

38
20/



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

APLICACION DEL ANALISIS NODAL AL SISTEMA ARTIFICIAL DE PRODUCCION DE BOMBEO MECANICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

RUBEN OSTOS VILLASEÑOR



México, D. E.

1989

TESIS CON FALTA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

CAPITULO	PAGINA
I INTRODUCCION	3
II EQUIPO DE BOMBEO MECANICO Y SUS FUNCIONES	5
II.1 INTRODUCCION.	
II.2 LA BOMBA SUBSUPERFICIAL.	
II.3 EL CICLO DE BOMBEO.	
II.4 LA SARTA DE VARILLAS DE SUCCION.	
II.4.1 CALCULO DE LAS CARGAS EN LA VARILLA PULIDA.	
II.4.2 DISEÑO DE LA SARTA DE VARILLAS DE SUCCION.	
II.5 EL EQUIPO SUPERFICIAL.	
REFERENCIAS.	
III ANALISIS Y DISEÑO	29
III.1 INTRODUCCION.	
III.2 CARTAS DINAMOMETRICAS.	
III.3 METODOS DE DISEÑO.	
III.3.1 METODO CRAFT, HOLDEN Y ORAVES.	
III.3.2 METODO API RP-11L.	
REFERENCIAS.	
IV TEORIA DEL ANALISIS NODAL	57
IV.1 INTRODUCCION.	
IV.2 NODOS DE SOLUCION.	
IV.3 TUBERIAS TELESCOPIADAS.	
REFERENCIAS.	
V ANALISIS NODAL EN UN SISTEMA ARTIFICIAL DE PRODUCCION DE BOMBEO MECANICO	57
V.1 INTRODUCCION.	
V.2 ANALISIS Y PROCEDIMIENTO.	
V.2.1 CURVAS CARACTERISTICAS (solo liquidos).	
V.2.2 CURVAS CARACTERISTICAS (liquido más gas).	
V.2.3 COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA DEL POZO.	
V.3 AUTOMATIZACION DEL METODO.	
V.3.1 PROGRAMA DE COMPUTO (BONEC/88).	
V.3.2 EJEMPLOS DE APLICACION.	
V.3.3 DISCUSION DE RESULTADOS	
REFERENCIAS.	
VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
VI.1 CONCLUSIONES.	
VI.2 RECOMENDACIONES.	

NOMENCLATURA.	91
APENDICE "A" DIAGRAMA DE FLUJO.	94
APENDICE "B" TABLAS Y GRAFICAS DE RESULTADOS.	100

0. INTRODUCCION.

Actualmente una gran parte de las actividades en la industria se realizan a base de petróleo, aun cuando ya se están explotando nuevas fuentes de energía, como son: *La geotérmica, nuclear, edica, marítima, etc.* Hoy en día estas fuentes ya se están utilizando en diferentes ramas de la industria, pero aún no han podido desplazar al petróleo.

El petróleo es un recurso renovable en la escala de muchos millones de años y por lo tanto se debe programar su explotación. Son pocos los países que explotan sus yacimientos petrolíferos bajo una buena y estratégica planeación. por lo general quienes sí cumplen con esta condición son los países productores desarrollados.

En México la industria petrolera se inició prácticamente en el Siglo XVI, aunque la población precolombina ya utilizaba el petróleo como medicina, brea, pegamento, combustible para lamparas, ungüento, y en sus ritos religiosos. El petróleo lo obtenían de las manifestaciones que actualmente se denominan como chapopoteras.¹

Los yacimientos petrolíferos son matrices rocosas de características específicas que contienen en sus huecos y fracturas, fluidos que están sujetos a altas presiones y temperaturas. Estos huecos son en su mayoría de tamaño microscópico.

Quando se construye un pozo para extraer los hidrocarburos de un yacimiento, éstos se manifiestan en la superficie por energía propia del yacimiento. Esto quiere decir que tanto la presión y en menor medida la temperatura actúan como una fuente motriz sobre los fluidos para que estos fluyan hacia el pozo y de ahí a la superficie. Cuando esta energía propia del yacimiento empieza a declinar debido a la extracción de los hidrocarburos, se utilizan métodos artificiales de producción.

Los métodos artificiales de producción son instalaciones de tipo (*mecánico, hidráulico o eléctrico*), que se diseñaron debido a la necesidad de continuar extrayendo hidrocarburos, cuando estos ya no pueden fluir hacia la superficie por energía propia. Existen diferentes diseños. estos dependen de las características y condiciones en que se encuentren tanto el pozo como el yacimiento.

Los diseños más conocidos hasta ahora son los siguientes:

- ▶ *Bombeo Mecánico.*
- ▶ *Bombeo Neumático.*
- ▶ *Bombeo Hidráulico Tipo pistón.*
- ▶ *Bombeo Electrocentrifugo.*
- ▶ *Bombeo Hidráulico Tipo Jet.*

Para fines de este trabajo, se enfocará únicamente el estudio y análisis del sistema artificial de producción de bombeo mecánico. En los siguientes capítulos se analizan los componentes de este sistema así como también su funcionamiento.

El objetivo es presentar la aplicación del Análisis Nodal al Bombeo Mecánico, para tener una herramienta más que se utilice en la optimización de este sistema artificial, haciendo uso de métodos y correlaciones ya establecidos.

00. EQUIPO DE BOMBEO MECÁNICO Y SUS FUNCIONES.^{1,2,3}

II.1 INTRODUCCION.

Después de haber efectuado todos los estudios necesarios referentes a la aplicación de bombeo mecánico, es necesario hacer la selección de cada una de las partes mecánicas que componen al sistema.

La experiencia ha demostrado que el bombeo mecánico es eficiente, dado que en campos de EE.UU los pozos han demostrado una mejoría del 80 al 85 %. Para instalar este tipo de sistema es necesario que los pozos cumplan con los siguientes requisitos:

- ▶ *Un bajo índice de productividad.*
- ▶ *Que no haya producción de arena, si la hay que sea muy baja.*
- ▶ *Que exista una presión de fondo fluyendo suficiente para que los fluidos alcancen un nivel estético en el pozo.*
- ▶ *Que no haya depósito de parafinas.*
- ▶ *Que la $P_{vf} > P_b$ a la profundidad de colocación de la bomba.*

En la figura 2.1 muestra un sistema completo de bombeo mecánico.

II.2 LA BOMBA SUBSUPERFICIAL^{1,2}

Su función es desplazar los fluidos del yacimiento desde el fondo del pozo hasta la superficie por el interior de la tubería de producción. La bomba admite los fluidos de la formación mediante un movimiento vertical ascendente y descendente que va desplazando la columna de fluidos hasta llegar al cabezal del pozo.

La bomba subsuperficial consta básicamente de cuatro componentes figura 2.2 , estos son:

- 1) *Barril de trabajo.*
- 2) *Embolo.*
- 3) *Válvula viajera.*
- 4) *Válvula de pie.*

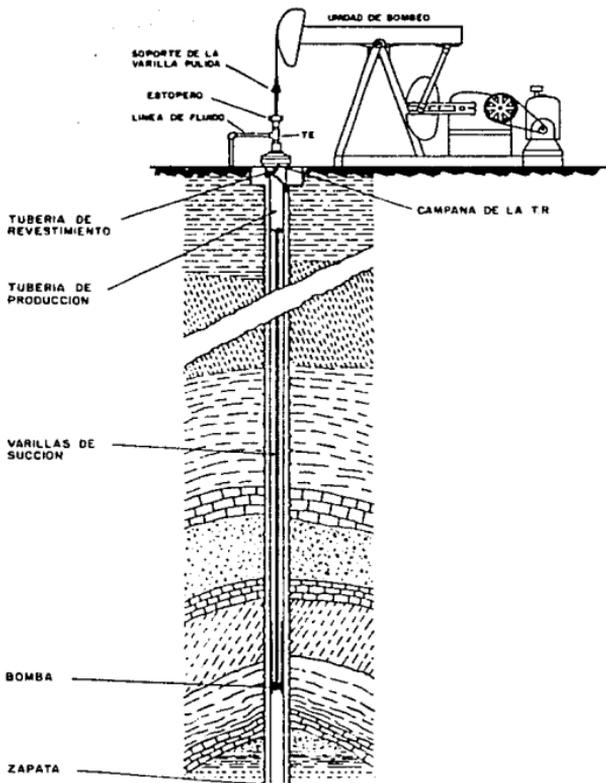


FIG. 2.1 SISTEMA DE BOMBEO MECANICO

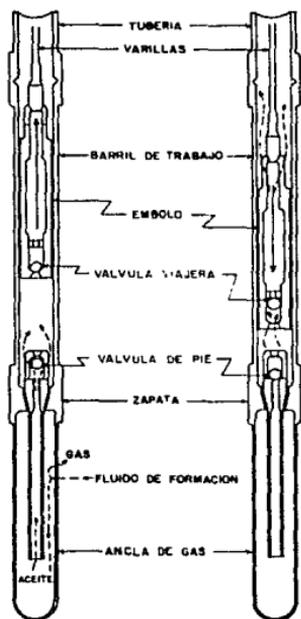


FIG. 2.2 LA BOMBA SUBSUPERFICIAL

Las bombas se clasifican de la siguiente forma:

- A) Bomba de tubería de revestimiento.
- B) Bomba de tubería de producción.
- C) Bomba de inserción.

A) Bomba de tubería de revestimiento (T.R).

Esta bomba es una versión de la de inserción solo que esta se ancla en la tubería de revestimiento. Estas bombas manejan grandes volúmenes a bajas profundidades y se requieren en pozos con índices de productividad no muy bajos.

B) Bomba de tubería de producción (T.P).

La principal diferencia entre la bomba de T.P. y la de inserción es básicamente la forma en que va colocado el barril de trabajo. El barril de la bomba de T.P. va conectado en el extremo inferior de la tubería y se introduce al pozo como una parte integral de la sarta de producción. El barril de la bomba de inserción ensambla íntegramente a la bomba subsuperficial y se introduce por el interior de la tubería de producción como una unidad en la sarta de varillas de succión. La tabla 2.1 muestra los máximos diámetros de bombas que se pueden introducir en la sarta de producción o en la tubería de revestimiento. Una ventaja importante de las bombas de T.P., es que tienen un mayor desplazamiento que las de inserción, sin embargo una gran desventaja es que para reemplazar la bomba es necesario sacar toda la sarta de tubería de producción. La figura 2.2. muestra un esquema típico de una bomba de T.P.

C) Bomba de inserción.

La principal ventaja de estas bombas es que se pueden conectar a la sarta de varillas de succión sin necesidad de tener que sacar la tubería de producción a la superficie, solo se saca la sarta de varillas. Las bombas de inserción se dividen en dos grupos:

r) Bombas invertidas o viajeras.-En este tipo de bombas, el barril de trabajo es la parte móvil y el émbolo es estacionario. La ventaja de este arreglo es que evita o elimina el arenamiento entre el barril y la T.P.

2) *Bombas con barril estacionario.* - En este tipo de bombas sucede lo contrario a la anterior. Es decir, el émbolo es móvil y el barril es fijo.

El API (Instituto Americano del Petróleo) ha hecho una clasificación de las bombas subsuperficiales, como se muestra en la figura 2.3, las especificaciones de estas se muestran en la tabla 2.2 y en la tabla 2.3 se muestra el sistema de clasificación de las bombas.

Tabla 2.1 Máximos diámetros de bombas.

Tipo de bomba	Diámetro de tubería (pg.)			
	1.900	2 3/8	2 7/8	3 1/2
De r.p. de una pieza barril pared delgada(TV)	1 1/2	1 3/4	2 1/4	2 3/4
De r.p. de una pieza barril pared (TH)	1 1/2	1 3/4	2 1/4	2 3/4
De r.p. con barril interior (TL)	-----	1 3/4	2 1/4	2 3/4

Tabla 2.2 Especificaciones de las bombas.

Tipo de bomba	Bombas de émbolo metálico			Bombas de émbolo empacado flexible	
	Barril pared densa	Barril corto	Barril pared delgada	Barril pared gruesa	Barril pared delgada
Bombas de inserción					
Barril estacionario anclaje en la cima	RHA	RLA	RWA	---	RSA
Barril estacionario anclaje en el fondo	RHB	RLB	RWB	---	RSB
Barril viajero anclaje en el fondo	RHT	RLT	RWT	---	RST
Bombas de r.p.					
	TH	TL	----	TP	---

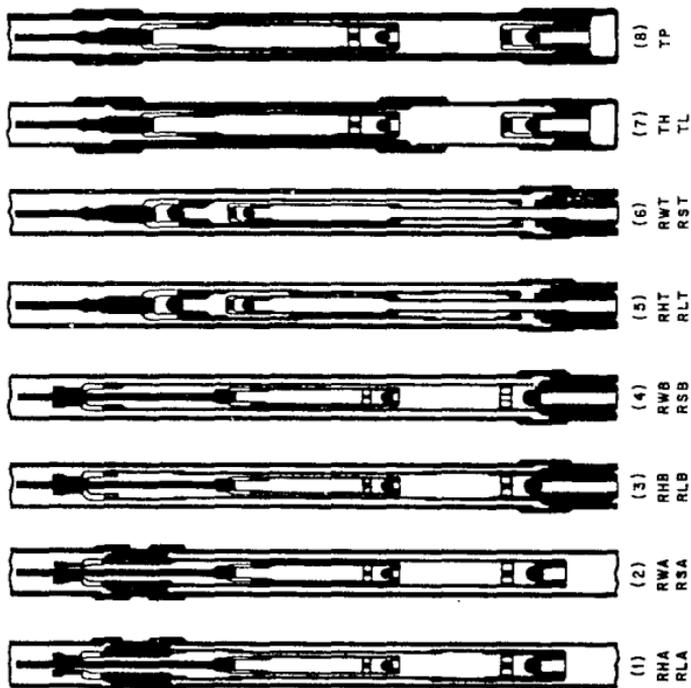


FIG. 2.3 CLASIFICACION DE BOMBAS

Tabla 2.3 Sistema de clasificación de bombas.

XX	XXX	X	X	X	X	X	X	X		
									Longitud total de conexiones, pies.	
									Longitud nominal del émbolo, pies.	
									Longitud del barril, pies.	
									Tipo de asiento: C - Tipo copa	
									M - Tipo mecánico	
									Localización del asiento: A - Cima	
									B - Fondo	
									C - Barril viajero en el fondo	
									Tipo de barril: H - Pared gruesa	} Bombas con émbolo metálico
									L - Barril interior	
									W - Pared delgada	
									S - Pared delgada	
									P - Pared gruesa	
									Tipo de bomba: R - De varillas	} Bomba con émbolo de empaque suave
									T - De tubería de producción	
									Diámetro del émbolo: 108 - 1 1/8	
									125 - 1 1/4	
									150 - 1 1/2	
									175 - 1 3/4	
									178 - 1 25/32	
									200 - 2	
									228 - 2 1/4	
									250 - 2 1/2	
									273 - 2 3/4	
									Diámetro de la tubería de producción: 15 - 1.900	
									20 - 2 3/8	
									25 - 2 7/8	
									30 - 3 1/2	

11.3 EL CICLO DE BOMBEO.

El ciclo de bombeo es el movimiento que realiza la bomba para poder desplazar los fluidos desde el fondo hasta la superficie del pozo. Estos fluidos forman una columna hidrostática dentro de la tubería de producción la cual es levantada por la bomba. La figura 2.4 muestra los pasos que sigue la bomba para realizar el desplazamiento de fluidos.

El ciclo de bombeo consta básicamente de cuatro pasos, que son:

- 1) *La válvula viajera y el émbolo están a punto de terminar la carrera descendente (válvula de pie cerrada y válvula viajera abierta).*
 - a) La válvula de pie permanece cerrada debido a que está soportando la carga de los fluidos que entran al barril.
 - b) La válvula viajera está abierta debido a que sufre un empuje ascendente de los fluidos y permite la admisión de estos.
 - c) La tubería y la válvula de pie son las que soportan la carga de los fluidos y de las varillas.

- 2) *Se inicia la carrera ascendente del émbolo y la válvula viajera.*
 - a) La válvula viajera se cierra debido a que se inicia la carrera ascendente y actúa sobre ella el peso de la columna de fluidos.
 - b) La válvula de pie se abre debido a que los fluidos a una Pwf la empujan (llenado de barril).

- 3) *Está a punto de terminar la carrera ascendente del émbolo y la válvula viajera.*
 - a) La válvula de pie sigue abierta admitiendo fluidos hacia el barril.
 - b) La válvula viajera continúa cerrada debido a la carga de fluidos.
 - c) Las varillas y la válvula viajera sigue soportando la carga de fluidos.

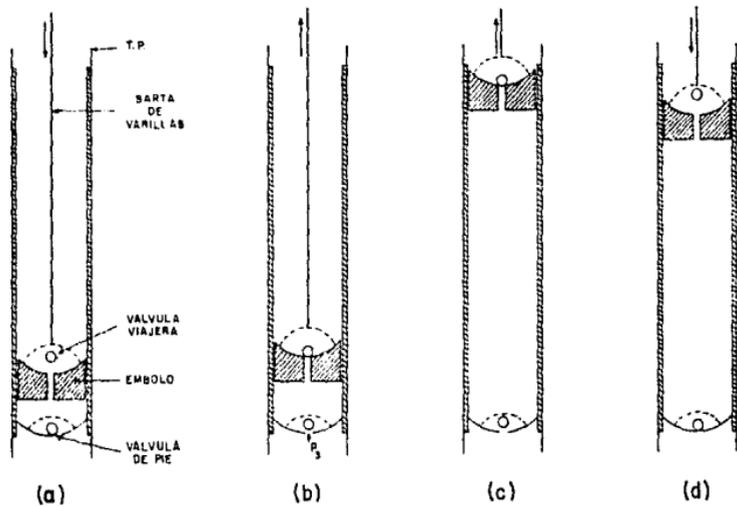


FIG. 2.4 EL CICLO DE BOMBEO

4) Se inicia la carrera descendente del émbolo y de la válvula.

- a) La válvula de pie se cierra debido a que soporta la carga de los fluidos desplazados por el émbolo.
- b) La válvula viajera se abre debido a que sufre un empuje de los fluidos y permite la admisión de estos a la parte superior del émbolo.
- c) Las cargas (varillas y fluidos) se transfirieron a la tubería y a la válvula viajera.

II.2 LA SARTA DE VARILLAS DE SUCCION.

La sarta de varillas de succión es un sistema vibratorio complejo mediante el cual el equipo superficial transmite energía o movimiento a la bomba subsuperficial. La selección conveniente de una sarta de varillas depende de la profundidad del pozo y de las condiciones de operación de este. Para pozos profundos mayores de 3500 pies (1070 m) es práctica utilizar una sarta de varillas telescopiadas, que consiste de un arreglo de diferentes longitudes y diámetros de varillas.¹

El porcentaje de longitud de cada diámetro de varillas a utilizar se obtiene de la tabla 2.4 así como también sus especificaciones mecánicas. Las varillas de diámetro menor se colocan en la parte inferior, donde la carga sobre la sarta es mínima, las varillas de mayor diámetro se colocan en la parte superior donde la carga sobre la sarta es máxima.

Tabla 2.4 Datos de varillas y émbolos.

Numero de varillas No.	Diámetro del émb. (pg) D	Peso de cada varilla (lb\pie) W _r	Constante Elástica (pg) E _r	Factor de frecuencia F _c	Porciento de cada varilla (%)
44	todos	0.725	1.99×10^{-6}	1.000	100 1/2φ

Las cargas máxima y mínima que existen durante el ciclo de bombeo deben ser determinadas tan exactas como sea posible para poder diseñar y seleccionar la unidad de bombeo superficial más adecuada.

El máximo esfuerzo en la parte superior de la sarta de varillas, es la carga máxima o carga pico sobre la varilla pulida (PPRL) entre el área de sección transversal de la cima de las varillas:

$$\tau_{\max} = \frac{PPRL}{A_{tr}} \quad (II.1)$$

El mínimo esfuerzo en la parte superior de la sarta de varillas, es la carga mínima sobre la varilla pulida (MPRL) entre el área de sección transversal de la cima de las varillas:

$$\tau_{\min} = \frac{MPRL}{A_{tr}} \quad (II.2)$$

El esfuerzo máximo y mínimo se relacionan con la siguiente ecuación:

$$\tau_{\max} = \left(\frac{T}{4} + 0.5 \alpha \tau_{\min} \right) SF \quad (II.3)$$

Donde:

T = Mínima fuerza de tensión para las varillas (90 000 psi. para varillas API grado C y 115 000 psi. para grado D).

SF = Factor de servicio que depende del tipo de varillas y las condiciones de operación.

La tabla 2.5 muestra los valores aproximados del factor SF, en función del tipo de varillas y de las condiciones de operación.

Tabla 2.5 Factor de servicio.

Servicio	API °C	API °D
No corrosivo	1.00	1.00
Agua salada	0.65	0.90
Acido sulfúrico	0.50	0.70

La ecuación II.3 muestra el máximo rango disponible para el esfuerzo máximo y el mínimo. T_{max} no deberá exceder el máximo esfuerzo permisible para el acero.

$$T_{max} \leq T_{oc}$$

La mayoría de las varillas de succión están constituidas principalmente por acero, contienen más del 90% de este metal además de otros elementos en cantidades muy pequeñas que son para darles dureza, elasticidad y resistencia a la corrosión. Existen tablas de varillas de succión que están basadas en las especificaciones API en ellas se encuentra: *grados del metal, diámetros, longitudes y propiedades físicas y químicas de las varillas.*

Existen nuevos tipos de varillas de succión como son las varillas huecas, las de fibra de vidrio y las de fibra de vidrio con alma de acero. Las dos últimas presentan características especiales tales como:

- 1) Menor peso que las varillas completamente de acero.
- 2) Menor torque en el reductor de engranes.
- 3) Mayor emboladas por minuto, (debido a su poco peso).
- 4) La carga sobre la varilla pulida se llega a reducir hasta un 50%.
- 5) Tienen menor costo.

II.4.1 CALCULO DE LAS CARGAS SOBRE LA VARILLA PULIDA.^{1,2}

La selección del equipo superficial para una instalación de bombeo mecánico, depende en gran medida de la carga máxima o carga pico esperada sobre la varilla pulida. La estimación preliminar del contrabalanceo requerido está basada principalmente en el cálculo de las cargas máxima y mínima sobre la varilla pulida, por lo tanto estas cargas se deben determinar tan precisas como los datos lo permitan. Existen varias expresiones que se han propuesto para el cálculo de estas cargas. Las presentadas por Craft, Holden y Graves se consideran como precisas en un amplio rango de velocidades de bombeo. Kermit E. Brow presentó las mismas expresiones con algunas modificaciones para poder ser aplicadas al análisis nodal.

Durante el ciclo de bombeo, son cinco factores los que contribuyen para obtener la carga neta sobre la varilla pulida, estos son: 1) *El peso de los fluidos;* 2) *El peso muerto de la*

sarta de varillas; 3) La carga por aceleración de las varillas; 4) La fuerza de flotación que actúa sobre la sarta de varillas; y 5) Las fuerzas por fricción. Las cargas por vibración de las varillas no serán consideradas al igual que las cargas por aceleración asociadas con los fluidos levantados.

