flúido en la tubería, esto origina que la válvula viajera se abra y la válvula estacionaria cierre y por lo tanto, la carga de flúido es transferida del émbolo a la tubería. Esto quiere decir que la carga es ahora soportada por la tubería. Esta transferencia de carga de flúido es un factor significativo en la determinación de la carrera efectiva del émbolo. Se ha observado que la mayoría de la producción se logra en la carrera ascendente, el flúido removido solamente de la tubería durante la carrera descendente ha sido desplazado por la caída de varillas.

Las bombas pueden ser clasificadas como bombas de varillas y bombas de tubos. En el caso de bombas de tubos, el barril es bajado suspendido de los tubos y el émbolo es bajado en la sarta de varillas.

En el caso de bombas de varillas, la unidad completa es bajada en la sarta de varillas.

LA SARTA DE VARILLAS DE SUCCION

Las varillas son el medio por el cual la energía es transmitida del equipo de superficie a la bomba. Las varillas están disponibles en 6 diámetros normales y el problema de diseño es esencialmente materia de determinar la sarta más ligera (y por lo tanto la más económica) que pueda ser usada sin exceder el esfuerzo de trabajo de las varillas. El máximo esfuerzo de trabajo de las varillas depende de la composición química y propiedades mecánicas de estas y en la naturaleza del fluido (es decir si es ó no corrosivo). Como regla es deseable mantener el esfuerzo de varillas bajo 30,000 psi. Sin embargo, la experiencia en un área determinada indicará un límite mucho menor.

Cuando las bombas son sentadas a profundidades a proximadamente mayores de 3,000 pies, es usualmente deseable usar una sarta ahusada, es decir una sarta de diferentes tamaños de diámetro. La varilla de diámetro más pequeño se coloca en el fondo de la sarta, inmediatamente sobre el émbolo.

EQUIPO DE BOMBEO DE SUPERFICIE

El equipo de superficie transfiere energía de la fuente motriz (motor) a la sarta de varillas, para bombear el pozo, se cambia el movimiento rotacional del motor

a movimiento recíprocante para la sarta de varillas y debe reducir la velocidad del motor a una velocidad pre establecida. La reducción se lleva a cabo en la caja de engranaje de reducción de la unidad de bombeo.

El empalme directo entre la sarta de varillas y el equipo de superficie es el varillón pulido. Cerca del final superior del varillón pulido está la grampa, la cual es soportada por el portavarillas.

El portavarillas, a su vez, es soportado por un cable flexible (llamado rienda) la cual pasa sobre la cabeza de caballo de la unidad en un extremo del balancín.

El balancín es soportado por el poste maestro. El movimiento es transmitido al balancín por la biela ó brazo (Pitman), a la cual el movimiento le es transmitido por la manivela (crank). La distancia del eje de la manivela al cojinete de la biela define la longitud de carrera del varillón pulido.

Uno de los aspectos más importantes del diseño de una instalación de bombeo, es la selección del contrapeso. Prácticamente todo el trabajo de levantar el fluido por una bomba con varillas, es realizado en la carrera ascendente, la carga de crudo y sarta de varillas deben ser aceleradas hacia arriba de velocidad cero, y deben ser levantadas la longitud de la carrera. En la carrera descendente, con carga de fluido transferida a los tubos, la caída de varillas actúa como impulsor de fuerza para la instalación.

Si no se proveyeran algunos medios para igualizar estas cargas en carrera ascendente y descendente resultarán condiciones perjudiciales para el equipo de superficie. Del punto de vista de la fuente de energía ocurrirán altas demandas de potencia innecesarias durante la carrera ascendente, con la consecuente impulsión de la fuente de energía durante la carrera descendente (esto origina que la velocidad del motor sea mayor en la carrera descendente que en la ascendente). Del punto de vista de transmisión de potencia, se impondrán altos torques innecesarios durante la carrera ascendente. El contrapeso provee una distribución uniforme de cargas y también para requerimientos de torque máximo. Los pesos del contrabalance, en efecto, almacenan energía durante la carrera descendente cuando la demanda de potencia es menor, y elevan energía durante la carrera ascendente, realizando parte del trabajo de levantar fluido y varillas.

Para evitar una mala interpretación de terminología, es necesario diferenciar entre EFECTO DE CONTRABALANCE (el cual es la contribución neta del sistema de contrabalance en el varillón pulido) y CONTRABALANCE O CONTRAPESO (el cual es el peso ó sistema de pesos usados para obtener el efecto de contrabalance). El efecto de contrabalance es determinado por el peso real del contrapeso, por su posición, y por la geometría de la unidad de superficie. La velocidad de bombeo es también un factor en el caso de contrabalance de balancín.

FUENTE DE ENERGIA

La función de la fuente de energía es suministrar a la instalación energía mecánica, la cual es eventualmente transmitida a la bomba y usada para levantar fluido.

La fuente de energía seleccionada para una instalación dada debe, de hecho, tener suficiente potencia de salida para levantar los fluidos en el rate deseado del nivel de trabajo, del fluido del pozo. La fuente de energía principal puede ser un motor de combustión interna ó un motor eléctrico.

III - TIPOS DE GEOMETRIA DE UNIDADES DE BOMBEO

Los diferentes tipos de unidades de bombeo se distinguen de acuerdo a la locación ó método de contrabalanceo.

A - UNIDADES CONVENCIONALES - API

La unidad de bombeo convencional ya sea con contrapesos rotativos ó contrapesos en el extremo del balancín ha sido el tipo de unidad más usado en los campos petroleros. La rotación de los contrapesos hace que el balancín pivote en el eje del rodamiento central, moviendo el vástago pulido arriba y abajo a través de sus varias conexiones.

B - BALANCEO NEUMATICO

A parte de las ventajas de diseño y eficiencia que tienen las unidades neumáticas, éstas unidades tienen mayores aplicaciones, particularmente para el bombeo profundo y bombeo de altos volúmenes con carreras largas, bombeo de crudos pesados, etc.

C - MONTAJE FRONTAL MARK II

Cambiando la geometría de las unidades convencionales a un tipo de unidad con montaje frontal, es posible, combinar el torque producido por la unidad al torque requerido por

el pozo, con una significativa reducción de los torques máximos. Este sistema da como resultado una carga uniforme en ambos, el motor y en el reductor.

UNIDADES CONVENCIONALES Y BALANCEADAS POR AIRE

Hagamos un análisis simple de estos tipos de unidad en función del movimiento armónico simple.

Las variaciones de verdadero movimiento armónico son debido a la geometría del sistema elevador y difiere de unidad a unidad. Refiriéndonos a las unidades convencional y balanceada por aire se notarán dos puntos en particular :

- a) En la unidad convencional la aceleración en el fondo de la carrera es algo mayor que la verdadera aceleración armónica simple, mientras que es menor en el tope de la carrera. Aquí se apoya uno de los mayores inconvenientes de la unidad convencional, ó sea que en el fondo de la carrera, justo en el instante que la válvula viajera está cerrando y la carga de fluído está siendo transferida a las varillas, la fuerza de aceleración en las varillas, está en su máximo. Estos dos factores se unen para crear un esfuerzo máximo en el sistema de varillas que es uno de los factores limitantes en diseños de instalación.
- b) El sistema elevador de la unidad balanceada por aire causa la máxima aceleración en el tope de la carrera, mientras que la aceleración en el fondo de la carrera es me-

nor que aquella bajo movimiento armónico simple. Por lo tanto el sistema de varillas soportará un menor esfuerzo máximo usando una unidad balanceada por aire primero que una unidad convencional, los otros factores siguen igual (Ver figura # 1).

UNIDADES CONVENCIONALES Y DE MONTAJE FRONTAL MARK II

En el eje de manivelas de cualquier unidad convencional existen 2 fuerzas torcionales, una que trata de rotar el eje en una dirección debido al sistema de contrapesos y la otra que trata de rotar al eje en dirección opuesta debido a la carga en el pozo. La diferencia entre estas dos torciones es el torque neto y es lo único que concierne al reductor y motor.

Si analizamos en un gráfico los torques producidos en una unidad convencional (Fig. 2), veremos que el torque producido por el contrabalanceo de la unidad describe una curva sinoidal simple durante todo el ciclo de bombeo. Cuando los contrapesos están en el tope superior (tope inferior de la carrera descendente), no existe torque de contrabalanceo en el eje. En la mitad de la carrera, cuando los contrapesos están hacia adelante y horizontales, se crea el contrabalanceo máximo. Cuando están completamente abajo (tope de carrera ascendente), otra vez no existe torque. El segundo de estos momentos de torsión, producido por las cargas en el pozo, son también cero al fondo de la carrera

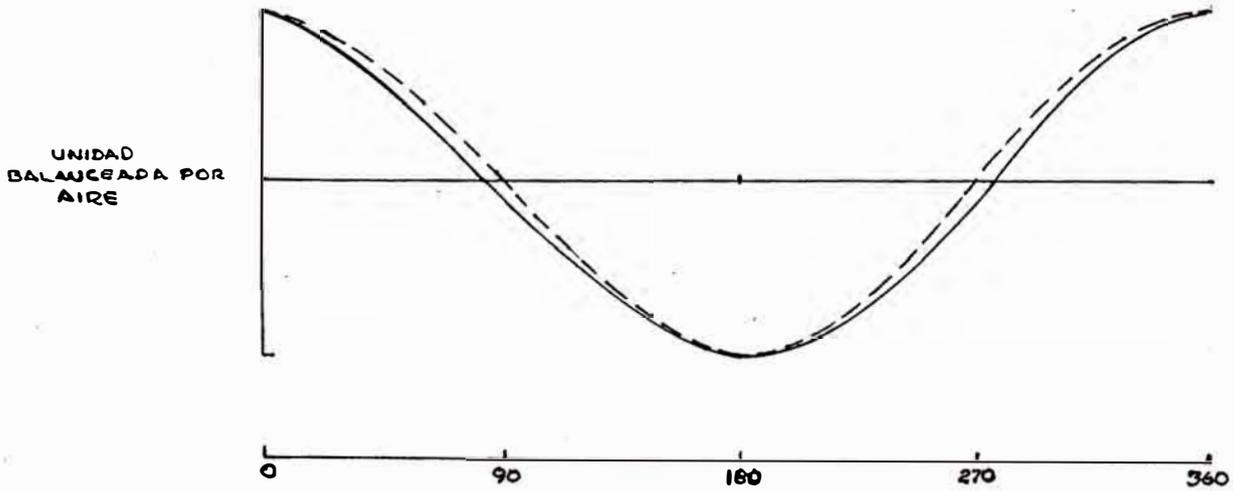
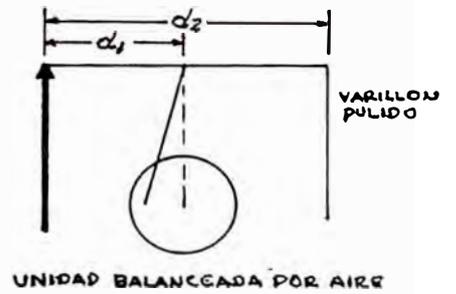
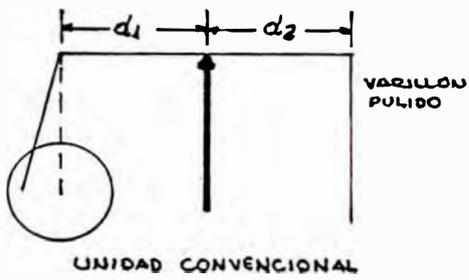
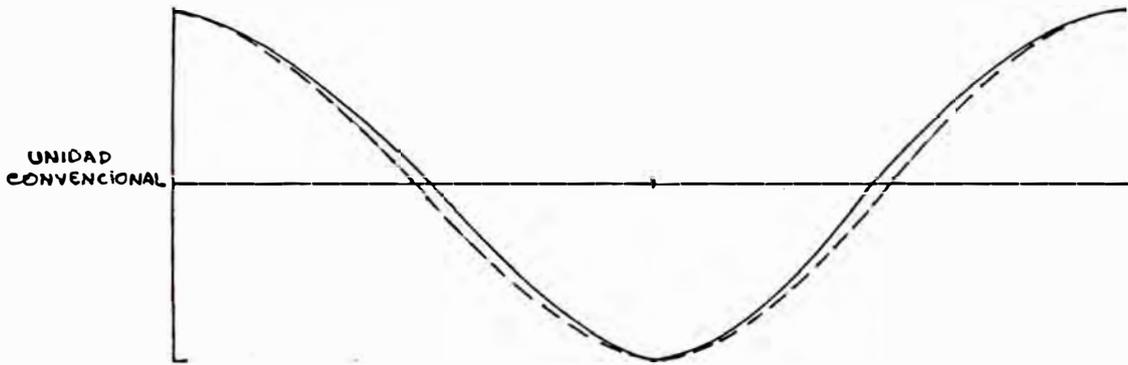


FIG. 1 MOVIMIENTOS DEL VARILLON PULIDO: UNIDADES CONVENCIONAL Y BALANCEADA POR AIRE

descendente, luego el torque sube al máximo de su valor a la mitad de la carrera ascendente, cuando el peso máximo de las varillas, fluído y la aceleración han obtenido su valor máximo. Al tope de la carrera ascendente, el torque vuelve a tener un valor cero, luego obtiene su máximo aproximadamente a la mitad de su carrera descendente y luego termina nuevamente en cero al fondo de la carrera descendente.

