

01148

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO

**“ANÁLISIS Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE  
EXPLOTACIÓN ARTIFICIAL A LOS POZOS  
DEL CAMPO CERRO NANCHITAL”**

T E S I N A

PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:

**ESPECIALISTA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS  
ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN PETROLERA**

P R E S E N T A:

**ING. IGNACIO ALBERTO DORANTES LÓPEZ**

ASESOR: ING. HUGO HUERTA LÓPEZ



Cd. Universitaria, México, D.F., Enero del 2005

m341356



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 esta 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.

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	2
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN</b>	4
II.1 Sistemas Artificiales de Producción	4
II.2 Sistema Artificial de Bombeo Neumático	5
II.3 Sistema Artificial por Bombeo Hidráulico	6
II.3.1 Bombeo Hidráulico Tipo Pistón	6
II.3.2 Bombeo Hidráulico Tipo Jet	7
II.4 Sistema Artificial de Bombeo por Cavidades Progresivas	9
II.5 Sistema Artificial de Bombeo Mecánico	10
II.5.1 Descripción del Equipo	11
II.6 Sistema Artificial de Bombeo Electrocentrífugo	12
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>SELECCIÓN Y ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN</b>	14
III.1 Selección del Sistema Artificial de Producción	14
III.2 Análisis Técnico del Sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas	15
III.3 Análisis Técnico del Sistema de Bombeo Mecánico	26
III.4 Análisis Técnico del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo	30
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN SELECCIONADOS</b>	40
IV.1 Análisis Económico del Sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas	40
IV.2 Análisis Económico del Sistema de Bombeo Mecánico	41
IV.3 Análisis Económico del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo	42
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	43
V.1 Conclusiones	43
V.2 Recomendaciones	44
<b>ANEXOS</b>	45
<b>NOMENCLATURA</b>	54
<b>REFERENCIAS</b>	55

## RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio basado en las condiciones mecánicas de operación de los pozos productores y las propiedades físicas del yacimiento, donde se busca el mejor sistema artificial de producción a utilizar en el campo Cerro Nanchital.

El Campo Cerro Nanchital se compone de un total de 14 pozos de los cuales actualmente operan 4, obteniendo en conjunto una producción neta de 3529 bls/día, dicha producción es manejada en la batería Cerro Nanchital y posteriormente transportada por medio de pipas a la batería La Gravera, que se encuentra a una distancia de 60 Km.

En los inicios de la explotación, la presión del yacimiento era de  $54 \text{ Kg/cm}^2$  y a medida que se ha ido explotando el yacimiento este valor a disminuido a  $37 \text{ Kg/cm}^2$ .

Una característica muy particular del Campo Cerro Nanchital es la diferencial de presión que existe entre la presión de fondo fluyendo y la presión estática del yacimiento, la cual, es muy pequeña; como se sabe, este es un factor muy importante y es motivo principal, por lo que los pozos disminuyen en forma considerable su productividad, debido a que se dificulta el arribo de los hidrocarburos del fondo del pozo a la superficie hasta llegar a impedir que los pozos puedan fluir con la energía propia del yacimiento; esto provocado por la igualación de presiones entre la presión de fondo fluyendo y la presión estática del yacimiento.

De lo anterior y con el propósito de optimizar la explotación del campo y maximizar la recuperación final de los hidrocarburos se realizó un estudio y análisis comparativo para seleccionar el mejor Sistema Artificial de Producción a implantar en los pozos pertenecientes al campo y así cumplir el objetivo principal de los sistemas artificiales de producción, que busca imprimir energía adicional a los fluidos del fondo del pozo, para hacerlos llegar a la superficie; que no es más que reducir la presión de fondo fluyendo para que la formación pueda aportar el gasto deseado.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El Campo Cerro Nanchital se ubica al Sur del Estado de Veracruz, aproximadamente a 60 Km de las Choapas, entre los paralelos 17°30'49" de longitud norte y entre los meridianos 94°08'49" y 94°10'00". Fig. I.1

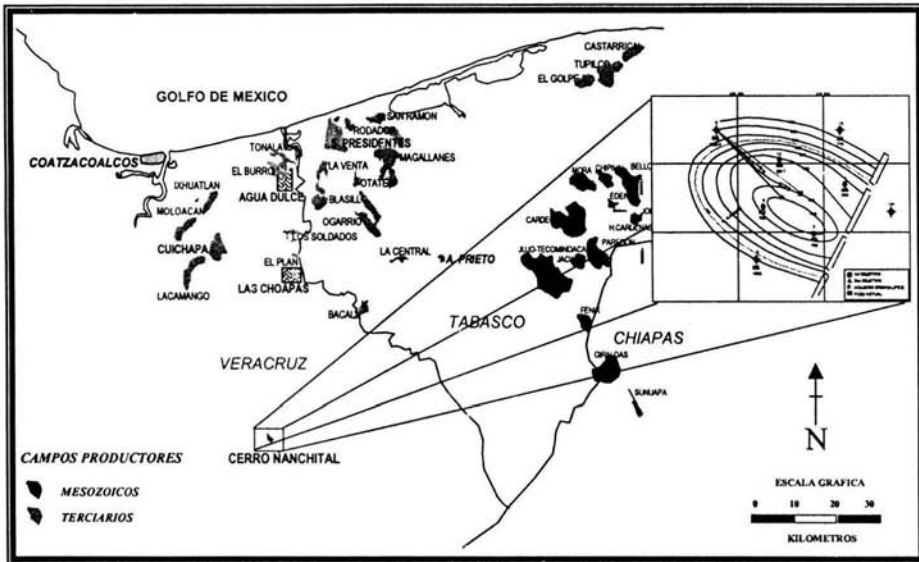


Fig. I.1 PLANO DE LOCALIZACIÓN

En cuanto a producción se refiere, es el segundo campo petrolero más importante del Activo de Producción Cinco Presidentes; el Campo Cerro Nanchital se explota en la formación del Cretácico Inferior y cuenta con una reserva actual de 20 MMbls.

El campo se compone de un total de 14 pozos de los cuales 5 están taponados, 3 fuera de operación sin posibilidades de explotación, 1 cerrado con posibilidades, 1 condicionado como pozo inyector y 4 pozos productores, los cuales son: Cerro Nanchital 6H, 8, 9 y 12 con una producción total de aceite neto de 3529 bls/día, la cual es manejada en la batería Cerro Nanchital y transportada por pipas a la batería La Gravera, que se encuentra a una distancia de 60 Km, consistiendo de 30 Km de pavimento asfáltico y 30 Km de camino revestido. La Tabla I.1 muestra los datos técnicos del campo.

INICIO DE EXPLOTACION:	1 DE JULIO DE 1987						
FORMACION PRODUCTORA	CRETACICO INFERIOR						
No. DE ARENAS	1						
AREA (Km <sup>2</sup> )	1.635						
VOLUMEN ORIGINAL @ C.A.	ACEITE 62.9 MMBLS	GAS 7.4 MMMPC					
TIPO DE YACIMIENTO	ACEITE NEGRO						
PRESION ORIGINAL ( Kg/cm <sup>2</sup> )	54 Kg/cm <sup>2</sup>						
PRESION DE SATURACION ( Kg/cm <sup>2</sup> )	31.6 Kg/cm <sup>2</sup>						
DENSIDAD DEL ACEITE	37° API						
PROD. ACUM. ACEITE (MMBLS)	9.2 MMBLS						
PROD. ACUM. GAS (MMMPC)	2.1 MMMPC						
FACT. RECUP. ACTUAL	ACEITE 14.6%	GAS 28%					
	TOTAL	PRODUCTORES	INYECTORES	CDOS. C/POSIB.	CDOS. S/POSIB.	PEND. TAPON	TAPONADOS
ESTADO DE POZOS	14	4	1	1	3	0	5

**TABLA I.1 DATOS TÉCNICOS**

La explotación del campo inicio en 1960 con los pozos Cerro Nanchital Nos. 2 y 12 los cuales operaron en forma intermitente hasta el año de 1986 en que fueron perforados los pozos Cerro Nanchital No. 8 y 9 alcanzando en conjunto un pico de producción de 1500 BPD, posteriormente en 1987 se perforó el primer pozo horizontal del activo, el Cerro Nanchital No.6H y se repararon los pozos No. 2 y 12, alcanzando una producción total entre los 5 pozos (2, 6H, 8, 9 y 12) de 6500 BPD; actualmente se encuentran operando en el campo 4 pozos (6H, 8, 9 y 12).

La presión del yacimiento, como resultado de la explotación ha disminuido de un valor inicial de 54 Kg/cm<sup>2</sup> a un valor actual de 37 Kg/cm<sup>2</sup>; con base en estudios realizados del yacimiento del campo y con objeto de optimizar la explotación del mismo y maximizar la recuperación final de los hidrocarburos, se realizará un estudio con el propósito de implantar y seleccionar el sistema artificial de producción más conveniente, que cumpla con las condiciones técnicas y de operación del campo.

Para ello se efectuó un análisis comparativo entre los diferentes tipos de sistemas artificiales de producción, los cuales son: Sistema Artificial por Bombeo Neumático, Sistema Artificial por Bombeo Hidráulico (Bombeo tipo Jet y Bombeo tipo Pistón), Sistema por Bombeo de Cavidades Progresivas, Sistema Artificial por Bombeo Mecánico y Sistema Artificial por Bombeo Electrocentrífugo.

## CAPÍTULO II

### DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN

#### II.1 Sistemas Artificiales de Producción.

La caída de presión en el yacimiento es un factor muy importante y es motivo por el cual la mayoría de los pozos disminuyen en forma considerable su productividad, lo cual provoca se dificulte el arribo de los hidrocarburos desde el fondo del pozo hasta la superficie causando que dichos pozos disminuyan su producción o dejen de fluir por igualación de presiones, esto crea la necesidad de efectuar un análisis para la selección del mejor sistema artificial de producción a utilizar considerando las características del yacimiento y condiciones del pozo.

Los sistemas artificiales de producción consisten en imprimir energía a los fluidos en el pozo para hacerlos llegar a la superficie, con lo que se puede obtener hasta un incremento en la recuperación de los hidrocarburos contenidos en el yacimiento.

El propósito principal de los sistemas artificiales de producción es el de reducir la presión de fondo por debajo de la presión normal del yacimiento para que la formación pueda aportar el gasto deseado, Fig. II.1

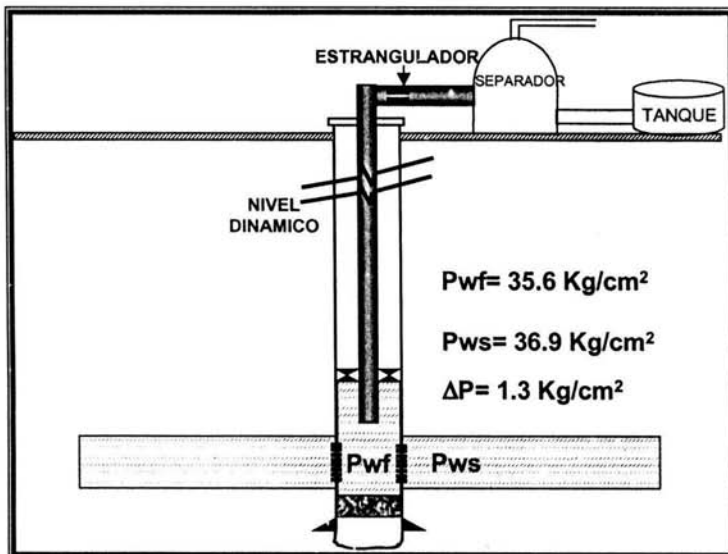


Fig. II.1 DIFERENCIAL DE PRESIÓN

## **II.2 Sistema Artificial de Bombeo Neumático**

Donde haya gas disponible, ya sea disuelto en el fluido producido o de alguna forma externa, el bombeo neumático es un método muy eficiente y económico de levantamiento artificial, Fig. II.2

El bombeo neumático continuo, emplea el mismo mecanismo que se utiliza en el flujo natural para seguir produciendo los fluidos del pozo. En él, el gas natural disuelto en el crudo se suplementa con el gas inyectado desde la superficie a la máxima profundidad posible, provocando así un aligeramiento de la presión de la columna de fluido permitiendo que la energía del yacimiento haga llegar los fluidos del fondo del pozo a la superficie y a las instalaciones de producción.

El bombeo neumático requiere muy pocos equipos de subsuelo y estos no son afectados por la presencia de arena en el pozo. Las válvulas de subsuelo tienen una vida de servicio larga y pueden correrse y recuperarse con línea de acero, facilitando así la reparación y servicio de las mismas. El bombeo neumático tiene la desventaja del tiempo de espera prolongado por los equipos de compresión, pero una vez instalados, este método tiene generalmente el menor costo de operación entre todos los sistemas de levantamiento artificial. El bombeo neumático de flujo continuo no se recomienda generalmente para yacimientos con presiones extremadamente bajas; para estos casos el bombeo neumático de flujo intermitente se ha utilizado con mucho éxito.

### **Ventajas**

- Su operación es sencilla.
- No presenta restricciones en la TP.
- Se puede usar en pozos que producen altas relaciones gas-aceite.
- Se puede usar en pozos desviados.
- De bajo costo. El costo inicial del equipo generalmente es menor que el de otros sistemas artificiales, al igual que los costos de operación.
- Trabaja en pozos con producción de arena.

### **Desventajas**

- Se debe tener una fuente disponible de gas a alta presión.
- No trabaja muy bien en pozos con baja densidad API.
- No es posible obtener grandes gastos de producción en pozos con la TR dañada en los que no sea económico repararla.
- En pozos con pequeñas cantidades de gas de formación generalmente produciría más con otros tipos de sistemas artificiales.
- La inyección de gas altamente corrosivo puede impedir la operación, a menos que se pueda tratar antes de inyectarlo al pozo.