El peso de la sarta de varillas está dado por:

$$W_r = M_1L_1 + M_2L_2 + M_3L_3 + \dots + M_nL_n \quad (II.4)$$

ó

$$W_r = \frac{LA_r \rho_a}{144} \quad (II.5)$$

donde M_u es el peso unitario de las varillas y L_1 es la longitud de la sección uno, M_2 y L_2 son el peso y la longitud de la sección dos respectivamente. Las cargas máxima y mínima de aceleración están dadas por:

$$\text{CARGA MÁXIMA DE ACELERACION} = W_r a \quad (II.6)$$

$$\text{CARGA MÍNIMA DE ACELERACION} = -W_r a \quad (II.7)$$

Durante el movimiento descendente del émbolo fig.II.4d, el fluido pasa através de la válvula viajera que se encuentra abierta, mientras que el peso de la columna está soportada por la válvula de pie, la cual consecuentemente se encuentra cerrada.

Mind² encontró que el valor máximo de la aceleración durante el descenso la cual trabaja para incrementar la carga sobre la sarta de varillas, ocurre cerca del final de la carrera. Este valor máximo está dado por:

$$\alpha = \frac{SN^2}{70500} (1 \pm B/M) \quad (II.8)$$

Donde el signo más es para la unidad CONVENCIONAL y el signo menos es para las unidades AEROBALANCEADA y MARK II, B/M es la relación biela-manivela.

Si se supone que la válvula viajera cierra y la de pie abre en el instante en que la aceleración es máxima, un balance de fuerzas en ese instante produce la carga máxima sobre la varilla pulida².

PPRL = (PESO DE LA COLUMNA DE FLUIDOS)+(PESO DEL EMBOLO)+(PESO DE LAS VARILLAS)+(EL TERMINO DE FRICCION)+(EL TERMINO DE ACELERACION)-(DESPLAZAMIENTO ASCENDENTE POR ABAJO DEL EMBOLO).

El término de fricción y el peso del émbolo son pequeños comparados con los demás términos por lo tanto pueden ser despreciados. El desplazamiento por abajo del émbolo es la presión de los fluidos producidos a través del émbolo:

$$PPRL = \frac{0.2 \cdot 41 \gamma f L (A_p - A_r)}{144} + W_r + c_u W_r - P_s A_p \quad (II.9)$$

ó

$$PPRL = \frac{0.2 \cdot 41 \gamma f L A_p}{144} - \frac{0.2 \cdot 41 \gamma f L A_r}{144} + W_r + c_u W_r - P_s A_p \quad (II.10)$$

donde P_s es la presión de entrada en la bomba, fig.II.4b.

El primer término del lado derecho de la ecuación II.10 es la carga de fluidos sobre el área total del émbolo y estará indicado por W_r' :

$$W_r' = \frac{0.2 \cdot 41}{144} \gamma f L A_p = 0.433 \gamma f L A_p \quad (II.11)$$

el segundo término es la fuerza de flotación que actúa sobre las varillas, y se denota por:

$$F_b = - \frac{0.2 \cdot 41}{144} \gamma f L A_r \quad (II.12)$$

si se multiplica y divide la ecuación II.12 por el término ρ_a (densidad del acero), se tiene:

$$F_b = - \frac{0.2 \cdot 41 \gamma f L A_r \rho_a}{144 \rho_a} \quad (II.13)$$

y sustituyendo a W_r en la ecuación II.13 queda como:

$$F_b = - \frac{0.2 \cdot 41}{\rho_a} \gamma f W_r \quad (II.14)$$

considerando que la densidad media del acero al carbón es de 490 lb/pe³ la ecuación II.14 queda finalmente:

$$F_b = - 0.127357 \gamma f W_r \quad (II.15)$$

Si se suman las ecuaciones II.11 y II.15, se obtiene la carga neta de fluidos sobre el émbolo:

$$W_f = W_r' + F_b \quad (II.16)$$

donde:

$$W_f = 0.433 \gamma f L A_p - 0.127357 \gamma f W_r \quad (II.17)$$

por lo tanto la ecuación II.10 queda como:

$$PPRL = W_l + W_r + \alpha W_r - P_3 A_p \quad (II.18)$$

$$\delta \quad PPRL = W_l' + F_b + W_r + \alpha W_r - P_3 A_p \quad (II.19)$$

Durante el movimiento ascendente del émbolo la válvula viajera está cerrada y la de pie abierta, figura 2.4b. La carga generada por la columna de fluidos está soportada por la sarta de varillas.

Mind² también encontró que el valor máximo de la aceleración durante la carrera ascendente, la cual trabaja para reducir la carga sobre la sarta de varillas, ocurre cerca del final de la carrera. Este máximo valor está dado por:

$$\alpha_2 = - \frac{SN^2}{70500} (1 \pm S/M) \quad (II.20)$$

en este caso el signo menos es para la unidad CONVENCIONAL y el signo más es para la unidad AEROBALANCEADA y MARK II.

Si se considera que la válvula viajera abre y la de pie cierra en el instante en que la aceleración ascendente es máxima, un balance de fuerzas en ese instante produce la carga mínima sobre la varilla pulida.

$$MPRL = (\text{PESO DE LAS VARILLAS}) + (\text{PESO DEL ÉMBOLO}) - (\text{TERMINO DE FRICCIÓN}) - (\text{TERMINO DE ACELERACION}) + (\text{FACTOR DE FLOTACION}).$$

También se desprecia en la expresión anterior el peso del émbolo y el término de fricción. La fuerza de flotación está dada por la ecuación II.15. De aquí que:

$$\delta \quad MPRL = W_r - 0.127307 \gamma W_r - \alpha_2 W_r \quad (II.21)$$

$$MPRL = W_r (1 - 0.127307 \gamma - \alpha_2) \quad (II.22)$$

El diámetro de la bomba está limitado por el diámetro de la T.P. o T.R. y por el gasto deseado. Si el objetivo es maximizar el gasto de producción se debe emplear el mayor diámetro posible (ver tabla 2.1). Sin embargo, si el émbolo es muy grande se aplican cargas innecesarias sobre el equipo, dando como resultado una operación ineficiente en la carrera del émbolo. Por otra parte si el émbolo es muy pequeño las velocidades de bombeo son altas, y el aumento del efecto de aceleración resulta en un incremento de las cargas sobre el equipo.

II.4.2 DISEÑO DE LA SARTA DE VARILLAS DE SUCCION².

Existen dos posibles enfoques para diseñar una sarta de varillas telescopiada (diferentes diámetros y longitudes):

- 1) Determinar un punto de la sarta en el cual el esfuerzo en la varilla es igual al máximo esfuerzo seleccionado previamente. De este punto hacia arriba la sarta debe ser de un diámetro mayor.
- 2) Diseñar la sarta de tal manera que los esfuerzos sean iguales en la cima de cada una de las secciones.

El segundo método es el más usual ya que proporciona un mayor margen de seguridad. En el primer método el esfuerzo máximo permisible se calcula en la cima de las varillas de menor diámetro, es por esto que las fallas llegan a ocurrir en las varillas de menor diámetro.

La fuerza que causa el esfuerzo en la sarta, es originada por la carga de los fluidos del pozo sobre el émbolo y el peso de las varillas bajo el punto considerado.

Consideraciones para el diseño: (1) condiciones estáticas, las fuerzas por aceleración se desprecian; (2) la gravedad específica de los fluidos del pozo es 1.0; (3) la carga de los fluidos actúa sobre el área total del émbolo; (4) la bomba se coloca en el nivel estático del fluido de trabajo. Bajo estas condiciones la carga del fluido es 0.433LAp.

Para una sarta telescopiada que consiste de dos secciones de L₁ pies de varillas, de área de sección transversal A₁ en pulgadas cuadradas y peso W₁ libras-pie, y L₂ pies de varillas de área de sección transversal A₂ en pulgadas cuadradas y de peso W₂ libras-pie. Las partes fraccionales de la longitud total de varillas está representada por R₁ y R₂ respectivamente:

$$R_1 = \frac{L_1}{L} \quad (II.23)$$

$$R_2 = \frac{L_2}{L} \quad (II.24)$$

donde: $L = L_1 + L_2$

El esfuerzo en la cima de la sección de abajo es:

$$\frac{0.433LAp + L_1W_1}{A_1} = \frac{0.433LAp + LR_1W_1}{A_1} \quad (II.25)$$

Asimismo, el esfuerzo en la cima de la sección de arriba es:

$$\frac{0.422LAp + L_1M_1 + L_2M_2}{A_2} = \frac{0.422LAp + LR_1M_1 + LR_2M_2}{A_2} \quad (II.26)$$

Si los esfuerzos en la cima de cada sección son iguales entonces igualando el segundo término de las ecuaciones II.25 y II.26:

$$\frac{0.422LAp + LR_1M_1}{A_1} = \frac{0.422LAp + LR_1M_1 + LR_2M_2}{A_2} \quad (II.27)$$

dividiendo todo entre la longitud total L :

$$\frac{0.422Ap + R_1M_1}{A_1} = \frac{0.422Ap + R_1M_1 + R_2M_2}{A_2} \quad (II.28)$$

la longitud total de la sarta se puede determinar con la ecuación II.28, tomando en cuenta que:

$$R_1 + R_2 = 1 \quad (II.29)$$

Para una sarta de varillas telescopiadas que consiste de más de dos secciones, el análisis difiere al antes presentado solo en el grado de complejidad. Por ejemplo para una sarta telescopiada de tres y cuatro secciones, la ecuación II.28 se puede complementar de la siguiente manera:

$$\frac{0.422Ap + R_1M_1}{A_1} = \frac{0.422Ap + R_1M_1 + R_2M_2 + R_3M_3}{A_3} \quad (II.30)$$

y

$$\frac{0.422Ap + R_1M_1}{A_1} = \frac{0.422Ap + R_1M_1 + R_2M_2 + R_3M_3 + R_4M_4}{A_4} \quad (II.31)$$

y en lugar de la ecuación II.29 se tiene:

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 1 \quad (II.32)$$

La ecuación II.25 es solo para la primer sección de arriba hacia abajo, por lo tanto habrá que resolver simultáneamente las ecuaciones para las siguientes secciones.

En general para una sarta telescopiada de n secciones, se tiene:

$$\frac{0.433A_p + R_1M_1}{A} = \frac{0.433A_p + R_1M_1 + R_2M_2 + R_3M_3 + \dots + R_nM_n}{A_n} \quad (II.33)$$

Las ecuaciones II.27, II.30, II.31 y II.32 se aplican para sartas telescopiadas con más de dos secciones. Para dos secciones R_2 y R_4 valen cero y para tres secciones R_4 se hace cero. Por lo tanto es posible determinar el valor de "R" para todas las combinaciones posibles de diámetros de varillas de succión. En la tabla 2.6 se puede consultar las combinaciones que más se utilizan.

Tabla 2.6 Diseño para una sarta telescopiada.

Diam. de varillas	Valores de R
$\frac{5}{8} \frac{3}{4}$	$R_1 = 0.759 - 0.0896A_p$ $R_2 = 0.241 + 0.0896A_p$
$\frac{3}{4} \frac{7}{8}$	$R_1 = 0.786 - 0.0566A_p$ $R_2 = 0.213 + 0.0566A_p$
$\frac{7}{8} 1$	$R_1 = 0.814 - 0.0375A_p$ $R_2 = 0.186 - 0.0375A_p$
$\frac{5}{8} \frac{3}{4} \frac{7}{8}$	$R_1 = 0.627 - 0.1393A_p$ $R_2 = 0.199 + 0.0737A_p$ $R_3 = 0.175 + 0.0655A_p$
$\frac{3}{4} \frac{7}{8} 1$	$R_1 = 0.664 - 0.0894A_p$ $R_2 = 0.181 + 0.0478A_p$ $R_3 = 0.155 + 0.0416A_p$
$\frac{3}{4} \frac{7}{8} 1 \frac{1}{8}$	$R_1 = 0.582 - 0.1110A_p$ $R_2 = 0.158 + 0.0421A_p$ $R_3 = 0.137 + 0.0364A_p$ $R_4 = 0.123 + 0.0325A_p$

Como un paso final del diseño es necesario comparar el máximo esfuerzo esperado contra el esfuerzo de trabajo permisible esperado para las varillas que se utilicen. Esto se puede hacer calculando el máximo esfuerzo en la cima de la sarta de varillas, el cual es la carga pico de la varilla pulida dividida entre el área de sección transversal de la sección superior de las varillas. Si la sarta ha sido diseñada como se mencionó anteriormente, el máximo esfuerzo en la cima de la sarta será el mismo esfuerzo en cualquier punto bajo la cima.

II.5 EL EQUIPO SUPERFICIAL^{1,2,3y5}

El equipo superficial es el que transmite la energía del motor principal hacia la bomba subsuperficial mediante el movimiento de la sarta de varillas, en este proceso mecánico el movimiento de rotación es convertido a un movimiento recíprocante sobre las varillas de succión y se reduce la velocidad del motor principal a una velocidad de bombeo conveniente. En la figura 2.5 se muestran todos los componentes del equipo superficial de bombeo.

El eslabón entre la sarta de varillas de succión y el equipo superficial es la varilla pulida. La varilla pulida está disponible en tres tamaños, para una instalación en particular depende del diámetro de la tubería de producción y del diámetro de las varillas de succión en la parte superior de la sarta. La varilla pulida pasa a través de un estopero el cual aísla el interior del pozo del medio exterior, el fluido es levantado y expulsado hacia la línea de descarga a través de una tee. En la parte superior de la varilla pulida se coloca una abrazadera (o *grampa*), la cual es soportada por el portavástago (o *barra portadora*). El portavástago es soportado por cables flexibles que pasan por encima de la cabeza de caballo hasta el final del balancín. Para asegurar que el movimiento de la varilla pulida sea vertical, es necesario realizar bien el diseño de estos componentes.

El balancín es soportado cerca de su centro de gravedad por el poste sampson (*poste maestro*) mediante el cojinete principal. El movimiento del balancín se obtiene por medio de una biela, esta a su vez recibe el movimiento de la manivela. La distancia del cojinete de la biela al perno de la manivela, está determinada por la longitud de carrera de la varilla pulida, a lo largo de la manivela se localizan tres diferentes posiciones para colocar el cojinete de la biela con la cual se obtiene diferentes longitudes de carrera.

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de una instalación de bombeo es la selección apropiada del

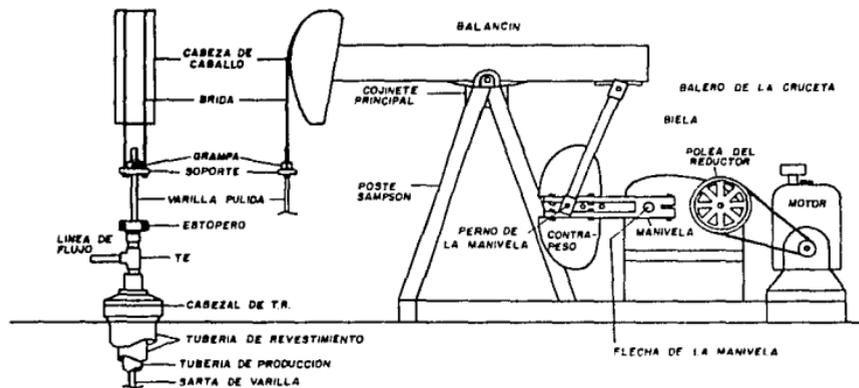


FIG. 2.5 COMPONENTES DEL EQUIPO SUPERFICIAL

contrabalanceo. Prácticamente todo el trabajo de levantamiento de los fluidos y de la sarta de varillas se ejecuta durante la carrera ascendente en el ciclo de bombeo, en esta fase del ciclo la carga total de fluidos y varillas se acelera a partir de una velocidad cero y se levanta la longitud de carrera de la bomba. En la carrera descendente, con la carga de fluidos transferida a la tubería, la caída de las varillas actúa como una fuerza de empuje sobre la instalación. Cuando no existe un equilibrio entre las cargas ascendente y descendente se pueden presentar condiciones adversas para el equipo superficial de bombeo. Desde el punto de vista del motor, ocurre que la velocidad es mayor durante la carrera descendente. En el caso de la transmisión de potencia se presenta un torque innecesariamente alto durante la carrera ascendente.

El contrabalanceo proporciona una distribución uniforme de cargas que ayuda a disminuir el torque máximo. Los pesos de contrabalanceo almacenan potencia durante la carrera descendente cuando la demanda de energía es baja, y proporciona energía durante la carrera ascendente ejecutando parte del trabajo de levantamiento de fluidos y varilla.

Para evitar una posible mala interpretación de terminología, es necesario diferenciar entre el efecto de contrabalanceo (el cual es la distribución neta del sistema de contrabalanceo a la varilla pulida) y contrabalanceo o contrapeso (el cual es el peso o sistema de pesos utilizados para obtener el efecto de contrabalanceo). El efecto de contrabalanceo se determina por el peso real del contrapeso, por su posición y por la geometría de la unidad superficial. El efecto se puede obtener colocando contrapesos sobre el balancín, sobre la biela o sobre la manivela. En algunos casos, particularmente en unidades grandes se utiliza aire a presión para obtener el efecto de contrabalanceo. El método para determinar el efecto de contrabalanceo deseado no está influenciado por el tipo de contrabalanceo utilizado.

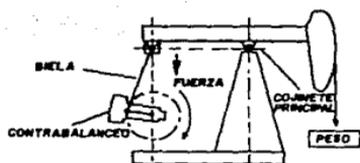
El motor tiene como función principal suministrar energía mecánica a la instalación, la cual es transmitida a la bomba. El motor seleccionado para una instalación dada debe tener la suficiente potencia para transportar los fluidos a un gasto deseado. La potencia requerida se puede obtener mediante un motor de combustión interna o eléctrico. Las ventajas y desventajas entre uno y otro dependen principalmente de su disponibilidad y de su costo, sin embargo el uso de un motor eléctrico facilita grandemente el análisis del comportamiento de la unidad de bombeo en dos aspectos: 1) Capacidad para medir exactamente la energía eléctrica suministrada a la unidad, lo cual permite medir su eficiencia y costo; 2) El análisis del contrabalanceo de la unidad se puede conseguir (sin interferir en las operaciones del pozo) utilizando un tacómetro registrador, para medir la variación en la velocidad del motor en un ciclo de bombeo completo.

Otro componente de la unidad superficial es el reductor de engranes, que consta de un sistema de engranajes que ayudan a disminuir la velocidad de rotación de la flecha del motor. Es necesario determinar el probable torque máximo al cual el reductor de engranes estará sujeto, ya que el API para clasificar las unidades de bombeo utiliza como base el torque máximo (en miles de pg-lb). Por ejemplo una unidad API 114 tiene un rango de 114000 pg-lb. El API tiene estandarizados 16 rangos de torque máximo que varían de 0.4 a 1824 miles de pg-lb.

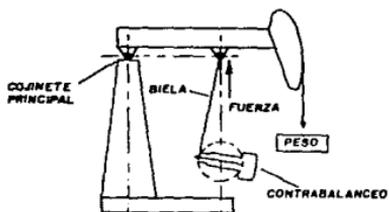
Existen tres diferentes tipos de unidades de bombeo mecánico en cuanto a su geometría, figura 2.6. Originalmente se dice que existen dos clases de unidades superficiales: La clase I que está representada por la unidad CONVENCIONAL figura 2.6a y la clase III representada por las unidades MARK II figura 2.6b y la AEROBALANCEADA, figura 2.6c.

Las diferencias entre las unidades son las siguientes:

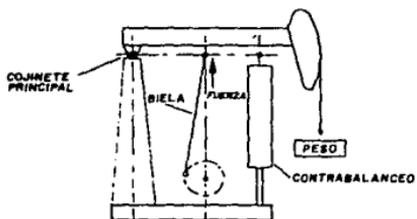
- 1) En la unidad convencional se aplica el movimiento desde la parte trasera de la unidad, quedando el cojinete principal en la parte intermedia del balancín, como se muestra en la figura 2.6a.
- 2) La unidad MARK II y la unidad AEROBALANCEADA tienen el movimiento en la parte intermedia de la unidad y el cojinete principal en la parte trasera del balancín como se muestra en las figuras 2.6b y 2.6c respectivamente.
- 3) La unidad aerobalanceada tiene la ventaja de no utilizar contrapesos ya que para amortiguar las cargas del pozo utiliza un cilindro con aire comprimido para dar el efecto de contrabalanceo.



(A) CLASE I UNIDAD CONVENCIONAL



(B) CLASE II UNIDAD MARK II



(C) CLASE III UNIDAD AEROBALANCEADA

FIG. 2.6 TIPOS DE UNIDADES DE BOMBEO MECANICO

REFERENCIAS

- 1.- **Craft B.C., Holden W.R., and Graves E.D.:** "Well Desing: Drilling and Production", Prentice-Hell, - Inc, Englewood cliffs, N.J., (1962).
- 2.- **Brown, K.E.:** "The technology of Artificial Lift Methods". Tulsa, Oklahoma, 1980, Vol. 2b.
- 3.- **Soto Rodriguez J. y Valdes Guerra.J.L.:** "Evaluación de métodos Para diseñar una instalación de B.M. convencional utilizando una calculadora programable T.I.59", Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura I.P.N. México, 1983.
- 4.- **World Oil.:** "1987 Sucker Rod Tables", March-85.
- 5.- **Medellin Salgado M.:** "Bombeo Mecdnico", Facultad de Ingeniería, UNAM. Mexico, 1986.
- 6.- **Catalogo Lufkin.:** "Unidades de Bombeo Mecánico", 86-87.

III. ANALISIS Y DISEÑO.

III.1 INTRODUCCION.

El bombeo mecánico al igual que otros sistemas artificiales de producción, emplea diferentes métodos para su análisis y diseño. Para fines de este trabajo solo se enfocará el análisis de dos de ellos, que son los más comúnmente utilizados, éstos son:

- 1) Método CRAFT, HOLDEN y GRAVES¹.
- 2) Método API-RP-11L².

El primer método es un método completamente analítico el cual hace uso de ecuaciones empíricas deducidas en base a la experiencia de campo. El método API-RP-11L es un método en su mayoría gráfico obtenido de igual forma que el método anterior. Tanto el uno como el otro se pueden hacer de uso fácil utilizando como herramienta un programa de cómputo para que la solución de éstos sea más rápida y exacta.

Para conocer la eficiencia de este sistema artificial se utilizan cartas dinamométricas que son gráficas que determinan los esfuerzos que ocurren durante un ciclo de bombeo en una instalación.

III.2 CARTAS DINAMOMETRICAS.