La diferencia de estos dos torques, el producido por las cargas en el pozo y el producido por el contrabalanceo, es el torque neto y el que tiene que atender al reductor y motor del equipo. El área entre estos dos torques es proporcional al trabajo hecho durante una revolución y la capacidad del reductor, que se requiere efectúe este trabajo, es proporcional al máximo tamaño de la curva, es decir, a las ordenadas B y E de la Fig. 2.

La inhabilidad de este sistema de producir una diferencia más proporcionada entre el torque del pozo y del contrabalanceo hace necesario que se diseñe el tamaño del reductor y motor basados en las ordenadas de máximo tamaño "B" y "E" Fig. 2, las cuales representan los torques máximos en las carrera ascendente y descendente.

El sistema con montaje frontal logra que las curvas de torque del pozo y del contrabalanceo estén más proporcionadas como se muestra en la Fig. 3., de tal manera que el trabajo se realice a una rata constante y se produce un torque neto

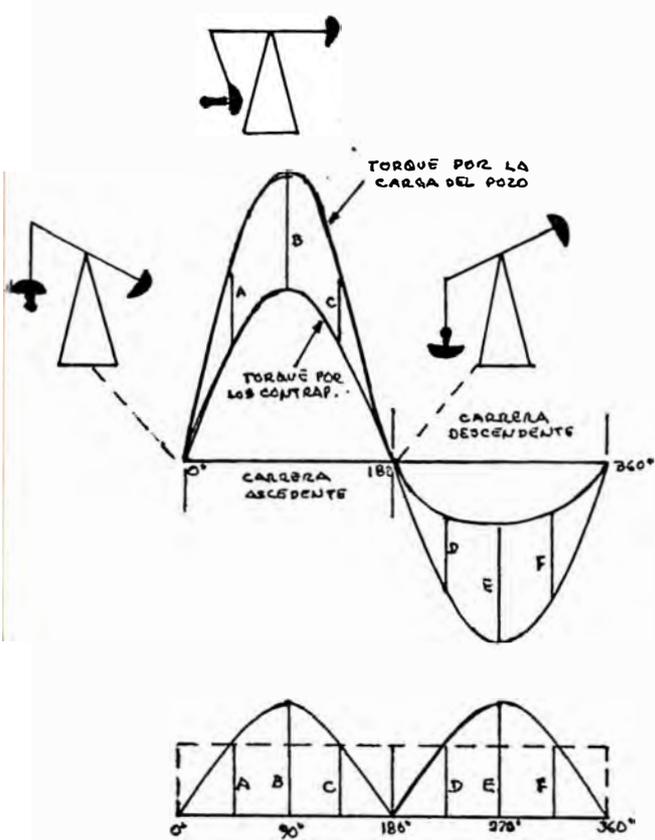


FIG. 2 SISTEMA DE TORQUE DE UNA UNIDAD CONVENCIONAL

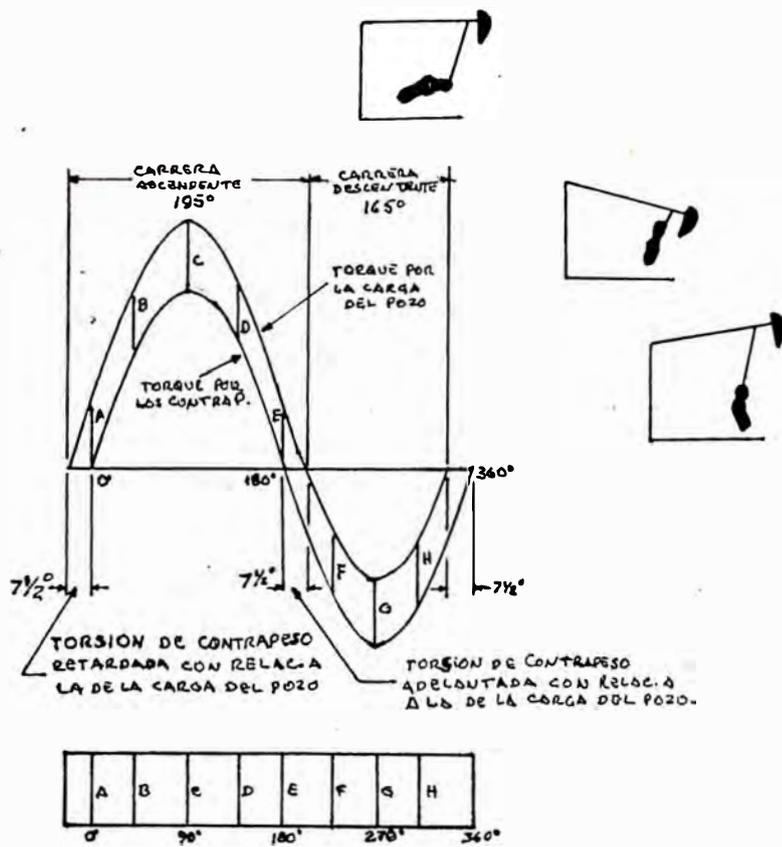


FIG. 3 SISTEMA DE TORQUE DE UNA UNIDAD DE MONTAJE FRONTAL

resultante que se aproxima más al rectángulo ideal que se muestra en Fig. 2 y 3

Suponiendo que se tomará como referencia fija la curva sinoidal del torque de contrabalanceo, que sería necesario para producir un ajuste perfecto entre esta curva y la del torque del pozo para que la diferencia sea siempre un torque neto del mismo tamaño. Los tres ajustes que deben efectuarse Fig. 3 son los siguientes :

- 1.- Las curvas del torque de las cargas del pozo y contrabalanceo deben estar desplazados por un cierto ángulo.
- 2.- El ciclo de la carrera ascendente debe incrementarse y el ciclo de la carrera descendente debe disminuirse.
- 3.- El torque del pozo a la mitad de la carrera ascendente debe disminuirse y el torque a la mitad de la carrera descendente debe incrementarse.

Al efectuarse modificaciones geométricas en la estructura de la unidad con montaje frontal se logran los ajustes arriba mencionados.

- 1.- Los contrapesos están colocados en forma descentrada en la manivela. Esto produce un torque de contrabalanceo que al principio de la carrera ascendente se "retarda" del torque del pozo por $7.1/2^\circ$ aproximadamente. Igualmente al principio de la carrera descendente el torque de contrabalanceo queda "adelantado" aproximadamente $7.1/2^\circ$

2.- El compensador se desplaza hacia adelante hacia la cabeza, en vez de estar colocado directamente encima del reductor.

Esto produce una carrera ascendente y descendente de 195° y 165° respectivamente. Así mismo, la carrera ascendente de 195° reduce la aceleración cuando la carga es máxima y por lo tanto se reduce la carga máxima en el vástago.

3.- Otro beneficio de colocar el compensador hacia adelante es que se obtiene una ventaja mecánica al levantar la carga y se reduce la ventaja mecánica durante la carrera descendente, es decir el factor máximo del torque durante la carrera descendente se incrementa.

De esta manera se consigue el beneficio adicional de que la unidad trabaja igualmente durante la carrera ascendente y descendente del varillón y al mismo tiempo se reduzcan las cargas.

Independientemente estas modificaciones no producirían un torque uniforme, pero trabajando juntas se obtiene un sistema de UNITORQUE que produce una reducción del torque máximo requerido hasta en un 40%.

Debido a que se reduce la aceleración de las varillas al comienzo de la carrera ascendente, se logra reducir aproximadamente un 10% la carga máxima en el varillón.

IV - ANALISIS DE LAS ECUACIONES MATEMATICAS USADAS.

El diseñador debe comprender que hay un número de condiciones inusuales las cuales pueden estar presentes en un pozo que pueden causar conclusiones engañosas de estos cálculos de diseño. Algunas de estas condiciones inusuales son :

- a. Huecos inclinados ó torcidos.
- b. Flúido muy viscoso.
- c. Excesiva producción de arena.
- d. Excesiva producción de gas a través de la bomba.
- e. Pozos fluyentes.

Para mejor entendimiento de las fórmulas utilizadas en la solución de problemas de bombeo mecánico, se da como referencia la siguiente figura en donde se ilustran las variables : F_0 , F_1 , F_2 , Wrf . y S . (Ver Fig. 4).

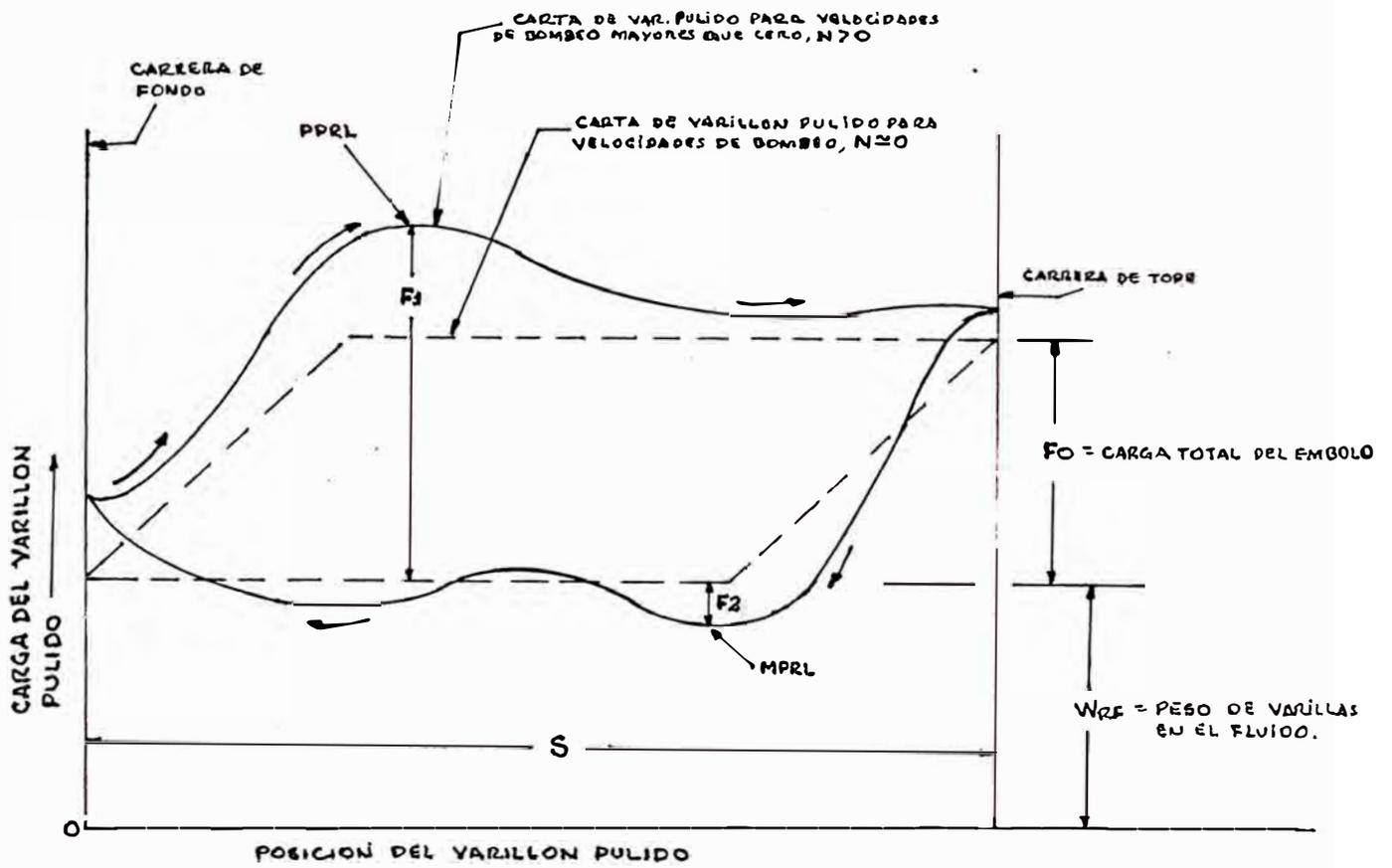


FIG. 4 CARTA DINAMOMETRICA BASICA

a) En velocidad de bombeo $N = 0$

$$PPRL = WRF + F_0$$

$$MPRL = WRF.$$

b) Para velocidad de bombeo $N \neq 0$

$$PPRL = WRF + F_1.$$

$$MPRL = WRF - F_2.$$

El problema se ha generalizado usando parámetros de variables que son adimensionales.

a. Las variables adimensionales independientes son :

$$N/N_0 \quad (\text{Dimensionalmente} = \text{SPM}/\text{SPM} = 1)$$
$$F_0/SKR \quad (\text{Dimensionalmente} = \frac{\text{libras}}{\text{pulg.} \times \text{libras}/\text{pulg.}} = 1)$$

donde : $N = \text{SPM}$.

$N_0 = \text{SPM}$ en frecuencia natural de sarta de varillas

$S = \text{Carrera en superficie}$

$KR = \text{Constante de resorte de sarta de varillas.}$

b. Las variables adimensionales dependientes son :

Carga máxima varillón pulido, $PPRL$: $F_1/SKR.$

Carga mínima varillón pulido, $MPRL$: $F_2/SKR.$

Torque máximo, PT : $2T/S^2 KR.$

Potencia en el varillón pulido, $PRHP$: $F_3/SKR.$

Carrera del émbolo, SP : $SP/S.$

Generalmente las fórmulas dadas en este método han sido obtenidas en simulaciones hechas en un computador analógico e léctronico y también basados en la experiencia de campo.