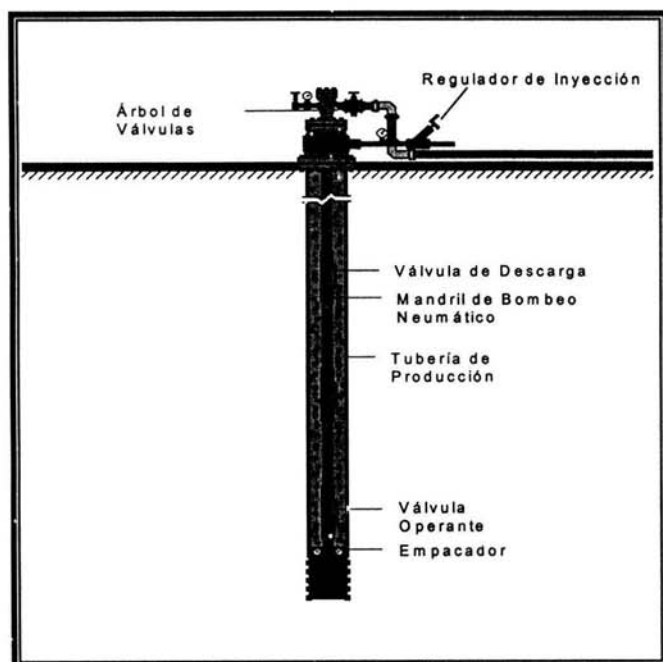


Fig II.2 SISTEMA DE BOMBEO NEUMÁTICO

### II.3 Sistema Artificial de Bombeo Hidráulico

El bombeo hidráulico es un sistema artificial donde se transmite energía al fondo del pozo mediante la inyección de un fluido presurizado a través de las tuberías del pozo. A este fluido presurizado se le llama fluido motriz que puede ser agua, aceite o una mezcla de estos. La energía es adicionada a los fluidos del yacimiento mediante una bomba instalada en el fondo, esta bomba puede ser de tipo Pistón o Jet.

#### II.3.1 Bombeo Hidráulico Tipo Pistón

El bombeo hidráulico tipo pistón consta de pistones que mediante el fluido motriz realizan un movimiento recíproco adicionando así la presión necesaria para elevar los fluidos a la superficie, como se aprecia en la Fig. II.3.1. Este tipo de bombeo hidráulico está basado en el principio de Pascal que dice que la presión aplicada a un fluido se transmitirá en todas direcciones con la misma intensidad, es decir, la presión que se aplica al fluido motriz se transmitirá al pistón de la bomba. Este sistema requiere de un gran volumen de fluido de potencia limpio para hacer trabajar la bomba en el subsuelo. El bombeo hidráulico tipo pistón se utiliza generalmente en los pozos de menor volumen debido a las limitaciones del diámetro de la bomba y los grandes volúmenes de fluido de potencia que se requieren.

### Ventajas

- Alta eficiencia de desplazamiento volumétrico.
- Se puede utilizar bombas libres (autorrecuperables).
- Buena aplicación en pozos desviados.
- Profundidades de aplicación de 5000 mts.
- Permite con facilidad la adición de aditivos o inhibidores de corrosión.
- Puede instalarse en áreas reducidas.

### Desventajas

- Requiere ensambles de fondo específico.
- Disminuye su eficiencia con la presencia de gas y sólidos.

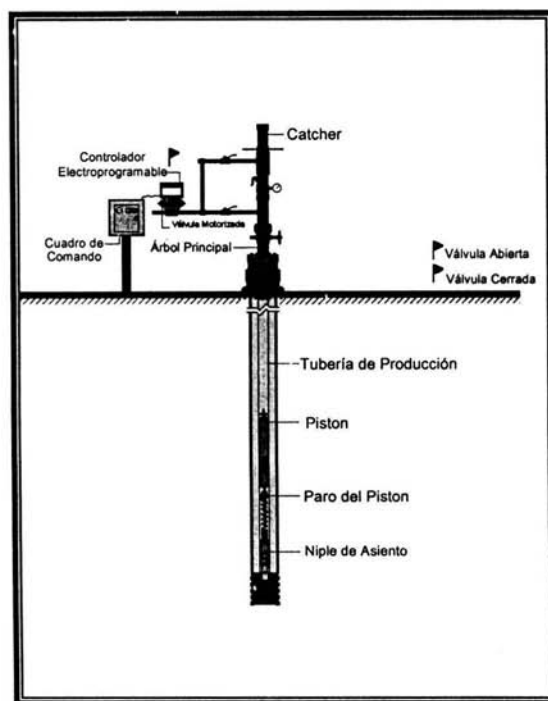


Fig II.3.1 SISTEMA DE BOMBEO HIDRÁULICO TIPO PISTÓN

### II.3.2 Bombeo Hidráulico Tipo Jet

El bombeo subsuperficial tipo jet (a chorro) es un sistema especial de bombeo hidráulico, a diferencia del tipo pistón, no ocupa partes móviles y su acción de bombeo se realiza por medio de transferencia de energía entre el fluido motriz y los fluidos producidos, como se aprecia en la Fig. II.3.2. El fluido motriz entra por la parte superior de la bomba y pasa a través de la tobera, donde su presión total es convertida a una carga por velocidad. La tobera descarga un chorro en la cámara de entrada de los fluidos del pozo, la cual, tiene comunicación con la formación. En la

cámara de mezclado cuyo diámetro es mayor al de la tobera, se mezclan los fluidos producidos y el fluido motriz. Al mismo tiempo que se efectúa la mezcla, el fluido motriz pierde la energía ganada por los fluidos del pozo; después la mezcla pasa al difusor, que es la última sección de trabajo, en donde la energía que en su mayor parte es conservada en forma de carga por velocidad se convierte en carga por presión estática; cuando esta presión es mayor que la ejercida por la columna de fluidos en el espacio anular, se establece el flujo hacia la superficie.

### Ventajas

- Carece de partes móviles.
- Puede manejar altos gastos de producción.
- Buena aplicación en pozos desviados.
- Diámetros pequeños para aplicaciones con línea de acero o tubería.
- Bajo mantenimiento.

### Desventajas

- Requiere grandes volúmenes de fluido de potencia, que deben poder manejarse en las instalaciones de producción en la superficie.
- Requiere ensambles de fondo específicos.
- Altos requerimientos de presión superficial.
- Requiere de una presión de succión relativamente alta para evitar la cavitación.
- Baja eficiencia de aprovechamiento de la potencia del motor.

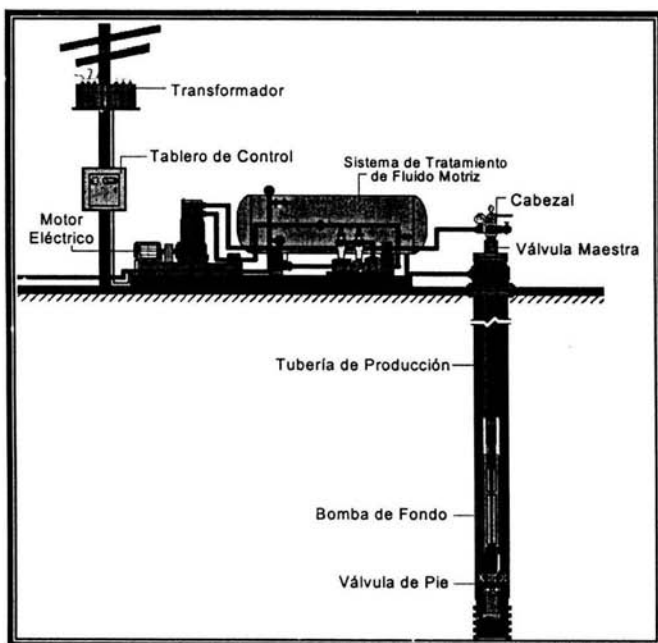


Fig II.3.2 SISTEMA DE BOMBEO HIDRÁULICO TIPO JET

## II.4 Sistema Artificial de Bombeo por Cavidades Progresivas

El aparejo de bombeo por cavidades progresivas (PCP) opera sumergido en el fluido del pozo empleando el principio de Moineau que consiste en hacer rotar un engranaje helicoidal dentro de otro para desplazar un fluido de un punto a otro. En los pozos de petróleo, la bomba esta conectada a la superficie por medio de varillas de succión con movimiento giratorio vertical, el cual, es impuesto a través de un sistema de transmisión conectado a la fuente de potencia (motor eléctrico o motor de combustión interna), por medio de poleas, bandas y masas que imparte el movimiento de rotación desde la superficie a la sarta de varillas, la Fig II.4 ilustra la disposición de los componentes.

Las bombas de cavidades progresivas para pozos de petróleo son bombas muy sencillas. Estas constan solamente de dos partes: el **estator**, normalmente instalado al final de la tubería de producción, y el **rotor**, normalmente instalado al final de la sarta de varillas. En este caso la bomba es impulsada por la rotación de la sarta de varillas.

La bomba de cavidad progresiva requiere muy poco espacio de instalación en la superficie y no necesita una unidad de izamiento grande, por esta razón ofrece ciertas ventajas con respecto al sistema de bombeo mecánico en algunos casos.

### Ventajas

- Desplaza fluidos altamente viscosos.
- No tiene válvulas (no hay candados de gas).
- El requerimiento de potencia es menor, comparada con el de otros sistemas.
- La operación de instalación es muy sencilla.
- Tolera altos niveles de gas, RGA de hasta  $500 \text{ m}^3/\text{m}^3$ .
- Adecuada para trabajar con grandes cantidades de arena.

### Desventajas

- La máxima temperatura de operación es de  $170 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Es sensible a algunos fluidos; el elastómero puede inflarse.
- No es aplicable a fluidos aromáticos ( $^\circ\text{API}$  mayores a 40).
- No son capaces de bombear en proyectos de inyección.

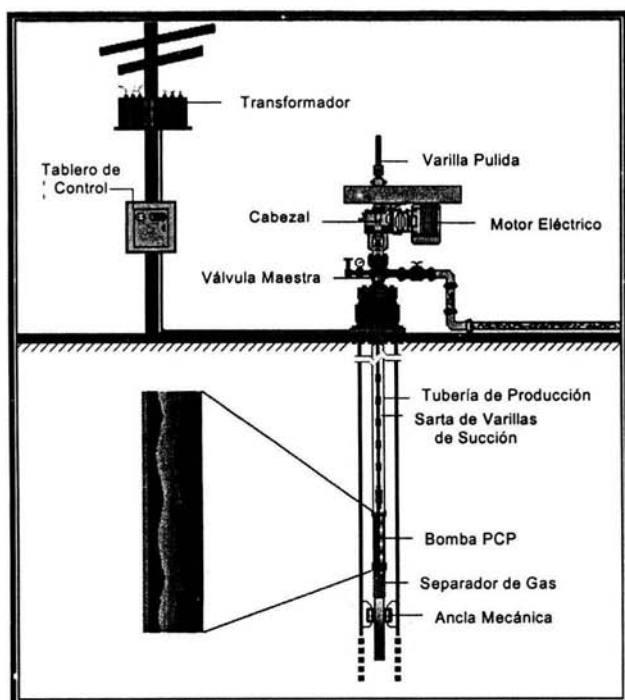


Fig II.4 SISTEMA DE BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS

## II.5 Sistema Artificial de Bombeo Mecánico

El sistema de levantamiento artificial más utilizado en la actualidad es el bombeo mecánico, se trata de un sistema mecánico donde se emplea una bomba reciprocante conectada a la superficie por medio de una sarta de varillas de succión. Las varillas de succión son impulsadas hacia abajo y hacia arriba desde la superficie por un equipo de izamiento mecánico llamado unidad de bombeo. El sistema de bombeo mecánico trabaja mejor en pozos someros y de poco volumen que contengan muy poco o nada de sólidos o gas. La presencia de arena y sólidos en el fluido bombeado puede ser sumamente dañina para la bomba de subsuelo. El gas arrastrado por el fluido también puede causar que la bomba se trabaje con gas y trabaje de manera muy ineficiente. El sistema de bombeo mecánico es de muy fácil disponibilidad, son sencillos de instalar y requiere de poca o ninguna experiencia para su operación, Fig. II.5

### Ventajas

- Es de fácil diseño.
- Las unidades pueden ser cambiadas a otros pozos.
- Se adapta a agujeros reducidos.
- Es flexible ya que puede manejar diferentes gastos de acuerdo a la capacidad del pozo según vaya declinando su producción.
- Levanta aceites viscosos y de altas temperaturas.

## Desventajas

- Las unidades son de grandes dimensiones.
- La alta producción de sólidos ocasiona problemas a la bomba.
- No se adapta a grandes profundidades.
- En operaciones costa fuera resulta pesado y estorboso.

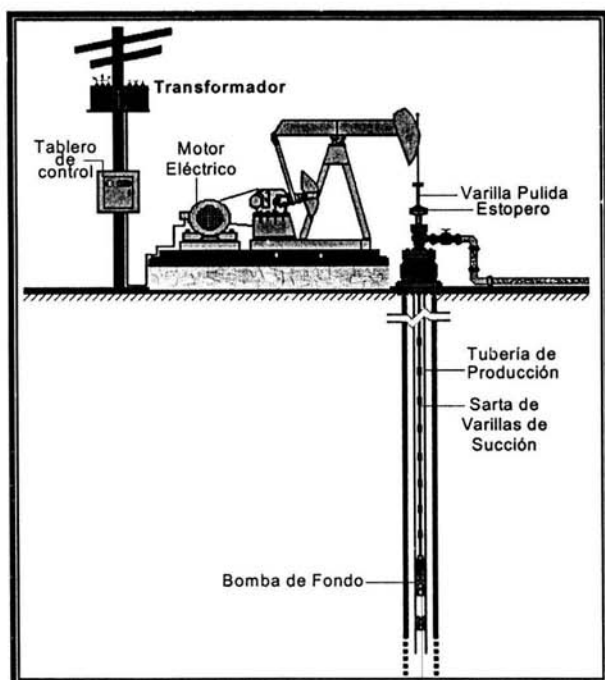


Fig II.5 SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO CONVENCIONAL

### II.5.1 Descripción del Equipo

**Bomba subsuperficial:** Esta es una bomba de émbolo y su función es admitir los fluidos de la formación y desplazarlos desde el fondo del pozo hasta la superficie por el interior de la TP, mediante el movimiento ascendente y descendente de la sarta de varillas, este movimiento de las varillas produce un vacío en el interior del barril de trabajo, haciendo que el líquido penetre en él a través de la válvula de pie ocupando el espacio vacío. El desplazamiento del líquido y su descarga por medio de la válvula viajera y de la tubería de descarga, se produce haciendo entrar nuevamente el émbolo, este movimiento que realiza la bomba para desplazar los fluidos es llamado ciclo de bombeo.