Cuando una instalación de bombeo mecánico está funcionando, se presentan esfuerzos a lo largo del aparejo de producción. Estos esfuerzos son compresionales, de tensión y de fricción. Las cartas dinamométricas son gráficas de estos esfuerzos que ocurren debido al movimiento de las varillas y de la tubería. A continuación se describe el patrón de movimiento de cuatro zonas, de la varilla pulida, figura 3.1 :

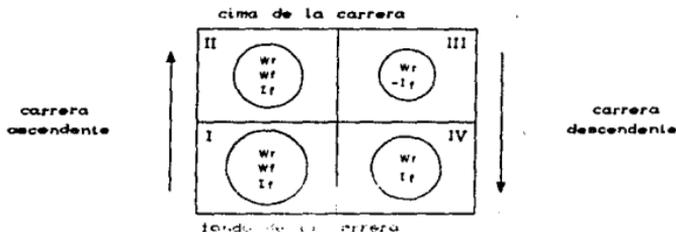


Fig. 3.1 Patrón de movimiento.

W_r = peso de las varillas.
 W_f = peso de los fluidos.
 I_f = factor de inercia.

Se considera que el peso de las varillas y la carga hidrostática se concentran en una sola masa es decir no existe alargamientos de varillas.

Iniciando en el fondo de la carrera de la varilla pulida, se tiene la zona I que es la parte de la carrera donde la máxima carga de varillas y fluidos se levantan con una máxima aceleración. Esta zona se extiende desde el fondo de la carrera hasta algún punto cerca de la mitad de la carrera ascendente, en esta zona el componente de la fuerza de inercia se suma a la carga estática de las varillas y los fluidos, ya que la máxima aceleración hacia arriba ocurre en esta zona. Normalmente el producto de esta carga máxima, compuesta de varillas y fluidos por la máxima aceleración da como resultado la carga pico (carga máxima en la varilla pulida).

La zona II es la parte de la carrera ascendente que se extiende desde cerca del punto medio hasta el tope de la carrera ascendente. En esta zona aún se tiene la carga máxima de varillas y fluidos pero, se está desacelerando consecuentemente el componente de inercia de la masa de varillas y fluidos se va restando del total del peso estático.

La zona III inicia en la parte superior de la carrera descendente hasta algún punto cerca de la mitad de la carrera. En esta zona se tiene únicamente el peso de las varillas flotando menos el componente de inercia y es donde se tiene la máxima aceleración hacia abajo.

La zona IV inicia en algún punto cercano a la mitad de la carrera descendente y se extiende hasta el fondo de la carrera. En esta zona las varillas flotando se va desacelerando para detenerse finalmente en el fondo de la carrera, por lo que el componente de inercia se suma al peso de las varillas flotando.

Lo anterior es una representación de un fenómeno complejo debido a que se supuso una masa no elástica de varillas, considerando inercia simple y sin considerar fuerzas armónicas y de fricción.

Información que se obtiene de una carta dinamométrica:

- A) Cargas en el equipo superficial.
- B) Cargas en las varillas.
- C) Comportamiento de la bomba.

El interprete de la carta dinamométrica puede determinar el comportamiento de la bomba al detectar con los perfiles de la carta:

- 1) Las condiciones de trabajo de la válvula de pie y de la válvula viajera.
- 2) La existencia de gas o golpeteo de fluido y su magnitud.
- 3) El candado de gas.
- 4) Fricción excesiva.
- 5) El bombeo en vacío.
- 6) La existencia de una sobrecarrera o baja carrera.

La figura 3.2 muestra el esquema de una carta dinamométrica ideal (teórica), para varillas no elásticas (a) y para varillas elásticas⁵ (b).

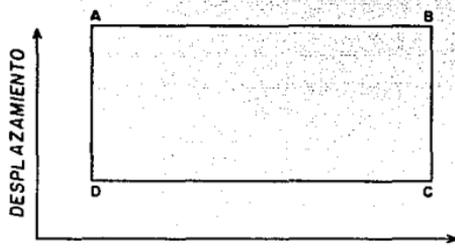
La figura 3.2 (a) sería el resultado de un ciclo de bombeo con las siguientes características⁴:

- 1) Las varillas fueron completamente rígidas.
- 2) Estas no tuvieron retraso.
- 3) No hubo efectos dinámicos.
- 4) No hubo vibraciones.
- 5) Todos los componentes del sistema permanecen constantes.

En el punto (A) la válvula viajera cierra instantes después de iniciar la carrera ascendente, actuando la carga total sobre la varilla pulida. Permanece constante del punto (A) al (B). En el punto (C) abre la válvula viajera unos instantes después de iniciar la carrera descendente, actuando la carga de fluidos sobre la válvula de pie que se encuentra cerrada hasta unos instantes antes de iniciar la carrera ascendente, punto (D). En la figura 3.2 (b) se observa el resultado de cuando existe alargamiento de varillas (A'-A) durante la carrera ascendente y contracción (C'-C) durante la carrera descendente.

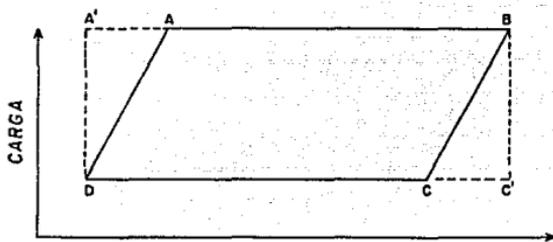
Quando se combinan varios de los efectos antes mencionados, da lugar a la comúnmente llamada Carta Dinamométrica Típica, para un sistema de bombeo real, figura 3.3.

Los efectos de alargamiento y contracción de varillas son los causantes principales de que la carrera superficial de la varilla pulida S, sea diferente a la carrera efectiva del émbolo Sp. Siendo esta última siempre menor, como se muestra en la figura 3.4



(a)

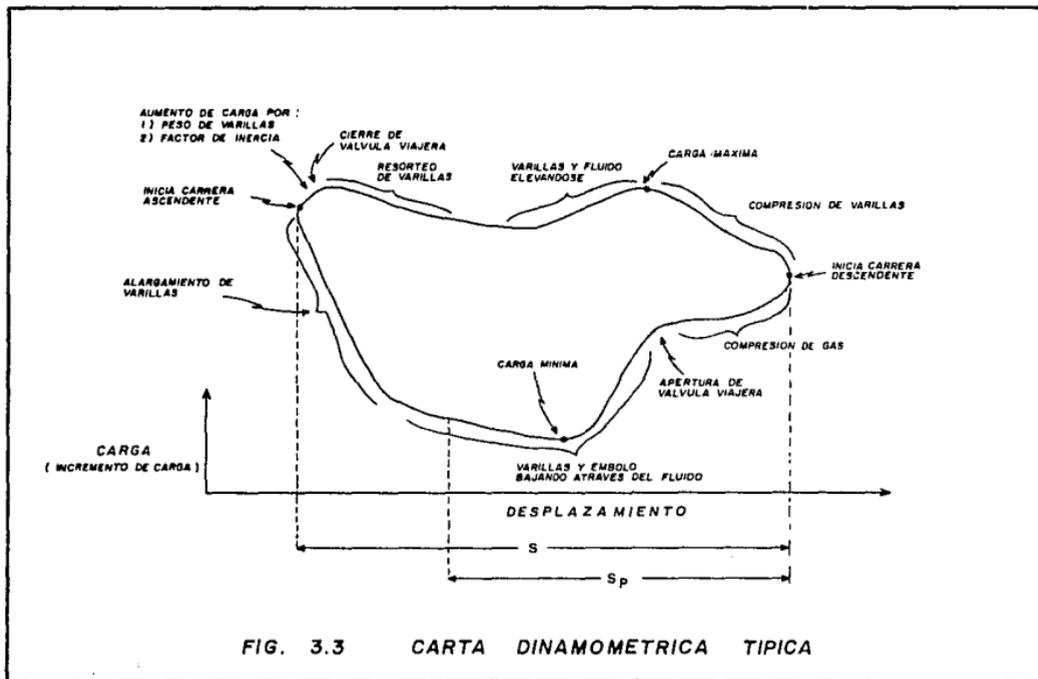
LONGITUD DE CARRERA



(b)

LONGITUD DE CARRERA

FIG. 3.2 CARTA DINAMOMETRICA IDEAL



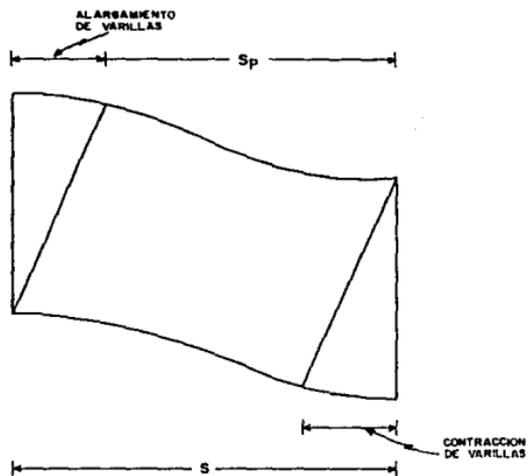


FIG. 3.4 CARTA DINAMOMETRICA AFECTADA POR ALARGAMIENTO DE VARILLAS Y POR EL FACTOR INERCIA

III.3 METODOS DE DISEÑO.

Como ya se mencionó anteriormente los métodos con mayor aceptación que se han aplicado en la Industria Petrolera son el método Craft, H y G. y el método API-RP-11L. Los dos métodos, no obstante de tener el mismo objetivo presentan diferencia en su procedimiento de diseño. Lo recomendable es utilizar ámbos métodos para así poder comparar los resultados y obtener la unidad de bombeo más adecuada. Del método Craft, H y G. solo se mencionará su secuencia de cálculo, no así el método API-RP-11L que se verá a detalle.

III.3.1 METODO CRAFT, HOLDEN Y GRAVES¹.

Los principales factores de diseño que se deben considerar son: el gasto de producción y el levantamiento neto de los fluidos. Conocer estos factores hace posible determinar el diámetro óptimo del émbolo para la instalación; que resultará en una mínima carga en las varillas y el equipo superficial, torque mínimo en la caja de engranes y la potencia mínima requerida en el motor. Determinar el diámetro del émbolo permite seleccionar el diámetro de la tubería, el diámetro y la longitud de las varillas, la longitud de carrera, la velocidad de bombeo, el rango de torque de la unidad y el rango de potencia del motor. La interdependencia de estos parámetros hará que su selección sea extremadamente difícil si el problema de diseño se enfocara completamente, desde un punto de vista matemático sin tomar en cuenta la experiencia.

Si se hacen algunas suposiciones en las condiciones del pozo, es posible construir gráficas que reduzcan ampliamente el número de cálculos necesarios en el diseño de una instalación. Los ejemplos de las gráficas que simplifican el diseño se presentan en la figura 5.6 y en las tablas de la 5.5 a la 5.12 de la referencia 1. Estas gráficas y tablas se construyeron apartir de ecuaciones de bombeo convencional previamente derivadas empleando la suposición de que la densidad del fluido es igual a 1.0 y que la profundidad de colocación de la bomba es igual al nivel de fluido.

Las gráficas representan el resultado de un gran número de cálculos concernientes a la determinación de condiciones óptimas de bombeo para obtener producciones predeterminadas a ciertas profundidades. Después de haber seleccionado las condiciones de operación y las dimensiones de la instalación, mediante las gráficas, es necesario verificar mediante cálculos matemáticos las cargas resultantes, torques, el gasto y algunos otros factores. Las gráficas se deben utilizar solo como guías y los valores que se obtienen de ellas pueden ser ajustados a situaciones particulares. No siempre los resultados de las gráficas son los más recomendables, esto es debido a las condiciones mecánicas de cada pozo.

Los principales factores en un problema de diseño son el desplazamiento de la bomba y la profundidad de colocación de la misma. El desplazamiento de la bomba se calcula a partir de la máxima producción estimada de fluidos y de la eficiencia volumétrica de la bomba. La información mínima necesaria para este método es: 1) *Producción de fluidos*, 2) *Profundidad de la bomba*. La información adicional que se debe de conocer o estimar consiste en: 1) *Eficiencia volumétrica*, 2) *Gravedad específica de los fluidos*, y 3) *el nivel del fluido de trabajo*. Aunque estos cinco factores son los más importantes se debe hacer una simplificación del problema para disminuir los requerimientos de información. Es importante conocer las características del yacimiento ya que la existencia de un acuífero afectaría la producción total de fluidos. Cuando la eficiencia volumétrica de la bomba no puede ser muy bien estimada se deberán de tomar como 0.80 y suponer una gravedad específica de los fluidos igual a 1.0.

A continuación se listan los pasos a seguir en el diseño de una instalación de bombeo. Se sugiere que todos los cálculos se hagan con las ecuaciones derivadas de la sección 5.6 a la 5.14 (referencia 1). Mas adelante se da una lista de estas ecuaciones:

- 1) *Apartir de la máxima producción supuesta de fluidos y de la eficiencia volumétrica estimada, calcular el desplazamiento de la bomba (ec. 11).*
- 2) *Con el gasto supuesto y la profundidad de colocación de la bomba, de la figura 5.6 referencia 1, determinar la longitud de carrera del émbolo y el rango API de la unidad de bombeo seleccionada apartir de la literatura del fabricante.*
- 3) *Con la unidad seleccionada y la longitud de carrera obtener de las tablas 5.5 a la 5.12 de la referencia 1, el diámetro de la tubería, el diámetro del émbolo, el diámetro de la varillas y la velocidad de bombeo correspondiente a la profundidad de colocación de la bomba.*
- 4) *Calcular la longitud fraccional de cada sección de varillas con los datos de las tablas 5.2 y 5.4 de la referencia 1.*
- 5) *Calcular la longitud de cada sección de la sarta de varillas lo más aproximado a multiples de 25 pies.*
- 6) *Calcular el factor de aceleración (ec. 1)*
- 7) *Calcular la longitud de la carrera efectiva del émbolo, (ec. 4)*
- 8) *Utilizando la eficiencia volumétrica estimada, determinar el gasto probable y comparar contra el gasto deseado, (ec. 12).*

- 9) Calcular el peso muerto de la sarta de varillas, (ec. 5).
- 10) Calcular la carga de fluidos, (ec. 6).
- 11) Determinar la carga máxima sobre la varilla pulida y comparar contra la carga máxima de la unidad seleccionada.
- 12) Calcular el máximo esfuerzo en la parte superior de la sarta de varillas y comparar contra el máximo esfuerzo permisible de trabajo de las varillas utilizadas, (ec. 9).
- 13) Calcular el efecto de contrabalanceo ideal y comparar contra el contrabalanceo disponible de la unidad seleccionada, (ec. 12).
- 14) De la literatura del fabricante determinar la colocación de los contrapesos para obtener el efecto de contrabalanceo ideal.
- 15) Considerando que la unidad no estará a más del 5% fuera de su rango calcular el torque máximo del reductor de engranes y comparar con el rango API de la unidad seleccionada, (ecs. 14 y 15).
- 16) Calcular la potencia hidráulica, la potencia de fricción y la potencia al freno del motor, (ecs. 18, 19 y 20).
- 17) De la literatura del fabricante obtener la relación del reductor de engranes, el diámetro de la polea del reductor para la unidad seleccionada y la velocidad del motor. Apartir de estos datos determinar el tamaño de la polea motor para obtener la velocidad de bombeo deseada, (ec. 16).

Si alguno de los pasos anteriores no cumple con la unidad o cualquier componente de la misma se deberá cambiar el diseño apropiadamente.

En seguida se da una lista de las ecuaciones que emplea este método:

Factor de aceleración:

$$a = \frac{SN^2}{70500} \quad (1)$$

Sarta de varillas telescópicas para n secciones:

$$\frac{0.488A_p + R_1M_1}{A_1} = \frac{0.488A_p + R_1M_1 + R_2M_2 + \dots + R_nM_n}{A_n} \quad (2)$$

donde: $R_1 + R_2 + \dots + R_n = 1$

(3)

Carrera efectiva del émbolo:

$$S_p = S + \frac{40.8 L^2 \alpha}{E} - \frac{5.20 G D A_p}{E} \left[\frac{L}{A_1} + \frac{L_1}{A_1} + \frac{L_2}{A_2} + \dots + \frac{L_n}{A_n} \right] \quad (4)$$

donde: $\frac{L}{A_1} = 0$, cuando la tubería está anclada.

Carga en la varilla pulida:

$$W_r = M_1 L_1 + M_2 L_2 + \dots + M_n L_n \quad (5)$$

$$W_f = 0.433(L A_p - 0.204 W_r) \quad (6)$$

$$W_{max} = W_f + W_r(1 + \alpha) \quad (7)$$

$$W_{min} = W_r(1 - \alpha - 0.127 G) \quad (8)$$

$$\tau_{max} = \frac{W_{max}}{A_n} \quad (9)$$

Gasto de producción:

$$K = 0.14844 A_p \quad (10)$$

$$V = K S_p N \quad (11)$$

$$q = V E v \quad (12)$$

Contrabalanceo y torque:

$$C_i = 0.5 W_f + W_r(1 - 0.127 G) \quad (13)$$

$$T_p = C_i + W_c \left(\frac{d}{r} \right) \left(\frac{1}{2} \right) \quad (14)$$

$$T_p = (W_{max} - C) \left(\frac{S}{2} \right) \quad (15)$$

Relación entre la velocidad del motor y la velocidad de bombeo:

$$N = \frac{N_{de}}{Z d u} \quad (16)$$

Potencia requerida:

$$L N = D + 2.31 \frac{P_t}{G} \quad (17)$$

$$H_h = 7.86 \times 10^{-5} q G L N \quad (18)$$

$$H_f = 6.31110^{-7} W_r S N \quad (19)$$

$$H_b = 1.5(H_h + H_f) \quad (20)$$

A continuación se da una lista de la nomenclatura y unidades utilizadas en las ecuaciones deducidas en este método:

A1, A2...	Area de sección transversal de las secciones individuales de una sarta de varillas telescopiadas, pg^2 .
Ap	Area de sección transversal del émbolo, pg^2 .
At	Area de sección transversal del espesor de la tubería, pg^2 .
C	Efecto de contrabalanceo total sobre la varilla pulida, lb.
Ct	Efecto de contrabalanceo debido al desbalanceo estructural, lb.
D	Profundidad del nivel del fluido, pies.
E	Módulo de elasticidad para el acero, lb/pg^2 .
Ev	Eficiencia volumétrica de la bomba, adim.
G	Gravedad específica de los fluidos del pozo, adim.
Hb	Potencia al freno del motor, hp.
Hf	Pérdida de potencia por fricción subsuperficial, hp.
Hh	Potencia hidráulica para levantar los fluidos, hp.
K	Constante de la bomba, $\text{bl}/\text{dia}/\text{pg}$ spm.
L	Longitud total de la sarta de varillas, pies.
L1, L2...	Longitud de cada sección individual de varillas de una sarta telescopiada, pies.
LN	Levantamiento neto de la columna de fluidos, pies.
M1, M2...	Peso por unidad de longitud de cada sección individual de una sarta telescopiada, lb. pie.
N	Velocidad de bombeo, spa.
Ne	Velocidad del motor, rpm.

Pt	Presión en el cabezal del pozo, lb/pg ² .
q	Gasto de producción, bl/día.
R ₁ , R ₂	Longitud individual de cada sección de varillas en una sarta telescopiada, expresada como una fracción de la longitud total de la sarta de varillas, adim.
S	Longitud de carrera de la varilla pulida, pg.
S _p	Longitud de la carrera efectiva del émbolo, pg.
T _p	Torque máximo en el reductor de engranes, pg-lb.
V	Desplazamiento teórico de la bomba, bl/día.
W _c	Peso de los contrapesos en la manivela, lb.
W _f	Carga o peso de la columna de fluidos, lb.
W _{max}	Carga máxima en la varilla pulida, lb.
W _{min}	Carga mínima en la varilla pulida, lb.
W _r	Peso de la sarta de varillas, lb.
Z	Relación de engranaje del reductor de engranes, adim.
d	Distancia desde la flecha de la manivela hasta el centro de gravedad de los contrapesos, pg.
d _e	Diámetro de la polea del motor, pg.
d _r	Diámetro de la polea del reductor de engranes, pg.
l ₁	Distancia a lo largo del balancín desde el cojinete principal hasta el balero de la cruceta, pg.
l ₂	Distancia a lo largo del balancín desde el cojinete principal hasta la brida, pg.
r	Distancia a lo largo de la manivela desde la flecha hasta el perno de la biela, pg.
α	Factor de aceleración para movimiento armónico simple, adim.

III.3.2 METODO API RP.11-L².

Un grupo de usuarios y fabricantes de equipo de bombeo mecánico, presentaron en 1954 un estudio detallado de la grán

variedad de problemas asociados con este sistema artificial de bombeo. Los cálculos de diseño están basados en datos de pruebas que fueron obtenidos durante la etapa de investigación del proyecto.

La compañía que desarrolló este método, envió al API una copia para su publicación: "Recommended Practice for the Design Calculation of Sucker Rod Pumping Systems", para unidades de bombeo convencional.

En la gran mayoría de los casos, se ha establecido que los valores calculados por este método se encuentran dentro de un rango razonable de exactitud con respecto a los valores medidos, esto se debe a que el método está basado en la interpretación de valores promedio obtenidos en programas de computo.

Existen varias condiciones que pueden presentarse en un pozo, las cuales causarán resultados dudosos en el diseño, estas son:

- 1) Pozos fracturados o desviados.
- 2) Fluidos muy viscosos.
- 3) Excesiva producción de arena.
- 4) Excesiva producción de gas.
- 5) Pozos fluentes.

En un principio este método se limitó solo a realizar cálculos considerando que la tubería de producción está anclada. Sin embargo en la mayoría de los casos la tubería no está anclada, por lo que se incluye una fórmula que da una buena aproximación para calcular el viaje relativo del émbolo con respecto a la bomba. Este valor está identificado con el símbolo S_p . Si se analiza la fórmula de S_p , se observará que la contracción de la tubería causada por la transferencia de la carga del fluido de la válvula de pie a la válvula viajera, es restada de la carrera del émbolo en la superficie. Esto es para simplificar la fórmula, la cual no es matemáticamente correcta pero es lo suficientemente aproximada para aplicaciones prácticas.

Cuando las condiciones en pozos de bombeo normal se ajustan a las indicadas en el apéndice "A" de la referencia 2, los resultados de los cálculos pueden ser utilizados con confianza. Las condiciones extrañas que no se ajustan causarán que los valores obtenidos por este método no sean los reales, por lo que se debe tener en cuenta estas condiciones desfavorables.

Si se observa la figura 3.5 se tendrá una mejor comprensión de las fórmulas utilizadas para la solución de problemas de Bombeo Mecánico. Las variables F_0 , F_1 , F_2 , W_{rl} y S se ilustran en la figura.