La corrida del computador fué hecha por muchas combinaciones de N/N_o y F_o/SKR midiéndose las variables adimensionales dependientes en cada prueba. Los resultados de las pruebas fueron correlacionadas y ploteando se obtuvo familias de curvas que se muestran en las figuras A-1 hasta A-5 del apendice. De estas curvas obtenemos los valores de las variables adimensionales para ser sustituidas en las siguientes fórmulas de cálculo de diseño

CARRERA DEL EMBOLO

$$SP = \left[(SP/S) \times S \right] - \left[F_o \times 1/KT \right]$$

Nota : Cuando la tubería está anclada, el valor de $1/KT$ es cero.

DESPLAZAMIENTO DE LA BOMBA :

$$PD = 0.1166 \times SP \times N \times D^2$$

CARGA MAXIMA DEL VARILLON PULIDO :

$$PPRL = WRF + \left[(F_1/SKR) \times SKR \right]$$

CARGA MINIMA DEL VARILLON PULIDO :

$$MPRL = WRF - \left[(F_2/SKR) \times SKR \right]$$

TORQUE MAXIMO :

$$PT = (2T/S^2 KR) \times SKR \times S/2 \times Ta.$$

POTENCIA EN EL VARILLON PULIDO :

$$PRHP = (F_3/SKR) \times SKR \times S \times N \times 2.53 \times 10^{-6}$$

CONTRAPESO REQUERIDO :

$$CBE = 1.06 (WRF + 1/2 F_o).$$

Anteriormente se ha estado haciendo simplificaciones en los métodos para predecir comportamiento del sistema de varillas como un resultado de dificultades matemáticas y carecer de computadoras para manipular la gran cantidad de cálculos requeridos para describir rendimiento de bombeo con exactitud.

En el presente método, el sistema de bombeo de varillas fué simulado por un computador analógico electrónico. Se hicieron numerosas corridas representando un amplio rango de condiciones. Estas corridas fueron correlacionadas en la base de dos parámetros adimensionales. Estos parámetros son N/N_0 (velocidad de bombeo adimensional) y F_0/SKR (estiramiento de varillas). El uso de estos parámetros adimensionales - permite una serie completa de condiciones de bombeo de varillas para ser correlacionadas sin tener que correr un número infinito de casos. En el análisis de varillas está incluido el efecto de ondas de fuerza viajando dentro de la varilla, porque se está considerando, como es en realidad, que la masa de la varilla está distribuída a lo largo de su longitud, y este factor debe ser incorporado dentro de cualquier modelo matemático realista de las varillas.

La razón de la frecuencia de impulsión N (la velocidad de bombeo) a la frecuencia natural desamortiguada de la sarta de varillas, N_0 , es un índice muy importante del comportamiento de la sarta de varillas.

La frecuencia natural desamortiguada se demuestra en la teoría de vibración por ser inversamente proporcional al tiempo requerido por una onda de fuerza para hacer cuatro viajes de largo de la varilla.

Por lo tanto la frecuencia natural desamortiguada esta dada por :

$$N_0 = \frac{Fca}{4L}$$

donde : Fc = Constante de proporcionalidad

a = Velocidad del sonido en el acero

L = Longitud de la sarta

Para sarta de varillas no ahusadas, Fc es igual a 1. La frecuencia natural de una sarta de varillas ahusadas es mayor que la de una sarta uniforme de igual longitud. Por lo tanto para sarta ahusadas, Fc tiene un valor mayor que la unidad. Dividiendo entre N, é invirtiendo adecuadamente la fórmula anterior se tiene :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{4NL}{Fca}$$

En la práctica, se ha encontrado que "a" es igual de alrededor de 16,300 pies/sig.

$$\frac{N}{N_0} = \frac{NL}{245,000 Fc}$$

Otros parámetros adimensionales de importancia en describir el comportamiento de la sarta de varillas es el adimensional estiramiento de varillas, Fo/SKR. En este parámetro, la

constante del resorte, KR, está involucrada. Para sartas de varillas no ahusadas, está evaluada por la relación :

$$KR = \frac{EA}{L}$$

Para sartas de varillas ahusadas, la constante del resorte es calculada por :

$$\frac{1}{KR} = \frac{1}{E} \left[\frac{L_1}{A_1} + \frac{L_2}{A_2} + \dots \right]$$

El término completo, Fo/SKR da el estiramiento de varillas causado por aplicación estática de la carga de fluido como un porcentaje de la carrera del varillón pulido. Por ejemplo:

$$\frac{F_o}{SKR} = 0.1$$

Significa que el estiramiento de varillas es 10% de la carrera del varillón pulido cuando la carga de fluido es estáticamente aplicada.

Las cartas (Apéndice) son usadas para determinar los parámetros dependientes. Tres fuerzas de particular importancia son determinadas de las cartas :

- F1 : Es la carga de fluido más el efecto dinámico máximo en la carrera ascendente.
- F2 : Es el efecto dinámico durante la carrera descendente arrebatado de la carga en el varillón pulido.

F3 : Es una fuerza la cual da potencia cuando es aplicada a la longitud de carrera total en la velocidad de bombeo de la unidad.

En el caso de torque, la cantidad de carga de varillas, es importante en la determinación del torque involucrado en la unidad. Todos los valores de torque fueron calculados usando una carga de varillas de :

$$\frac{WRF}{SKR} = 0.3$$

Si se usa una carga de varillas diferente de este valor, debe hacerse una corrección como se muestra en la fig. A-6.

V - PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Como ya se ha mencionado, este diseño está basado basicamente en el API-RP11L. Algunas de las fórmulas para cálculos se han modificado con un criterio práctico, como ya se explicará luego.

En el gráfico 5, se muestra una hoja de cálculos del API-RP 11L, en la fig. 6 una hoja de cálculos dadas por LUFKIN y en la fig. 7 tenemos la hoja de cálculo modificada del API-RP11L y la cual se usará para los fines del presente texto y se recomienda su uso para Petroperú.

La solución final para este problema de diseño se logra a través de métodos de ensayo. Generalmente se requieren tres etapas para diseñar una instalación.

DESIGN CALCULATIONS

for

CONVENTIONAL SUCKER ROD PUMPING SYSTEMS

Refer to API RP 11L for the explanation of this form and the necessary tables and figures required for this calculation.

Well Name _____ Date _____

County _____ State _____

Displacement, PD _____ bbls./day Maximum Allowable Rod Stress _____ psi

Well Depth, H = _____ ft. Pumping Speed, N = _____ SPM Plunger Diameter, D = _____ in.

Stroke Length, L = _____ ft. Length of Stroke, S = _____ in. Spec. Grav. of Fluid, G = _____

Rod Size _____ in. Is it anchored? Yes, No Sucker Rods _____

Factors from Tables 1 & 2:

1. $F_c =$ _____ (Table 4.1, Column 3)

3. $F_c =$ _____ (Table 4.1, Column 5)

2. $E_t =$ _____ (Table 4.1, Column 4)

4. $E_t =$ _____ (Table 4.2, Column 5)

Non-Dimensional Variables:

1. $W = .340 \times G \times D^2 \times H = .340 \times$ _____ \times _____ \times _____ = _____ lbs.

2. $F_0 = E_r \times L =$ _____ \times _____ = _____ in/lb. 9. $N/N_o = NL \div 245,000 =$ _____ \times _____ $\div 245,000 =$ _____

3. $F_1 = S \div 1/k_r =$ _____ \div _____ = _____ lbs.

10. $N/N_o' = N/N_o \div F_c =$ _____ \div _____ = _____

4. $Sk_r =$ _____ \div _____ = _____

11. $1/k_t = E_t \times L =$ _____ \times _____ = _____ in/lb.

Substitution and PD:

12. $S =$ _____ (Figure 4.1)

13. $F_2 = [(S_p/S) \times S] - [F_0 \times 1/k_t] = [$ _____ \times _____ $] - [$ _____ \times _____ $] =$ _____ in.

14. $PD = 0.1166 \times S_p \times N \times D^2 = 0.1166 \times$ _____ \times _____ \times _____ = _____ barrels per day

If calculated pump displacement is unsatisfactory make appropriate adjustments in assumed data and repeat steps 1 through 14.

Non-Dimensional Parameters:

15. $W_r = W_r \times L =$ _____ \times _____ = _____ lbs.

17. $W_{rt}/Sk_r =$ _____ \div _____ = _____

16. $W = W[1 - (.128G)] =$ _____ $[1 - (.128 \times$ _____ $)] =$ _____ lbs.

Non-Dimensional Factors from Figures 4.2 through 4.6:

18. $F_1/Sk_r =$ _____ (Figure 4.2)

20. $2T/S^2k_r =$ _____ (Figure 4.4)

19. $F_2/Sk_r =$ _____ (Figure 4.3)

21. $F_3/Sk_r =$ _____ (Figure 4.5)

22. $T_a =$ _____ (Figure 4.6)

Operating Characteristics:

1. $PRL = W_{rt} + [(F_1/Sk_r) \times Sk_r] =$ _____ $+ [$ _____ \times _____ $] =$ _____ lbs.

2. $PRL = W_{rt} - [(F_2/Sk_r) \times Sk_r] =$ _____ $- [$ _____ \times _____ $] =$ _____ lbs.

3. $F' = (2T/S^2k_r) \times Sk_r \times S/2 \times T_a =$ _____ \times _____ \times _____ \times _____ = _____ lb inches

4. $HP = (F_3/Sk_r) \times Sk_r \times S \times N \times 2.53 \times 10^{-6} =$ _____ \times _____ \times _____ \times _____ $\times 2.53 \times 10^{-6} =$ _____

5. $BE = 1.06(W_{rt} + 1/2 F_0) = 1.06 \times ($ _____ $+$ _____ $) =$ _____ lbs.

PUMPING UNIT DESIGN CALCULATIONS

Page 1

Well Name: _____

Date: _____

County: _____

State: _____

Production: _____ BBL'S/Day - Fluid Gravity 1.0 Pump Depth 8,650 Ft. - Stroke Length 168 Inches
1 3/4 Inches - Tubing Size: _____ Inches - Rod Size: 86 - Pumping Speed 7.6 SPM

ALL TYPES OF UNITS

$$\begin{aligned} \text{Depth} \times G \times \text{Fluid Load, Table 1} &= \underline{8,650} \times \underline{1.0} \times \underline{1.041} = \underline{9,005} \\ 1000 \times \text{Stroke} \div (\text{Er, Table 2} \times \text{Depth}) &= 1000 \times \underline{168} \div (\underline{1.0007} \times \underline{8,650}) = \underline{27,746} \\ \text{L} &= \underline{9,005} + \underline{27,746} = \underline{0.325} \\ \text{SPM} \times \text{Depth} \div 245000 &= \underline{7.6} \times \underline{8,650} \div 245,000 = \underline{.268} \\ (N/N_0) \div F_e, \text{ Table 2} &= \underline{.268} \div \underline{1.164} = \underline{.230} \\ (100\% \text{ eff.}) = \text{Pump Const. Table 1} \times \text{SPM} \times \text{Stroke} \times \text{SP, Table 3} &= \underline{.357} \times \underline{7.6} \times \underline{168} \times \underline{.771} = \underline{351} \\ \text{Rod Weight, Table 2} \times \text{Depth} \times [1 - (.128 \times G)] &= \underline{2.185} \times \underline{8,650} \times [1 - (.128 \times \underline{1})] = \underline{16,481} \\ R &= \underline{16,481} \div \underline{27,746} = \underline{.594} \\ \text{WRF} + [\%, \text{ Table 7} \times (\frac{\text{WRF}}{\text{SKR}} - .3) \times 10] &= 1 + [\underline{-.0075} \times (\underline{.594} - .3) \times 10] = \underline{.978} \end{aligned}$$

CONVENTIONAL UNITS

$$\begin{aligned} \text{WRF} + (F_1, \text{ Table 4} \times \text{SKR}) &= \underline{16,481} + (\underline{.497} \times \underline{27,746}) = \underline{30,270} \\ \text{WRF} - (F_2, \text{ Table 5} \times \text{SKR}) &= \underline{16,481} - (\underline{.177} \times \underline{27,746}) = \underline{11,570} \\ 1.06 \times (\text{WRF} + \text{Fo}/2) &= 1.06 \times (\underline{16,481} + \frac{\underline{9,005}}{2}) = \underline{22,243} \\ \text{F, Table 6} \times \text{SKR} \times \text{Stroke}/2 \times \text{TA} &= \underline{.348} \times \underline{27,746} \times \underline{84} \times \underline{.978} = \underline{793,200} \\ \text{Pressure} = \text{PPRL} \div \text{Area, Table 8} &= \underline{30,270} \div \underline{.785} = \underline{38,561} \end{aligned}$$

AIR BALANCED UNITS

$$\begin{aligned} \text{WRF} + \text{Fo} + .85 \times (F_1, \text{ Table 4} \times \text{SKR} - \text{Fo}) &= \underline{16,481} + \underline{9,005} + .85 \times (\underline{.497} \times \underline{27,746} - \underline{9,005}) = \underline{29,553} \\ \text{PPRL} - (F_1, \text{ Table 4} + F_2, \text{ Table 5}) \times \text{SKR} &= \underline{29,553} - (\underline{.497} + \underline{.177}) \times \underline{27,746} = \underline{10,852} \\ 1.06 \times (\text{PPRL} + \text{MPRL}) \div 2 &= 1.06 \times (\underline{29,553} + \underline{10,852}) \div 2 = \underline{21,415} \\ \text{F, Table 6} \times \text{SKR} \times \text{Stroke}/2 \times \text{TA} \times .96 &= \underline{.348} \times \underline{27,746} \times \underline{84} \times \underline{.978} \times .96 = \underline{761,500} \\ \text{Pressure} = \text{PPRL} \div \text{Area, Table 8} &= \underline{29,553} \div \underline{.785} = \underline{37,647} \end{aligned}$$