## **II.6 Sistema Artificial de Bombeo Electrocentrífugo**

El bombeo electrocentrífugo, conocido comúnmente como ESP, consiste de una bomba centrífuga de múltiples etapas, impulsada por un motor eléctrico de subsuelo, conectado a la superficie por medio de un cable eléctrico. El bombeo electrocentrífugo o ESP puede levantar grandes volúmenes de fluido, de pozos donde el diámetro de la tubería de revestimiento permita el uso de bombas y motores de diámetro grande. Como el bombeo electrocentrífugo es por su naturaleza un proceso mecánico, también se ve afectado por la presencia de sólidos y gas en el fluido. Sin embargo, puede levantar grandes volúmenes de líquidos de pozos profundos y las altas temperaturas del pozo pueden reducir considerablemente la vida de las bombas electrosumergibles.

El bombeo electrocentrífugo debe reunir ciertas características que no afecten su funcionamiento como son: altas relaciones gas-aceite, altas temperaturas, presencia de arena en los fluidos producidos y medio ambiente de operación agresivo, que son factores con influencias indeseables sobre la eficiencia del aparejo.

Entre las características únicas del sistema está su capacidad de producir volúmenes considerables de fluidos desde grandes profundidades y bajo una amplia variedad de condiciones del pozo; este sistema particularmente se distingue porque su unidad de impulso o motor está directamente acoplada con la bomba en el fondo del pozo.

El aparejo de bombeo electrocentrífugo Fig. II.6, trabaja sobre un amplio rango de profundidades y gastos, su aplicación es particularmente exitosa cuando las condiciones son propicias para producir altos volúmenes de líquidos con bajas relaciones gas-aceite. El sistema opera sin empacador, sumergido en el fluido del pozo y suspendido en el extremo inferior de la tubería de producción, generalmente por arriba de la zona de disparos.

### **Ventajas**

- Se considera como un sistema efectivo y económico para producir grandes volúmenes de fluidos, a grandes profundidades y variadas condiciones.
- Es capaz de manejar gastos desde 200 hasta 60,000 BPD de fluidos, en profundidades aún superiores a los 4500 m.
- Se utiliza para fluidos con altas viscosidades y en el manejo simultáneo de aceite, gas y agua.
- El comportamiento del sistema es muy eficaz cuando se manejan únicamente líquidos, más no por esta razón se deja de intentar su aplicación en pozos que produzcan cantidades considerables de gas libre, ya que la bomba centrífuga tolera cantidades determinadas de gas libre.

### **Desventajas**

- La profundidad de operación está limitada tanto por el rango de potencia del motor eléctrico, como por las altas temperaturas; éstas a su vez limitan el tamaño del motor y las características del cable.

- El costo inicial puede ser alto ya que las múltiples etapas en la bomba para un alto volumen y las elevadas potencias en el motor son costosas.
- El cable es de alto costo especialmente si se requieren recubrimientos para que opere en medio ambiente agresivo, las fallas en el cable son muy frecuentes y se deben a altas temperaturas, corrosión abrasión, alta RGA (eficiencias bajas) y frecuentemente a la liberación de gas encerrado en la bomba.

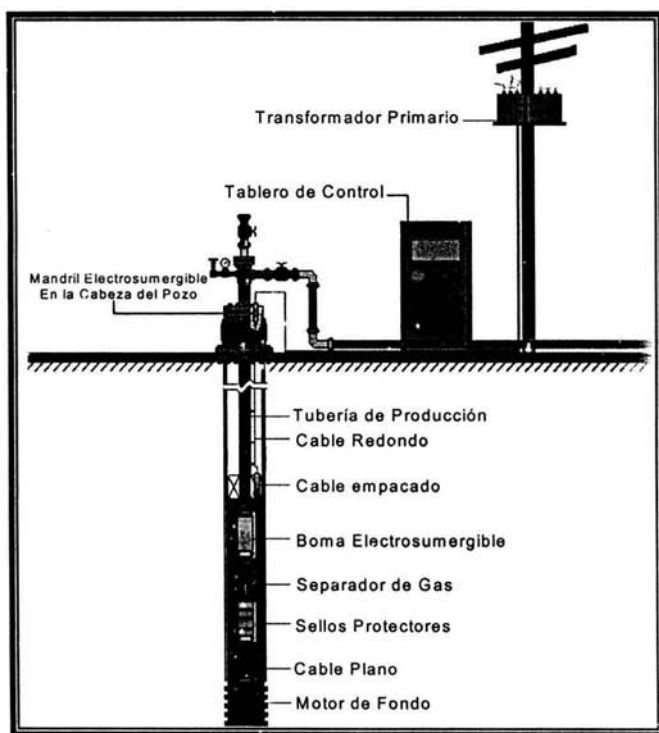


Fig II.6 SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO



## CAPÍTULO III

### SELECCIÓN Y ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN

#### III.1 Selección del Sistema Artificial de Producción.

Una verdadera optimización de la producción no se puede lograr a menos que exista una instalación de levantamiento artificial que se adapte perfectamente a las condiciones de operación del área. Tratar de producir un campo con un sistema de levantamiento artificial inadecuado o que no tome en cuenta las condiciones de operación del área, producirá como resultado los peores tipos de ineficiencia. Existen muchos factores que afectan la selección de un sistema artificial de producción, estos factores varían de un área a otra e incluso pueden variar dentro del mismo campo. A continuación se mencionan algunos de los factores que intervienen en la selección del sistema artificial de producción:

- Infraestructura con la que cuenta el campo petrolero.
- La localización del pozo.
- La productividad del pozo.
- Las propiedades de los fluidos.
- La presión del yacimiento.
- El gasto de producción.
- La cantidad de gas disuelto en el aceite.
- La profundidad de levantamiento.
- La configuración y desviación del pozo.
- La temperatura de fondo del pozo.
- La producción de arena.

La única infraestructura con la que cuenta el campo Cerro Nanchital es una batería de separación pequeña, la cual, tiene 2 tanques verticales de 500 bpd y 2 tanques horizontales de 250 bpd, además de un tanque de almacenamiento de 5000 bpd, la producción de aceite proveniente de los pozos es manejada primeramente en la batería donde se separa el gas del aceite, dicho gas es quemado a la atmósfera y el aceite es transportado por pipas a la batería La Gravera, que se encuentra a una distancia de 60 Km, consistiendo de 30 Km de pavimento asfáltico y 30 Km de camino revestido

Por lo que con base a las características de selección del sistema artificial de producción antes mencionadas; se ha decidido descartar del estudio de selección el sistema artificial por bombeo neumático y el sistema artificial por bombeo hidráulico tipo pistón y el bombeo hidráulico tipo Jet.

El sistema artificial por bombeo neumático no es factible implantarse debido a que, en el Campo Cerro Nanchital no se cuenta con ningún tipo de infraestructura que permita generar y manejar el gas para el bombeo neumático y mucho menos existe

una red de inyección que permita introducir el gas a los pozos de interés, por lo que sería necesario construir absolutamente toda una infraestructura completa para el sistema de bombeo neumático, considerando también una estación de compresión, lo cual, trae consigo una inversión inicial muy costosa.

En cuanto al sistema por bombeo hidráulico tipo pistón es un sistema costoso de implantar y delicado, en este caso debido a la alta concentración de sulfhídrico que tienen los pozos que componen al campo, es costoso debido a que es un sistema que requiere de un gran volumen de fluido de potencia limpio para hacer trabajar la bomba en el fondo por lo que se necesita de una infraestructura tal que suministre el fluido de potencia a una alta presión para poder ejercer su función y es delicado ya que se compone de partes móviles que se ven afectadas por la corrosión provocada por el sulfhídrico contenido en el gas producido.

Finalmente el sistema de bombeo hidráulico tipo Jet de igual forma no es factible de implantar ya que su acción de bombeo se realiza por medio de transferencia de energía entre el fluido motriz y los fluidos producidos provocando así que se contamine de sulfhídrico el fluido motriz y este tenga que ser tratado en la superficie elevando así los costos de producción, además de que se requiere de instalaciones en superficie que puedan manejar grandes volúmenes de fluido de potencia.

En relación con lo antes mencionado únicamente se realizará el análisis técnico del sistema de bombeo por cavidades progresivas y el sistema por bombeo mecánico a los pozos verticales Cerro Nanchital 8, 9 y 12 y el análisis del sistema de bombeo electrocentrífugo al pozo horizontal Cerro Nanchital 6H.

### III.2 Análisis Técnico del Sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas.

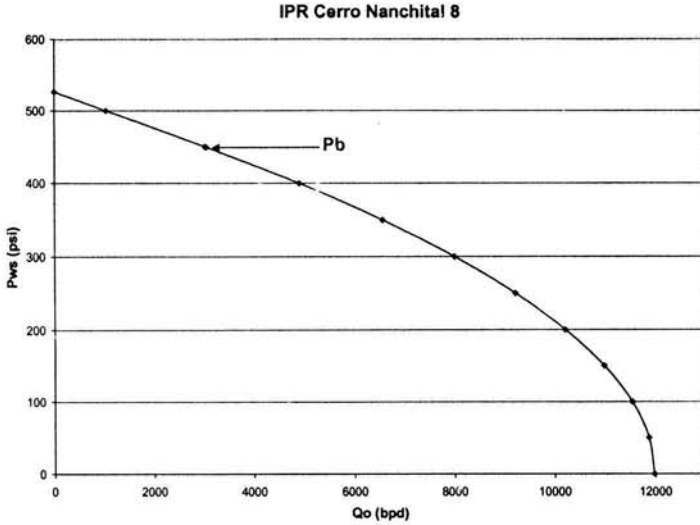
#### Pozo Cerro Nanchital No. 8

Datos del Pozo:

Profundidad de clocación de la bomba:	485 m
Gasto actual:	127 m <sup>3</sup> /d ≈ 800 bpd
Temperatura de fondo:	45 °C
μ=	5.128 cp
T.R=	7"
T.P=	2 7/8"
Pws=	37 Kg/cm <sup>2</sup>
Pb=	31.6 Kg/cm <sup>2</sup>
G= 0.839 gr/cm <sup>3</sup> * 1000= 840 Kg/m <sup>3</sup> ----	37 °API
Sb=	241 m
Intervalo disparado:	450-485 m
Profundidad Interior:	667 m
Presión en la línea de flujo:	1.5 Kg/cm <sup>2</sup>

**Paso 1:**

Con los datos del yacimiento se calcula el IPR del pozo:



**Paso 2:**

Calcular la presión diferencial a través de la bomba con la ecuación 1:

$$\Delta P = [(Hc - Sb)G + Pf + FI] \text{ ----- ec.1}$$

Para una TP de 4 1/2" y sarta de varillas de succión de 1", calcular la pérdida de presión del fluido por fricción con la ecuación 2:

$$Pf = f(Hc)(\mu) \text{ ----- ec.2}$$

De la gráfica A-3 obtenemos el factor f, el cual resulta:

$$f = 0.000016 \text{ [(Kgf/cm}^2\text{)/m/cp]}$$

sustituyendo el factor f en la ecuación 2, obtenemos:

$$Pf = 0.000016[(\text{Kgf/cm}^2\text{)/m/cp}] * 485\text{m} * 5.128\text{cp} = 0.039793 \text{ Kgf/cm}^2$$

Ahora sustituyendo valores en la ecuación 1, obtenemos:

$$\Delta P = \frac{(485\text{m} - 241\text{m}) * 840\text{Kgf/m}^3}{10000} + 0.039793\text{Kgf/cm}^2 + 1.5\text{Kgf/cm}^2 = 22.036\text{Kgf/cm}^2$$

$$\therefore \Delta P = 22.036 \text{ Kgf/cm}^2$$

**Paso 3:**

Se selecciona el tipo de bomba con los siguientes datos:

Q actual= 127 m<sup>3</sup>/d ≈ 800 bpd

ΔP= 22.036 Kgf/cm<sup>2</sup>

TP= 4"

Bomba seleccionada del catálogo: **NTZ 450\*065 ST 78**  
con velocidad: **N= 175 rpm**

NTZ 450*065 ST 78	
Pump Geometry:	Singlelobe
Type:	Tubular
Displacement:	0,780 [m <sup>3</sup> /d]/[rpm] ⇔ 78,0 [m <sup>3</sup> /d]/[100 rpm]
Max. Differential Pressure:	65 kgf/cm <sup>2</sup> ⇔ 975 psi
B - Stator Housing O.D.:	72,00 mm
C - Stator Coupling O.D.:	141,5 mm EU
D - Rotor (Crest-to-Crest) O.D.:	70,0 mm ⇔ 2,76 inches
F - Rotor Major Diameter:	90,0 mm ⇔ 3,54 inches
E - Rotor Head:	1.9/16" for 1.1/8" rod ⇔ Threads API spec 11B
G - Rotor Length:	4950 mm ⇔ 16,24 ft
Min. Casing Size:	6.5/8" 24.00 lb/ft EU
Min. Tubing Size:	3.1/2 inches
API Tubing Drift:	74.75 mm
Warning: Requires first tubing (or tubing extension) size min. = 3.1/2"	
175	136.50

TABLA DE CATALOGO DE BOMBAS PCP

**Paso 4:**

Calcular el torque total con la ecuación 3:

$$T_t = T_h + T_o + T_r \text{ ----- ec.3}$$

Torque hidráulico:

$$T_h = \delta [m^3/d \text{ rpm}] \Delta P$$

$$T_h = 0.780 [m^3/d \text{ rpm}] * 22.036 \text{ Kgf/cm}^2 * (7121/656.7) = 186.38 \text{ [N.m]}$$