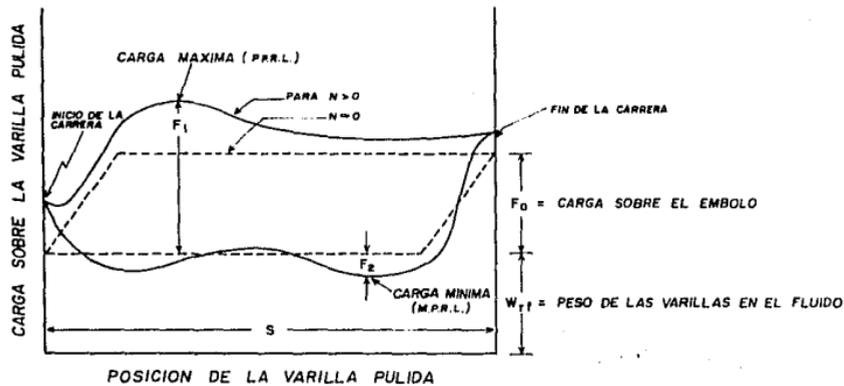


FIG. 3.5 · CARTA DINAMOMETRICA BASICA

De la figura 3.5:

A) Para una velocidad de bombeo, $N \cong 0$ se tiene que:

La carga máxima sobre la varilla pulida, es:
 $PPRL = Wrf + F_0$

La carga mínima sobre la varilla pulida, es:
 $MPRL = Wrf$

B) Para una velocidad de bombeo, $N > 0$ se tiene que:

La carga máxima sobre la varilla pulida, es:
 $PPRL = Wrf + F_1$

La carga mínima sobre la varilla pulida, es:
 $MPRL = Wrf - F_2$

El problema se generaliza si se utilizan parámetros adimensionales:

A) Las variables adimensionales independientes son:

N/N_0 (dimensionalmente = $\text{spm}/\text{spm} = 1$), y

F_0/Skr (dimensionalmente = $\text{lb}/\text{pg}/\text{lb}/\text{pg} = 1$).

donde:

$N = \text{spm}$

$N_0 = \text{spm}$ de la frecuencia natural de la sarta de varillas.

$S =$ carrera superficial.

$kr =$ constante de elasticidad de la sarta.

B) Las variables adimensionales dependientes son:

Carga máxima en la varilla pulida, $PPRL: F_1/Skr$

Carga mínima en la varilla pulida, $MPRL: F_2/Skr$

Torque máximo en el reductor de engranes, $PT: 2T/S^2kr$

Potencia en la varilla pulida, $PRHP: F_3/Skr$

carrera del émbolo, $Sp: Sp/S$

En este método, mediante una computadora se simuló el sistema de bombeo mecánico. Las corridas en la computadora fueron hechas para muchas combinaciones de N/N_0 y F_0/Skr para poder obtener los valores de las variables adimensionales dependientes en cada prueba. Los resultados fueron correlacionados graficando las

familias de curvas mostradas en las figuras 3.6 a la 3.11. De estas curvas se determinan los valores de algunas variables no adimensionales, para ser sustituidas en las siguientes fórmulas de diseño:

Carrera efectiva del émbolo,

$$S_p = [(S_p/S)S] - [F_o \ 1/kt]$$

NOTA: Cuando la tubería está anclada, el valor de $1/kt$ es igual a cero, por lo que la fórmula para S_p sería

$$S_p = [(S_p/S)S]$$

Desplazamiento de la bomba,

$$PD = 0.1166 S_p N D^2$$

Carga máxima en la varilla pulida,

$$PPR = Wrf + [(F_1/Skr)Skr]$$

Carga mínima en la varilla pulida,

$$MPRL = Wrf - [(F_2/Skr)Skr]$$

Torque máximo en el reductor de engranes,

$$PT = (2T/S^2 k_r) Skr S N (2.59 \times 10^{-6})$$

Contrabalanceo requerido,

$$CBE = 1.06 (Wrf + \frac{1}{2} F_o)$$

Procedimiento de diseño:

1.- Para obtener la solución final de este diseño es necesario aplicar un método de ensayo y error. Por lo general se requiere de tres pasos para el diseño de una instalación de Bombeo Mecánico:

- A) Hacer una selección preliminar de los componentes.
- B) Realizar los cálculos preliminares de los componentes seleccionados, haciendo uso de las tablas y figuras presentadas en este capítulo.
- C) Comparar los datos calculados con los preliminares.

Generalmente se hacen más de un cálculo debido a las limitaciones de los componentes de la instalación, esto se debe a que no siempre se obtiene en la primer selección los elementos adecuados.

2.- *La mínima información que se debe de conocer (o suponer) para el diseño de una instalación de bombeo, es:*

- ▶ Nivel del fluido, H en pies (altura neta a levantar).
- ▶ Profundidad de colocación de la bomba, L en pies.
- ▶ Velocidad de bombeo, N en rpm.
- ▶ Longitud de la carrera superficial, S en pg.
- ▶ Diámetro del émbolo de la bomba, Dp en pg.
- ▶ Diámetro nominal de la tubería ya sea anclada o desanclada, en pg.
- ▶ Diseño y diámetro de las varillas, en pg.
- ▶ Geometría de la unidad.
- ▶ Densidad relativa de los fluidos, adim.

3.- *Con estos factores el diseñador estard capacitado para calcular los siguientes parámetros:*

- ▶ Carrera efectiva del émbolo, Sp en pg.
- ▶ Desplazamiento de la bomba (o gasto), PD en bl/dia.
- ▶ Carga máxima sobre la varilla pulida, PPRL en lb.
- ▶ Carga mínima sobre la varilla pulida, MPRL en lb.
- ▶ Torque máximo en el reductor de engranes, PT en lb-pg.
- ▶ Potencia en la varilla pulida, PRHP en hp.
- ▶ Contrabalanceo requerido, CBE en lb.

4.- *Refiriéndose a la tabla 4.1 (de la referencia 2 pag. 7), utilizando la sarta de varillas designada en la columna 1 y el diámetro del émbolo en la columna 2 como guía, leer los valores de W_r , E_r y F_c en las columnas 3, 4 y 5 respectivamente. En la tabla 3.1 se muestran los valores dados para E_l . Este valor es significativo solo si se está trabajando con la tubería desanclada, en caso contrario este factor no es necesario para efectos de cálculo.*

5.- *En el formato de cálculo (tabla 3.4), efectuar las operaciones matemáticas indicadas hasta el paso 11. Si la tubería está anclada, el factor $1/k_1$ (paso 11) es igual a cero por lo tanto no es necesario calcularlo. Hasta ahora se tienen los valores con los cuales se puede calcular la carrera efectiva del émbolo S_p y el desplazamiento de la bomba (el gasto) PD.*

6.- *Con los valores calculados de F_o/S_k y N/No' obtener el valor de S_p/S de la figura p. 4 y calcular S_p y PD en los pasos 13 y 14. El desplazamiento de la bomba es la primer prueba que se hace para verificar si la selección previa de los componentes es correcta. Si el desplazamiento de la bomba calculado en el paso 14 no satisface los requerimientos previos (esto es comparando el gasto calculado con el supuesto), se debe hacer un ajuste apropiado en los datos considerados al principio y repetir los pasos del 1 al 14. Cuando el valor calculado del desplazamiento de la bomba es aceptable, continuar con los cálculos ejecutando los pasos 15, 16, y 17.*

- 7.- Utilizando los valores calculados de F_0/Skr y N/No , obtener los siguientes valores: F_1/Skr (fig. 3.7), F_2/Skr (fig. 3.8), $2T/Skr$ (fig. 3.9) y F_3/Skr (fig. 3.10). Refiriéndose a las figuras 3.6 y 3.8 para determinar Sp/S y Ta respectivamente, se debe utilizar el valor de N/No calculado en el paso 10. Anotar el valor de Ta (fig. 3.11).
- 8.- Sustituyendo los valores correctos en las fórmulas y efectuando los cálculos matemáticos en los pasos 23 al 27 se obtienen las cargas esperadas para el equipo seleccionado en la prueba. Es necesario comparar estas cargas con las limitaciones hechas anteriormente. Calcular los esfuerzos en la sarta de varillas para determinar si están dentro de los límites aceptables.
- 9.- Por lo general es necesario hacer más de una selección y cálculos para las condiciones de operación antes de hacer una selección óptima del equipo.

En la tabla 3.4 se muestra el tipo de formato y la secuencia de cálculos a seguir para el diseño de una unidad por este método, de las figuras 3.6 a la 3.11 se obtienen los valores gráficos de las variables dimensionales.

Para determinar la posible longitud de carrera, la combinación de varillas, la velocidad de bombeo y el rango API de la unidad, se puede hacer uso de la figura 5.6 de la referencia 1 y de las tablas 5.5 a la 5.12 de la misma referencia.

Pasos a seguir para obtener los factores antes mencionados:

1) Con el dato del gasto deseado en bl/día y la profundidad de colocación de la bomba, se obtiene alguna de las curvas graficadas en la figura 5.6 de la referencia 1.

2) Con la letra que le corresponda a dicha curva seleccionada se consulta la tabla anexa a la figura y se determina el rango de la unidad y la longitud de carrera.

3) Con los datos de longitud de carrera, rango de la unidad y profundidad de colocación de la bomba determinar el diámetro del émbolo, el diámetro nominal de la T.P., la combinación de varillas y el rango de la velocidad de bombeo de las tablas.

4) Para obtener el porcentaje de cada diámetro de varilla consultar la tabla 4.1 de la referencia 2 pag. 7 en las columnas 4, 7, 8, 9, 10 y 11. Las tablas 3.1 y 3.2 de este capítulo muestran los datos necesarios de tuberías y varillas respectivamente.

NOTA: Si en los datos no se tiene el nivel de la columna de los fluidos, se considera que es igual a la profundidad de colocación de la bomba por lo tanto $H = L$.

El valor de T_a (fig. 3.11 Ajuste al Torque Máximo), se obtiene multiplicando el valor del porcentaje (%) indicado en las curvas por:

$$\left(\frac{Wrf}{Sk_r} - 0.3 \right)$$

donde el valor de Wrf/Sk_r se obtiene en el paso No.17, F_0/Sk_r en el paso No.8 y N/No' del paso No.10. Finalmente T_a es igual a la siguiente expresión:

$$T_a = 1 \pm \left[\left(\frac{Wrf}{Sk_r} - 0.3 \right) \times 0.1 \times \% \right]$$

El signo depende del valor de Wrf/Sk_r ; si es menor a 0.3 el segundo término se resta; si es igual a 0.3 no se hace ajuste al igual que si el valor obtenido fuera cero y si el valor de Wrf/Sk_r es mayor a 0.3 el segundo término de la ecuación se suma.

Tabla 3.1. - Datos de tubería de producción.

Diámetro noml. T.P. (pg)	Diámetro Exterior (pg)	Diámetro Interior (pg)	Area de Metal (pg ²)	Cte. Elast. Et x 10 ⁻⁶ (pg/lb-pie)
1 1/2	1.900	1.810	0.800	0.500
2	2.375	1.995	1.304	0.307
2 1/2	2.875	2.441	1.812	0.221
3	3.500	2.992	2.590	0.154
3 1/2	4.000	3.478	3.077	0.130
4	4.500	3.958	3.601	0.111

Tabla 3.2. - Datos de las varillas de succión.

Diámetro de varillas (pg)	Areas de metal (pg ²)	Peso de varillas en el aire (lb/pie)	Cte. Elast. Er x 10 ⁵ (pg/lb-pie)
1/2	0.193	0.72	1.990
5/8	0.307	1.13	1.270
3/4	0.442	1.63	0.883
7/8	0.601	2.22	0.649
1	0.783	2.90	0.497
1 1/8	0.994	3.87	0.383

Tabla 2.3 Constantes de bomba.

Diámetro de émbolo (pg)	Area del émbolo (pg ²)	Constante de la bomba (K)
5/8	0.307	0.046
3/4	0.442	0.066
15/16	0.690	0.102
1	0.785	0.117
1 1/16	0.886	0.132
1 1/8	0.994	0.148
1 1/4	1.227	0.182
1 1/2	1.767	0.262
1 3/4	2.405	0.357
1 25/32	2.488	0.370
2	3.142	0.466
2 1/4	3.976	0.590
2 1/2	4.909	0.728
2 3/4	5.940	0.861
3 3/4	11.045	1.640
4 3/4	17.721	2.630

Tamaños API.

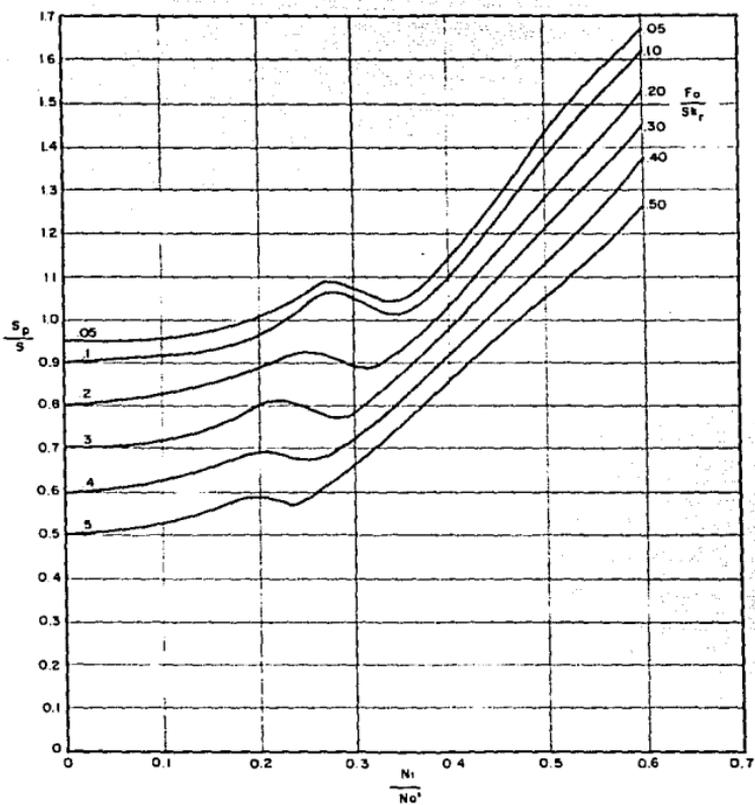


FIGURA 3.6

$\frac{S_p}{S}$ FACTOR DE LA CARRERA DEL EMBOLO

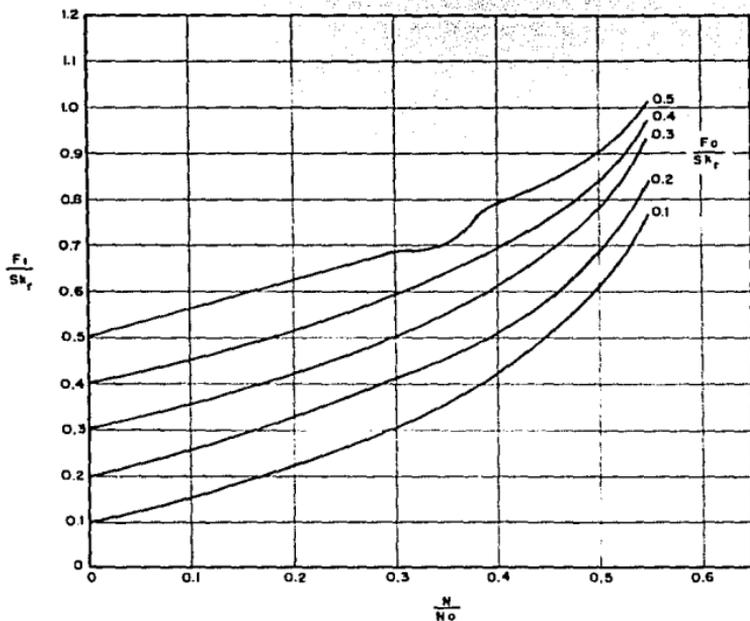


FIGURA 3.7

$\frac{F_i}{S k_r}$ CARGA MAXIMA EN LA VARILLA PULIDA

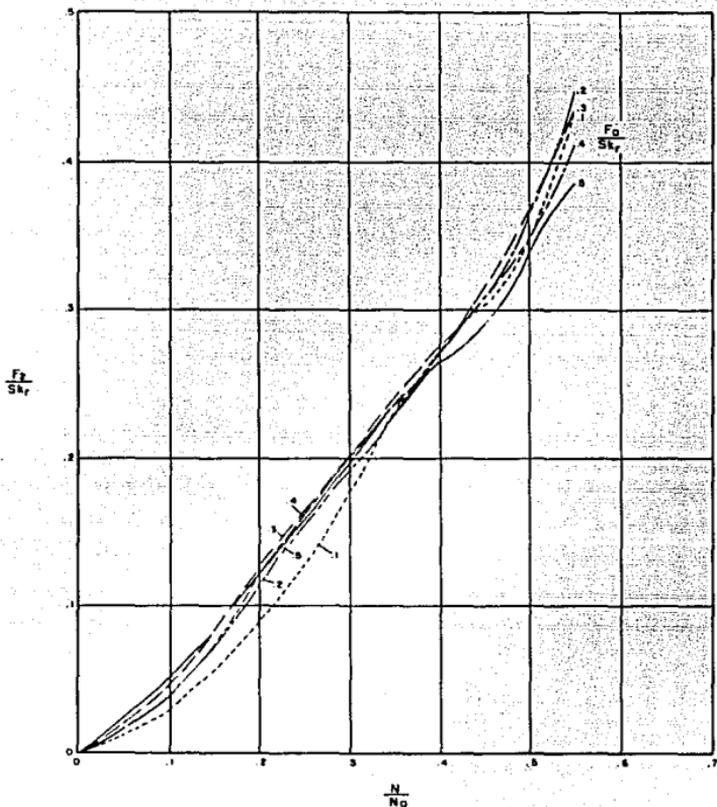


FIGURA 3.8

$\frac{F_z}{S k r}$ CARGA MINIMA EN LA VARILLA PULIDA

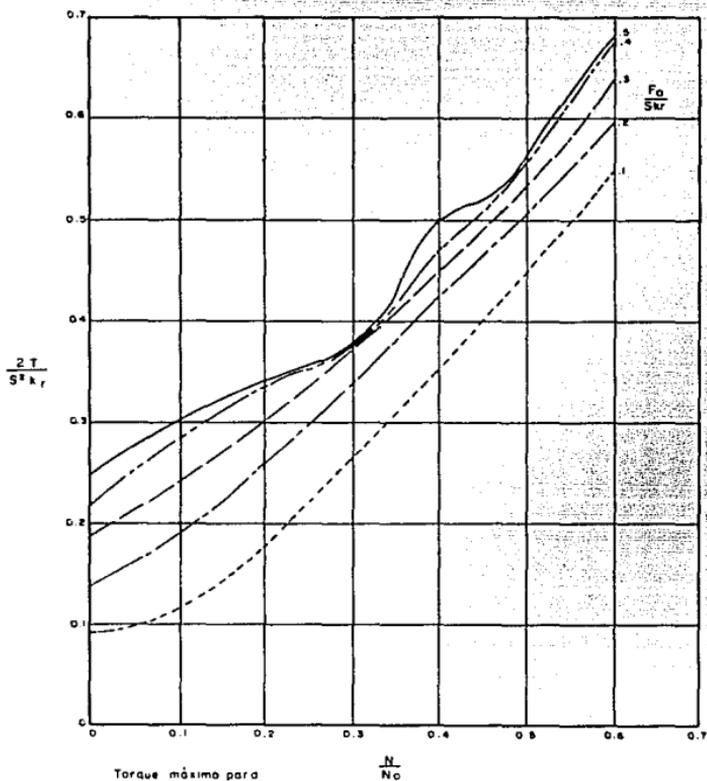


FIGURA 3.9

$\frac{2T}{S^2 k_r}$ TORQUE MAXIMO

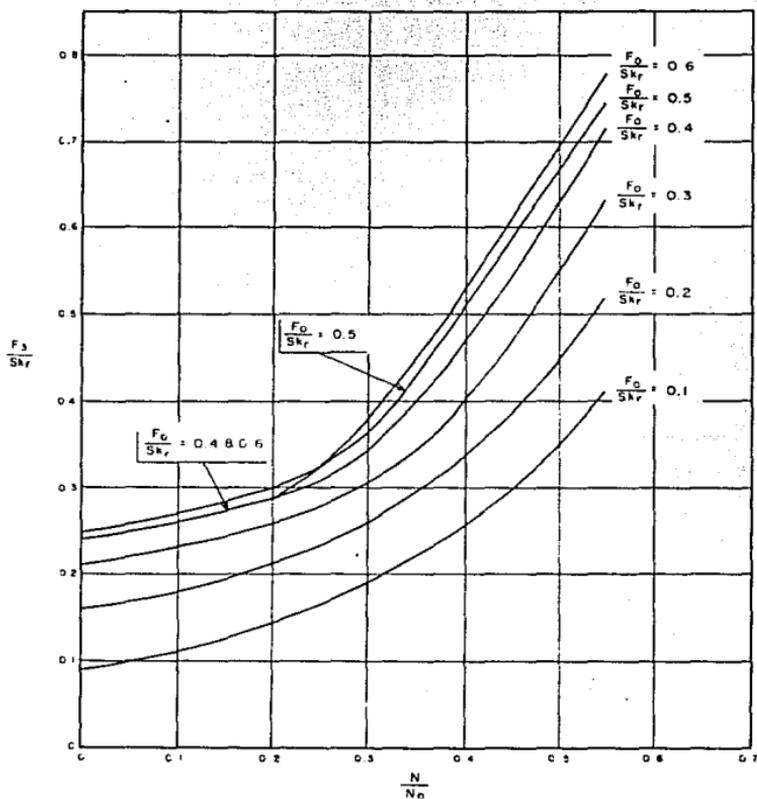


FIGURA 3.10

$\frac{F_2}{Skr}$ POTENCIA EN LA VARILLA PULIDA

REFERENCIAS

- 1.- Craft B.C., Holden W.R. and Graves E.D. :*"Well Desing: Drilling and Production"*, Prentice-Hall-Inc. Engledwood Cliff, N.J., (1962).
- 2.- API RP-11L:*"Recommended Practice for desing calculations for sucker rod pumping systems (Conventional Units)"*, Third Edition, february 1977.
- 3.- Soto Rodriguez J.A. y Valdez Guerra J.I.:*"Evaluación de métodos para diseñar una instalación de bombeo mecánico convencional utilizando una calculadora programable TI-59."*, E.S.I.A. IPN. 1983.
- 4.- Medellín Salgado M.:*"Bombeo Mecánico"*, Facultad de Ingeniería, UNAM. 1986.
- 5.- Brown K.E.:*"The technology of Artificial Lift Method."* Vol.2a Tulsa, Oklahoma: 1980.
- 6.- *Apuntes de clases: "Producción de Pozos II"*, Facultad de Ingeniería, UNAM.

IV TEORIA DEL ANALISIS NODAL.