MARK II UNITS

$$\begin{aligned} \text{WRF} + \text{Fo} + .75 \times (F_1, \text{ Table 4} \times \text{SKR} - \text{Fo}) &= \underline{16,481} + \underline{9,005} + .75 \times (\underline{.497} \times \underline{27,746} - \underline{9,005}) = \underline{29,075} \\ \text{PPRL} - (F_1, \text{ Table 4} + F_2, \text{ Table 5}) \times \text{SKR} &= \underline{29,075} - (\underline{.497} + \underline{.177}) \times \underline{27,746} = \underline{10,374} \\ 1.04 \times (\text{PPRL} + 1.25 \times \text{MPRL}) \div 2 &= 1.04 \times (\underline{29,075} + 1.25 \times \underline{10,374}) \div 2 = \underline{21,862} \\ (\text{PPRL} \times .93 - \text{MPRL} \times 1.2) \times \text{Stroke} \div 4 &= (\underline{29,075} \times .93 - \underline{10,374} \times 1.2) \times \underline{168} \div 4 = \underline{612,800} \\ \text{Pressure} = \text{PPRL} \div \text{Area, Table 8} &= \underline{29,075} \div \underline{.785} = \underline{37,038} \end{aligned}$$

CALCULOS DE DISEÑO PARA UNIDADES DE BOMBEO

DISTRITO : _____ POZO N^o _____ RESERVORIO _____ FECHA _____
 Prof. Bomba, D = _____ pies. Velocidad Bombeo, N = _____ SPM. Diámetro Émbolo, DE _____ Pulg.
 Tubing = _____ Pulg. Long.Carrera, S = _____ Pulg. Grav. Esp. fluido. G = _____
 Anclado ? _____ Varillas de succión : _____

1. $F_o = D \times G \times \text{Carga de fluido, tabla A-4} = \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$
2. $SKR = S \div (Er, \text{ tabla A-1} \times D) = \underline{\hspace{2cm}} \div (\underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}}) = \underline{\hspace{2cm}}$
3. $F_o/SKR = \underline{\hspace{2cm}} / \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$
4. $N/No = N \times D \div 245,000 = \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} \div 245,000 = \underline{\hspace{2cm}}$
5. $N/No = N/No \div Fc \underline{\hspace{2cm}} \div \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$
6. $Sp = [(Sp/S), \text{Fig A-1}, \times S] - [F_o \times (Et, \text{ tabla A-2} \times D)] = [\underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}}] - [\underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}}] = \underline{\hspace{2cm}}$
7. $PD = B, \text{ tabla A-4} \times SP \times N = \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$
8. $WRF = WR, \text{ tabla A-1} \times D \times [1 - (0.128G)] = \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} \times [1 - (0.128 \times \underline{\hspace{2cm}})] = \underline{\hspace{2cm}}$
9. $WRF/SKR = \underline{\hspace{2cm}} / \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$
10. $TA = 1 + [\%, \text{ Fig. A-6} \times (WRF/SKR - 0.3) \times 10] = 1 + [\underline{\hspace{2cm}} \times (\underline{\hspace{2cm}} - 0.3) \times 10] = \underline{\hspace{2cm}}$
11. $PPRL = WRF + (F1/SKR, \text{Fig A-2} \times SKR) = \underline{\hspace{2cm}} + (\underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}}) = \underline{\hspace{2cm}}$
12. $\text{Esfuerzo de Varillas} = PPRL \div \text{Area, tabla A-3} \underline{\hspace{2cm}} \div \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$
13. $MPRL = WRF - (F2/SKR, \text{Fig. A-3} \times SKR) = \underline{\hspace{2cm}} - (\underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}}) = \underline{\hspace{2cm}}$
14. $PT = 2T/S^2 KR, \text{ Fig A-4} \times SKR \times S/2 \times TA = \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$
15. $CBE = 1.06 (WRF + F_o/2) = 1.06 (\underline{\hspace{2cm}} + \underline{\hspace{2cm}}) = \underline{\hspace{2cm}}$
16. $PRHP = F3/SKR, \text{ Fig A-5} \times SKR \times S \times N \times 2.53 \times 10^{-6} = \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} \times \underline{\hspace{2cm}} \times 2.53 \times 10^{-6} = \underline{\hspace{2cm}}$

FIG. 7

a) Debe hacerse una selección preliminar de componentes para la instalación.

b) Las características de operación de la selección preliminar son calculadas para uso de las fórmulas, tablas y figuras presentadas aquí.

c) El desplazamiento de la bomba calculado y cargas son comparados con los volúmenes, regímenes de carga, esfuerzos y otras limitaciones de la selección primaria.

Se requiere una cantidad mínima de información, la cual debe conocerse (o asumirse) para una instalación de bombeo en particular. Los cálculos de diseño deben incluir :

- NIVEL DE FLUIDO-H, Altura en pies.
- PROFUNDIDAD DE LA BOMBA-L, pies.
- VELOCIDAD DE BOMBEO-N, carreras por minuto.
- LONGITUD DE CARRERA EN SUPERFICIE-S, pulg.
- DIAMETRO EMBOLO BOMBA-D, pulg.
- GRAVEDAD ESPECIFICA DEL FLUIDO-G.
- EL DIAMTRO NOMINAL DEL TUBING y si está anclado ó colgando libre.
- TAMAÑO DE VARILLAS Y DISEÑO.

Con estos factores el ingeniero estará apto para calcular lo siguiente :

- CARRERA DEL EMBOLO - Sp, pulg.
- DESPLAZAMIENTO DE LA BOMBA-PD, barriles por día, BPD.
- CARGA MAXIMA VARILLON PULIDO-PPRL, lb.

- CARGA MINIMA VARILLON PULIDO-MPRL, lb.
- TORQUE MAXIMO DE LA MANIVELA (crank)-PT, pulg-lb.
- POTENCIA EN VARILLON PULIDO-PRHP.
- CONTRAPESO REQUERIDO-CBE, lb.

Reunir los factores conocidos (ó asumidos) en la hoja de diseño para efectuar los cálculos convenientes. Referente a la tabla A-1, usar la designación de sarta de varillas en la columna 1 y el diámetro del émbolo en la columna 2 como guías, leer y registrar los valores para W_r , E_r y F_c . encontrados en columnas 3, 4 y 5 respectivamente. La tabla A-2 columna 5 da el valor de E_t . Este valor es significativo sólo cuando se trabaja con una sarta de tubos no anclada. Si los tubos están anclados, E_t no necesita ser registrado.

Para los cálculos en paso 1 hay que referirse a la tabla A-4 para encontrar carga de flúido. Seguir realizando las operaciones matemáticas indicadas hasta el paso 7. Si el tubing está anclado, $1/K_t$ es igual a cero y no necesita ser calculado.

El desplazamiento de la bomba es la primera prueba que se hace para ver si la selección preliminar de componentes para la instalación es satisfactoria. Si el desplazamiento de la bomba calculado en paso 14 no es adecuado, para satisfacer requerimientos conocidos ó anticipados, deben hacerse ajustes apropiados en los datos asumidos en los pasos 1 a 7.

Cuando el desplazamiento de la bomba es aceptable proseguir

con los siguientes pasos :

La sustitución de los valores apropiados en las diferentes fórmulas y realizando los cálculos indicados obtendremos las diferentes cargas esperadas de la selección preliminar de equipo. Finalmente deben compararse estas cargas calculadas con limitaciones impuestas por la selección preliminar. Calcular los esfuerzos de las varillas para determinar si están dentro de los límites aceptables.

SEGUNDA PARTE

I - INTRODUCCION

Como en todas las ramas de la ingeniería y otras ciencias, las computadoras están sirviendo de gran ayuda para la solución de infinidad de problemas. Existen diversas marcas y modelos con diferentes capacidades de memoria y también tenemos diferentes "lenguajes" de máquina según la marca.

En Ingeniería de Petróleo también hacemos uso de las computadoras sobre todo en el diseño de métodos de cálculo.

Ultimamente han hecho su aparición las minicomputadoras ó computadoras de mano, en las cuales también hay diferentes marcas con diferentes capacidades de memoria y diferente cantidad de funciones. Algunas minicomputadoras pueden ampliar su capacidad de memoria insertándoseles módulos especiales para tal fin.

En el presente trabajo se ha hecho uso de la minicomputadora de la marca HEWLETT-PACKARD, modelo HP-41CV, del tipo ALFANUMERICA. Es una computadora muy versátil y de gran capacidad de memoria. (319 registros de memoria). Su amplia capacidad ha hecho posible la elaboración del programa para el diseño de Bombeo Mecánico. Se da en esta parte una breve descripción de la computadora y luego el diagrama de flujo. Finalmente se esboza la forma como se ejecuta el programa para obtener el diseño deseado.

II - BREVE DESCRIPCION DE LA HP-41CV

La calculadora HP-41CV representa un concepto totalmente nuevo en el diseño de calculadoras. Debido a sus características, estas calculadoras pueden ser designadas como un sistema personal de computación.

La HP-41CV es una computadora alfanumérica. Consta de cuatro receptáculos estandar que le permiten usar módulos de aplicación, periféricos y módulos de memoria en cualquier combinación.

Si se necesita una función que no se encuentra en la calculadora, se cuenta con la posibilidad de escribir un programa que pueda satisfacer esa necesidad especial. Estos programas especiales, así como todos los programas que se escriban, pueden ser transferidos al teclado, mediante un nombre y ejecutados como cualquiera de las funciones standard, pulsando una sola tecla.

La HP-41CV viene con 319 registros de almacenamiento ó 319 registros de memoria de programa (hasta 2000 líneas). Se puede definir la combinación de registros de almacenamiento de datos y registros de memoria de programa que se desee.

El sistema lógico de la HP-41-CV con el cual se puede ingresar los números libres de paréntesis, se llama RPN. (Reverse Polish Notatio - Notación Polaca Inversa).

El sistema RPN ofrece las siguientes ventajas :

- Opera con una sola función por vez. La HP-41CV, disminuye la extensión del problema.

- Las funciones se ejecutan inmediatamente. Se opera naturalmente a través de problemas complicados, con pulsaciones de teclas y menor pérdida de tiempo.

- Los resultados intermedios aparecen a medida que son calculados. No hay cálculos "ocultos" y se puede controlar cada paso a medida que se avanza.

- Los resultados intermedios son manejados automáticamente. Cuando se resuelve un problema no es necesario escribir largas respuestas intermedias.

- Se puede efectuar los cálculos de la misma manera que se haría con lápiz y papel.

- En los cálculos no es necesario preocuparse por los paréntesis; el RPN elimina la necesidad de ingresar paréntesis.

III - DESCRIPCION DEL PROGRAMA Y DIAGRAMA DE FLUJO

El programa de diseño para la HP-41CV está basado en la hoja de "CALCULOS DE DISEÑO PARA UNIDADES DE BOMBEO", mostrada en la primera parte.

Se comienza el programa con la identificación para la computadora, con lo cual se le "llamará" cuando lo requiramos para hacer un diseño. En este caso la identificación que hemos adoptado es BMEC. (Según instrucciones de programación de la HP-41C). Seguidamente, si se desea, podemos dar el título del diseño, como en este caso lo hemos titulado "BOMB MEC RP11L". (la computadora acepta como máximo 24 caracteres por línea).

Seguimos con la introducción de los datos preliminares, tales como : profundidad de la bomba, velocidad, longitud de carrera, etc. Asimismo, también en el programa vamos dando instrucciones para la presentación en pantalla (e impresor) de estos datos.

En la línea 78 preguntamos por el primer condicional, en este caso, si la tubería está anclada ó no. Si no esta anclada el problema se resuelve de la manera prevista para esta condición, de lo contrario con una instrucción GO TO, se deriva la secuencia de solución para la forma de la otra condición. Otro condicional se presenta en la línea 221

cuando preguntamos si el esfuerzo de varillas que estamos calculando excede ó no al esfuerzo de varillas real.(dato).

Como se puede apreciar en la fig. 8, en la cual se da el listado del programa, la secuencia que sigue es idéntica a como si estuviéramos resolviendo a mano la hoja de cálculos mostrada en la primera parte. Este es pues la gran ventaja de esta minicomputadora en la solución de problemas de ingeniería.

Para la mejor visualización y cuando no se tiene mucha experiencia en la programación, es preferible hacer un diagrama de flujo, tal como se muestra en la fig. # 9. Aquí podemos apreciar la secuencia del programa y de los condicionales con mayor facilidad y así de esta manera hacer un mejor programa, el cual se caracterizará mejor cuando menos instrucciones ó líneas tenga.