Torque de fricción:

De la gráfica A-4, la cual nos muestra la curva de comportamiento de la bomba seleccionada del catálogo, obtenemos que:

$$T_o = 45 \text{ [N.m]}$$

Torque resistivo:

$$T_r = H_c * \text{coef. fric} * \mu$$

El coeficiente de fricción se obtiene de la tabla B-1, el cual para una TP de 4" y varillas de 1" = 0.00008

Sustituyendo valores en la ecuación de torque resistivo:

$$Tr = 485 * 0.00008 * 5.128 = 0.19896 \text{ [N.m]}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 3, obtenemos el torque total:

$$Tt = 186.38 \text{ [N.m]} + 45 \text{ [N.m]} + 0.19896 \text{ [N.m]} = 231.57 \text{ [N.m]}$$

**Paso 5:**

Calcular la potencia requerida, dicha potencia es la que se tiene en la varilla pulida:

$$Pr = (Tr * N) / 7121 \text{ [HP]}$$

$$Pr = (231.57 * 175) / 7121 = 5.69 \text{ [HP]}$$

**Paso 6:**

Calcular la elongación causada por las varillas de succión:

Sabemos que para varillas de 1" = 1 \* 2.54 cm = 2.54 cm ≈ 25.4 mm

Del catálogo conocemos que:

$$D = 70 \text{ mm} \approx 7 \text{ cm}$$

$$H = 350 \text{ mm} \approx 35 \text{ cm}$$

$$L = 4550 \text{ mm} \approx 450 \text{ cm}$$

⇒ Calcular el área equivalente

$$A_e = \frac{\pi * D^2}{4} - A_R$$

$$A_R = \frac{\pi * d_r^2}{4} = \frac{3.1416 * (2.54 \text{ cm})^2}{4} = 5.07 \text{ cm}^2$$

$$\therefore A_e = \frac{3.1416 * (7 \text{ cm})^2}{4} - 5.07 \text{ cm}^2 = 33.42 \text{ cm}^2$$

⇒ Calcular la fuerza que actúa sobre las varillas

$$F = \Delta P * A_e$$

$$F = 22.036 \text{ Kg/cm}^2 * 33.42 \text{ cm}^2 = 736.39 \text{ Kg}$$

⇒ Calcular la tensión que actúa sobre el área de las varillas

$$\sigma = \frac{F}{A_R} = \frac{736.39 \text{ Kg}}{5.07 \text{ cm}^2} = 145.24 \text{ kgf / cm}^2$$

⇒ Calcular la elongación total

Conocemos que el modulo de YOUNG del acero es:

$$E = 2100000 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\Delta L = \frac{\sigma \cdot L}{E}$$

$$\therefore \Delta L = \frac{145.24 \text{Kgf/cm}^2 \cdot (485 \text{m} \cdot 100)}{2100000 \text{Kgf/cm}^2} = 3.35 \text{cm}$$

⇒ Finalmente calcular el espacio que debe existir entre el niple de paro y el rotor

$\Delta L + H$

$$3.35 \text{ cm} + 35 \text{ cm} = \underline{\underline{38.35 \text{ cm}}}$$

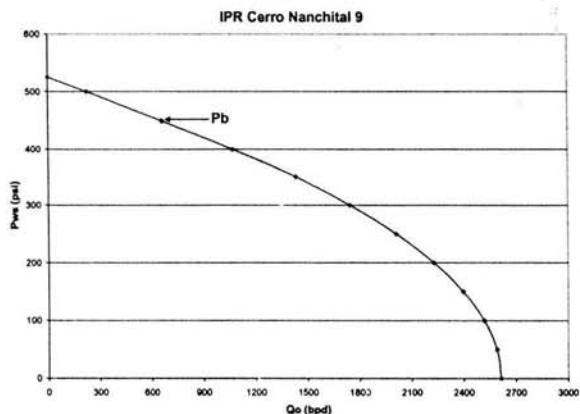
### Pozo Cerro Nanchital No. 9

Datos del Pozo:

Profundidad de colocación de la bomba:	495 m
Gasto actual:	57 m <sup>3</sup> /d ≈ 360 bpd
Temperatura de fondo:	45 °C
μ=	5.128 cp
T.R=	7"
T.P=	2 7/8"
Pws=	37 Kg/cm <sup>2</sup>
Pb=	31.6 Kg/cm <sup>2</sup>
G= 0.842 gr/cm <sup>3</sup> * 1000= 842 Kg/m <sup>3</sup> ----	36.60 °API
Sb=	266 m
Intervalo disparado:	455-495 m
Profundidad interior:	660 m
Presión en la línea de flujo:	1.5 Kg/cm <sup>2</sup>

#### Paso 1:

Con los datos del yacimiento se calcula el IPR del pozo:



#### Paso 2:

Calcular la presión diferencial a través de la bomba con la ecuación 1:

$$\Delta P = [(Hc - Sb)G + Pf + FI] \text{ ----- ec.1}$$

Para una TP de 3 1/2" y sarta de varillas de succión de 7/8", calcular la pérdida de presión del fluido por fricción con la ecuación 2:

$$Pf = f(Hc)(\mu) \text{ ----- ec.2}$$

De la gráfica A-1 obtenemos que el factor f es:

$$f = 0.000025 [(Kgf/cm^2)/m/cp]$$

sustituyendo el factor f en la ecuación 2, obtenemos:

$$Pf = 0.000025[(Kgf/cm^2)/m/cp] * 495m * 5.128cp = 0.063459 \text{ Kgf/cm}^2$$

Ahora sustituyendo valores en la ecuación 1, obtenemos:

$$\Delta P = \frac{(495m - 266m) * 842Kgf/m^3}{10000} + 0.063459Kgf/cm^2 + 1.5Kgf/cm^2 = 20.85Kgf/cm^2$$

$$\therefore \Delta P = 20.85 \text{ Kgf/cm}^2$$

### Paso 3:

Se selecciona el tipo de bomba con los siguientes datos:

Q actual = 57 m<sup>3</sup>/d ≈ 360 bpd

ΔP = 20.85 Kgf/cm<sup>2</sup>

TP = 3 1/2"

Bomba seleccionada del catálogo:

**NTZ 350\*060 DT 33**

con velocidad:

**N = 175 rpm**

NTZ 350*060 DT 33	
Pump Geometry:	Multilob
Type:	Tubular
Displacement:	0,330 [m <sup>3</sup> /d]/[rpm] ⇔ 33,0 [m <sup>3</sup> /d]/[100 rpm]
Max. Differential Pressure:	60 kgf/cm <sup>2</sup> ⇔ 900 psi
B - Stator Housing O.D.:	95,20 mm ⇔ 3,12" BJE or NI API spec 684CT
C - Stator Coupling O.D.:	114,3 mm EU ⇔ 108,0 mm NI (Slim Hole)
D - Rotor (Crest-to-Crest) O.D.:	52,6 mm ⇔ 2,07 inches
F - Rotor Major Diameter:	62,0 mm ⇔ 2,44 inches
E - Rotor Head:	1.3/8" for 1" rod ⇔ Threads API spec 11B
G - Rotor Length:	2060 mm ⇔ 6,76 ft
Min. Casing Size:	5-1/2" 20.00 lb/r EU ⇔ 2-5/8" 13.00 lb/r or 5-1/2" 20.00 lb/r NI
Min. Tubing Size:	2,78 inches
API Tubing Drift:	59,61 mm
Warning: Requires first tubing (or tubing extension) size min. = 95,20 mm	
175	57,75

TABLA DE CATÁLOGO DE BOMBAS PCP

**Paso 4:**

Calcular el torque total con la ecuación 3:

$$T_t = T_h + T_o + T_r \text{ ----- ec.3}$$

Torque hidráulico:

$$T_h = \delta [m^3/d \text{ rpm}] \Delta P$$

$$T_h = 0.330 [m^3/d \text{ rpm}] * 20.85 \text{ Kg/cm}^2 * (7121/656.7) = 74.61 \text{ [N.m]}$$

Torque de fricción:

De la gráfica A-5, la cual nos muestra la curva de comportamiento de la bomba seleccionada del catálogo, obtenemos que:

$$T_o = 20 \text{ [N.m]}$$

Torque resistivo:

$$T_r = H_c * \text{coef. fric} * \mu$$

El coeficiente de fricción se obtiene de la tabla B-1, el cual para una TP de 3 1/2" y varillas de 7/8" = 0.00017

Sustituyendo valores en la ecuación de torque resistivo:

$$T_r = 495 * 0.00017 * 5.128 = 0.4315 \text{ [N.m]}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 3, obtenemos el torque total:

$$T_t = 74.61 [N.m] + 20 [N.m] + 0.4315 [N.m] = 95.04 \text{ [N.m]}$$

**Paso 5:**

Calcular la potencia requerida, dicha potencia es la que se tiene en la varilla pulida:

$$P_r = (T_r * N) / 7121 \text{ [HP]}$$

$$P_r = (95.04 * 175) / 7121 = 2.34 \text{ [HP]}$$

**Paso 6:**

Calcular la elongación causada por las varillas de succión:

Sabemos que para varillas de 7/8" = 0.875 \* 2.54 cm = 2.22 cm ≈ 22.2 mm

Del catálogo conocemos que:

$$D = 52.6 \text{ mm} \approx 5.26 \text{ cm}$$

$$H = 350 \text{ mm} \approx 35 \text{ cm}$$

$$L = 1660 \text{ mm} \approx 166 \text{ cm}$$

⇒ Calcular el área equivalente

$$A_o = \frac{\pi * D^2}{4} - A_R$$



$$A_R = \frac{\pi * d_r^2}{4} = \frac{3.1416 * (2.22\text{cm})^2}{4} = 3.87\text{cm}^2$$

$$\therefore A_e = \frac{3.1416 * (5.26\text{cm})^2}{4} - 3.87\text{cm}^2 = 17.86\text{cm}^2$$

⇒ Calcular la fuerza que actúa sobre las varillas

$$F = \Delta P * A_e$$

$$F = 20.84 \text{ Kg/cm}^2 * 17.86 \text{ cm}^2 = 372.38 \text{ Kg}$$

⇒ Calcular la tensión que actúa sobre el área de las varillas

$$\sigma = \frac{F}{A_R} = \frac{372.38\text{Kg}}{3.87\text{cm}^2} = 96.22\text{kgf/cm}^2$$

⇒ Calcular la elongación total

Conocemos que el módulo de YOUNG del acero es:

$$E = 2100000 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\Delta L = \frac{\sigma * L}{E}$$

$$\therefore \Delta L = \frac{96.22\text{Kg/cm}^2 * (495\text{m} * 100)}{2100000\text{Kg/cm}^2} = 2.27\text{cm}$$

⇒ Finalmente calcular el espacio que debe existir entre el niple de paro y el rotor

$$\Delta L + H$$

$$2.27 \text{ cm} + 35 \text{ cm} = \underline{37.27 \text{ cm}}$$

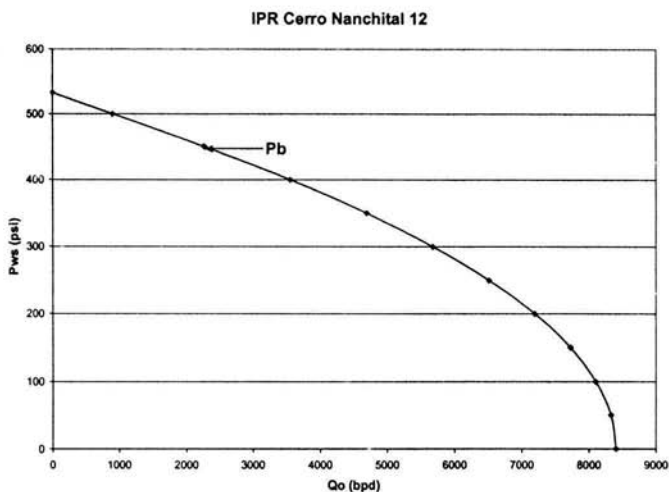
### Pozo Cerro Nanchital No. 12

Datos del Pozo:

Profundidad de colocación de la bomba:	460 m
Gasto actual:	87 m <sup>3</sup> /d ≈ 550 bpd
Temperatura de fondo:	45 °C
μ=	5.128 cp
T.R=	9 5/8"
T.P=	2 3/8"
Pws=	37.5 Kg/cm <sup>2</sup>
Pb=	31.6 Kg/cm <sup>2</sup>
G= 0.841 gr/cm <sup>3</sup> * 1000= 841 Kg/m <sup>3</sup> ----	36.70 °API
Sb=	216 m
Intervalo disparado:	441-460 m
Profundidad interior:	479 m
Presión en la línea de flujo:	1.5 Kg/cm <sup>2</sup>

**Paso 1:**

Con los datos del yacimiento calculamos la IPR del pozo:

**Paso 2:**

Calcular la presión diferencial a través de la bomba con la ecuación 1:

$$\Delta P = [(H_c - S_b)G + P_f + F_I] \text{ ----- ec.1}$$

Para una TP de 4" y sarta de varillas de succión de 1", calcular la pérdida de presión del fluido por fricción con la ecuación 2:

$$P_f = f(H_c)(\mu) \text{ ----- ec.2}$$

De la gráfica A-2 obtenemos que el factor f es:

$$f = 0.0000195 \text{ [(Kg/cm}^2\text{)}/\text{m}/\text{cp}]$$

sustituyendo el factor f en la ecuación 2, obtenemos:

$$P_f = 0.0000195 \text{ [(Kg/cm}^2\text{)}/\text{m}/\text{cp}] * 460\text{m} * 5.128\text{cp} = 0.045998 \text{ Kg/cm}^2$$

Ahora sustituyendo valores en la ecuación 1, obtenemos:

$$\Delta P = \frac{(460\text{m} - 216\text{m}) * 841\text{Kg/m}^3}{10000} + 0.045998\text{Kg/cm}^2 + 1.5\text{Kg/cm}^2 = 22.066\text{Kg/cm}^2$$

$\therefore \Delta P = 22.066 \text{ Kg/cm}^2$

**Paso 3:**

Se selecciona el tipo de bomba con los siguientes datos:

Q actual= 87 m<sup>3</sup>/d ≈ 550 bpd

ΔP= 22.066 Kgf/cm<sup>2</sup>

TP= 4"

Bomba seleccionada del catálogo:  
con velocidad:

NTZ 400\*060 DT 66  
N= 150 rpm

NTZ 400*060 DT 66		NTZ 400*060 DT 66	
Pump Geometry:	Multilobe	Stator Length:	2685 mm
Type:	Tubular	R - Distance Stator End to Stop Pin:	350 mm
Displacement:	0,660 [m <sup>3</sup> /d]/[rpm]	⇒	66,0 [m <sup>3</sup> /d]/[100 rpm]
Max. Differential Pressure:	60 kgf/cm <sup>2</sup>	⇒	900 psi
B - Stator Housing O.D.:	109,00 mm	⇒	4,00" EUE or 4,00" API spec 68ASCT
G - Stator Coupling O.D.:	127,0 mm EU	⇒	120,6 mm NPS 5/8" Pipe
D - Rotor (Crest-to-Crest) O.D.:	57,0 mm	⇒	2,24 inches
F - Rotor Major Diameter:	68,0 mm	⇒	2,68 inches
E - Rotor Head:	1.3/8" for 1" rod	⇒	Threads API spec 11B
G - Rotor Length:	3085 mm	⇒	10,12 ft
Min. Casing Size:	6.5/8" 32.00 lbs EU	⇒	5.00" 20.00 lbs NU
Min. Tubing Size:	2.7/8 inches	Warning: Requires first tubing (or tubing extension) size min. = 108,00 mm	
API Tubing Drift:	39,51 mm		
	150		99,00

TABLA DE CATALOGO DE BOMBAS PCP

#### Paso 4:

Calcular el torque total con la ecuación 3:

$$T_t = T_h + T_o + T_r \text{ ----- ec.3}$$

Torque hidráulico:

$$T_h = \delta [m^3/d \text{ rpm}] \Delta P$$

$$T_h = 0.660 [m^3/d \text{ rpm}] * 22.066 \text{ Kgf/cm}^2 * (7121/656.7) = 157.92 \text{ [N.m]}$$

Torque de fricción:

De la gráfica A-6, la cual nos muestra la curva de comportamiento de la bomba seleccionada del catálogo, obtenemos que:

$$T_o = 40 \text{ [N.m]}$$

Torque resistivo:

$$T_r = H_c * \text{coef. fric} * \mu$$

El coeficiente de fricción se obtiene de la tabla B-1, el cual para una TP de 4" y varillas de 1" = 0.00008

Sustituyendo valores en la ecuación de torque resistivo:

$$Tr = 460 * 0.00008 * 5.128 = 0.189 \text{ [N.m]}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 3, obtenemos el torque total:

$$Tt = 157.92 \text{ [N.m]} + 40 \text{ [N.m]} + 0.189 \text{ [N.m]} = 198.11 \text{ [N.m]}$$

**Paso 5:**

Calcular la potencia requerida, dicha potencia es la que se tiene en la varilla pulida:

$$Pr = (Tr * N) / 7121 \text{ [HP]}$$

$$Pr = (198.11 * 150) / 7121 = 4.17 \text{ [HP]}$$

**Paso 6:**

Calcular la elongación causada por las varillas de succión:

Sabemos que para varillas de 1" = 1 \* 2.54 cm = 2.54 cm ≈ 25.4 mm

Del catálogo conocemos que:

$$D = 57 \text{ mm} \approx 5.7 \text{ cm}$$

$$H = 350 \text{ mm} \approx 35 \text{ cm}$$

$$L = 2685 \text{ mm} \approx 268.5 \text{ cm}$$

⇒ Calcular el área equivalente

$$A_e = \frac{\pi * D^2}{4} - A_R$$

$$A_R = \frac{\pi * d_r^2}{4} = \frac{3.1416 * (2.54 \text{ cm})^2}{4} = 5.07 \text{ cm}^2$$

$$\therefore A_e = \frac{3.1416 * (5.7 \text{ cm})^2}{4} - 5.07 \text{ cm}^2 = 20.45 \text{ cm}^2$$

⇒ Calcular la fuerza que actúa sobre las varillas

$$F = \Delta P * A_e$$

$$F = 22.07 \text{ Kg/cm}^2 * 20.45 \text{ cm}^2 = 451.33 \text{ Kg}$$

⇒ Calcular la tensión que actúa sobre el área de las varillas

$$\sigma = \frac{F}{A_R} = \frac{451.33 \text{ Kg}}{5.07 \text{ cm}^2} = 89.02 \text{ kgf / cm}^2$$

⇒ Calcular la elongación total

Conocemos que el módulo de YOUNG del acero es:

$$E = 2100000 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\Delta L = \frac{\sigma * L}{E}$$

$$\therefore \Delta L = \frac{89.02 \text{Kgf/cm}^2 * (460 \text{m} * 100)}{2100000 \text{Kgf/cm}^2} = 1.95 \text{cm}$$

⇒ Finalmente calcular el espacio que debe existir entre el niple de paro y el rotor

$\Delta L + H$

$$1.95 \text{ cm} + 35 \text{ cm} = \underline{36.95 \text{ cm}}$$

### III.3 Análisis Técnico del Sistema de Bombeo Mecánico.

El análisis técnico que se realizará para el sistema artificial de bombeo mecánico en el campo Cerro Nanchital será únicamente para los pozos con terminación vertical, los cuales son el 8, 9 y 12, dicho análisis se apoyara con el método API considerando para su estudio el equipo subsuperficial y el equipo superficial tomando en consideración 4 tipos de unidades, las cuales son: unidad Convencional, Mark II, RM y Aerobalanceada.

Se tomará para este análisis el calculo de las curvas IPR efectuadas en el análisis del sistema de bombeo por cavidades progresivas.

#### Pozo Cerro Nanchital No. 8

Datos característicos del pozo:

Profundidad de colocación de la bomba:	1443 pies ≈ 440 m
Nivel de fluidos:	800 pies ≈ 244 m
Diámetro de la bomba:	2.75 pg
Longitud de carrera:	120 pg
Combinación de sarta de varillas:	76
Presión en la línea de flujo:	21.33 psi
Velocidad de bombeo:	10 emp
Gasto bruto deseado:	800 bpd
Tubería de producción:	3 ½ pg

Como resultado de dicho análisis se obtuvieron los siguientes resultados:

#### Input Data

Customers Name ...: Proyecto Final	(25 characters max.)
Well I.D. ....: C.N. 8	(10 characters max.)
Pump depth .....	1443 (ft)
Fluid level (from surface).....:	800 (ft)
Pump size .....	2.75 (in)
Stroke length .....	120 (in)
Rod size .....	76
Specific gravity .....	1.01

Tubing (0-Anch/Size if unanch)....:	0
Flowline pressure .....	21.33 (psi)
Pumping speed/Production .....	10 (spm / bpd)

### OUTPUT

Pumping Unit Loading	Conv	Mark II	RM	Air Bal
Torque (in-lbs) .....	130560	160688	88868	124685
PPRL (lbs) .....	6691	6074	6327	6402
MPRL (lbs) .....	1343	487	726	1054
CBE (lbs) .....	3884	3475	3884	3952
Pumping Speed (spm) .....	10	10	10	10
PRHP (hp) .....	7.5	9.8	9.9	7.5

#### Production

BPD @ 100% .....	1042	1042	1042	1042
BPD @ 80% .....	834	834	834	834

#### Prime Mover HP Requirements

S.S. Eng./Nema 'D' Mtr .....	15.8	12.6	15.8	15.8
M.C. Eng./Nema 'C' Mtr .....	19.7	15.7	19.7	19.7

#### Sucker Rod Information

	Conv	Mark II	RM	Air Bal
Max. Rod Stress (psi) .....	11127	10101	10522	10647
Min. Rod Stress (psi) .....	2233	810	1208	1753
Grade 'C' Loading (%) .....	41.3	42	42.4	40.9
7/8 in. Rod Section (ft) .....	821	821	821	821
3/4 in. Rod Section (ft) .....	622	622	622	622

Con base a los resultados obtenidos se selecciono como equipo superficial una unidad convencional con las siguientes características **C-228D-213-120** y como equipo subsuperficial una combinación de varillas de succión 76 de grado C, una bomba de tubería de 2 ¾" de diámetro del émbolo para TP de 3 ½" y un motor eléctrico de 20 HP, esta selección se determinó debido a que se cumple con los requerimientos técnicos del pozo en estudio.

### Pozo Cerro Nanchital No.9

#### Datos característicos del pozo:

Profundidad de colocación de la bomba:	1460	pies ≈ 445 m
Nivel de fluidos:	750	pies ≈ 229 m
Diámetro de la bomba:	2.25	pg
Longitud de carrera:	120	pg
Combinación de sarta de varillas:	76	
Presión en la línea de flujo:	21.33	psi
Velocidad de bombeo:	7	emp

Gasto bruto deseado: 360 bpd  
 Tubería de producción: 2 7/8 pg

Como resultado de dicho análisis se obtuvieron los siguientes resultados:

Input Data

Customers Name ...: Proyecto Final (25 characters max.)  
 Well I.D. ....: C.N. 9 (10 characters max.)  
 Pump depth .....: 1460 (ft)  
 Fluid level (from surface).....: 750 (ft)  
 Pump size .....: 2.25 (in)  
 Stroke length .....: 120 (in)  
 Rod size .....: 76  
 Specific gravity .....: 1.01  
 Tubing (0-Anch/Size if unanch)....: 0  
 Flowline pressure .....: 21.33 (psi)  
 Pumping speed/Production .....: 7 (spm / bpd)

OUTPUT

	Conv	Mark II	RM	Air Bal
Pumping Unit Loading				
Torque (in-lbs) .....	93167	141729	67551	88974
PPRL (lbs) .....	5162	4724	4836	4973
MPRL (lbs) .....	1863	1340	1422	1674
CBE (lbs) .....	3404	3327	3404	3523
Pumping Speed (spm) .....	7	7	7	7
PRHP (hp) .....	3.3	4.7	4.9	3.3
Production\par				
BPD @ 100% .....	492	491	491	492
BPD @ 80% .....	394	393	393	394
Prime Mover HP Requirements				
S.S. Eng./Nema 'D' Mtr .....	7	5.6	7	7
M.C. Eng./Nema 'C' Mtr .....	8.7	7	8.7	8.7
Sucker Rod Information				
Max. Rod Stress (psi) .....	8584	7856	8043	8271
Min. Rod Stress (psi) .....	3098	2228	2365	2784
Grade 'C' Loading (%) .....	25.9	26.1	26.4	25.8
7/8 in. Rod Section (ft) .....	686	686	686	686
3/4 in. Rod Section (ft) .....	774	774	774	774

Con base a los resultados mostrados en la tabla anterior se selecciono como equipo superficial una unidad de bombeo mecánico convencional con las siguientes características **C-228D-213-120** y como equipo subsuperficial una combinación de

varillas de succión 76 de grado C, una bomba de tubería de 2 ¼" de diámetro del émbolo para TP de 2 7/8" y un motor eléctrico que cumpla con el requerimiento de 7 HP, esta selección se determinó debido a que se cumple con los requerimientos técnicos del pozo en estudio.

### Pozo Cerro Nanchital No.12

Datos característicos del pozo:

Profundidad de colocación de la bomba:	1410 pies ≈ 430 m
Nivel de fluidos:	800 pies ≈ 244 m
Diámetro de la bomba:	2.75 pg
Longitud de carrera:	120 pg
Combinación de sarta de varillas:	76
Presión en la línea de flujo:	21.33 psi
Velocidad de bombeo:	8 emp
Gasto bruto deseado:	550 bpd
Tubería de producción:	3 ½ pg

Como resultado de dicho estudio se obtuvo lo siguiente:

#### Input Data

Customers Name ...: Proyecto Final	(25 characters max.)
Well I.D. ....: C.N. 12	(10 characters max.)
Pump depth .....	1410 (ft)
Fluid level (from surface).....:	800 (ft)
Pump size .....	2.75 (in)
Stroke length .....	120 (in)
Rod size .....	76
Specific gravity .....	1.01
Tubing (0-Anch/Size if unanch)....:	0
Flowline pressure .....	21.33 (psi)
Pumping speed/Production .....	8 (spm / bpd)

#### OUTPUT

Pumping Unit Loading	Conv	Mark II	RM	Air Bal
Torque (in-lbs) .....	116925	163219	82872	111664
PPRL (lbs) .....	6228	5670	5861	6000
MPRL (lbs) .....	1654	1059	1142	1426
CBE (lbs) .....	3824	3637	3824	3936
Pumping Speed (spm) .....	8	8	8	8
PRHP (hp) .....	5.6	7.4	7.5	5.6
Production\par				
BPD @ 100% .....	834	833	833	834
BPD @ 80% .....	667	666	667	667



**Prime Mover HP Requirements**

S.S. Eng./Nema 'D' Mtr .....	12.7	10.1	12.6	12.7
M.C. Eng./Nema 'C' Mtr .....	15.7	12.6	15.7	15.7

Sucker Rod Information	Conv	Mark II	RM	Air Bal
Max. Rod Stress (psi) .....	10356	9430	9747	9978
Min. Rod Stress (psi) .....	2750	1762	1899	2371
Grade 'C' Loading (%) .....	35.7	35.3	36.2	35.4
7/8 in. Rod Section (ft) .....	803	803	803	803
3/4 in. Rod Section (ft) .....	607	607	607	607

En función a los resultados obtenidos se selecciono como equipo superficial una unidad de bombeo mecánico convencional con las siguientes características **C-228D-213-120** y como equipo subsuperficial una combinación de varillas de succión 76 de grado C, una bomba de tubería de 2 3/4" de diámetro de émbolo para TP de 3 1/2" y un motor eléctrico de 20 HP.

**III.4 Análisis Técnico del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo.**

El único pozo que se estudiará para este tipo de sistema artificial es el pozo Cerro Nanchital No.6H, esto debido a la configuración mecánica, la geometría que caracteriza al pozo (terminación horizontal) y al volumen de producción que aporta diariamente (2150 bpd).