IV.1 INTRODUCCION.^{1,2}

La aplicación de la teoría del análisis nodal, hace necesario el uso de correlaciones para determinar: *las propiedades de los fluidos, longitud y diámetro de las tuberías, estranguladores y válvulas de seguridad.* Para tratar de optimizar el transporte de los hidrocarburos desde el yacimiento hasta los tanques de almacenamiento en superficie. Por ejemplo para determinar las propiedades de los fluidos, es necesario tener un laboratorio de análisis de PVT, pero en el campo es difícil que exista uno por lo tanto las propiedades se calculan por medio de correlaciones que son ecuaciones empíricas obtenidas de una gran cantidad de pruebas hechas en laboratorio. Asimismo existen correlaciones para diseñar una red completa para transportar los hidrocarburos, todas estas están fundamentadas principalmente en lo que es la mecánica de los fluidos en la sección de flujo a través de tuberías.

Las propiedades físicas de los fluidos que se pueden calcular mediante correlaciones, son: *la tensión superficial, la densidad, la compresibilidad, y la viscosidad.* Así como también: *La relación de solubilidad, el factor de volumen de cada una de las fases a las condiciones de presión y temperatura que se encuentren cuando estén estáticos o fluyendo.*

Cabe señalar que el uso de correlaciones siempre acarrea un margen de error, por lo que los datos siempre serán aproximados. La forma en la cual se puede conocer el margen de error es, comparando los valores obtenidos en el laboratorio con los calculados.

IV.2 NODOS DE SOLUCION.^{1,2,3}

El objetivo del análisis nodal de sistemas es conocer el comportamiento de flujo de fluidos a través de un sistema de producción, y así reducir los costos del equipo y/o incrementar la producción.

El análisis se hace en pozos terminados, que va desde la frontera exterior del yacimiento hacia el fondo del pozo a través de las perforaciones de la tubería de revestimiento y la entrada de la sección de terminación de la tubería de producción, subiendo por la sarta de la misma incluyendo posibles restricciones y válvulas de seguridad de fondo, estranguladores superficiales, la línea de descarga, y finalmente el separador.

La fig.4.1 muestra un esquema de un sistema de producción simple. Este consiste básicamente de tres secciones o módulos:

- 1) Flujo a través del un medio poroso.
- 2) Flujo a través de tuberías verticales o inclinadas (T. P.).
- 3) Flujo a través de tuberías horizontales (L. D.).

La figura 4.2 muestra los componentes de un sistema de producción más completo.

A continuación se anotan las pérdidas de presión que ocurren en un sistema de producción más complejo, iniciando en el yacimiento y terminando en el separador, (ver figura 4.3):

- $\Delta P_1 = P_{vs} - P_{vfs}$ = Caída de presión en el medio poroso (yacimiento).
- $\Delta P_2 = P_{vs} - P_{vf}$ = Caída de presión a través de la terminación.
- $\Delta P_3 = P_{ur} - P_{dr}$ = Caída de presión a través de restricciones de fondo.
- $\Delta P_4 = P_{usv} - P_{dsv}$ = Caída de presión a través de la válvula de seguridad.
- $\Delta P_5 = P_{vh} - P_{dsv}$ = Caída de presión a través del estrangulador superf.
- $\Delta P_6 = P_{dev} - P_{sep}$ = Caída de presión a través de la línea de descarga.
- $\Delta P_7 = P_{vf} - P_{vh}$ = Caída de presión total en la tubería de producción.
- $\Delta P_8 = P_{vh} - P_{sep}$ = Caída de presión total en la línea de descarga.

Las distintas configuraciones de los pozos pueden variar desde un sistema muy simple como el de la figura 4.1 a un sistema más complejo como el de la figura 4.3.

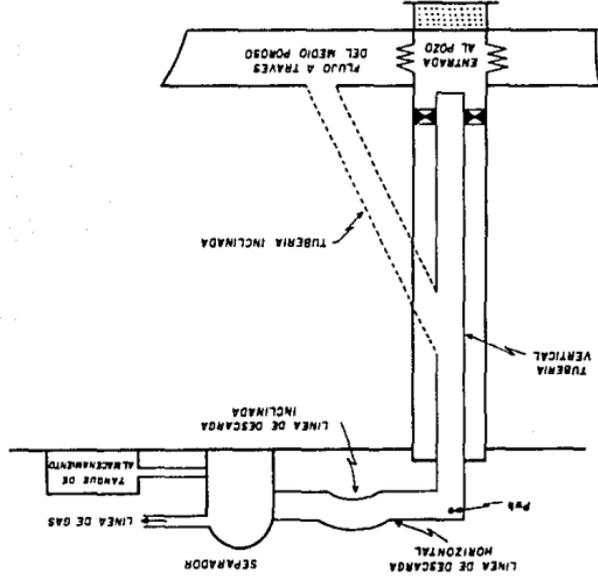
La capacidad del pozo para producir estará relacionada con la eficiencia del sistema de tuberías para manejar los fluidos, por lo tanto el efecto de los distintos componentes se muestra por un concepto nodal. Los nodos de solución son colocados en segmentos definidos por diferentes ecuaciones o correlaciones.

Un nodo se clasifica como funcional cuando existe una presión diferencial a través de él, y la respuesta de la presión o el gasto puede ser representada por alguna función físico-matemática.

Brown y Beggs analizaron como nodos de solución las dos principales posiciones el fondo del pozo y la cima del mismo. El nodo 1 representa la presión de separación y el nodo 8 representa la presión estática del yacimiento. Para hacer un análisis nodal, tanto la P_{sep} como la P_{vs} se consideran constantes, por lo tanto estas dos posiciones no estarán en función del gasto. Por esta razón cualquier solución por ensayo y error se deberá iniciar en el nodo 1 (P_{sep}) o en el nodo 8 (P_{vs}) o en ambos nodos si es seleccionado como nodo de solución un nodo intermedio tales como el nodo 3 o el nodo 6 (ver figura 4.2).

Para analizar desde el fondo del pozo hasta el cabezal, se utilizan correlaciones de flujo multifásico en tuberías verticales y para analizar desde el cabezal hasta el separador se hace uso de correlaciones de flujo multifásico para tuberías horizontales. Para el caso en el que se tienen tuberías inclinadas se emplean métodos que generalicen las condiciones en las que se encuentre la tubería, como puede ser la correlación de Beggs y Brill ya que se

FIG. 4.1 UN SISTEMA DE PRODUCCION COMPLETO



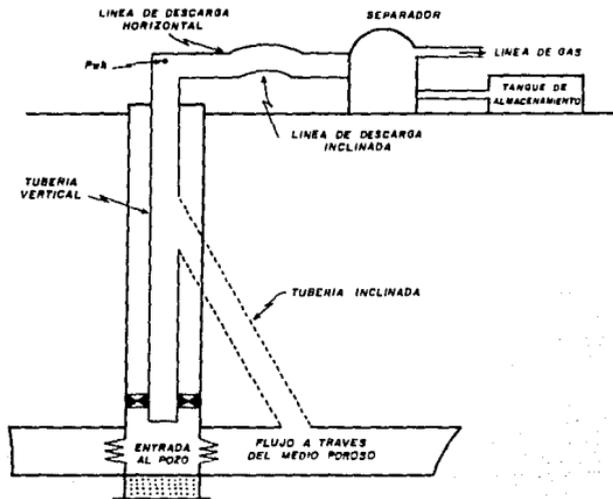


FIG. 4.1 UN SISTEMA DE PRODUCCION COMPLETO

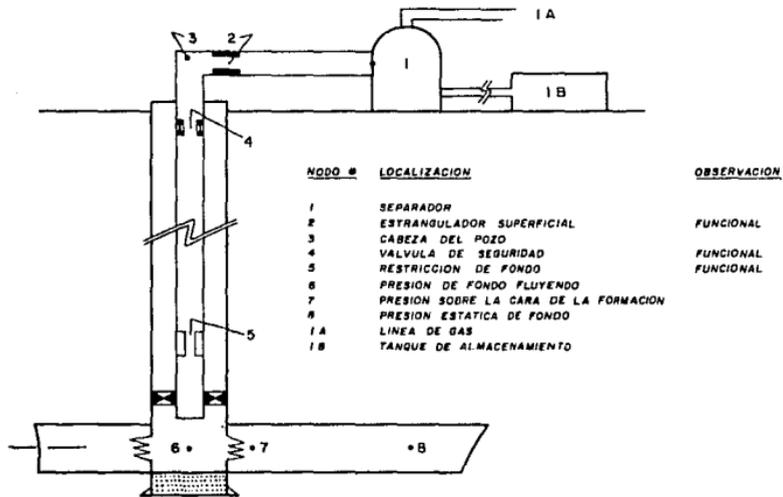


FIG. 4.2 LOCALIZACION DE NODOS

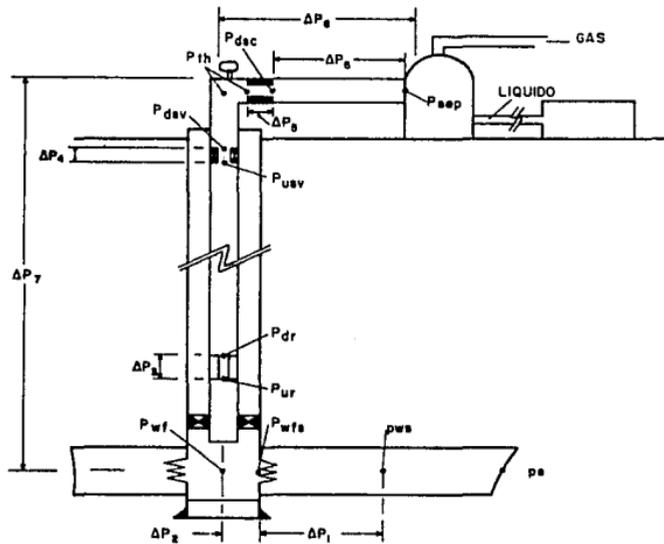


FIG. 4.3 CAIDAS DE PRESION EN UN SISTEMA COMPLETO DE PRODUCCION

puede aplicar a tuberías verticales, horizontales o inclinadas. Con estas correlaciones se pueden diseñar las instalaciones superficiales y subsuperficiales de pozos productores de aceite y gas, teniendo como parámetros principales: la presión, la temperatura y las propiedades de los fluidos, y como variables: El gasto, los diámetros y longitud de tuberías según sea el caso.

IV.3 TUBERIAS TELESCOPIADAS.^{2,3}

Hasta aquí la discusión del análisis nodal se ha enfocado a un sistema simple de producción, como es el manejar líneas de descarga y tuberías de producción de un solo diámetro. Por supuesto que es posible, y algunas veces ventajoso cambiar de diámetro la tubería a la mitad de la sarta de producción. Para evaluar un sistema de esta naturaleza, se puede considerar como nodo de solución el punto donde cambia de diámetro la tubería.

Existen numerosas razones por las cuales una sarta telescopiada puede ser corrida en un pozo, pero una de las principales implica el uso de un LINER (T.R. corta) en la sarta total de tubería de revestimiento. En muchas terminaciones se emplea el LINER en la sección inferior del pozo, este restringe el diámetro de la tubería de producción (T.P.) que va a ser corrida dentro del mismo, pero tuberías de revestimiento colocadas arriba del LINER permiten la instalación de una sarta de T.P. de mayor diámetro, que puede ser corrida desde la parte superior del LINER hasta la superficie. Este tipo de análisis nodal permite una fácil solución para determinar el efecto de diferentes diámetros de T.P. arriba del LINER, ver figura 4.4.

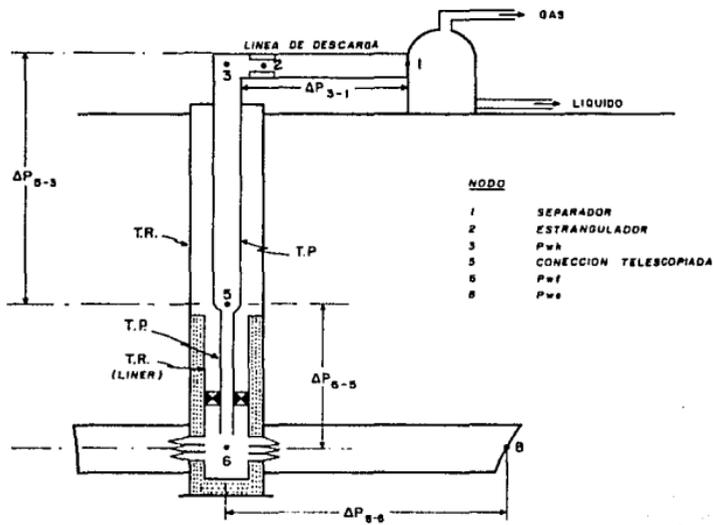


FIG. 4.4 SARTA TELESCOPIADA

REFERENCIAS

- 1.- Garaicochea, P. F.: "Apuntes de Transporte de Hidrocarburos", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.
- 2.- Brown, K. E y otros: "Nodal Systems Analysis", C.4 Vol.4, Petroleum Publishing, Co. Tulsa Okla. (1980).
- 3.- Mach J, Proaño E., and Brown K. E.: "A Nodal Approach for Applying Systems Analysis to the Flowing an Artificial Lift Oil or Gas Well", paper SPE 8025.

V. ANALISIS NODAL EN UN SISTEMA ARTIFICIAL DE PRODUCCION DE BOMBEO MECANICO.

V.1 INTRODUCCION.

En el capítulo anterior se dio una breve explicación de lo que es el análisis nodal en un sistema de producción en pozos petroleros.

Asimismo en capítulos anteriores se mencionó que es y cómo funciona un equipo de bombeo mecánico, además de dos métodos principales para diseñar una instalación completa de bombeo mecánico. El nodo solución para este caso será la presión de fondo fluyendo o presión de entrada a la bomba, $P_{vf}=P_a$. En este capítulo se hace un análisis completo para poder obtener la producción más conveniente en función de P_a .

La predicción de curvas características (o curvas de entrada a la bomba) en *Bombeo Mecánico*, se considera para dos casos: 1) *Bombeando solo líquido* y 2) *Bombeando líquido más gas*. Para ambos casos, se considera que la bomba se instala en el fondo del pozo; además de que el diámetro de la tubería de producción, el diámetro de la bomba, la sarta de varillas y la relación biela/manivela permanecen constantes.

Los parámetros principales para el análisis de este sistema son la velocidad de bombeo y la longitud de carrera del émbolo combinados entre sí para obtener la mejor solución.

En la figura 4.2 Capítulo IV, se observa la localización del nodo solución para este caso, que viene siendo de acuerdo a la figura el nodo No.6.

V.2 ANALISIS Y PROCEDIMIENTO.

El desplazamiento teórico de la bomba es:

$$V = A \times v \quad (V.1)$$

donde:

A = Área del émbolo, A_p .

v = SpN

Sp = Longitud de carrera efectiva del émbolo.

N = velocidad de bombeo.

Por lo tanto la ecuación V.1 queda como:

$$V = A_p Sp N$$

En unidades consistentes:

$$V [\text{bl/dia}] = A_p [\rho_g^2] \times S_p [\rho_g / \text{carrera}] \times N [\text{carrera/min.}] \times 1440 [\text{min/dia}] \\ \times \frac{1}{\rho_{702}} [\text{bl}/\rho_g^3]$$

finalmente:

$$V = 0.14842 A_p S_p N \quad (V.2)$$

el valor de 0.14842 A_p se conoce como la constante de la bomba y se define como:

$$K = 0.14842 A_p \quad (V.3)$$

como este término es independiente de las condiciones de operación en la superficie la ecuación V.2 queda como:

$$V = K S_p N \quad (V.4)$$

La tabla 3.3 (cap. III) muestra las áreas de émbolos y sus constantes de bombas para todos los diámetros de bombas API.

La relación entre el gasto real y el gasto teórico da como resultado la eficiencia volumétrica y se denota como:

$$E_v = \frac{q_{rc}}{V} \quad (V.5)$$

donde:

$$V = \frac{q_{tc}}{E_v} \quad (V.6)$$

este factor es de suma importancia ya que con él se determinan las condiciones de operación, si es o no eficiente.

Del capítulo II resolviendo la ecuación II.19 para P_s , se tiene:

$$P_s = \frac{1}{A_p} [W_r + F_b + W_r + \alpha W_r - PPRL] \quad (V.7)$$

La relación entre P_s y V está implícitamente descrita por la ecuación V.7. Una relación explícita se puede obtener sustituyendo los valores de PPRL y α en la ecuación como sigue: sustituyendo la ecuación II.3 en la ecuación II.1 del cap.II, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$PPRL = \frac{T}{4} S F A_r + 0.5625 \tau_{min} S F A_r \quad (V.8)$$

sustituyendo la ecuación II.21 en la ecuación II.2, da lo siguiente:

$$\tau_{min} = \frac{1}{A_r} [W_r - 0.127367 \gamma (W_r - W_r \alpha)] \quad (V.9)$$

sustituyendo la ecuación II.20 (cap.II) en la ecuación V.9, se tiene:

$$T_{min} = \frac{1}{A_{lr}} \left[W_r - 0.127807 \gamma (W_r - W_r \frac{SN^2}{70 \cdot 500} (1 \pm B/M)) \right] \quad (V.10)$$

sustituyendo la ecuación V.10 en la ecuación V.8, se tiene:

$$PPRL = \frac{T}{4} SFA_{lr} + 0.5025 SFA_{lr} \left[\frac{1}{A_{lr}} (W_r - 0.127807 \gamma (W_r - W_r \frac{SN^2}{70 \cdot 500} (1 \pm B/M))) \right]$$

o

$$PPRL = \frac{T}{4} SFA_{lr} + 0.5025 SF W_r - 0.071644 SF W_r - 0.5025 SF W_r \frac{SN^2}{70 \cdot 500} (1 \pm B/M) \quad (V.11)$$

ahora el valor de PPRL como es dado en la ecuación V.11 y el valor de α como es dado en la ecuación II.8 (cap.II), se sustituyen en la ecuación V.7:

$$P_3 = \frac{1}{A_p} \left[W_r' + F_b + W_r + W_r \frac{SN^2}{70 \cdot 500} (1 \pm B/M) - \left(\frac{T}{4} SFA_{lr} + 0.5025 SF W_r - 0.071644 SF \gamma (W_r - 0.5025 SF W_r \frac{SN^2}{70 \cdot 500} (1 \pm B/M)) \right) \right]$$

finalmente queda como:

$$P_3 = \frac{1}{A_p} \left[W_r' + F_b + W_r (1 - 0.5025 SF + 0.071644 SF \gamma) - \frac{T}{4} SFA_{lr} + \frac{W_r SN^2}{A_p 70 \cdot 500} [1 + 0.5025 \pm (1 - 0.5025 SF) (B/M)] \right] \quad (V.12)$$

donde el signo más es para la UNIDAD CONVENCIONAL y el signo menos es para la UNIDAD MARK II y AEROBALANCEADA. P_3 en esta ecuación es la mínima presión de entrada a la bomba permisible.

Suponiendo que la carrera del émbolo es el 80% de la carrera en la superficie, la ecuación V.4 queda como:

$$V = 0.8KSN \quad (V.13)$$

donde SN^2 se puede escribir como:

$$SN^2 = \frac{(0.8KSN)N}{0.8K} \quad (V.14)$$

como 0.8KSN es igual al volumen producido la ecuación V.14 queda como:

$$SN^2 = \frac{N}{0.8K} V \quad (V.15)$$

sustituyendo la ecuación V.15 en la ecuación V.12, queda:

$$P_2 = \frac{1}{A_p} [Wl' + Fb + W_r(1 - 0.5025SF + 0.071044SF\gamma) - \frac{T}{4} SFA_{1r}] + \frac{W_r N}{50 \cdot 400KA_p} [1 + 0.5025SF \pm (1 - 0.5025SF)(B/M)] V \quad (V.16)$$

la ecuación V.16 se puede escribir como sigue:

$$P_2 = a + bV \quad (V.17)$$

donde:

$$a = \frac{1}{A_p} [Wl' + Fb + W_r(1 - 0.5025SF + 0.071044SF\gamma) - \frac{T}{4} SFA_{1r}] \quad (V.18)$$

y

$$b = \frac{W_r N}{50 \cdot 400KA_p} [1 + 0.5025SF \pm (1 - 0.5025SF)(B/M)] \quad (V.19)$$

otra forma de escribir SN^2 , es la siguiente:

$$SN^2 = \frac{(0.8KSN)^2}{(0.8K)^2 S} = \frac{V^2}{(0.8K)^2 S} \quad (V.20)$$

sustituyendo el valor de SN^2 de la ecuación V.20 en la ecuación V.12, se tiene:

$$P_2 = \frac{1}{A_p} [Wl' + Fb + W_r(1 - 0.5025SF + 0.071044SF\gamma) - \frac{T}{4} SFA_{1r}] + \frac{W_r}{45 \cdot 120KA_p S} [1 - 0.5025SF \pm (1 - 0.5025)(B/M)] V^2 \quad (V.21)$$

la ecuación V.21 se puede escribir como sigue:

$$P_2 = a + cV^2 \quad (V.22)$$

donde a está dada por la ecuación V.18 y c es igual a:

$$c = \frac{W_r}{45 \cdot 120A_p S} [1 + 0.5025SF \pm (1 - 0.5025)(B/M)] \quad (V.23)$$

De acuerdo a las consideraciones anteriores el valor de a permanece constante. La cantidad b está en función de la velocidad de bombeo (N) por lo que la ecuación V.17 es lineal, mientras que la cantidad c está en función de la longitud de carrera del émbolo (S), en este caso la ecuación V.22 es cuadrática. Nótese que manteniendo el valor de N fijo la variación de V en la ecuación V.17 implica solo la variación de S . Por lo tanto se puede establecer que P_2 está en función lineal de S con pendiente igual a $0.8KNb$ con intersección en a . Por otra parte, manteniendo el valor de S fijo la variación de V en la ecuación V.22 implica solamente la variación de N , por lo tanto se puede establecer que P_2 varía con el valor de N .

De lo anterior se concluye que se puede obtener una relación lineal entre P_3 y V para cada valor considerado de N . Similarmente, se puede obtener una relación cuadrática para cada valor supuesto de S . Si las líneas rectas o las curvas cuadráticas se grafican en una misma escala en la misma gráfica con la curva de IPR, las intersecciones con esta representan los posibles gastos de producción para esas condiciones.

La presión de entrada mínima disponible (o el gasto máximo disponible) se puede determinar a partir de la condición de que el esfuerzo máximo en la cima de la sarta de varillas no exceda el esfuerzo permisible del grado de acero de las varillas utilizadas:

$$T_{max} \leq \tau_a \quad (V.24)$$

sustituyendo la ecuación II.1 en la ecuación V.24, se tiene:

$$PPRL \leq \tau_a A_{tr} \quad (V.25)$$

sustituyendo la ecuación V.11 en la desigualdad anterior:

$$\frac{T}{4} SFA_{tr} + 0.5625 SFW_r - 0.07144 SFY(W_r - 0.5625 W_r SF) \frac{SN^2}{70 \ 500} (1 \pm B/M) \leq \tau_a A_{tr} \quad (V.26)$$

6

$$SN^2 \geq \frac{70 \ 500}{0.5625 SFW_r (1 \pm B/M)} \left[\left(\frac{T}{4} SF - \tau_a \right) A_{tr} + (0.5625 - 0.07144 Y) SFW_r \right] \quad (V.27)$$

donde el signo menos es para la unidad CONVENCIONAL y el signo más es para la unidad AEROBALANCEADA y MARK II.