FIG.8. LISTADO POR LINEA DEL PROGRAMA "BMEC"

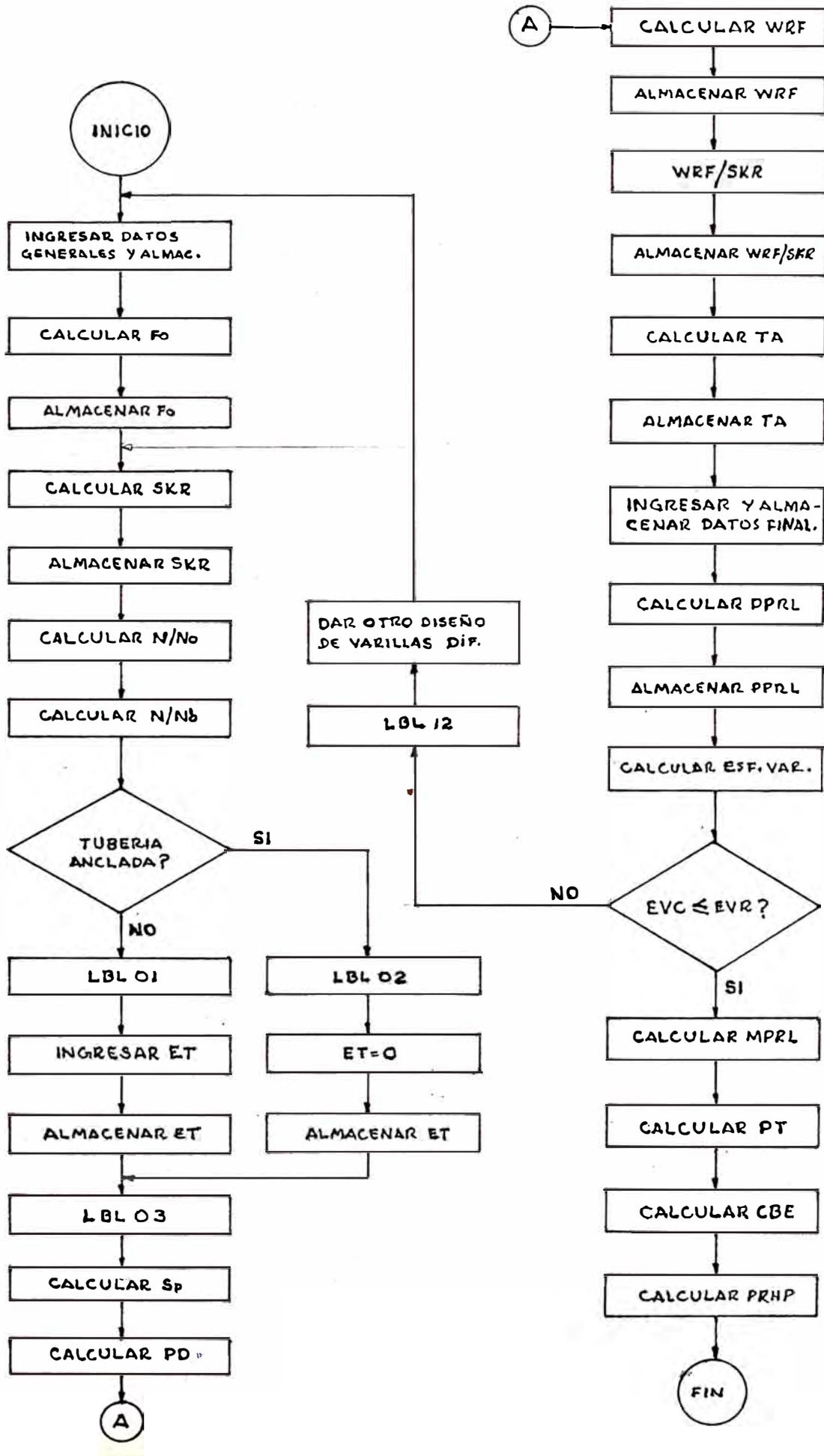
```
01+LBL "BMEC"  
02 "BARRA MEC DEJ"  
03 "E PP 11 L"  
04 QVIEW  
05 FIX 0  
06 "P070"  
07 PROMPT  
08 "P001"  
09 PROMPT  
10 FIX 4  
11 "D<FT>?"  
12 PROMPT  
13 STO 01  
14 "N<SPM>?"  
15 PROMPT  
16 STO 02  
17 "S<PG>?"  
18 PROMPT  
19 STO 03  
20 "DE<PG>?"  
21 PROMPT  
22 "C?"  
23 PROMPT  
24 STO 04  
25 "TIR<PG>?"  
26 PROMPT  
27 "ANCL? NO=0 SI=1"  
28 QVIEW  
29 PSE  
30 "ANCLAD00?"  
31 PROMPT  
32 STO 05  
33 "VARILLAS? Y %"  
34 QRCI X  
35 QVIEW  
36 "a?"  
37 PROMPT  
38 RCL 01  
39 *  
40 QRCI X  
41 QVIEW  
42 PSE  
43 "b?"  
44 PROMPT  
45 RCL 01  
46 *  
47 QRCI X  
48 QVIEW  
49 PSE  
50 "c?"  
51 PROMPT  
52 QCI 01  
53 *  
54 QRCI X  
55 QVIEW  
56 PSE  
57 "d?"  
58 PROMPT  
59 RCL 01  
60 *  
61 QRCI X  
62 QVIEW  
63 PSE  
64 "TABLA 01"  
65 QVIEW  
66 PSE  
67 PSE  
68 "UP?"  
69 PROMPT  
70 STO 06  
71 "E9?"  
72 PROMPT  
73 STO 07  
74 "FC?"  
75 PROMPT  
76 STO 08  
77 RCL 05  
78 X=0?  
79 GTO 01  
80 GTO 02  
81+LBL 01  
82 "TABLA 02"  
83 QVIEW  
84 PSE  
85 PSE  
86 "ET?"  
87 PROMPT  
88 STO 09  
89 GTO 03  
90+LBL 02  
91 0  
92 STO 09  
93+LBL 03  
94 RCL 01  
95 RCL 04  
96 *
```

101 RCL 03
102 RCL 07
103 RCL 01
104 *
105 /
106 STO 11
107 RCL 10
108 RCL 11
109 /
110 "F0/SKR="
111 ARCL Y
112 AVIEW
113 PSE
114 PSE
115 STO 12
116 RCL 01
117 RCL 02
118 *
119 245000
120 /
121 "N/NO="
122 ARCL Y
123 AVIEW
124 PSE
125 PSE
126 RCL 00
127 /
128 "N/NOP="
129 ARCL Y
130 AVIEW
131 PSE
132 PSE
133 "SP/S?FIG 01"
134 PROMPT
135 RCL 02
136 *
137 RCL 10
138 RCL 09
139 *
140 RCL 01
141 *
142 -
143 "R? TAR 04"
144 PROMPT
145 *
146 RCL 02
147 *
148 "PD(RPD)="
149 ARCL Y
150 AVIEW

151 PSE
152 PSE
153 RCL 06
154 RCL 01
155 *
156 /
157 ENTER+
158 .128
159 RCL 04
160 *
161 -
162 *
163 STO 13
164 RCL 13
165 RCL 11
166 /
167 STO 14
168 "% FIG 05"
169 PROMPT
170 10
171 *
172 RCL 14
173 .3
174 -
175 *
176 100
177 /
178 1
179 +
180 STO 15
181 "FIG 02-05"
182 AVIEW
183 PSE
184 PSE
185 "F1/SKR?FIG 02"
186 PROMPT
187 STO 16
188 "F2/SKR? FIG 03"
189 PROMPT
190 STO 17
191 "2T/S+2KR FIG 04"
192 PROMPT
193 STO 18
194 "F3/SKR? FIG 05"
195 PROMPT
196 STO 19
197 RCL 16
198 RCL 11
199 *
200 RCL 13

```
201 +
202 "PPRL(LB)="
203 ARCL X
204 QVIEW
205 PSE
206 PSE
207 STO 20
208 "EV REQL?"
209 PROMPT
210 STO 21
211 RCL 20
212 "APPA? TAB Q3"
213 PROMPT
214 /
215 "EV CAL(PST)="
216 ARCL X
217 QVIEW
218 STO Y
219 RCL 21
220 STO Y
221 X<=Y?
222 GTO 11
223 GTO 12
224+LBL 11
225 RCL 13
226 RCL 17
227 RCL 11
228 *
229 -
230 "MPRL(LB)="
231 ARCL X
232 QVIEW
233 RCL 18
234 RCL 11
235 *
236 RCL 03
237 ?
238 /
239 *
240 RCL 15
241 *
242 "PT(LBAG)="
243 ARCL X
244 QVIEW
245 RCL 13
246 RCL 10
247 ?
248 /
249 +
250 1.06
251 *
252 "CRF(LB)"
253 ARCL Y
254 QVIEW
255 RCL 19
256 RCL 11
257 *
258 RCL 03
259 *
260 RCL 02
261 *
262 2.53 E-06
263 *
264 "PRHP="
265 ARCL Y
266 QVIEW
267 PSE
268 PSE
269+LBL 12
270 "VA CAL EXC REQL"
271 "CAMP DIS VAP"
272 "FIN"
273 QVIEW
274 "REWS"
275 QVIEW
276 END
```

FIG. 9 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA "BMEC"



IV - EJECUCION DEL PROGRAMA

Para ejecutar un programa, como es lógico, hay que "cargarlo" previamente en la memoria de la computadora. La carga de la memoria con un programa se inicia con la instrucción GO TO., la cual hace que la memoria de programa se coloque en el inicio de la memoria libre para programa. Esto quiere decir por ejemplo que si no se ha grabado ningún programa previo, la memoria de programa presentará el inicio de la memoria si ya hay programas previos al que queremos cargar, la memoria de programa se coloca inmediatamente después del último programa grabado. Seguidamente, se inicia la programación con la instrucción LBL y un título para nuestro programa, se continúa la carga de este de acuerdo a instrucciones de manejo de la HP-41C.

Una vez cargado el programa estamos listos ya para resolver cualquier problema de diseño de unidades de bombeo. Para esto procedemos de la siguiente manera y para nuestro caso, el nombre de llamada de nuestro programa es "BMEC".:

- 1.- Presionamos la tecla de instrucción XEQ.
- 2.- Presionamos la tecla de modo alfabético.
- 3.- Damos el nombre de llamada del programa "BMEC" (presionando las teclas como en una máquina de escribir).
- 4.- Presionamos nuevamente la tecla de modo alfabético. Con esto la computadora comienza a "correr" el

programa, presentando primero el título de éste y luego pide el primer dato, en éste caso es D ?, la profundidad de la bomba.

- 5.- Se dá el dato que pide la computadora, presionando las teclas de números como en cualquier calculadora normal.
- 6.- Seguidamente se presiona la tecla de avance R/S. Con esto la computadora sigue corriendo el programa y se detiene para preguntar el siguiente dato.
- 7.- Se repiten los pasos 5 y 6 y así sucesivamente hasta la finalización del programa en que obtenemos los resultados finales que necesitamos para catalogar una unidad de bombeo. Estos resultados finales son pues : PPRL, MPRL, PT, CBE y PRHP.

El programa se ha confeccionado de tal manera que cuando la computadora pide un dato, presenta en la pantalla el número de la tabla ó gráfico donde se encuentra éste, evitándose así perdida de tiempo en la elaboración del diseño en sí.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- API RECOMMENDED PRACTICE FOR DESIGN CALCULATIONS FOR SUCKER ROD PUMPING SYSTEMS (API RP 11L) THIRD EDITION, (MARZO 1979).
- 2.- B.C. CRAFT, W.R. HOLDEN Y E.D. GRAVES, Jr., "WELL DESIGN : DRILLING AND PRODUCTION"
- 3.- T.E.W. NIND, "PRINCIPLES OF OIL WELL PRODUCTION"
- 4.- "LUFKIN EQUIPMENT"
- 5.- SARGENT INDUSTRIES - "OIL WELL EQUIPMENT DIVISION"
- 6.- HEWLETT-PACKARD, "MANUAL Y GUIA DE PROGRAMACION"