Datos característicos del yacimiento y pozo:

$$P_{ws} \approx P_r = 568.80 \text{ psi} \approx 40 \text{ Kg/cm}^2$$

$$RGA = 117.81 \text{ pie}^3/\text{bl} \approx 21 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$T_{wb} = 109.4 \text{ }^\circ\text{F} \approx 43 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Profundidad media de los disparos (tubería ranurada de 5")} = 2,644 \text{ pies} \approx 806 \text{ m}$$

$$\text{Profundidad de colocación de la bomba} = 1640 \text{ pies} \approx 500 \text{ m}$$

$$P_{th} = 73.94 \text{ psi} \approx 5.20 \text{ Kg/cm}^2$$

$$T_{sup} = 86 \text{ }^\circ\text{F} \approx 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Ø casing} = 7 \text{ pg @ } 0 - 2112 \text{ pies} \approx 0 - 644 \text{ m}$$

$$\text{Ø linner} = 5 \text{ pg @ } 1948.3 - 2965.1 \text{ pies} \approx 594 - 904 \text{ m}$$

Datos de producción:

$$Q_o = 2145 \text{ bpd}$$

$$P_{wf} = 484.76 \text{ psi}$$

$$WC = 6.0\%$$

Características del fluido y análisis PVT:

$$^\circ \text{ API} = 36.6$$

$\mu_o = 5.128 \text{ cp @ } 45^\circ\text{C} \approx 113^\circ\text{F}$   
 $B_o = 1.108 \text{ por Standing}$   
 $P_b = 449.35 \text{ psi} \approx 31.6 \text{ Kg/cm}^2$

**PASO 1:**

Análisis y dimensionamiento de la curva IPR del pozo en cuestión.

$$J = \frac{Q_o}{P_r - P_{wf}} = \frac{2145(\text{bpd})}{(568.80 - 484.76)\text{psi}} = 25.52 \frac{\text{bpd}}{\text{psi}}$$

$$Q_b = J(P_r - P_b) = 25.52 \frac{\text{bpd}}{\text{psi}} * (568.80 - 449.35)\text{psi} = 3048.79(\text{bpd})$$

$$Q_{\text{max}}(\text{vogel modificado}) = \frac{J * P_b}{(2 + b)} + Q_b \quad \text{Por Fetkovich } b=0$$

$$Q_{\text{max}} = \frac{25.52 \left( \frac{\text{bpd}}{\text{psi}} \right) * 449.35(\text{psi})}{(2 + 0)} + 3048.79(\text{bpd}) = 8783.30(\text{bpd})$$

a)  $Q_o$  desde  $P_r$  hasta  $P_{wf}=P_b$

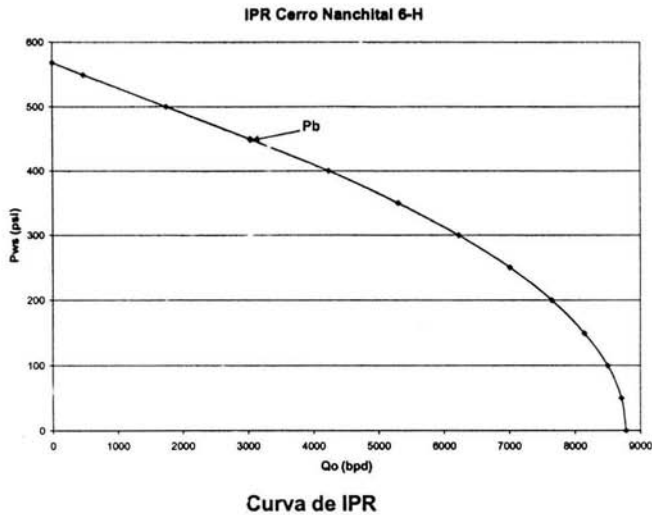
$$Q_o = J (P_r - P_{wf})$$

b)  $Q_o$  desde  $P_{wf} < P_b$  hasta  $P_{wf} = 0$  (psi)

$$Q_o = \left[ 1 - \left( \frac{P_{wf}}{P_b} \right)^2 * (Q_{\text{max}} - Q_b) \right] + Q_b$$

Pws (psi)	Qo (bpd)
568,8	0
550	480
500	1756
450	3032
449,35	3048
400	4239
350	5304
300	6227
250	7008
200	7647
150	8144
100	8499
50	8712
0	8783

**Análisis de la curva IPR**



**PASO 2:**

Calculo de la profundidad de colocación de la bomba ( $L_p$ ).

Para asegurar flujo monofásico en la succión de la bomba, se considera en este caso que la presión de succión ( $P_{IP}$ ) es igual a  $P_b + 300$  (psi) ,  $P_{IP} = (449.35+300)$  (psi)= 749.35 (psi).

De un balance de energía tenemos:

$$P_{IP} = P_{wf} - \Delta P_e - \Delta P_f \quad \text{----- Ec.1}$$

$$\Delta P_e = 0.433 \gamma_o \Delta H$$

$$\Delta P_f = \frac{\gamma_o \Delta H Q_o^{1.85}}{1075.48 * 1000 * d^{4.8655}}$$

$$P_{wf} = P_r - \frac{Q_o}{J}$$

$L_p$ = Profundidad media de la zona disparada -  $\Delta H$

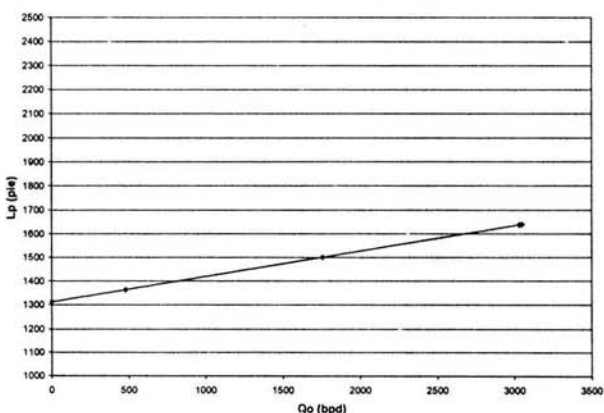
El valor de  $\Delta H$  es aquel que para un  $Q_o$  y  $P_{wf}$  correspondiente se cumple con la ecuación 1.

$$749.35(\text{psi}) = \frac{P_r - Q_o}{J} - 0.433\gamma_o\Delta H - \frac{\gamma_o\Delta H Q_o^{1.85}}{1075.48 * 1000 * d^{4.8655}}$$

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos para determinar Lp.

Pwf (psi)	Qo (bpd)	ΔH (pie)	ΔPe (psi)	ΔPf (psi)	P ent bomba (psi)	Lp (pie)
568,8	0	328	119,45	0,00	449,35	2316
550	480	276	100,65	0,00	449,34	1364
500	1756	139	50,67	0,02	449,32	1501
450	3032	2	0,65	0,00	449,35	1638
449,35	3048	0	0,00	0,00	449,35	1640

Profundidad mínima de colocación de la Bomba



### PASO 3:

Calculo de las curvas OPR.

Las curvas de OPR se determinaron tomando en cuenta la geometría del pozo y Lp, por lo que se consideraron cuatro posibles combinaciones de aparejos de producción:

- 4 ½ pg
- 4 pg
- 3 ½ pg
- 2 7/8 pg

$$P_{\text{descarga}} = P_{\text{th}} + \Delta P_e + \Delta P_f$$

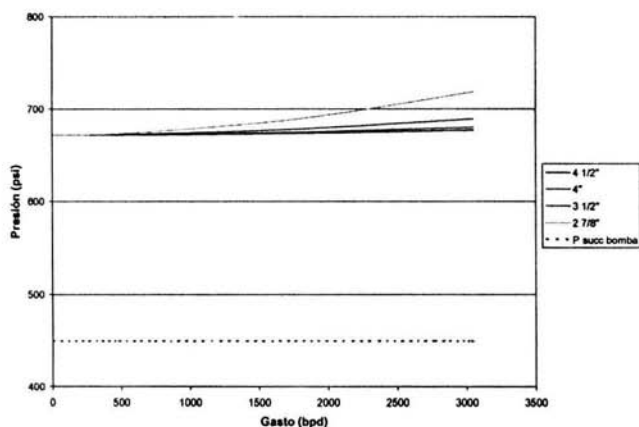
$$\Delta P_e = 0.433 \gamma_o L_p$$

$$\Delta P_f = \frac{\gamma_o L_p Q_o^{1.85}}{1075.48 * 1000 * d^{4.8655}}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de las posibles combinaciones de aparejos de producción.

Lp (pie)	Q <sub>max</sub> (tpd)	D <sub>p</sub> (in)	TR 7"				OPR			
			OP 4 1/2"	OP 4"	OP 3 1/2"	OP 2 7/8"	OP Total 4 1/2"	OP Total 4"	OP Total 3 1/2"	OP Total 2 7/8"
1312	0	588	0	0	0	0	672	672	672	672
1364	480	588	0	0	1	2	672	672	672	673
1501	1756	588	2	3	6	17	674	675	678	689
1638	3032	588	5	8	17	46	677	680	689	718
1640	3048	588	5	8	17	47	677	680	689	718

OPR



#### PASO 4:

Calculo de la potencia superficial requerida.

$$HP_{sup} = \frac{HP_h}{Eff_{sist}}$$

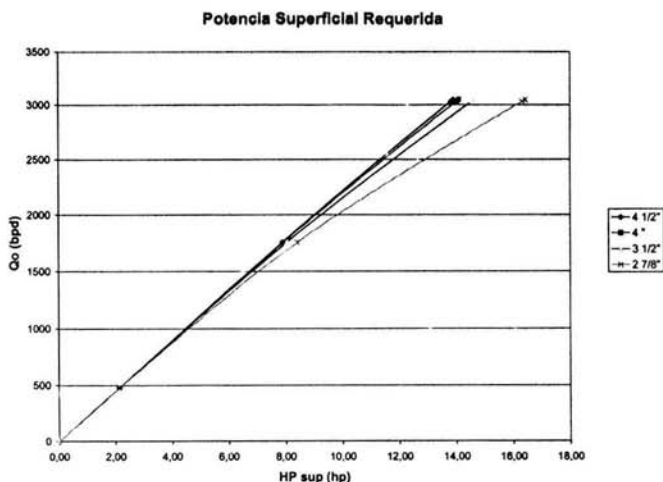
$$HP_h = Q_o B_o \Delta P_p$$

$$\Delta P_p = P_{desc} - P_{IP}$$

$$Eff_{SIST} = Eff_{motor} * Eff_{bomba} * Eff_{cable} = 0.85 \times 0.6 \times 0.8 = 0.408$$

En la tabla que se muestra a continuación se presentan los resultados de los HP requeridos para las posibles combinaciones de aparejos de producción:

Lp (pie)	Q <sub>max</sub> (tpd)	HP <sub>h</sub> (hp)				HP <sub>sup</sub> = HP <sub>h</sub> / Eff <sub>Sist</sub> (hp)			
		4 1/2"	4"	3 1/2"	2 7/8"	4 1/2"	4"	3 1/2"	2 7/8"
1312	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1364	480	0,87	0,87	0,87	0,88	2,14	2,14	2,14	2,15
1501	1756	3,22	3,24	3,28	3,43	7,89	7,93	8,05	8,42
1638	3032	5,64	5,72	5,94	6,66	13,83	14,02	14,55	16,32
1640	3048	5,67	5,75	5,98	6,70	13,91	14,10	14,65	16,43



**PASO 5:**

Calculo del análisis económico.

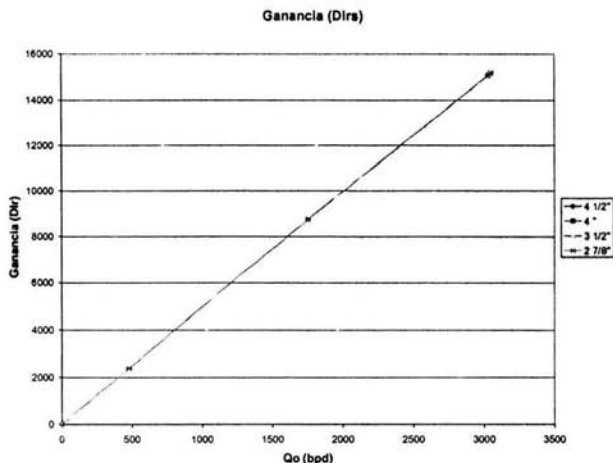
Considerando los siguientes valores:

- $S_o = 12 \text{ \$/bl}$  (costo del aceite por barril)
- $C_o = 7 \text{ \$/bl}$  (costo de operación por barril)
- $C_{hp} = 5 \text{ \$/hp/día}$  (costo de potencia por día)

$$P = S_o Q_o - C_o Q_o - C_{hp} HP_{sup}$$

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

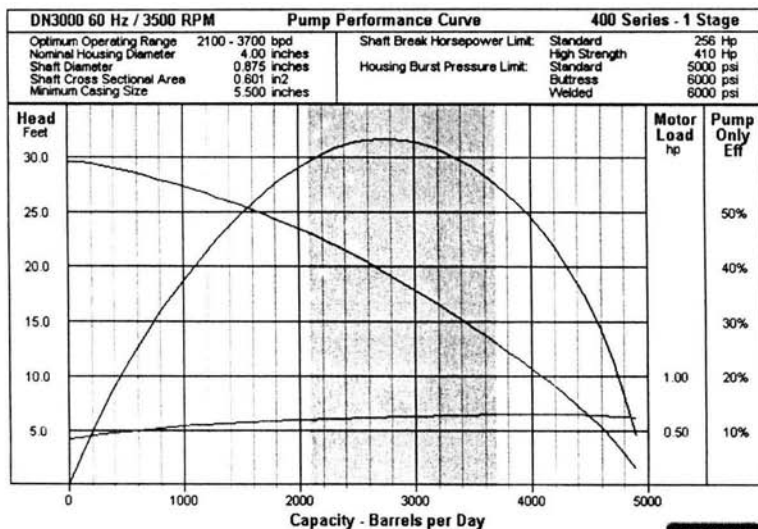
Lp (pie)	Qo (bpd)	(Ganancia) P (\$)			
		4 1/2"	4"	3 1/2"	2 7/8"
1312	0	0	0	0	0
1364	480	2388	2388	2388	2388
1501	1756	8739	8739	8739	8737
1638	3032	15090	15089	15086	15077
1640	3048	15172	15171	15169	15160



**PASO 6:**

Selección del equipo subsuperficial.