Con la desigualdad V.27 se calcula el mínimo valor de SN^2 , el cual se sustituye en la ecuación V.12, para obtener la mínima presión de entrada permisible.

V.2.1 CURVAS CARACTERISTICAS (SOLO LIQUIDO)⁴.

El procedimiento para construir las curvas características (o curvas de entrada) para bombeo mecánico es complejo, por lo que la solución exacta queda a discusión de los que hagan uso del método.

Los líquidos son ligeramente compresibles por lo tanto V en la ecuación V.17 y V.22 se puede sustituir por el gasto a condiciones estandar, q_{ec} :

$$P_3 = a + bq_{ec} \quad (V.28)$$

$$P_3 = a + cq_{ec}^2 \quad (V.29)$$

También γ se puede considerar a condiciones estandar como sigue:

$$\gamma_{isc} = w\gamma_{vsc} + (1-w)\gamma_{osc} \quad (V.30)$$

El procedimiento para construir las curvas características es el siguiente:

1) *Determinar el tipo de unidad superficial de bombeo (CONVENCIONAL, AKROBALANCEADA O MARK II).*

2) *Seleccionar un diámetro de bomba, sarta de varillas y una relación B/M.*

3) *Calcular A_p , K y W_r . Determinar γ_l con la ecuación V.30; después calcular W_r' de la ecuación II.11 y F_b con la ecuación II.15.*

4) *Calcular a de la ecuación V.18. Calcular b en función de N con la ecuación V.19 y calcular c en función de S con la ecuación V.23.*

5) *Suponer varios valores de velocidad de bombeo y para cada valor de N calcular b ; después se grafica P_3 vs. q_{sc} como está dada por la ecuación V.28.*

6) *Suponer valores de longitud de carrera y para cada valor de S calcular c ; después graficar P_3 vs. q_{sc} como se da en la ecuación V.29.*

7) *Construir y graficar la curva de IPR contra el gasto a condiciones estandar q_{sc} .*

Nota: Las gráficas de los pasos 5, 6 y 7 se deben de construir a una misma escala y en la misma gráfica, como se muestra en la figura 5.4.

8) *Determinar el máximo esfuerzo permisible para el grado y tipo de varillas utilizadas, después calcular el mínimo valor permisible de SN^2 con la ecuación V.27. Utilizar el valor de SN^2 para calcular la mínima presión de entrada permisible con la ecuación V.12. Trazar este valor particular de P_3 horizontalmente en la gráfica obtenida de los pasos 5, 6 y 7.*

9) *Leer los gastos en la intersección de las curvas características de la bomba (líneas rectas del paso 5 o de las curvas cuadráticas del paso 6) con la curva del IPR. Leer el máximo gasto permisible en la intersección de la mínima presión de entrada permisible con la curva del IPR.*

10) *Graficar el gasto vs. S y N , como se muestra en la figura 5.5.*

11) *Y finalmente seleccionar un gasto adecuado.*

Se considera que la bomba está colocada en el fondo del pozo

y que el diámetro de la tubería, el diámetro del émbolo, la sarta de varillas y la relación biela-manivela permanecen constantes¹.

Los datos mínimos necesarios para aplicar este análisis, son los siguientes:

- ▶ Profundidad de colocación de la bomba.
- ▶ Diámetro de la T. P. o T. R.
- ▶ Diámetro del émbolo.
- ▶ Combinación de varillas.
- ▶ Relación biela-manivela.
- ▶ Densidad relativa del aceite.
- ▶ Densidad relativa del gas.
- ▶ Densidad relativa del agua producida.
- ▶ Propiedades de los fluidos.
- ▶ Presión de saturación.
- ▶ Fracción de agua producida.
- ▶ Presión de fondo estática.
- ▶ Temperatura de fondo.
- ▶ Índice de Productividad.
- ▶ Relación Gas-Líquido.

En caso de no conocer las propiedades de los fluidos de un análisis PVT, se puede hacer uso de correlaciones como son las de M.B. STANDING², GLASO OISTEIN⁴ y M. VAZQUEZ².

Como el objetivo es maximizar la producción del pozo, se empleará el diámetro del émbolo más grande que sea posible, en la tabla 5.2 se puede seleccionar un diámetro de émbolo de acuerdo a la profundidad de colocación de la bomba y del gasto deseado; con el diámetro seleccionado se determina el diámetro de la tubería de producción o viceversa, tabla 2.1 capítulo II; de la tabla 4.1 de la referencia 2 pag.7, con el diámetro del émbolo y el número de combinación de varillas se obtiene el porcentaje de cada diámetro de varillas; en la tabla 3.2 capítulo III se obtienen los datos de cada diámetro de varillas; en la tabla 5.1 se obtiene el valor de la relación biela-manivela. Lo anterior es en el caso de que se vaya a realizar el diseño de una unidad de bombeo. Si solo se va a comprobar el funcionamiento de una unidad instalada, se deben utilizar los datos iniciales de su diseño.

tabla 5.1 Relación biela-manivela, (B/M).

Unidad convencional	Long. de carrera	Unidad MARKII
0.32	64"	0.22
0.33	74"	0.26
0.33	86"	0.23
0.33	100"	0.22
0.27	120"	0.26
0.26	144"	0.29
0.22	168"	0.33
-	192"	0.32
-	216"	0.34

Tabla 5.2 Diámetros de émbolos recomendados.

Nivel neto de fluido(pies)	Producción de fluidos (bl/día) E.V.=80 %									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
2000	1 1/2	1 1/4	2	2 1/4	2 1/2	2 3/4	2 3/4	2 3/4	2 3/4	2 3/4
	1 1/4	1 1/2	1 3/4	2	2 1/4	2 1/2				
3000	1 1/2	1 3/4	2	2 1/4	2 1/2	2 1/2	2 3/4	2 3/4	2 3/4	2 3/4
	1 1/4	1 1/2	1 3/4	2	2 1/4	2 1/4	2 1/2			
4000	1 1/4	1 3/4	2	2 1/4	2 1/4	2 1/4	2 1/4	2 1/4		
		1 1/2	1 3/4	2	2					
5000	1 1/4	1 3/4	2	2	2 1/4	2 1/4				
	-	1 1/2	1 3/4	1 3/4	2					
6000	1 1/4	1 1/2	1 3/4	1 3/4						
	-	1 1/4	1 1/2							
7000	1 1/4	1 1/2								
	1 1/8	1 1/4								
8000	1 1/4									
	1 1/8									

Para longitudes de carrera menores a 74".

V.2.2 CURVAS CARACTERISTICAS (Líquido+gas).¹

Como se mencionó anteriormente V en la ecuaciones V.17 y V.22 se refiere al volumen del gasto producido (líquido+gas). Por lo tanto, cuando se bombea líquido con gas, no se puede considerar constante el gasto como se hace para el caso cuando se bombea solo líquido. El valor de V se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = q_{sc} \cdot VF \quad (V.30)$$

donde q_{sc} es el gasto a condiciones estandar y VF es el factor de volumen del líquido total, se define de la siguiente forma el volumen de 1 barril de líquido a condiciones estandar más gas asociado a cualquier presión y cualquier temperatura, está dado por:

$$VF = W_c B_w + (1 - W_c) B_o + PGI [RGL - (1 - W_c) R_s - W_c R_{sw}] B_g \quad (V.31)$$

donde PGI^4 es el porcentaje de gas que pasa a través del sistema de bombeo. Debido a que en la práctica común los valores de R_{sw} y B_w se toman como la unidad y además se considera que todo el gas es bombeado junto con el líquido, PGI es igual a uno por lo tanto la ecuación V.31 queda como sigue:

$$VF = W_c + (1-W_c)B_o + [RGL - (1-W_c)R_s]B_g \quad (V.32)$$

donde

$$RGL = RGA(1-W_c).$$

La determinación de W_r en la ecuación II.11 y de F_b en la ecuación II.15 para este caso también es complicado debido a que γ_l varía entre el cabezal y la profundidad de colocación de la bomba. Sin embargo W_r aparece como un término adicional en la expresión para la carga máxima en la varilla pulida ecuación II.18; por lo tanto para mayor seguridad γ_l se debe considerar en su valor más cercano a las condiciones de presión y temperatura. Una buena aproximación de γ_l para la presión de saturación, es:

$$\gamma_l = \frac{350W_c\gamma_{sc} + 350(1-W_c)\gamma_{osc} + (RGL)(PGI)\rho_{gsc}}{350[W_c + (1-W_c)B_{ob}]} \quad (V.33)$$

haciendo la misma consideración que en la ecuación V.31 respecto a PGI , se tiene:

$$\gamma_l = \frac{350W_c\gamma_{sc} + 350(1-W_c)\gamma_{osc} + RGL\rho_{gsc}}{350[W_c + (1-W_c)B_{ob}]} \quad (V.34)$$

la densidad del gas a condiciones estandar se calcula con la siguiente ecuación:

$$\rho_{gsc} = \rho_a \gamma_{sc}$$

y B_{ob} es el factor de volumen del aceite a la presión de saturación.

Con esta aproximación de γ_l , la relación entre P_s y V será lineal para cada valor fijo de N , ecuación V.17 y será cuadrática para cada valor fijo de S , ecuación V.22⁴.

El procedimiento para elaborar las curvas características es el mismo que en el caso para cuando se bombea solo líquido excepto que P_s en este caso se grafica contra V , de manera que los posibles gastos son las intersecciones de las curvas de entrada a la bomba con la curva del IPR en (bb/d) en lugar de la curva de IPR en (stb/d). Es recomendable incluir la curva de IPR en (stb/d).

Y.2.3 COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA DEL POZO.

Para presiones de fondo fluyendo mayores que la presión de saturación (P_b) el índice de productividad (J) se describe con la siguiente relación lineal⁴:

$$q_{sc} = J(P_{ws} - P_{wf}) \quad (V.35)$$

o'

$$J = \frac{q_{sc}}{(P_{ws} - P_{wf})} \quad (V.36)$$

El índice de productividad se define como el gasto de producción neto de líquido (producción de aceite más producción de gas) por unidad de abatimiento de presión. Cuando P_{wf} es igual a cero se obtiene lo que se denomina como el potencial del pozo, que es el gasto máximo que la formación puede aportar al pozo, observese el siguiente análisis:

$$\begin{array}{l} q_{sc}=0 \text{ -----} \rightarrow P_{wf}=P_{ws} \\ P_{wf}=0 \text{ -----} \rightarrow q_{sc}=JP_{ws} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} q_{sc}=0 \\ P_{wf}=0 \end{array}} \right\} \text{ para } P_{wf} \geq P_b \quad (V.37)$$

La ecuación V.36 se puede escribir en forma de línea recta, figura 5.1:

$$P_{wf} = P_{ws} - \frac{q_{sc}}{J} \quad (V.38)$$

A medida que P_{wf} declina por abajo del punto de saturación (P_b) el índice de productividad deja de ser lineal y se define como la relación del comportamiento de afluencia hacia el pozo (IPR)⁴. Vogel³ graficó la P_{wf} vs. q_{sc} , para diferentes viscosidades y diferentes valores de RGL y observó que las curvas del IPR tenían un comportamiento similar. Posteriormente adimensionó estas curvas y obtuvo una curva de referencia, figura 5.2 con la cual se puede construir la curva del IPR para cualquier pozo en particular, partiendo de una prueba de producción y un registro de presiones de fondo. La ecuación V.39 describe el comportamiento de afluencia hacia el pozo en un yacimiento con empuje por gas disuelto liberado, que es característico de la descripción anterior:

$$\frac{q_{sc}}{q_{max}} = 1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2 \quad (V.39)$$

donde q_{sc} es el gasto correspondiente a una presión de fondo fluyendo deseada, P_{ws} es la presión correspondiente al yacimiento y q_{max} es el gasto correspondiente a $P_{wf}=0$, para $P_{wf} < P_b$.

La fig.5.3 muestra la combinación del índice de productividad constante ($P_{ws} > P_b$) y la curva de comportamiento de Vogel ($P_{wf} < P_b$), deduciéndose así una ecuación general que incluye los dos

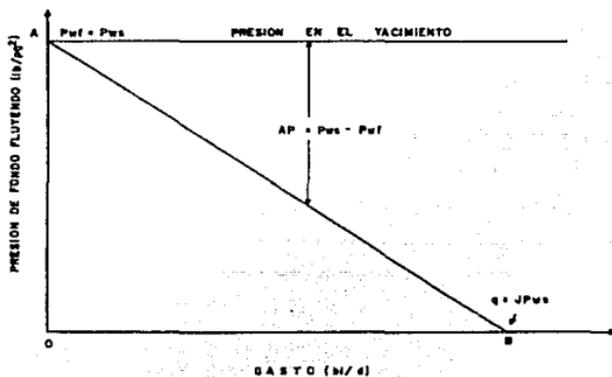


FIG. 5.1. INDICE DE PRODUCTIVIDAD CONSTANTE

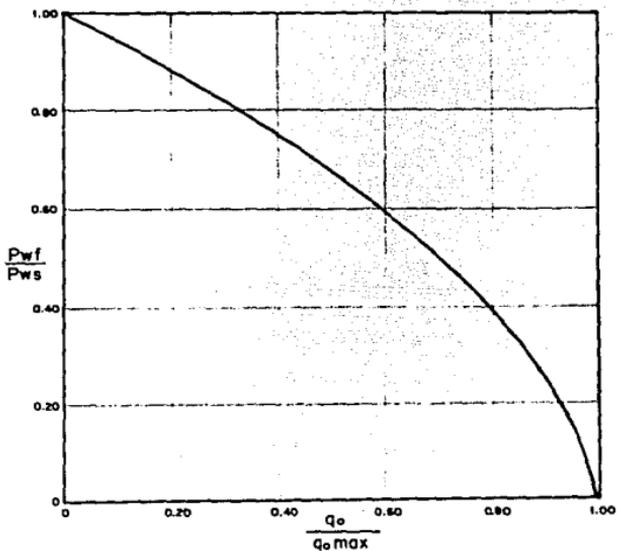


FIG.5.2. COMPORTAMIENTO DE AFLUENCIA AL POZO DE UN YACIMIENTO CON EMPUJE POR GAS DISUELTO (Vogel).

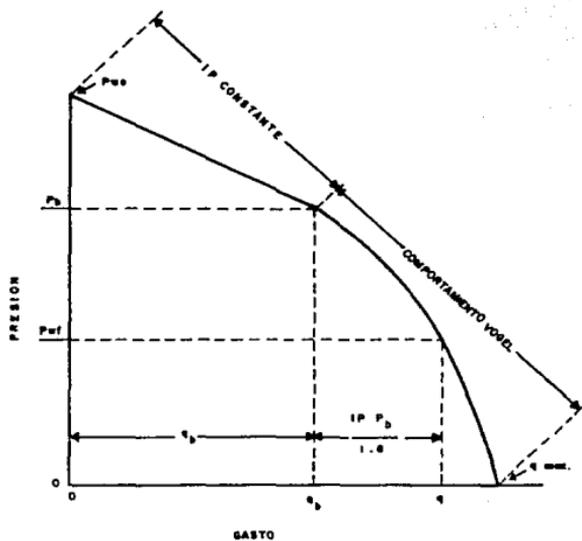


FIG. 5.3. COMBINACION DEL IP CON EL IPR

casos. Operando algebraicamente las ecuaciones V.38 y V.39, se obtiene la siguiente ecuación:

$$q_{oc} = q_b + (q_{max} - q_b) \left[1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2 \right] \quad (V.40)$$

donde:

$$q_b = J(P_{ws} - P_b) \quad (V.41)$$

en el intervalo desde P_{ws} hasta P_b ,

y

$$q_{max} = q_b + \frac{J P_b}{1.8} \quad (V.42)$$

finalmente se tiene:

$$q_{oc} = J \left[P_{ws} - P_b + \frac{P_b}{1.8} \left(1 - 0.2 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right) - 0.8 \left(\frac{P_{wf}}{P_{ws}} \right)^2 \right) \right] \quad (V.43)$$

esta ecuación es una aproximación hecha por K. E. Brown¹, para calcular el IPR cuando faltan datos de producción.

V.3 AUTOMATIZACION DEL METODO.

V.3.1 PROGRAMA DE COMPUTO.

Hay que tomar en cuenta que para obtener la solución de este método realizando los cálculos a mano, llevaría mucho tiempo en obtener resultados ya que el análisis nodal es un poco complejo además de que en las expresiones que se utilizan interviene un gran número de variables y esto origina que se efectúen muchas operaciones matemáticas.

A fin de facilitar los cálculos y obtener mayor exactitud en los resultados, se elaboró un programa de cómputo muy sencillo con el cual se puede analizar un pozo en particular que tenga instalado un Sistema Artificial de Bombeo Mecánico.

El programa considera los dos casos, cuando se bombea puro líquido y cuando se bombea líquido más gas. La solución es la misma en ambos casos, solo que cuando se bombea líquido más gas se considera que el gas viene en solución con el líquido por lo tanto es necesario hacer uso de las propiedades de los fluidos como son: B_{ob} , B_o , B_g y R_s obtenidos de un análisis de PVT en el laboratorio, así como también el valor de P_b . En caso de no tener los datos de las propiedades de los fluidos, de los mismos datos de producción calcularlos mediante alguna correlación para propiedades de los fluidos. Dicha correlación se puede implementar en el programa de cómputo anexando una subrutina, ver diagrama de flujo en el apéndice "A". En el caso de cuando se bombea solo líquido no se utilizan las propiedades de los fluidos ya que se

supone que el líquido no contiene gas en solución.

Las curvas que se obtienen de graficar P_3 vs. q_{ac} o P_3 vs. V según sea el caso, para un valor dado de N y S son como las presentadas en la figura 5.4. En la lista de pasos a seguir para construir las curvas se explica la forma de utilizarlas. En la figura 5.5 se muestra como debe ser la gráfica del gasto vs. N y S , siendo estas curvas de gran utilidad. Para un valor dado de gasto deseado se determina de la gráfica el valor de N y S con el que se podría obtener dicho gasto. Esta gráfica es el producto final de todo el desarrollo realizado desde que se selecciona el tipo de unidad que se va a utilizar.

Las curvas que se obtienen representan la relación existente entre el gasto y la presión de entrada a la bomba, en función de las propiedades de los fluidos y las características mecánicas de la instalación de bombeo seleccionada.

Para poder construir las curvas características, es necesario trabajar con las ecuaciones descritas anteriormente, tabla 5.3:

tabla 5.3 Ecuaciones de comportamiento

bombeando solo liquido	bombeando liquido+gas	tipo de ec.
$P_3 = a + bNq_{ac}$	$P_3 = a + bNV$	lineal
$P_3 = a + \frac{c}{S} q_{ac}^2$	$P_3 = a + \frac{c}{S} V^2$	cuadrática

En los pasos 5 y 6 del procedimiento para construir las curvas características se mencionó que hay que suponer valores de N y S para calcular b y c respectivamente, y en función del gasto calcular las presiones de entrada a la bomba (P_3), pero como este método no funciona para gastos altos sería difícil determinar entre que rango de gastos se tendrían que calcular las presiones de entrada a la bomba para cada valor de N y S . A continuación se dan los pasos simplificados para facilitar el uso del método, calculando el gasto en función de la presión. Si se analizan los datos que son necesarios para aplicar el método se observa que la presión máxima que se tendría en el yacimiento es la presión estática (P_{we}). Por lo tanto de las ecuaciones anteriores (tabla 5.3) se despeja el gasto para ser calculado en función de la presión que vendrían siendo las presiones de entrada a la bomba, variando estas desde P_{we} hasta el valor de presión cero, para cada valor dado de N y S . De esta forma se obtiene un rango de gastos bastante aceptable para poder graficar las ecuaciones siguientes:

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

bombeando solo líquido:

$$q_{sc} = (P_a - a) \sqrt{bN} \quad (V.44)$$

y

$$q_{sc} = \left[\frac{(P_a - a)S}{c} \right]^{1/2} \quad (V.45)$$

bombeando líquido más gas:

como $V = q_{sc}VF$ se tiene que:

$$V = \left[\frac{(P_a - a)}{bN} \right]^{1/2} VF \quad (V.46)$$

y

$$V = \left[\frac{(P_a - a)S}{c} \right]^{1/2} VF \quad (V.47)$$

Pasos a seguir:

- 1) Calcular W_r , W_l , F_b , A_p , A_{lr} , K y γ_{sc} .
- 2) Calcular los valores de a , b y c .
- 3) Dar valores de P_a para los cuales se va a calcular q_{sc} o V según sea el caso.
- 4) Para cada valor dado de N y S calcular el gasto con todo el rango de presiones del paso 3.
- 5) Para el mismo rango de presiones ir variando el valor de N y S para obtener los gastos correspondientes a esas condiciones.

Explicación de la figura 5.4:

- a) La curva del IPR se obtiene con las ecuaciones V.40, V.41 y V.42.
- b) La curva de la mínima presión disponible se obtiene de sustituir el valor de la desigualdad V.27 SN^2 en la ecuación V.12 para obtener un valor constante de P_a .
- c) Las líneas rectas con la letra N , se obtienen de combinar N y P_a en las ecuaciones V.44 y V.46 para obtener $q_{sc} = f(P_a, N)$ y $V = f(P_a, N)$ respectivamente.
- d) Las líneas curvas con la letra S , se obtienen de combinar S y P_a en las ecuaciones V.45 y V.47 para obtener $q_{sc} = f(P_a, S)$ y $V = f(P_a, S)$ respectivamente.