TABLA A-1
DATOS DE VARILLAS Y BOMBA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
VAR. No.	DIAM EMBOLO PULG. DE	PESO VAR. LB. POR FT Hr.	CONSTANTE ELASTICA PULG. POR LB FT Er.	FACTOR DE FRECUENCIA Fc.	SARTA DE VARILLAS, % DE CADA TAMAÑO					
					1-1/8	1	7/8	3/4	5/8	1/2
44	A11	0.726	1.990 x 10 ⁻⁶	1.000	....	....	....	....	....	100.0
54	1.06	0.908	1.668 x 10 ⁻⁶	1.138	....	....	....	....	44.6	55.4
54	1.25	0.929	1.633 x 10 ⁻⁶	1.140	....	....	....	....	49.5	50.5
54	1.50	0.957	1.584 x 10 ⁻⁶	1.137	....	....	....	....	56.4	43.6
54	1.75	0.990	1.525 x 10 ⁻⁶	1.122	....	....	....	....	64.6	35.4
54	2.00	1.027	1.460 x 10 ⁻⁶	1.095	....	....	....	....	73.7	26.3
54	2.25	1.067	1.391 x 10 ⁻⁶	1.061	....	....	....	....	83.4	16.6
54	2.50	1.108	1.318 x 10 ⁻⁶	1.023	....	....	....	....	93.5	6.5
55	A11	1.135	1.270 x 10 ⁻⁶	1.000	....	....	....	....	100.0	....
64	1.06	1.164	1.382 x 10 ⁻⁶	1.229	....	....	....	33.3	33.1	33.5
64	1.25	1.211	1.319 x 10 ⁻⁶	1.215	....	....	....	37.2	35.9	26.9
64	1.50	1.275	1.232 x 10 ⁻⁶	1.184	....	....	....	42.3	40.4	17.3
64	1.75	1.341	1.141 x 10 ⁻⁶	1.145	....	....	....	47.4	45.2	7.4
65	1.06	1.307	1.138 x 10 ⁻⁶	1.098	....	....	....	34.4	65.6	....
65	1.25	1.321	1.127 x 10 ⁻⁶	1.104	....	....	....	37.3	62.7	....
65	1.50	1.343	1.110 x 10 ⁻⁶	1.110	....	....	....	41.8	58.2	....
65	1.75	1.369	1.090 x 10 ⁻⁶	1.114	....	....	....	46.9	53.1	....
65	2.00	1.394	1.070 x 10 ⁻⁶	1.114	....	....	....	52.0	48.0	....
65	2.25	1.426	1.045 x 10 ⁻⁶	1.110	....	....	....	58.4	41.6	....
65	2.50	1.460	1.018 x 10 ⁻⁶	1.099	....	....	....	65.2	34.8	....
65	2.75	1.497	0.990 x 10 ⁻⁶	1.082	....	....	....	72.5	27.5	....
65	3.25	1.574	0.930 x 10 ⁻⁶	1.037	....	....	....	88.1	11.9	....
66	A11	1.634	0.883 x 10 ⁻⁶	1.000	....	....	....	100.0	....	....
75	1.06	1.566	0.997 x 10 ⁻⁶	1.191	....	....	27.0	27.4	45.6	....
75	1.25	1.604	0.973 x 10 ⁻⁶	1.193	....	....	29.4	29.8	40.8	....
75	1.50	1.664	0.935 x 10 ⁻⁶	1.189	....	....	33.3	33.3	33.3	....
75	1.75	1.732	0.892 x 10 ⁻⁶	1.174	....	....	37.8	37.0	25.1	....
75	2.00	1.803	0.847 x 10 ⁻⁶	1.151	....	....	42.4	41.3	16.3	....
75	2.25	1.875	0.801 x 10 ⁻⁶	1.121	....	....	46.9	45.8	7.2	....
76	1.06	1.802	0.816 x 10 ⁻⁶	1.072	....	....	28.5	71.5	....	....
76	1.25	1.814	0.812 x 10 ⁻⁶	1.077	....	....	30.6	69.4	....	....
76	1.50	1.833	0.804 x 10 ⁻⁶	1.082	....	....	33.8	66.2	....	....
76	1.75	1.855	0.795 x 10 ⁻⁶	1.088	....	....	37.5	62.5	....	....
76	2.00	1.880	0.785 x 10 ⁻⁶	1.093	....	....	41.7	58.3	....	....
76	2.25	1.908	0.774 x 10 ⁻⁶	1.096	....	....	46.5	53.5	....	....
76	2.50	1.934	0.764 x 10 ⁻⁶	1.097	....	....	50.8	49.2	....	....
76	2.75	1.967	0.751 x 10 ⁻⁶	1.094	....	....	56.5	43.5	....	....
76	3.25	2.039	0.722 x 10 ⁻⁶	1.078	....	....	68.7	31.3	....	....
76	3.75	2.119	0.690 x 10 ⁻⁶	1.047	....	....	82.3	17.7	....	....
77	A11	2.224	0.649 x 10 ⁻⁶	1.000	....	....	100.0	....	....	....
85	1.06	1.883	0.873 x 10 ⁻⁶	1.261	....	22.2	22.4	22.4	33.0	....
85	1.25	1.943	0.841 x 10 ⁻⁶	1.253	....	23.9	24.2	24.3	27.6	....
85	1.50	2.039	0.791 x 10 ⁻⁶	1.232	....	26.7	27.4	26.8	19.2	....
85	1.75	2.138	0.738 x 10 ⁻⁶	1.201	....	29.6	30.4	29.5	10.5	....

TABLA A.1
DATOS DE VARILLAS Y BOMBA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11						
											VAR. No.	DIAM EMBOLO PULG. DE	PESO VAR. LB. POR FT. Wr.	CONSTANTE ELASTICA PULG. POR LB. FT. Er.	FACTOR DE FRECUENCIA Fc.	SARTA DE VARILLAS		% DE CADA TAMAÑO
											1-1/8	1	7/8	3/4	5/8	1/2
86	1.06	2.058	0.742 x 10 ⁻⁶	1.151	....	22.6	23.0	54.3	....	....				
86	1.25	2.087	0.732 x 10 ⁻⁶	1.156	....	24.3	24.5	51.2	....	....				
86	1.50	2.133	0.717 x 10 ⁻⁶	1.162	....	26.8	27.0	46.3	....	....				
86	1.75	2.185	0.699 x 10 ⁻⁶	1.164	....	29.4	30.0	40.6	....	....				
86	2.00	2.247	0.679 x 10 ⁻⁶	1.161	....	32.8	33.2	33.9	....	....				
86	2.25	2.315	0.656 x 10 ⁻⁶	1.153	....	36.9	36.0	27.1	....	....				
86	2.50	2.385	0.633 x 10 ⁻⁶	1.138	....	40.6	39.7	19.7	....	....				
86	2.75	2.455	0.610 x 10 ⁻⁶	1.119	....	44.5	43.3	12.2	....	....				
87	1.06	2.390	0.612 x 10 ⁻⁶	1.055	....	24.3	75.7	....	....	....			
87	1.25	2.399	0.610 x 10 ⁻⁶	1.058	....	25.7	74.3	....	....	....			
87	1.50	2.413	0.607 x 10 ⁻⁶	1.062	....	27.7	72.3	....	....	....			
87	1.75	2.430	0.603 x 10 ⁻⁶	1.066	....	30.3	69.7	....	....	....			
87	2.00	2.450	0.598 x 10 ⁻⁶	1.071	....	33.2	66.8	....	....	....			
87	2.25	2.472	0.594 x 10 ⁻⁶	1.075	....	36.4	63.6	....	....	....			
87	2.50	2.496	0.588 x 10 ⁻⁶	1.079	....	39.9	60.1	....	....	....			
87	2.75	2.523	0.582 x 10 ⁻⁶	1.082	....	43.9	56.1	....	....	....			
87	3.25	2.575	0.570 x 10 ⁻⁶	1.084	....	51.6	48.4	....	....	....			
87	3.75	2.641	0.556 x 10 ⁻⁶	1.078	....	61.2	38.8	....	....	....			
87	4.75	2.793	0.522 x 10 ⁻⁶	1.038	....	83.6	16.4	....	....	....			
88	A11	2.904	0.497 x 10 ⁻⁶	1.000	....	100.0	....	....	....	....		
96	1.06	2.382	0.670 x 10 ⁻⁶	1.222	19.1	19.2	19.5	42.3	....	....				
96	1.25	2.435	0.655 x 10 ⁻⁶	1.224	20.5	20.5	20.7	38.3	....	....				
96	1.50	2.511	0.633 x 10 ⁻⁶	1.223	22.4	22.5	22.8	32.3	....	....				
96	1.75	2.607	0.606 x 10 ⁻⁶	1.213	24.8	25.1	25.1	25.1	....	....				
96	2.00	2.703	0.578 x 10 ⁻⁶	1.196	27.1	27.9	27.4	17.6	....	....				
96	2.25	2.806	0.549 x 10 ⁻⁶	1.172	29.6	30.7	29.8	9.8	....	....				
97	1.06	2.645	0.568 x 10 ⁻⁶	1.120	19.6	20.0	60.3	....	....	....			
97	1.25	2.670	0.563 x 10 ⁻⁶	1.124	20.8	21.2	58.0	....	....	....			
97	1.50	2.707	0.556 x 10 ⁻⁶	1.131	22.5	23.0	54.5	....	....	....			
97	1.75	2.751	0.548 x 10 ⁻⁶	1.137	24.5	25.0	50.4	....	....	....			
97	2.00	2.801	0.538 x 10 ⁻⁶	1.141	26.8	27.4	45.7	....	....	....			
97	2.25	2.856	0.528 x 10 ⁻⁶	1.143	29.4	30.2	40.4	....	....	....			
97	2.50	2.921	0.515 x 10 ⁻⁶	1.141	32.5	33.1	34.4	....	....	....			
97	2.75	2.989	0.503 x 10 ⁻⁶	1.135	36.1	35.3	28.6	....	....	....			
97	3.25	3.132	0.475 x 10 ⁻⁶	1.111	42.9	41.9	15.2	....	....	....			
98	1.06	3.068	0.475 x 10 ⁻⁶	1.043	21.2	78.8	....	....	....	....		
98	1.25	3.076	0.474 x 10 ⁻⁶	1.045	22.2	77.8	....	....	....	....		
98	1.50	3.089	0.472 x 10 ⁻⁶	1.048	23.8	76.2	....	....	....	....		
98	1.75	3.103	0.470 x 10 ⁻⁶	1.051	25.7	74.3	....	....	....	....		
98	2.00	3.118	0.468 x 10 ⁻⁶	1.055	27.7	72.3	....	....	....	....		
98	2.25	3.137	0.465 x 10 ⁻⁶	1.058	30.1	69.9	....	....	....	....		
98	2.50	3.157	0.463 x 10 ⁻⁶	1.062	32.7	67.3	....	....	....	....		
98	2.75	3.180	0.460 x 10 ⁻⁶	1.066	35.6	64.4	....	....	....	....		
98	3.25	3.231	0.453 x 10 ⁻⁶	1.071	42.2	57.8	....	....	....	....		
98	3.75	3.289	0.445 x 10 ⁻⁶	1.074	49.7	50.3	....	....	....	....		
98	4.75	3.412	0.428 x 10 ⁻⁶	1.064	65.7	34.3	....	....	....	....		
99	A11	3.676	0.393 x 10 ⁻⁶	1.000	100.0	....	....	....	....	....	

TABLA A.1
DATOS DE VARILLAS Y BOMBA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11						
											VAR. No.	DIAM EMBOLLO PULG. DE	PESO VAR. LB POR FT Wr.	CONSTANTE ELASTICA PULG POR LB.FT Er,	FACTOR DE FRECUENCIA Fc.	SARTA DE VARILLAS, % DE CADA TAMAÑO
											1-1/4	1-1/8	1	7/8	3/4	5/8
107	1.06	2.977	0.524 x 10 ⁻⁶	1.184	16.9	16.8	17.1	49.1	.....	.....				
107	1.25	3.019	0.517 x 10 ⁻⁶	1.189	17.9	17.8	18.0	46.3	.....	.....				
107	1.50	3.085	0.506 x 10 ⁻⁶	1.195	19.4	19.2	19.5	41.9	.....	.....				
107	1.75	3.158	0.494 x 10 ⁻⁶	1.197	21.0	21.0	21.2	36.9	.....	.....				
107	2.00	3.238	0.480 x 10 ⁻⁶	1.195	22.7	22.8	23.1	31.4	.....	.....				
107	2.25	3.336	0.464 x 10 ⁻⁶	1.187	25.0	25.0	25.0	25.0	.....	.....				
107	2.50	3.435	0.447 x 10 ⁻⁶	1.174	26.9	27.7	27.1	18.2	.....	.....				
107	2.75	3.537	0.430 x 10 ⁻⁶	1.156	29.1	30.2	29.3	11.3	.....	.....				
108	1.06	3.325	0.447 x 10 ⁻⁶	1.097	17.3	17.8	64.9	.....	.....	.....			
108	1.25	3.345	0.445 x 10 ⁻⁶	1.101	18.1	18.6	63.2	.....	.....	.....			
108	1.50	3.376	0.441 x 10 ⁻⁶	1.106	19.4	19.9	60.7	.....	.....	.....			
108	1.75	3.411	0.437 x 10 ⁻⁶	1.111	20.9	21.4	57.7	.....	.....	.....			
108	2.00	3.452	0.432 x 10 ⁻⁶	1.117	22.6	23.0	54.3	.....	.....	.....			
108	2.25	3.498	0.427 x 10 ⁻⁶	1.121	24.5	25.0	50.5	.....	.....	.....			
108	2.50	3.548	0.421 x 10 ⁻⁶	1.124	26.5	27.2	46.3	.....	.....	.....			
108	2.75	3.603	0.415 x 10 ⁻⁶	1.126	28.7	29.6	41.6	.....	.....	.....			
108	3.25	3.731	0.400 x 10 ⁻⁶	1.123	34.6	33.9	31.6	.....	.....	.....			
108	3.75	3.873	0.383 x 10 ⁻⁶	1.108	40.6	39.5	19.9	.....	.....	.....			
109	1.06	3.839	0.378 x 10 ⁻⁶	1.035	18.9	81.1	.....	.....	.....	.....		
109	1.25	3.845	0.378 x 10 ⁻⁶	1.036	19.6	80.4	.....	.....	.....	.....		
109	1.50	3.855	0.377 x 10 ⁻⁶	1.038	20.7	79.3	.....	.....	.....	.....		
109	1.75	3.867	0.376 x 10 ⁻⁶	1.040	22.1	77.9	.....	.....	.....	.....		
109	2.00	3.880	0.375 x 10 ⁻⁶	1.043	23.7	76.3	.....	.....	.....	.....		
109	2.25	3.896	0.374 x 10 ⁻⁶	1.046	25.4	74.6	.....	.....	.....	.....		
109	2.50	3.911	0.372 x 10 ⁻⁶	1.048	27.2	72.8	.....	.....	.....	.....		
109	2.75	3.930	0.371 x 10 ⁻⁶	1.051	29.4	70.6	.....	.....	.....	.....		
109	3.25	3.971	0.367 x 10 ⁻⁶	1.057	34.2	65.8	.....	.....	.....	.....		
109	3.75	4.020	0.363 x 10 ⁻⁶	1.063	39.9	60.1	.....	.....	.....	.....		
109	4.75	4.120	0.354 x 10 ⁻⁶	1.066	51.5	48.5	.....	.....	.....	.....		

TABLA A-2
DATOS DE TUBERIA

1	2	3	4	5
TAMAÑO DE TUBERIA	DIAMETRO EXTERNO PLG.	DIAMETRO INTERNO PLG.	AREA METAL PLG. ²	CONSTANTE ELASTICA PLG. POR LB FT Et.
1.900	1.900	1.610	0.800	0.500×10^{-6}
2-3/8	2.375	1.995	1.304	0.307×10^{-6}
2-7/8	2.875	2.441	1.812	0.221×10^{-6}
3-1/2	3.500	2.992	2.590	0.154×10^{-6}
4	4.000	3.476	3.077	0.130×10^{-6}
4-1/2	4.500	3.958	3.601	0.111×10^{-6}

TABLA A-3
DATOS DE VARILLAS

1	2	3	4
TAMAÑO VAR	AREA METAL PULG. ²	PESO VAR EN AIRE LB. POR FT Wr.	CONSTANTE ELASTICA PULG. POR LB FT Er.
1/2	0.196	0.72	1.990×10^{-6}
5/8	0.307	1.13	1.270×10^{-6}
3/4	0.442	1.63	0.883×10^{-6}
7/8	0.601	2.22	0.649×10^{-6}
1	0.785	2.90	0.497×10^{-6}
1-1/8	0.994	3.67	0.393×10^{-6}

TABLA A-4
CONSTANTES DE LA BOMBA

1	2	3	4
DIAMETRO EMBOLO PULG. DE	DIAM. EMB. CUADRADO PULG. CUA. DE ²	FACTOR CARGA FLUIDO* 16' POR FT (340 x DE ²)	FACTOR DE LA BOMBA (.1166x DE ²)
1-1/16	1.1289	0.384	0.132
1-1/4	1.5625	0.531	0.182
1-1/2	2.2500	0.765	0.262
1-3/4	3.0625	1.041	0.357
2	4.0000	1.360	0.466
2-1/4	5.0625	1.721	0.590
2-1/2	6.2500	2.125	0.728
2-3/4	7.5625	2.571	0.881
3-3/4	14.0625	4.781	1.640
4-3/4	22.5625	7.671	2.630