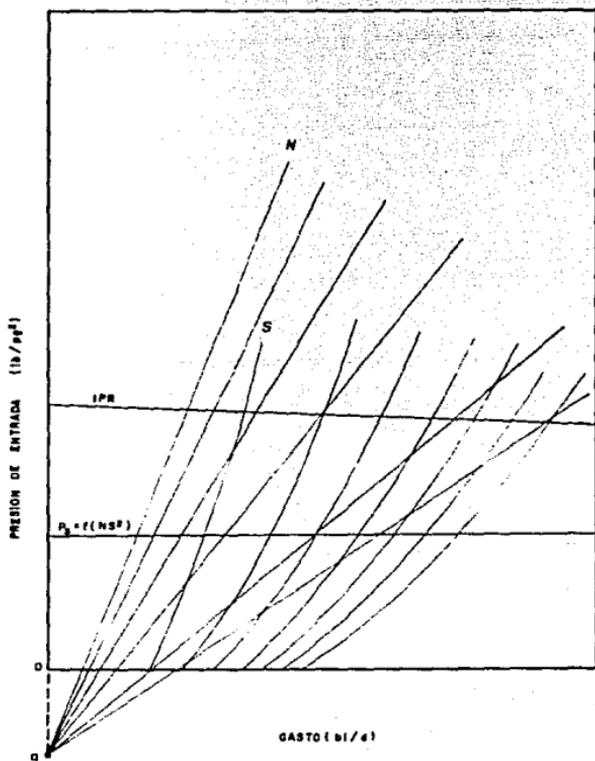
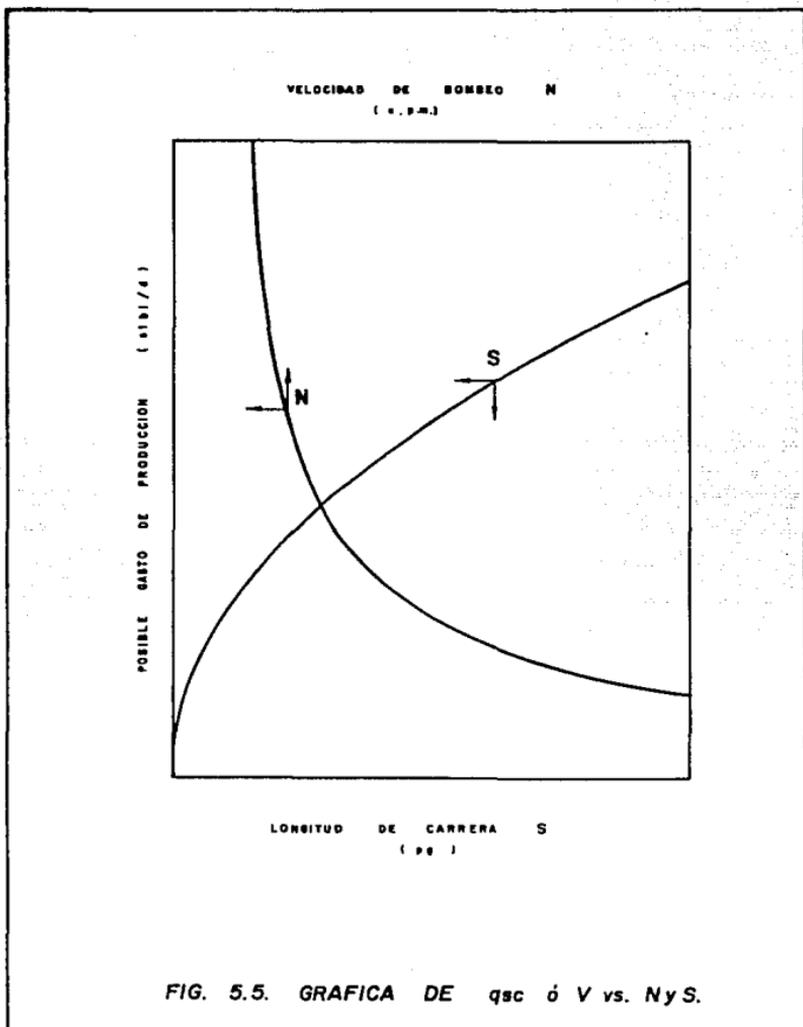


FIG. 5.4. GRAFICA DE P_3 vs. q_{ac} ó V, S y N



- e) El valor de la ordenada al origen que es la misma en ambas curvas (ver figura 5.4), se obtiene de la ecuación V.18.

V.3.2 EJEMPLOS DE APLICACION.

Para verificar el funcionamiento del programa de cómputo que se elaboró, se utilizaron como datos los mismos del artículo de donde se obtuvo la información⁴. Los resultados no son exactamente igual a los del artículo, debido a que el autor redondea algunos valores en las ecuaciones. En los ejemplos se utilizaron los datos del pozo No.1 y fueron aplicados para los dos casos cuando se bombea solo líquido y cuando se bombea líquido más gas. En la tabla 5.4 se presentan los datos y en la tabla B.1 del apéndice "B" se presentan los valores de B_0, R_s y B_g de dicho pozo.

V.3.2 DISCUSION DE RESULTADOS.

Ejemplo 1:(Caso cuando se bombea solo líquido).

Los resultados que se obtuvieron utilizando los datos de la tabla 5.4 son los siguientes:

- 1) Peso de la sarta de varillas en el aire,

$$W_r = 17940 \text{ lb.}$$

- 2) Carga neta de fluidos sobre el émbolo,

$$W_f = W_r + F_b$$

$$W_f = 10407.87 - 2197.90$$

$$W_f = 8209.97 \text{ lb.}$$

- 3) ordenada al origen,

$$a = -004.02 \text{ psi. ; } P_3 = -004.02 + (bN)q_{sc}$$

- 4) Pendiente para la relación lineal,

$$b = 0.302447 ; P_3 = a + (0.302447N)q_{sc}$$

- 5) Pendiente para la relación cuadrática, $\frac{c}{W_f}$

$$c = 0.0710556 ; P_3 = a + \left(\frac{0.0710556}{S} \right) q_{sc}^2$$

- 6) Mínimo valor permisible de SN^2 ,

$$SN \geq 0333.80$$

tabla 3.4 Datos para los ejemplos.

Datos	Cantidades
Prof. de la bomba, pies	8000
Índice de productividad, stbl/psi	5
Presión estática, psi.	1020
Presión de fondo fluyendo, psi.	1700
qo a Pwf, .stbl/d	1227
Fracción de agua	0.5
Relación gas-aceite, pie ³ /bl	400
Densidad del aceite, °API	35
Densidad relativa del gas	0.7
Densidad relativa del agua	1.074
Temperatura de fondo fluyendo, °F	170
Presión de saturación, psi.	1820
Factor de volumen del aceite a Pb, bl/bl	1.228
Tipo de unidad (CONVENCIONAL (C) o MARKII (M))	c
Diámetro de la tubería de producción, pg.	2.875
Diámetro del émbolo, pg.	2
Relación biela-manivela	0.33
COMBINACION DE VARILLAS	
Sección No.1	
Peso unitario, lb/pie	2.9
Fracción de longitud	0.328
Diámetro, pg.	1
Sección No.2	
Peso unitario, lb/pie	2.22
Fracción de longitud	0.332
Diámetro, pg.	0.875
Sección No.3	
Peso unitario, lb/pie	1.63
Fracción de longitud	0.34
Diámetro, pg.	0.75
Esfuerzo a la tensión, lb.	11.5 X 10 ⁴
Esfuerzo del acero, lb	35 000
Factor de servicio, SF	0.9

7) Mínima presión de entrada permisible, en función de SN^2 ecuación V.12

$$P_3 = 597.30 \text{ psi.}$$

8) Para una presión de fondo fluyendo de 597 (psi) la curva del IPR muestra un gasto de 5393 (stbl/d) por lo tanto la bomba debe operar en cualquier región limitada por la presión mínima de entrada (paso 7) y el gasto máximo de 5393 (stbl/d) En caso de no tener datos de producción el gasto se puede calcular con las ecuaciones V.41, V.42 y V.40, teniendo así una buena aproximación.

9) Para un valor de S y q calcular N y con un valor de N y q calcular S.

10) Con un valor de N y S calcular α_1 y α_2 .

11) De la curva del IPR escoger un gasto y determinar la P_3 correspondiente.

12) Calcular con P_3 y α_1 el valor de FPRL.

13) Con FPRL calcular el valor de T_{max} .

14) Calcular con P_3 y α_2 el valor de MPRL.

15) Con MPRL calcular el valor de T_{min} .

Así sucesivamente para cada valor de q, N y S se calculan las condiciones en las cuales estaría trabajando la unidad de bombeo.

Un factor que se debe de calcular para verificar si la unidad está trabajando con seguridad, es el valor del torque máximo de la flecha, con la ecuación 15 del método CRAFT y HOLDEN descrito en el capítulo III.

16) Contratalanceo ideal:

$$C_t = 0.5W_f + W_r(1 - 0.127G)$$

$$C = C_t + W_c \left(\frac{d}{r} \right) \left(\frac{1}{2} \right)$$

$$T_p = (W_{max} - C) \left(\frac{S}{2} \right)$$

Donde T_p es el torque máximo en el reductor de engranes. Para comprender mejor estas ecuaciones consúltese la sección III.3.1 del capítulo III, al final de ese capítulo se localiza la nomenclatura. Este valor también se puede calcular con el método API sección III.2.2 del capítulo III.

Ejemplo 2: (Caso para cuando se bombea líquido más gas).

1) Peso de la sarta de varillas:

$$W_r = 17040 \text{ lb.}$$

2) Carga neta de fluidos sobre el émbolo:

$$W_f = W_r + F_b$$

$$W_f = 9709 - 2036.7$$

$$W_f = 7672 \text{ lb.}$$

3) Ordenada al origen, a:

$$a = -893.31 \text{ psi.}$$

$$P_s = -893.31 + (bN)V; \quad V = q_{gc} \times VF$$

4) Pendiente para la relación lineal, bN:

$$b = 0.302447; \quad P_s = a + (0.302447N)V$$

5) Pendiente para la relación cuadrática, $\frac{c}{S}$

$$c = 0.0710556; \quad P_s = a + \left(\frac{0.0710556}{S}\right)V^2$$

6) Mínimo valor permisible de SN^2 :

$$SN^2 \geq 10276$$

7) Mínima presión de entrada permisible en función de SN^2
ecuación V. 12:

$$P_s = 506 \text{ psi.}$$

8) Para una presión de fondo fluyendo de 506 (psi) la curva del IPR muestra un gasto de 5500 (stbl/d) por lo tanto la bomba debe operar en cualquier región limitada por la presión mínima de entrada (paso 7) y el gasto máximo de 5500 (stbl/d), misma consideración que en el paso 8 del ejemplo anterior en caso de no tener datos de producción. Como se está bombeando líquido+gas, habrá que afectar al gasto por el factor de volumen del fluido (VF), ecuación V. 32:

$$q_{gc} = 5500 \text{ stbl/d}$$

$$RGL = 400(1-0.5) = 200 \text{ scf/bl.}$$

$$VF = 0.5(1-0.5) + 0.0870 + [200 - 85(1-0.5)]0.0059 = 1.07 \text{ bbl/stbl.}$$

$$V = 5500 \times 1.07 = 11028 \text{ bbl/d.}$$

Observese que el gasto es muy grande, por lo que la operación de la bomba debe ser en cualquier parte de la región limitada por la presión mínima de admisión de 506 (psi) y un gasto máximo de 11028 (bbl/d), (5590 stbl/d). Los siguientes pasos son los mismos del caso anterior.

Los posibles gastos para los dos casos son las intersecciones de las curvas de entrada con la curva del IPR en stbl/d y bbl/d, según sea el caso.

Finalmente las figuras B.1 y B.2 muestran el resultado de un análisis nodal para un Sistema Artificial de Bombeo Mecánico, para cada caso en particular. En el apéndice "B" se presentan las gráficas y tablas de resultados para ambos casos.

Para obtener el resultado final que vienen siendo las gráficas de q_{sc} (stbl/d) vs. N y S y V (bbl/d) vs. N y S de las figuras B.3 y B.4 respectivamente, se despeja la velocidad de bombeo (N) de las ecuación V.44 y V.46 y la longitud de carrera (S) de las ecuaciones V.45 y V.47 según sea el caso, por lo que se tiene lo siguiente:

- 1) Caso cuando se bombea solo líquido:

$$N = \frac{P_a - \alpha}{q_{sc} b} \quad (V.48)$$

y

$$S = \frac{q_{sc}^2 c}{P_a - \alpha} \quad (V.49)$$

- 2) Caso cuando se bombea líquido mas gas:

$$N = \frac{P_a - \alpha}{V_b} \quad (V.50)$$

y

$$S = \frac{V^2 c}{P_a - \alpha} \quad (V.51)$$

y para cada valor de gasto del IPR, con su respectiva presión de fondo fluyendo (P_a) calcular los valores de N y S , para obtener una gráfica semejante a la presentada en la figura 5.5, siendo esta finalmente de uso práctico al finalizar el análisis.

NOTA: Recuerdese que para el segundo caso, al calcular el gasto con cada una de las presiones supuestas para cada valor de N y S habrá que afectarlo por el factor de volumen del fluido VF, ecuación V.32.

REFERENCIAS

- 1.- Brown K.E.: "The Technology of Artificial Lift Method" Vol.4 C.5. Tulsa Oklahoma: The Petroleum Publishing. Co.1980.
- 2.- Garatcochea F. P.: "Apuntes de Transporte de Hidrocarburos". F.I. U.N.A.M.
- 3.- Craft B.C., Holden W.R. and Graves E.D.: "Well Desing: Drilling and Production", Prentice-Hell, -Inc. Englewood Cliffs. N.J.,(1962).
- 4.- Ostein Glaso: "Generalizad Pressure-Volume-Temperature correlation", JPT may 1980.
- 5.- Gomez Cabrera J.A.: "Apuntes de Producción de Pozos I" F.I. U.N.A.M.
- 6.- Vogel J.V.: "Inflow Performance Relationships for Solution Gas DriveWell".
- 7.- T.E.W. Nind.: "Fundamentos y Mantenimiento de Pozos Petroleros" Capitulo 3.
- 8.- Diaz Zertuche H.: "Apuntes de clases de Producción de Pozos II" F.I. U.N.A.M.

VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis que se realizó a través de este trabajo, puede ser utilizado para diseñar una instalación completa de Bombeo Mecánico o para comprobar las condiciones de operación de una unidad ya instalada. Aun cuando las ecuaciones deducidas en el Capítulo V se derivan de las utilizadas por Craft, Holden y Graves se debe considerar dicho análisis como un método más de diseño.

El factor que se incluyó en este análisis es la fuerza que actúa en el fondo de la bomba para introducir los fluidos al interior de la misma y mediante el ciclo de bombeo transportar los fluidos hacia la superficie mecánicamente, y se denota como P_{3Ap} . Con la adición de esta fuerza queda completo el balance de fuerzas para calcular la Carga Máxima sobre la varilla pulida (PFRL). Dicha fuerza debe ser restada (ec.II.18) ya que el valor de P_{3Ap} es una fuerza paralela al movimiento ascendente del émbolo, la cual ayuda a aliviar la Carga Máxima.

De lo anterior se debe concluir que para fines de un buen diseño y análisis se deben tener las siguientes consideraciones:

1.- *Obtener toda la información necesaria de datos de producción y de un análisis PVT. Estos no deben ser difíciles de obtener ya que la mayoría de los pozos que se les instala algún tipo de unidad artificial de producción, fueron en su mayoría Pozos Fluyentes, y esto da lugar a que se tenga toda esa información almacenada en bitácoras.*

2.- *El aspecto más importante del Análisis Nodal es que se obtienen resultados óptimos entre la interacción del Yacimiento y el pozo, para poder transportar los fluidos hasta la superficie ya sea por energía propia o artificialmente*

3.- *La validez de los resultados dependen en gran medida de la confiabilidad de los datos y del cuidado con que se utilice el método aquí descrito.*

4.- *El método puede ser tan sencillo o complicado como el usuario lo desee, es por esto que en el diagrama de flujo del programa de cómputo (apendice "A") se incluye la subrutina del cálculo de las propiedades de los fluidos. Además de que se pueden adaptar los métodos de diseño descritos en el Cap.III.*

5.- *Las fig. B.1 y B.2 son el resultado de todo este proceso de datos que facilitan los cálculos para poder optimizar el sistema de producción, haciendo uso de las ecuaciones ya mencionadas.*

6.- Se debe tomar en cuenta que cada pozo es independiente entre sí, aún cuando algunos estén produciendo del mismo campo e incluso de la misma formación.

7.- El producto final de todo este trabajo se presenta en las gráficas de las figuras B.3 y B.4 dependiendo del caso que se haya analizado. Únicamente se escoge un gasto deseado y se proyectan las líneas para obtener la velocidad de bombeo (N) y la longitud de carrera necesarios para dicho gasto.

Las curvas que se obtienen como resultado del análisis (figuras 5.6 y 5.7), son únicamente líneas rectas y líneas curvas con la misma ordenada al origen que es el valor de "a". A cada valor de N le corresponde una recta y a cada valor de S le corresponde una línea curva para un rango de valores de presión dado que va desde Pws hasta el valor de cero. Por lo que se recomienda que los datos de entrada sean confiables, ya que de ser así se puede confiar plenamente en las gráficas obtenidas para poder extraer datos de ellas y realizar los cálculos necesarios para unas condiciones dadas y comprobar la eficiencia con que esté trabajando la unidad instalada.

Para el análisis de los resultados obtenidos por este método se debe hacer una comparación con otros métodos de diseño para conocer la discrepancia entre uno y otro y así poder tomar medidas correctivas y mejorar el diseño.

Se recomienda que el usuario del programa analice bien el diagrama de flujo, con la finalidad de que pueda adaptarlo a cualquier lenguaje de programación y manejarlo en alguna P.C.. El utilizado en este trabajo se realizó en una micro-HP-85 en lenguaje basic.

NOMENCLATURA

Latín :

- Ap** = Área del émbolo, pg^2 .
Atr = Área de sección transversal en la cima de la sarta de varillas, pg .
Ar = Área de cada sección de varillas, pg^2 .
An = Área de sección transversal de la última varilla, pg^2 .
Bo = Factor de volumen del aceite, bbl/stbo.
Bg = Factor de volumen del gas, bbl/pie³.
Bob = Factor de volumen del aceite bajosaturado, bbl/stbl.
BW = Factor de volumen del agua, bbl/stbv.
D = Profundidad del nivel del fluido, pies.
B/M = Relación biela-manivela.
dp = Diámetro del émbolo, pg .
dr = Diámetro de la i^{er} varilla, pg .
Ev = Eficiencia volumétrica de la bomba, adim.
EI = Constante elástica de la T. P., $pg/lb-pie$.
Er = Constante elástica de las varillas, $pg/lb-pie$.
Fb = Fuerza de flotación, lb.
IP = Índice de productividad, stbl/psi. ($P > P_b$).
IPR = Índice de productividad, stbl/psi. ($P < P_b$).
J = IP
K = Constante de la bomba.
L = Longitud total de la sarta de varillas, pies.
Ln = Longitud de cada sección de varillas, pies.
Mn = Peso unitario de cada diámetro de varilla, lb/pie.

Latin:

MPRL = Carga mínima sobre la varilla pulida, lb.

N = Velocidad de bombeo, spm.

PPRL = Carga máxima sobre la varilla pulida, lb.

Pa = Presión de entrada a la bomba, lb/pg².

Pwe = Presión estática, lb/pg².

Pwf = Presión de fondo fluyendo, lb/pg².

Pb = Presión de saturación, lb/pg².

PGI = Fracción de gas que pasa a través de la bomba, fracc.

Qmax = Potencial del pozo, stbl/d.

Qp = Gasto de producción a Pb., stbl/d.

Qqc = Gasto de producción en la superficie, stbl/dia.

RGA = Relación gas-acete, pie³/bl.

RGL = Relación gas-líquido, pie³/bl.

Re = Relación de solubilidad, pie³/blo.

Rn = Fracción de la longitud total de varillas.

S = Longitud de carrera de la varilla pulida en la superficie, pg.

Sp = Carrera efectiva del émbolo, pg.

SF = Factor de servicio.

T = Mínimo esfuerzo a la tensión, lb/pg².

Twh = Temperatura en el cabezal, °F.

Twf = Temperatura de fondo fluyendo, °F.

v = Velocidad, pg/min.

V = Desplazamiento teórico de la bomba, bl/d.

VF = Factor de volumen de las dos fases, bbl/stbl.

Latin:

Wf = Carga neta de fluidos sobre el émbolo, lb.

Wf' = Carga de fluidos sobre el área total del émbolo, lb.

Wr = Peso de la sarta de varillas en el aire, lb.

wc = Porcentaje de agua de yacimiento fluyendo.

Orígenes :

aa = Máxima aceleración durante la carrera descendente de las varillas, pie/seg².

aa' = Máxima aceleración durante la carrera ascendente de las varillas, pie/seg².

γf = Gravedad específica de los fluidos para algunas condiciones de presión y temperatura dadas.

γgsc = Gravedad específica del gas a condiciones estándar.

γosc = Gravedad específica del aceite a condiciones estándar.

γwsc = Gravedad específica del agua a condiciones estándar.

ρgsc = Densidad del gas a condiciones estándar, lb/pie³.

ρa = Densidad del acero, lb/pie³.

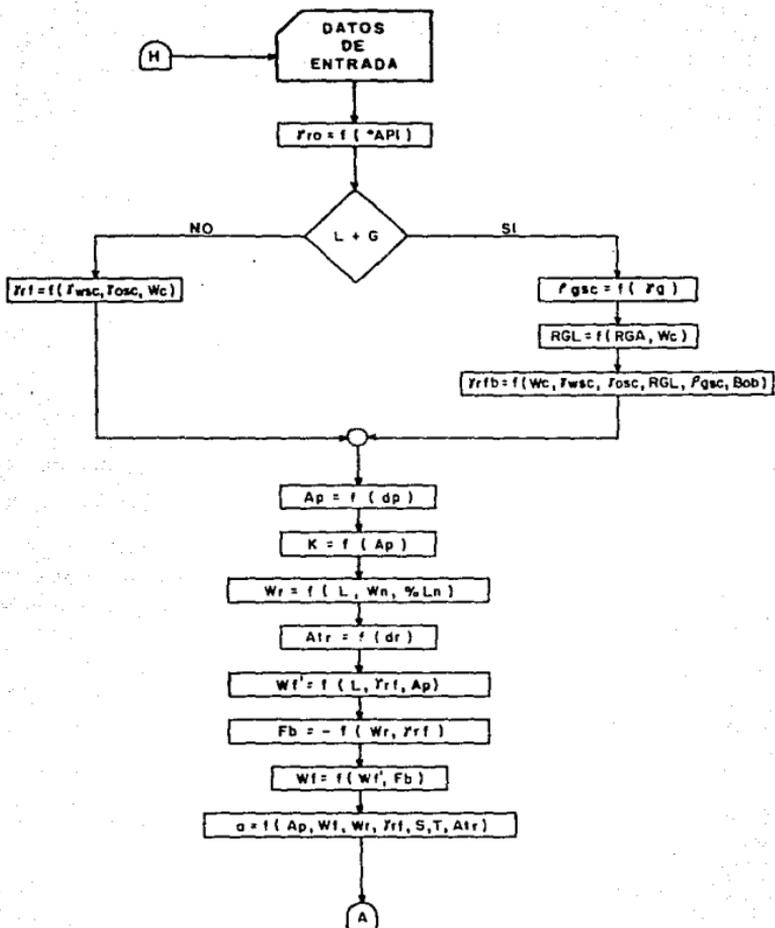
Ta = Máximo esfuerzo disponible para el acero, lb/pg².