* PARA FLUIDOS CON GRAVEDAD ESPEDIFICA DE 1.00

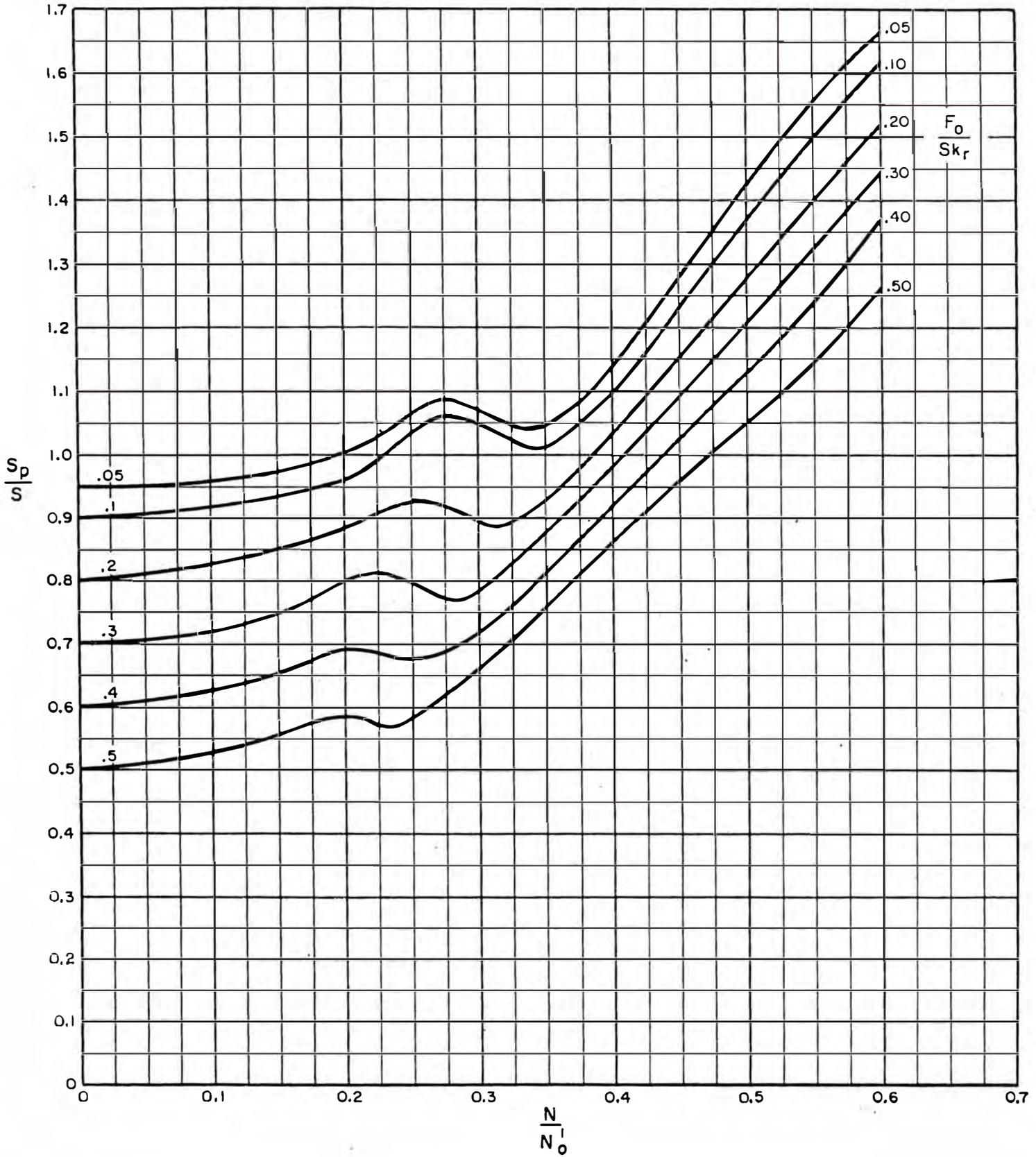


FIGURE 4.1
 $\frac{S_p}{S}$, PLUNGER STROKE FACTOR

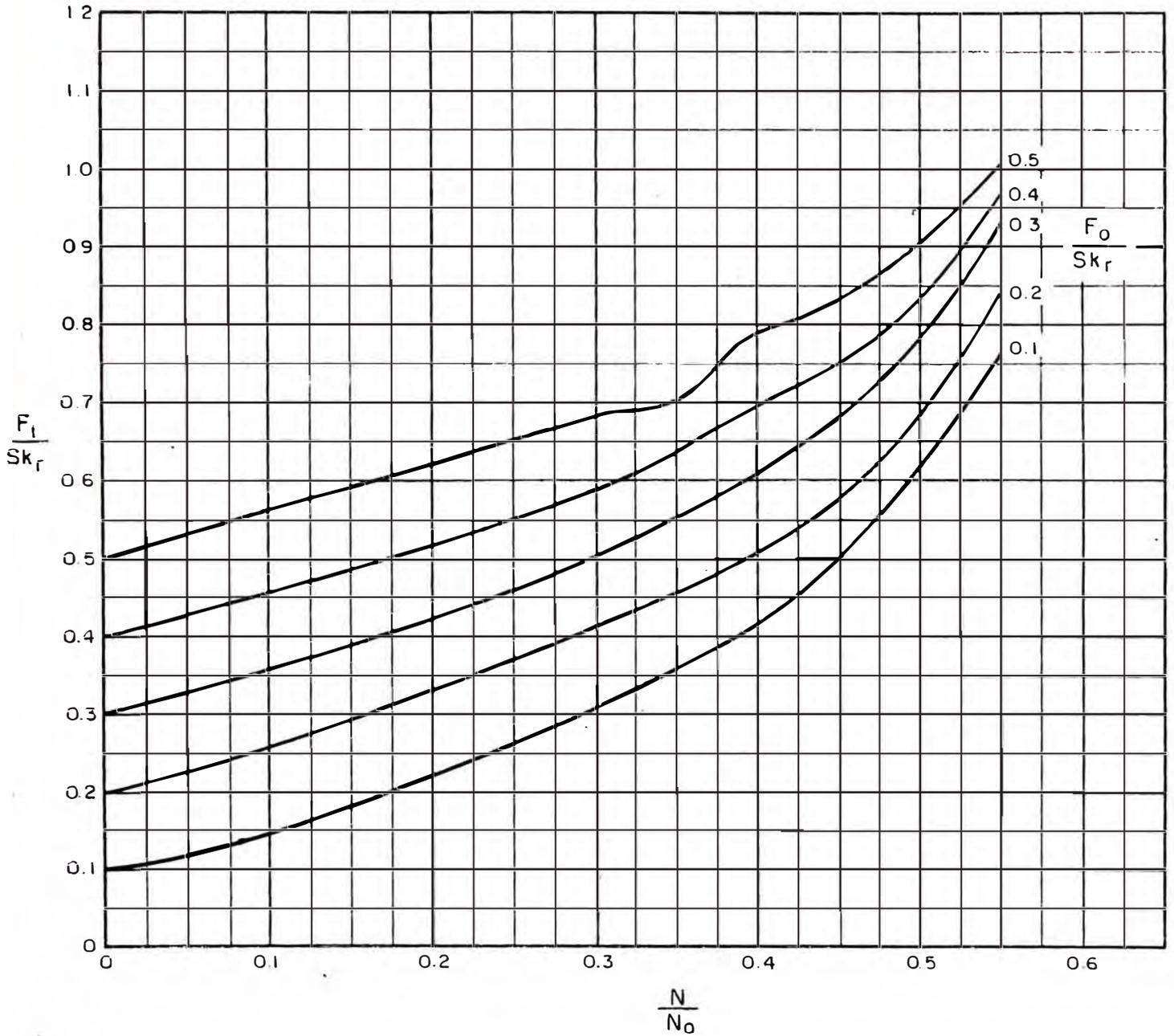


FIGURE A.2

 $\frac{F_1}{Sk_r}$, PEAK POLISHED ROD LOAD

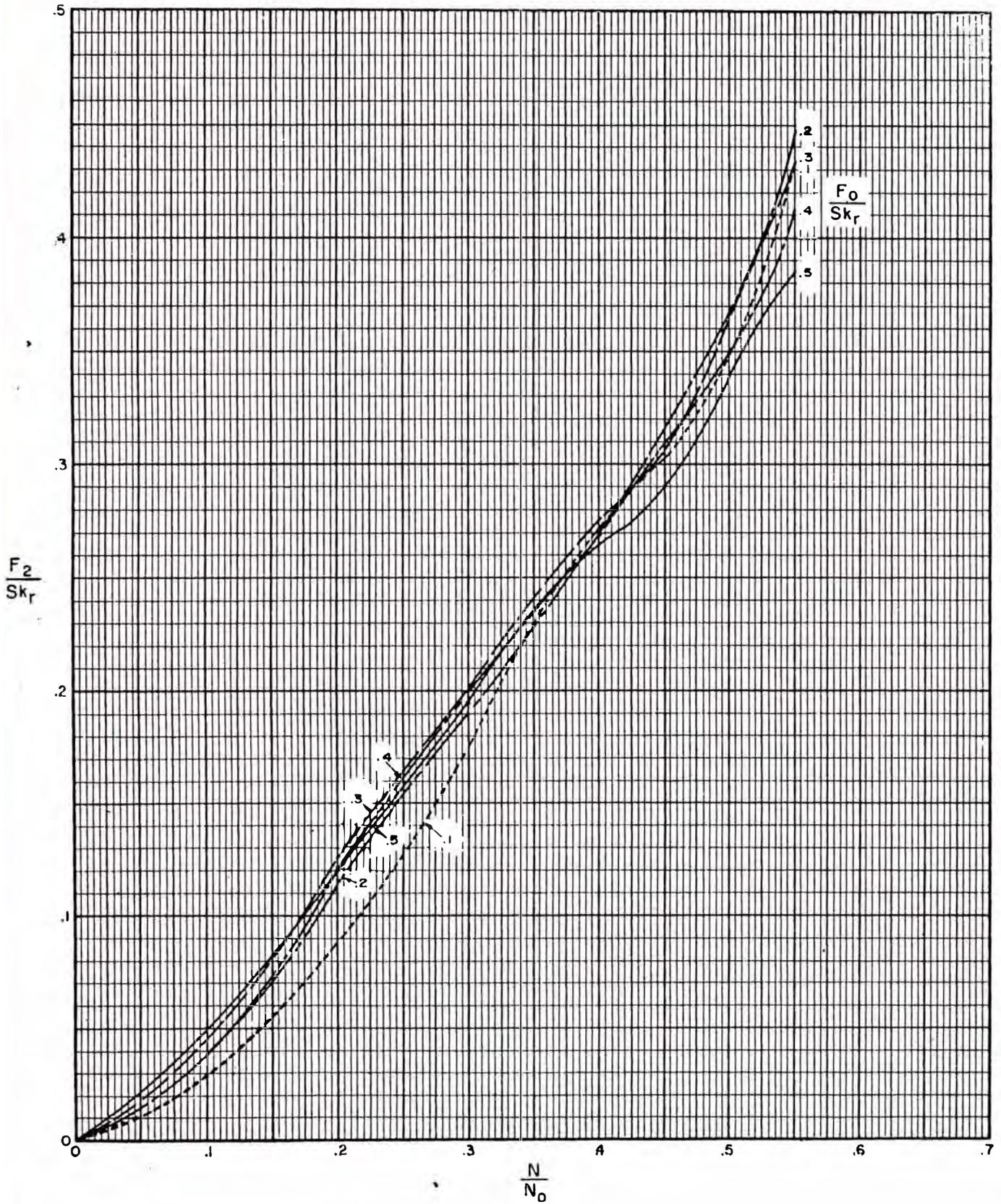
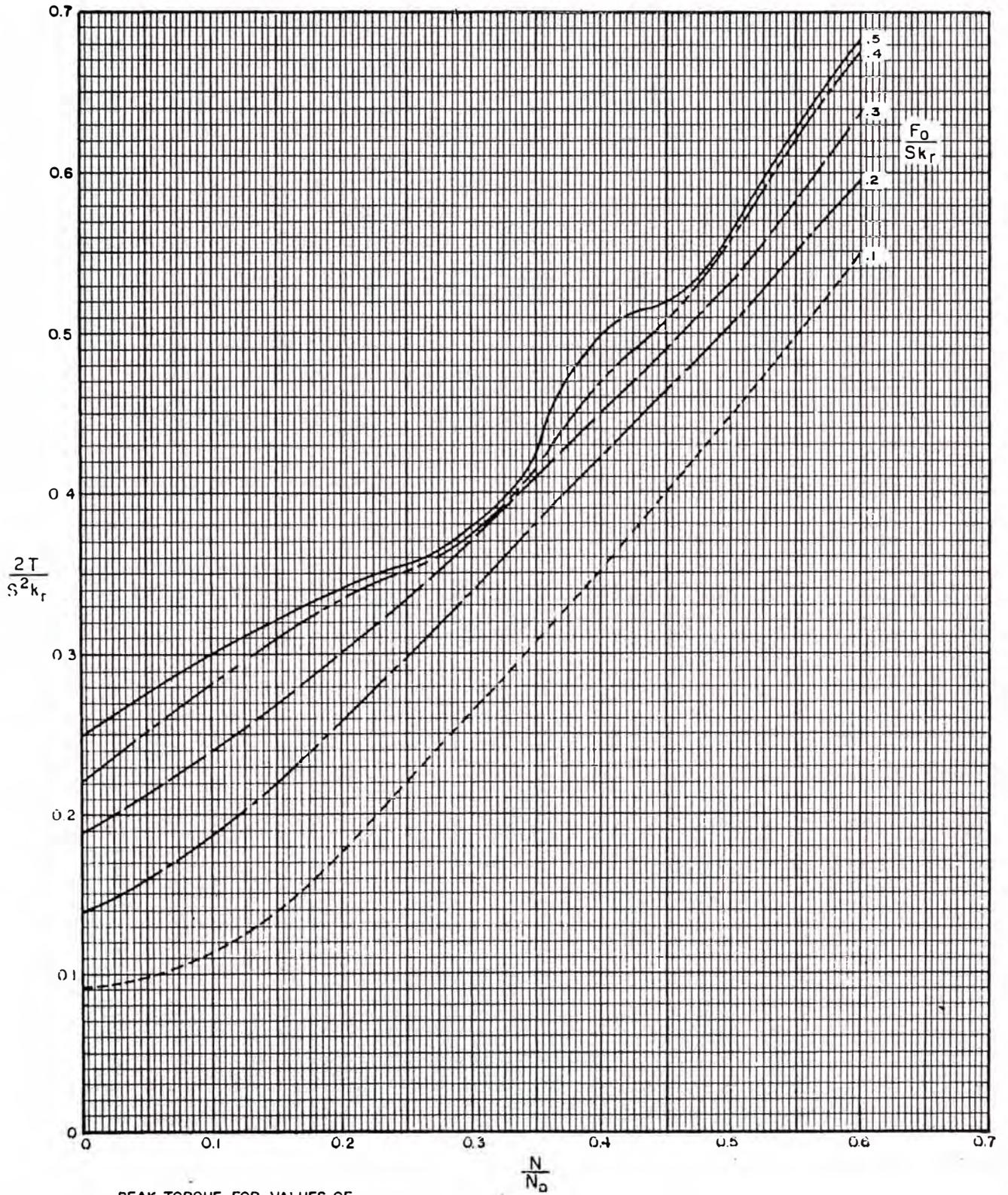


FIGURE 4.3

$\frac{F_2}{Sk_r}$, MINIMUM POLISHED ROD LOAD



PEAK TORQUE FOR VALUES OF $\frac{W_{if}}{S k_r} = .3$ USE TORQUE ADJUSTMENT FOR OTHER VALUES OF $\frac{W_{if}}{S k_r}$.

FIGURE A.4

$\frac{2T}{S^2 k_r}$, PEAK TORQUE

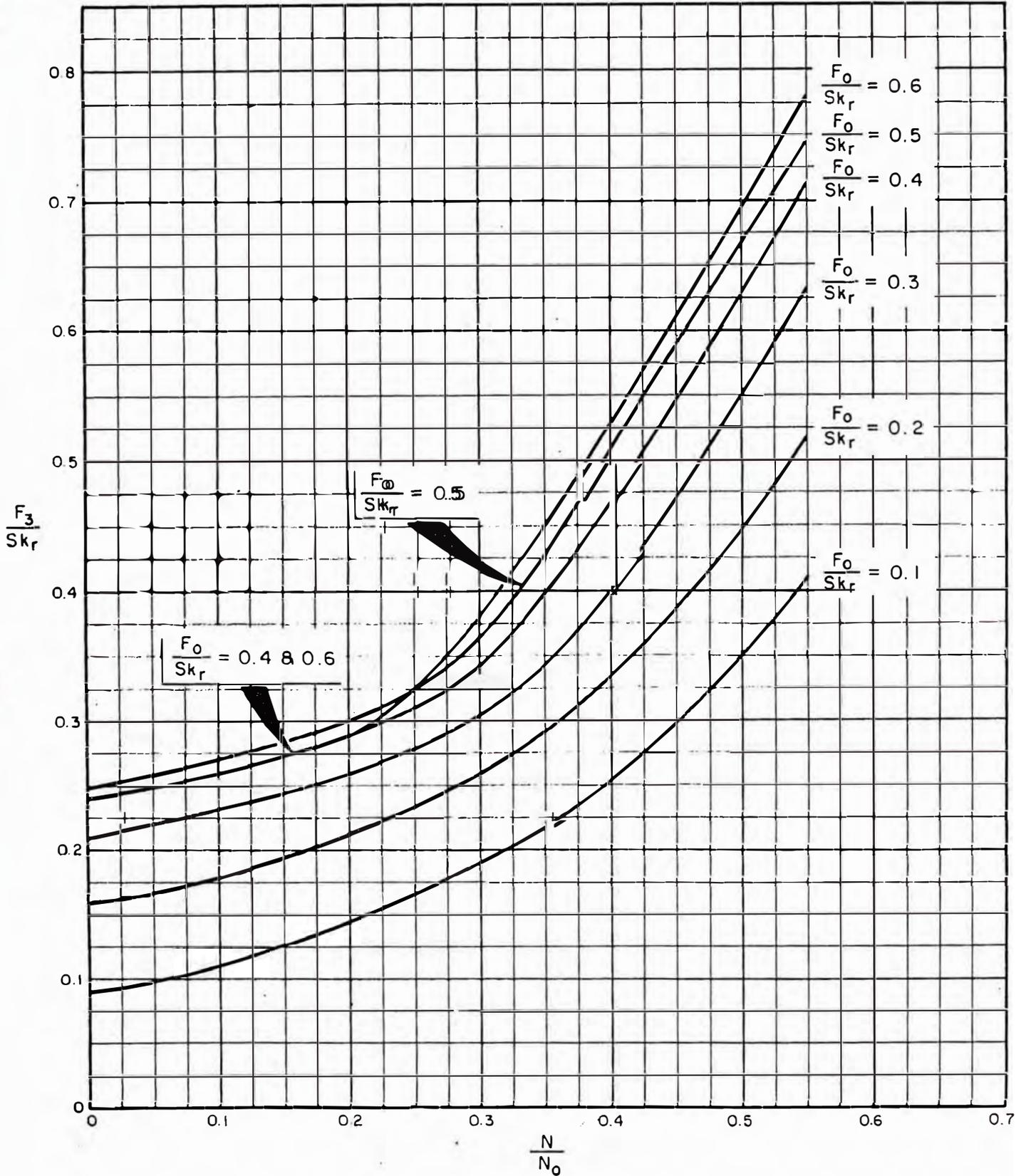
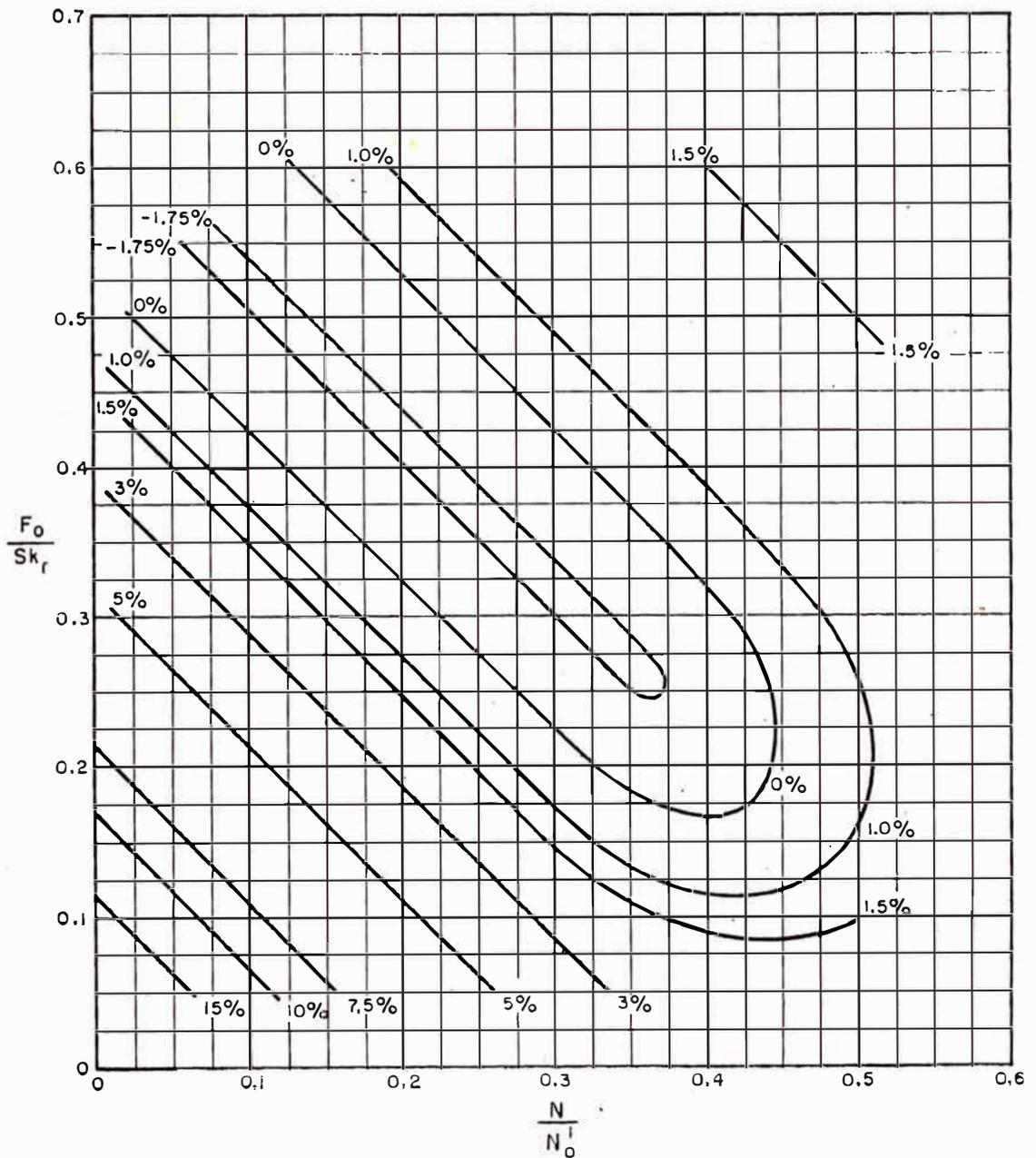


FIGURE A.5

$\frac{F_3}{Sk_r}$, POLISHED ROD HORSE POWER



TO USE: MULTIPLY % INDICATED ON CURVE BY $\frac{\left(\frac{W_{rf}}{S_{k_r}} - 0.3\right)}{0.1}$

FOR EXAMPLE: $\frac{W_{rf}}{S_{k_r}} = 0.600$

$\frac{N}{N_0} = 0.200$ $\frac{F_0}{S_{k_r}} = 0.168$

ADJUSTMENT = 3% FOR EACH 0.1 INCREASE IN $\frac{W_{rf}}{S_{k_r}}$ ABOVE 0.3

TOTAL ADJUSTMENT = $3 \times 3\% = 9\%$

$T_d = 1.00 + 0.09 = 1.09$

NOTE: IF $\frac{W_{rf}}{S_{k_r}}$ IS LESS THAN 0.3 ADJUSTMENT BECOMES NEGATIVE

FIGURE 4.6

T_d , ADJUSTMENT FOR PEAK TORQUE

FOR VALUES OF $\frac{W_{rf}}{S_{k_r}}$ OTHER THAN 0.3