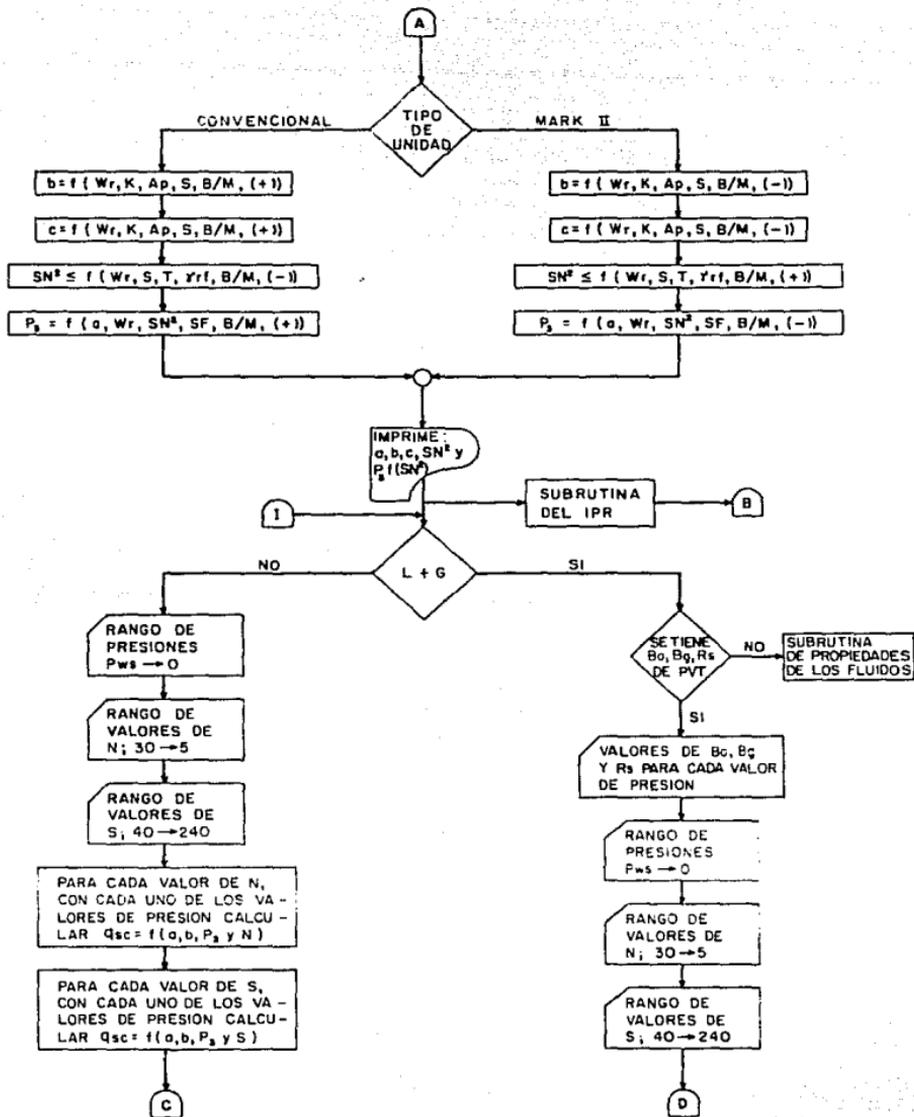
Tmax. = Máximo esfuerzo en la cima de las varillas, lb/pg².

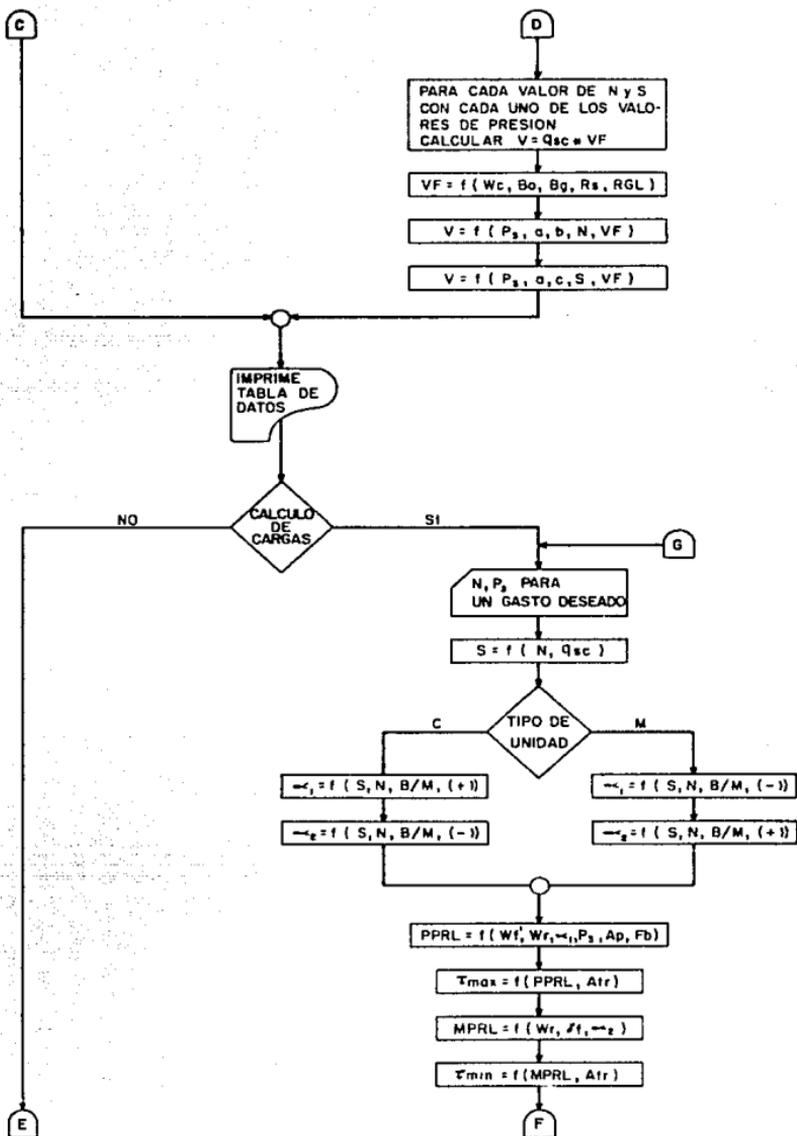
Tmin = Mínimo esfuerzo en la cima de las varillas, lb/pg².

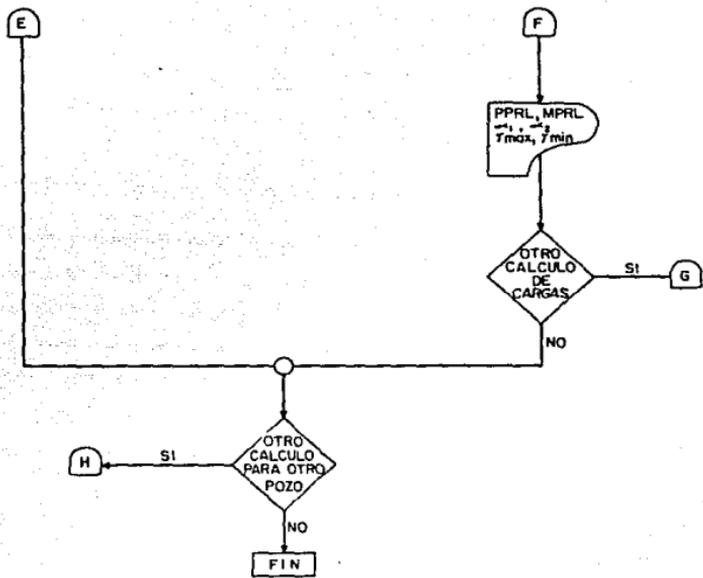
A P E N D I C E "A"

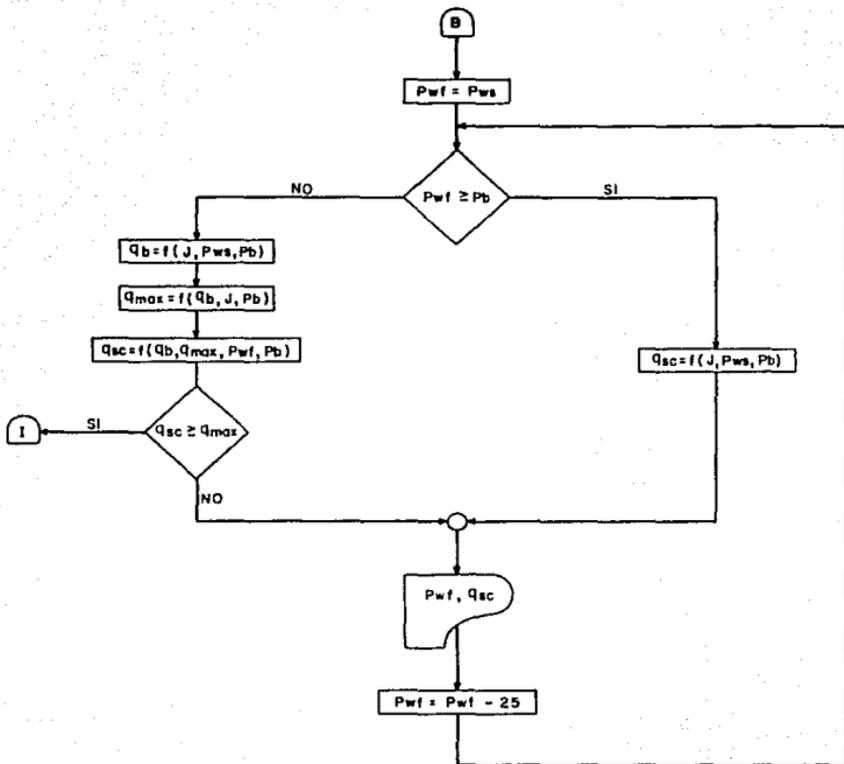
D I A G R A M A D E F L U J O











A P E N D I C E "B"

T A B L A S Y G R A F I C A S D E R E S U L T A D O S

P	B _o	B _g	R _e	V F
(psi)	(bl/bl)	(bl/pie ³)	(pie ³ /bl)	(bl/bl)
0	1.0480	0.0275	-----	8.5240
100	1.0555	0.2130	12	5.1600
200	1.0631	0.0155	27.9	3.9153
300	1.0705	0.0105	48	2.8938
400	1.0782	0.0076	84.4	2.3144
500	1.0855	0.0060	84	1.9908
600	1.0953	0.0050	105	1.7852
700	1.1045	0.0043	127	1.6392
800	1.1141	0.0038	148.4	1.5351
900	1.1240	0.0033	171	1.4399
1000	1.1343	0.0030	194.2	1.3759
1100	1.1450	0.0027	219	1.3169
1200	1.1557	0.0025	241.9	1.2755
1300	1.1665	0.0023	267	1.2382
1400	1.1783	0.0021	291.3	1.2033
1500	1.1885	0.0019	317	1.1731
1600	1.2019	0.0018	342.2	1.1530
1700	1.2125	0.0016	370	1.1303
1800	1.2266	0.0015	394.3	1.1176
1900	1.2265	-----	400	1.1133
2000	1.2259	-----	400	1.1130

Tabla B-1 Valores de B_o, B_g, R_e y V F.

P	q
(lb/pg ³)	(stbl/d)
0	6268
100	6189
200	6083
300	5950
400	5789
500	5602
600	5387
700	5145
800	4875
900	4579
1000	4258
1100	3904
1200	3526
1300	3121
1400	2688
1550	2228
1600	1741
1700	1227
1800	686
1900	100
1920	0

Tabla B-2 Valores del IPR (moto líquido).

P	V
(lb/pg ²)	(bbl/d)
0	40897
100	31937
200	23818
300	17218
400	15136
500	11152
600	9617
700	8433
800	7484
900	6593
1000	5853
1100	5141
1200	4497
1300	3858
1400	3234
1500	2614
1600	2008
1700	1387
1800	766
1900	111
1920	0

tabla B-3 Valores del IPR (líquido+gas).

Pvf \ N	30	25	20	15	10	5
2000	245	294	368	490	735	1470
1900	235	283	354	472	708	1415
1800	227	272	340	453	680	1360
1700	217	261	326	435	652	1305
1600	208	250	312	417	625	1250
1500	199	239	299	398	597	1194
1400	190	228	285	380	570	1139
1300	181	217	271	361	542	1084
1200	171	206	257	343	514	1029
1100	162	195	243	325	487	974
1000	153	184	230	306	459	919
900	144	173	216	288	432	863
800	135	162	202	269	404	808
700	126	151	188	251	377	753
600	116	140	174	233	349	698
500	107	129	161	214	321	643
400	98	117	147	196	294	587
300	89	106	133	177	266	532
200	80	95	119	159	239	477
100	70	84	105	141	211	422
0	61	73	92	122	183	367

tabla B-4 Valores del gasto (q) vs. N y Pvf.

Pvf \ S	40	80	120	160	200	240
2000	331	468	574	662	741	811
1900	325	460	563	650	727	796
1800	319	450	552	637	712	780
1700	312	441	540	624	698	764
1600	305	432	529	611	683	748
1500	299	422	517	597	667	731
1400	292	412	505	583	652	714
1300	284	402	493	569	636	697
1200	277	392	480	554	620	679
1100	270	381	467	539	603	660
1000	262	370	453	524	585	641
900	254	359	440	508	567	622
800	246	347	425	491	549	601
700	237	335	411	474	530	581
600	228	323	395	456	510	559
500	219	310	379	438	490	535
400	209	296	363	419	468	513
300	199	282	345	399	446	488
200	189	267	327	377	422	462
100	177	251	307	355	397	435
0	165	234	286	331	370	405

tabla B-5 Valores del gasto (q) vs. S y Pvf.

$P_{VI} \backslash N$	30	25	20	15	10	5
2000	295	354	443	590	885	1771
1900	285	342	427	570	855	1710
1800	276	331	414	552	827	1655
1700	269	322	403	537	806	1611
1600	263	316	395	527	790	1580
1500	257	309	388	514	771	1543
1400	253	303	379	506	758	1516
1300	248	298	372	496	745	1489
1200	244	293	367	489	733	1466
1100	240	288	360	480	721	1441
1000	238	285	357	477	715	1430
900	236	283	354	472	708	1417

tabla B-6 Valores del gasto (V) vs. N y P_{VI} .

$P_{VI} \backslash S$	40	80	120	160	200	240
2000	383	542	684	787	857	939
1900	377	533	653	754	843	923
1800	371	525	643	743	831	910
1700	369	521	639	737	824	903
1600	369	521	639	737	824	903
1500	367	520	636	735	822	900

tabla B-7 Valores del gasto (V) vs. S y P_{VI} .

Pwf	solo líquido			líquido + gas			
	q	N	S	VF	V	N	S
1750	960	8.9	371	1.125	1080	6.2	469
1760	905	7.4	328	1.122	1015	6.6	413
1770	851	7.9	289	1.122	965	7.0	364
1780	796	8.5	252	1.120	892	7.6	316
1790	741	9.1	217	1.119	829	8.2	272
1800	686	9.9	188	1.1175	787	8.9	232
1810	630	10.8	158	1.1175	704	9.7	195
1820	500	13.7	98	1.1170	559	12.3	122
1830	450	15.3	79	1.1165	502	13.7	98
1840	400	17.3	62	1.1155	448	15.5	77
1850	350	19.8	47	1.1150	390	17.8	59
1860	300	23.2	35	1.1148	334	20.9	43
1870	250	28.0	24	1.1140	279	25.1	30
1880	200	35.5	15	1.1135	223	31.5	19
1890	150	47.0	9	1.1134	167	42.2	11
1900	100	70.8	4	1.1133	111	63.7	5
1910	50	142.1	1	1.1132	56	126.8	1

Tabla B-8 valores de q y V vs. N y S.

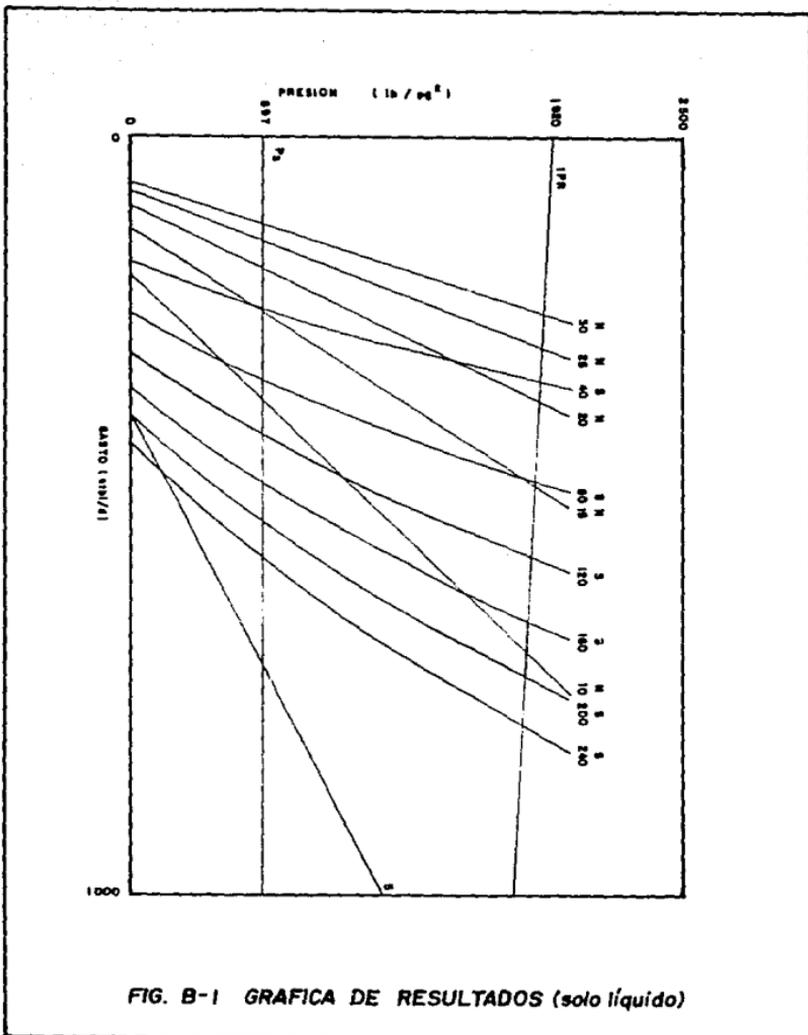


FIG. B-1 GRAFICA DE RESULTADOS (solo líquido)

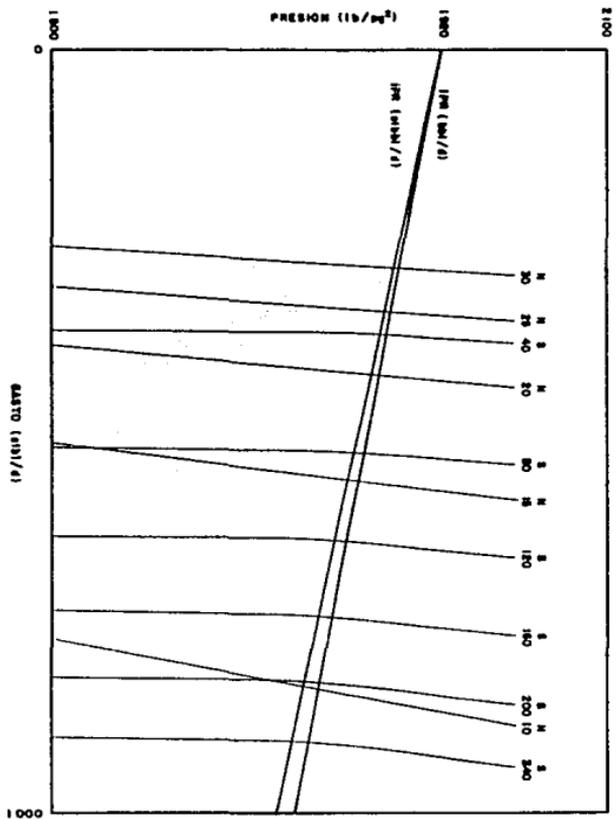


FIG. B-2 GRAFICA DE RESULTADOS (líquido + gas)

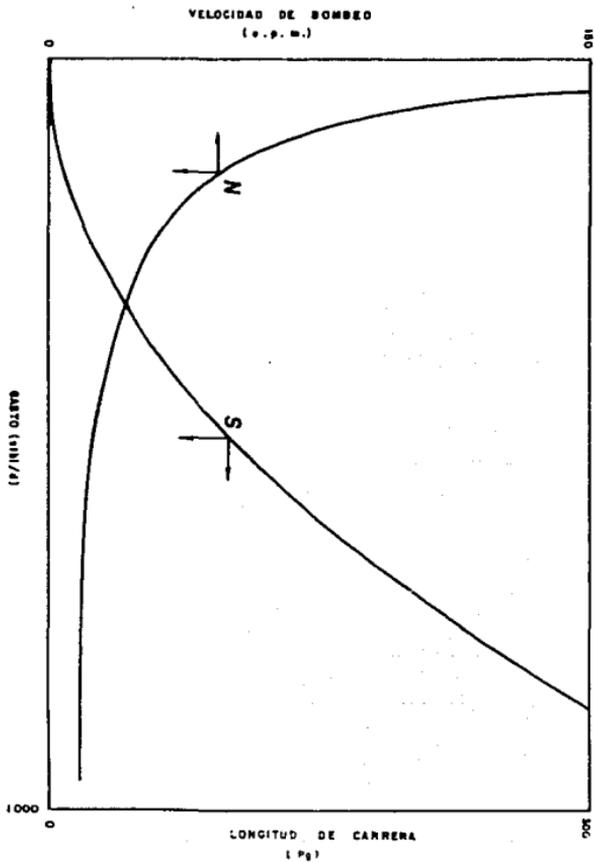


FIG. B-3 GRAFICA DE q vs. N y S (solo líquido)

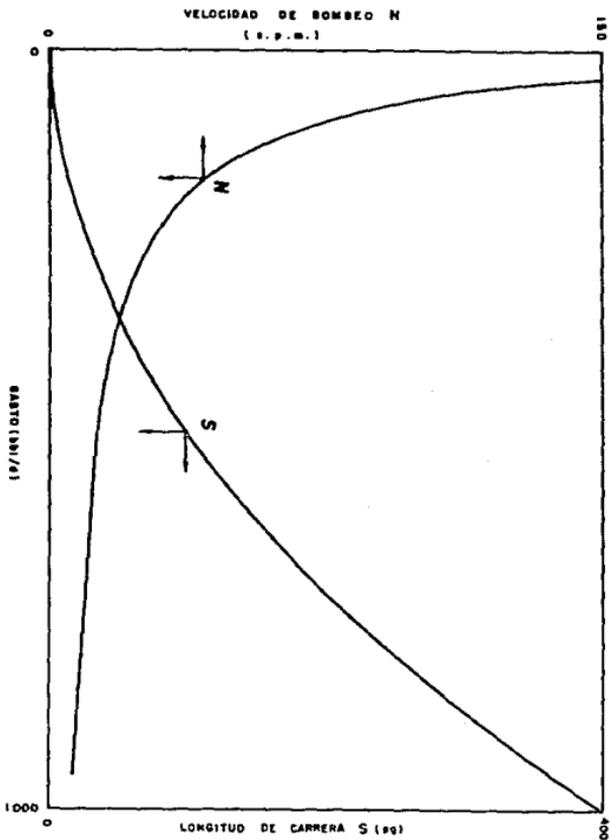


FIG. B-4 GRAFICA DE V vs. N y S (líquido + gas).