Del catálogo de la compañía REDA, se selecciona la bomba DN3000 para producir un  $Q_o = 3032$  (bpd) con una  $\Delta P = 269$  (psi).



$$H_{\text{bomba}} = 18 \frac{\text{pie}}{\text{stg}} \quad (\text{de la curva característica})$$

$$\text{No. etapas} = \frac{\Delta P}{0.433 * \gamma_o * H_{\text{bomba}}}$$

$$\text{No. etapas} = \frac{269}{0.433 * 0.842 * 18} = 40.99 \text{ stg}$$

Con base al número de etapas se selecciona 1 Housing de 50 stg

De la curva característica de la bomba DN3000 se tiene que el HP requerido por la bomba es de 0.65 (hp)/stg

$$HP_b = \text{No. Etapas} * HP_{\text{bomba}} = 50 \text{ stg} * 0.65 \text{ (hp)/stg} = 32.5 \text{ (hp)}$$

$$HP_{\text{motor}} = HP_b + HP_{\text{protector}} = 32.5 + 3 = 35.5 \text{ (hp)}$$

Debido a que el (HP) del motor requerido es de 35.5 (hp), se selecciona 1 motor en tandem S-456 de 50 (hp)

Datos de placa:

$$HP_{\text{motor}} = 50 \text{ (hp)}$$

$$V = 1335 \text{ volts @ } 60 \text{ Hz}$$

$$I = 22.5 \text{ amp}$$

$$\text{Longitud} = 14.0 \text{ pies}$$

$$\text{Peso} = 654 \text{ Lbs}$$

UT- acero al carbón

$$\text{Eff}_{\text{motor}} = \frac{HP_{\text{requerido}}}{HP_{\text{placa}}} = \frac{35.5}{50} = 0.71 * 100 = 71\%$$

$$I_{\text{motor}} = I * \text{Eff}_{\text{motor}} = 22.5 * 0.71 = 15.98 \text{ amp}$$

$$V_{\text{motor}} = 1335 \text{ volts}$$

$$L_p = 1638 \text{ pies}$$

$$\text{Aparejo de producción} = 2 \frac{7}{8}''$$



## PASO 7:

### Selección del cable

La selección del cable se realiza con base a los requerimientos de corriente y voltaje del motor y se aplicara el criterio de que las pérdidas de voltaje en el cable sean menores de 30 v/1000 (pie), de modo tal, que el voltaje que llegue al motor deberá estar entre el 60 y 80 % del voltaje superficial.

$$C_t = (0.0022 * T) + 0.8517$$

$$C_t = (0.0022 * 109.4) + 0.8517 = 1.09$$

$$\Delta V_{1000 \text{ pies}}^{68^\circ \text{F}} = a * I_{\text{motor}}$$

$$\Delta V_{\text{total}} = C_t * \left( \frac{L_c}{1000} \right) * \Delta V_{1000 \text{ pies}}^{68^\circ \text{F}}$$

El valor del factor "a" que nos representa la resistividad en función del tamaño del cable es obtenido de la tabla B-2 y el factor "b" que nos indica el aislamiento del material en función del tamaño del cable se obtiene de la tabla B-3, estas tablas son presentadas en el Anexo B; realizado los cálculos necesarios, el resultado para la selección del tamaño y tipo de cable se presentan en las 2 tablas siguientes:

Calibre cable	a	$\Delta/1000 \text{ pie y } 68^\circ \text{F (v)}$	$\Delta/\text{ft del (v)}$	V <sub>sup</sub> (v)	$\Delta b/V_{\text{brnt}}^*$	V <sub>que llega al motor en el arranque</sub>	V <sub>del motor en el arranque</sub>
#6	0.6818	109	19.452	1354.452	0.015	1257.190225	0.941715524
#4	0.4545	7.3	12.967	1347.967	0.010	1049.718415	0.786306929
#2	0.2708	43	7.726	1342.726	0.006	1304.096208	0.976850343
#1	0.2150	34	6.134	1341.134	0.005	1310.46333	0.981620472

\* para seleccionar el cable, este valor si es mayor del 80% rompa la flecha, si es menor del 60% no arranque el motor

\*\* para seleccionar el cable, este valor debe estar entre el 5 y 10%

Se selecciona el cable de calibre #4			
Tipo de cable	b	T <sub>c</sub> (°F)	T max oper(°F) (de tablas)
Redalene POTB	0,0176	114	205
Redalene PPEO*	0,0112	112	
Redahot ETKO	0,0169	114	220
Redahot ETBO	0,0117	112	
Redablack EEE	0,0167	114	300
Redablack EER	0,0115	112	
Redalead ELB	0,0169	114	400
Redalead ELBE	0,0116	112	

\* cable a seleccionar

El cable seleccionado es:

Redalene #4 (redondo) de la descarga de la bomba hasta la superficie.

**PASO 8:**

Calculo del voltaje requerido en superficie para seleccionar la capacidad de transformador a utilizar.

$$V_{sup} = V_{motor} + \Delta V_{total} = 1335 + 12.967 = 1347.97 \text{ volts}$$

Selección del transformador a utilizar:

$$KVA = 3^{0.333} * I_{motor} * \frac{V_{sup}}{1000} = 3^{0.333} * 22.5 \text{ amp} * \frac{1347.97 \text{ volts}}{1000} = 43.73 \text{ kva}$$

De catálogo de REDA se selecciona un transformador primario 67 Kva.

En resumen el equipo a seleccionar con base al diseño que se realizó y que cumple con los requerimientos necesarios del pozo en estudio son:

- |  |   |
|--|---|
| ✘ Aparejo de producción:                 | 2 7/8"  |
| ✘ Profundidad de colocación de la bomba: | 1638 pies ≈ 500 m   |
| ✘ Incremento de producción:              | 887 bpd   |
| ✘ Bomba (50 etapas):                     | DN3000, Serie 400   |
| ✘ Motor:                                 | 1 en tandem, S-456, 50 (hp)<br>1335 volts, 22.5 amp             |
| ✘ Cable:                                 | Redalene #4 (Redondo)   |
| ✘ Transformador:                         | Powell-Esco – Transformer<br>Marca REDA<br>No. de serie 1037134 |

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN SELECCIONADOS

El análisis que se realiza a continuación tiene el propósito de obtener el periodo de cancelación de los tres sistemas artificiales de producción examinados en el capítulo anterior, basándose para ello un horizonte de estudio de 6 meses.

En el Anexo C se observan las tablas C-1 y C-2, las cuales, muestran los precios de los equipos y accesorios del sistema de Bombeo Mecánico y el Bombeo por Cavidades Progresivas así como el precio de los equipos y accesorios para el sistema de Bombeo Electrocentrífugo respectivamente, dichos precios se contemplan para la cotización de los sistemas artificiales de producción ya analizados, considerando también los costos estimados por parte de Terminación y Reparación de Pozos, los cuales son: el costo por intervención del equipo de reparación y terminación de pozos de \$126,315.79 c/u; costo por instalación de los equipos de \$5,000.00 c/u y el costo del aparejo de \$1.41/pie.

#### IV.1 Análisis Económico del Sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos del análisis económico al implantar el sistema de bombeo por cavidades progresivas y de las cuales se observa un periodo de cancelación de 16 días, esto únicamente para los pozos Cerro Nanchital 8, 9 y 12 los cuales tienen terminación vertical.

Unidad POP	Producción Bruta (BPD)	Costo de Adquisición (USD)		Aparejo (USD)	Interv. TRP (USD)	Instalación (USD)
		Equipo Superficial	Equipo Subsuperficial			
NIT450*065 ST 78						
NIT350*030 DT 33	1845	42000	7264	6660,84	378947,37	15000
NIT400*060 DT 66						

Costo inicial (USD)	Ritmo de prod. Inicial (BPD)	Deducción anual (%anual)	Precio Neto del Crudo (USD)	Costo del capital (%anual)
514872,21	1845	0,25	18	12

INDICADOR	n=1 mes	n=2 meses	n=3 meses	n=4 meses	n=5 meses	n=6 meses
Ganancia Bruta, dólares	148603,41	847361,94	1512721,34	2154831,76	2782060,45	3402046,90
Razón beneficio/costo	1,291	2,646	3,938	5,185	6,403	7,608
Tasa de rendimiento, %anual	3,308	5,981	5,603	5,052	4,584	4,178
Tasa de ganancia, %anual	0,035	0,197	0,353	0,502	0,648	0,793
Tasa interna de retorno, %anual	23,255	23,255	23,255	23,255	23,255	23,255
Tiempo de cancelación, años	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043

TIEMPO DE CANCELACION:	16 (días)
------------------------	-----------

## IV.2 Análisis Económico del Sistema de Bombeo Mecánico.

En este sistema se analizan económicamente la utilización de 2 tipos de unidades de bombeo mecánico, una unidad convencional y una unidad Mark II mejorada (RM), esto debido a que las 2 unidades son técnicamente factibles de ser utilizadas en el campo ya que cumplen con los requerimientos operacionales de los pozos con terminación vertical.

El resultado del análisis que se observa en las siguientes tablas, obtiene un periodo de cancelación prácticamente el mismo al utilizar cualquiera de las dos unidades superficiales, el cual, es de 18 días.

Unidad de BM	Producción Bruta (BPD)	Costo de Adquisición (USD)		Aparejo (USD)	Interv. TRP (USD)	Instalación (USD)
		Equipo Superficial	Equipo Subsuperficial			
C-228D-213-120	1895	188410,83	25184	6151	378947,37	15000
RM-228D-213-120	1895	201599,59	25184	6151	378947,37	15000

Costo inicial (USD)	Ritmo de prod. Inicial (BPD)	Declinación anual (%anual)	Precio Neto del Grubo (USD)	Costo del capital (%anual)
613693,2	1895	0,25	18	12
626681,96	1895	0,25	18	12

### PARA UNIDAD DE B.M.C-228D-213-120

INDICADOR	n=1 mes	n=2 meses	n=3 meses	n=4 meses	n=5 meses	n=6 meses
GANANCIA BRUTA, dolares	66789,69	785457,86	1468848,69	2128360,47	2772587,23	3409375,48
Razón beneficio/costo	1,112	2,280	3,393	4,468	5,518	6,566
Tasa de rendimiento, %anual	1,448	5,085	5,007	4,615	4,226	3,881
Tasa de ganancia, %anual	0,013	0,154	0,287	0,416	0,542	0,667
Tasa interna de retorno, %anual	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
Tiempo de cancelación, años	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060

TIEMPO DE CANCELACION:	18 (días)
------------------------	-----------

### PARA UNIDAD DE B.M.RM-228D-213-120

INDICADOR	n=1 mes	n=2 meses	n=3 meses	n=4 meses	n=5 meses	n=6 meses
GANANCIA BRUTA, dolares	55601,13	772269,10	1455659,93	2115171,71	2759398,47	3396186,72
Razón beneficio/costo	1,089	2,232	3,322	4,374	5,402	6,418
Tasa de rendimiento, %anual	1,182	4,957	4,922	4,552	4,175	3,838
Tasa de ganancia, %anual	0,011	0,148	0,279	0,405	0,528	0,650
Tasa interna de retorno, %anual	19,573	19,573	19,573	19,573	19,573	19,573
Tiempo de cancelación, años	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051

TIEMPO DE CANCELACION:	18,57 (días)
------------------------	--------------

### IV.3 Análisis Económico del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo.

Este sistema artificial únicamente se aplicará en el pozo horizontal 6H ya que es el sistema que más se ajusta a sus necesidades y con el que podemos observar en las siguientes tablas un período de cancelación de 8 días por lo que es rentable su aplicación en el pozo.

Unidad BEC	Producción Bruta (BPD)	Costo de Adquisición (USD)		Aparejo (USD)	Interv. TRP (USD)	Instalación (USD)
		Equipo Superficial	Equipo Subsuperficial			
Bomba Serie 400, 50 etapas, DN3000 cable Redclene #4	3032	105021	181126,2	2315	126315,79	5000

Costo inicial (USD)	Ritmo de prod. Inicial (BPD)	Declinación anual (%anual)	Precio Neto del Crudo (USD)	Costo del capital (%anual)
419777,99	3032	0,25	18	12

INDICADOR	n=1 mes	n=2 meses	n=3 meses	n=4 meses	n=5 meses	n=6 meses
Ganancia Bruta, dólares	672194,95	1818863,71	2912269,03	3967537,88	4996270,69	6017131,89
Razón beneficio/costo	2,601	5,333	7,938	10,451	12,907	15,334
Tasa de rendimiento, %anual	12,070	10,204	8,406	7,167	6,268	5,580
Tasa de ganancia, %anual	0,192	0,520	0,833	1,134	1,429	1,720
Tasa interna de retorno, %anual	47,167	47,167	47,167	47,167	47,167	47,167
Tiempo de cancelación, años	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021

TIEMPO DE CANCELACIÓN:	8 (días)
------------------------	----------

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### V.1 Conclusiones.

De acuerdo al análisis comparativo técnico y económico basado en las características del yacimiento y en las condiciones físicas de los pozos del Campo Cerro Nanchital, concluimos que la mejor opción de explotación para los pozos C.N. 8, 9 y 12 es el Sistema Artificial por Bombeo Mecánico y para el pozo C.N. 6H es el Sistema Artificial por Bombeo Electrocentrífugo ya que cumplen con los requerimientos de presión, temperatura, gastos, relación gas aceite, profundidad y geometría de los pozos.

El Sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas, tiene grandes posibilidades de implantarse en los pozos C.N. 8, 9 y 12, ya que el sistema es fácil de instalar, tiene bajos costos de inversión inicial y mostró ser técnicamente aplicable, únicamente queda condicionada dicha aplicación a que se tenga en existencia un material resistente para el estator que soporte concentraciones de sulfhídrico del orden del 10 % mol.

Por otro lado, debido a la mínima infraestructura con la que cuenta el campo, no es factible la utilización del Sistema por Bombeo Neumático ya que no es económicamente rentable aplicarse debido a los altos costos que implicaría la instalación y construcción de una red de inyección de gas que tendría que realizarse en el campo.

El Sistema por Bombeo Hidráulico Tipo Pistón, en este caso es un sistema muy costoso debido a que requiere de una infraestructura tal que pueda contener un gran volumen de fluido de potencia limpio y que además pueda suministrarlo a alta presión al fondo del pozo para así hacer trabajar la bomba en el fondo, además es un sistema muy delicado ya que se compone de partes móviles que se ven seriamente afectadas por la corrosión provocada por el alto contenido de sulfhídrico que se tiene en el gas producido de los pozos.

El Sistema por Bombeo Hidráulico Tipo Jet no es factible de aplicarse por que requiere de instalaciones en superficie que puedan manejar grandes volúmenes de fluido de potencia y además de una planta de tratamiento donde se pueda tratar el fluido motriz proveniente del fondo del pozo contaminado por el sulfhídrico, esto debido a la acción de bombeo que se realiza por medio de la transferencia de energía entre el fluido motriz y los fluidos producidos, provocando que se eleven los costos de producción.

## V.2 Recomendaciones.

1. Se recomienda considerar la aplicación del Sistema Artificial por Bombeo Mecánico para los pozos con geometría vertical y el Sistema de Bombeo Electrocentrífugo para el pozo con geometría horizontal, esto de forma casi inmediata, ya que basándose en el comportamiento que a tenido el campo y en consideración a estudios de yacimientos, los pozos podrían dejar de fluir por energía propia en muy poco tiempo.
2. Se recomienda la aplicación del Sistema por Bombeo Mecánico a los pozos C.N 8, 9 y 12 con terminación vertical, ya que cumplen con los requerimientos técnicos y económicos.
3. Con base al análisis técnico del Sistema por Bombeo Mecánico se recomienda utilizar unidades de tipo convencional de tamaño C-228D-213-120 para los tres pozos antes citados con bomba de tubería designación API 25-225-THBM-22-5-2 para el pozo C.N. 9 y para los pozos C.N. 8 y 12 la bomba de tubería designación API 30-275-THBM-25-5-2.
4. Para el pozo C.N 6H se recomienda aplicar el Sistema por Bombeo Electrocentrífugo, debido a la geometría del pozo y al volumen de aportación de hidrocarburos, el cual con este sistema y con base al análisis técnico se obtiene un incremento de producción del pozo de 887 bpd.
5. En la aplicación del Sistema por Bombeo Electrocentrífugo se recomienda la instalación de un variador de velocidad (VSD) para que el pozo tenga flexibilidad en el arranque y para condiciones futuras, por otro lado no se recomienda la instalación de un separador de gas ya que la RGA es muy baja y la profundidad de la bomba está seleccionada de tal modo que exista flujo monofásico.
6. No se recomienda descartar por completo la aplicación del Bombeo por Cavidades Progresivas, sino hasta haber consultado con los proveedores, de que tan factible es que se tenga en existencia bombas PCP con material que soporte altas concentraciones de sulfhídrico, ya que el Campo Cerro Nanchital maneja del orden del 10% mol.
7. Los estados mecánicos que se proponen como resultado del análisis técnico para los pozos Cerro Nanchital 6H, 8, 9 y 12 se muestran en el Anexo D.

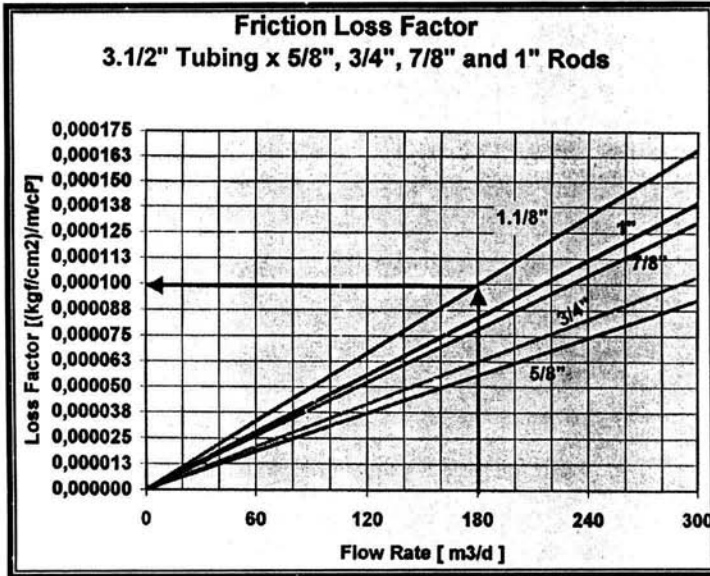
# ANEXOS

---

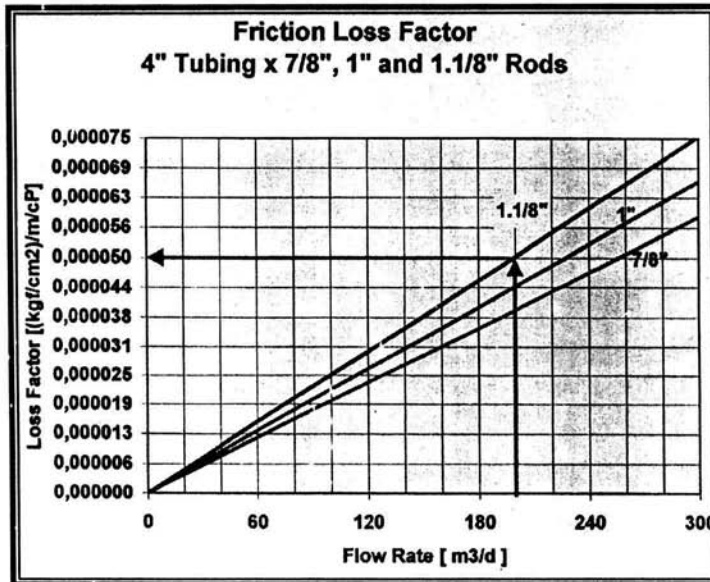
---



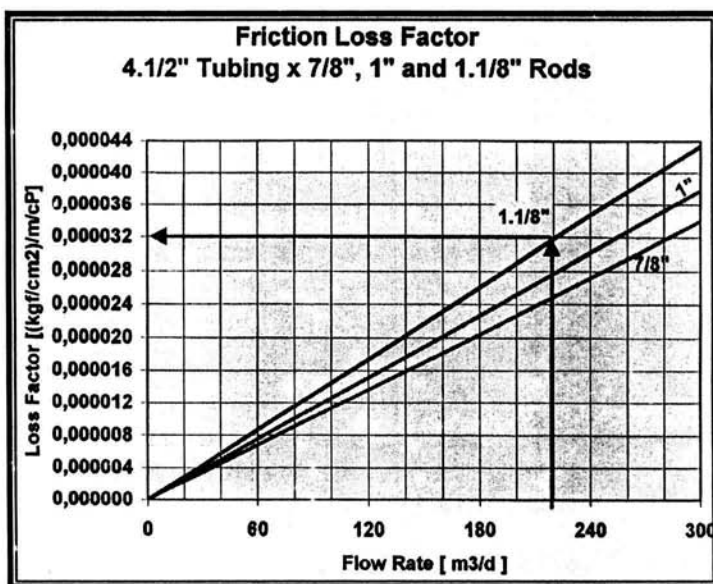
## ANEXO A



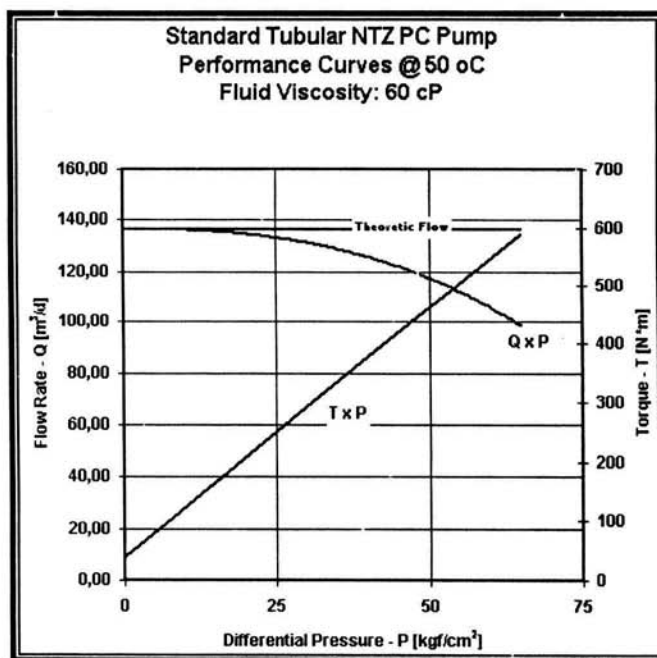
GRAFICA A-1 FACTOR DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN  $f$  PARA TP 3 1/2"



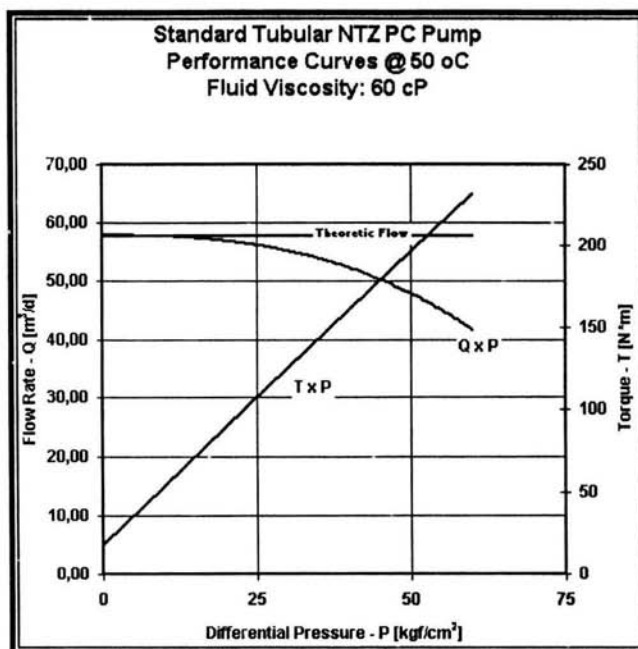
GRAFICA A-2 FACTOR DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN  $f$  PARA TP 4"



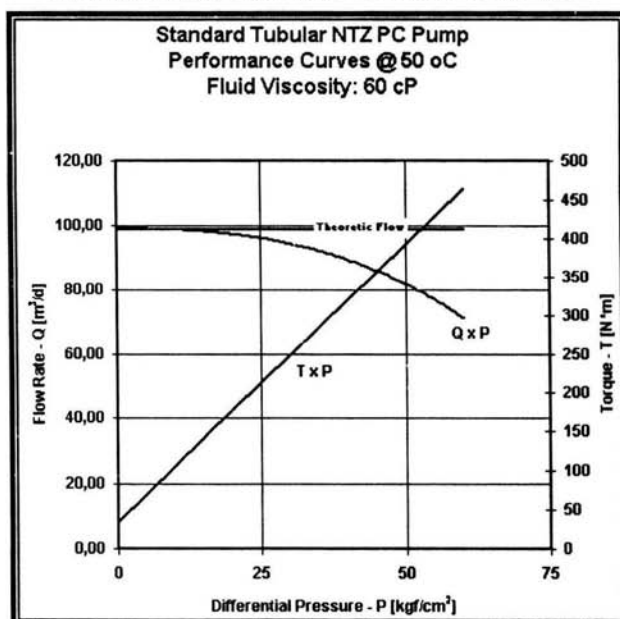
GRAFICA A-3 FACTOR DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN f PARA TP 4 1/2"



GRAFICA A-4 CURVA DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA SELECCIONADA DEL CATÁLOGO NTZ 450\*065 ST 78



**GRAFICA A-5 CURVA DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA SELECCIONADA DEL CATÁLOGO NTZ 350\*060 DT 33**



**GRAFICA A-6 CURVA DE COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA SELECCIONADA DEL CATALOGO 400\*060 DT 66**

## ANEXO B

COEFICIENTE DE FRICCIÓN [Nm]/[m]/[cp]					
Torque resistivo - Tr	Tubing 2 3/8"				
	5/8	3/4	7/8	1	1 1/8
	0.00097	0.00137	0.00316	N/A	N/A
	Tubing 2 7/8"				
	5/8	3/4	7/8	1	1 1/8
	0.00030	0.00038	0.00050	0.0011	N/A
	Tubing 3 1/2"				
	5/8	3/4	7/8	1	1 1/8
	0.00010	0.00012	0.00017	0.00020	0.00027
	Tubing 4"				
5/8	3/4	7/8	1	1 1/8	
0.00005	0.00006	0.00007	0.00008	0.00010	
Tubing 4 1/2"					
5/8	3/4	7/8	1	1 1/8	
0.00003	0.00003	0.00003	0.00004	0.00005	

**TABLA B-1 COEFICIENTE DE FRICCIÓN PARA EL TORQUE RESISTIVO**

Cable Size	a
#6	0.6818
#4	0.4545
#2	0.2708
#1	0.2150

**TABLA B-2 RESISTIVIDAD DEL TAMAÑO DEL CABLE**

Cable	b				$T_{max} (F)$
	Cable Size				
	#6	#4	#2	#1	
Redalene POTB	0.0281	0.0176	0.0097	0.0079	205
Redalene PPEO	0.0199	0.0112	0.0062	0.0045	
Redahot ETKO	0.0275	0.0169	0.0090	0.0068	220-350
Redahot ETBO	0.0200	0.0117	0.0062	0.0046	
Redablack EEF	0.0275	0.0167	0.0086	0.0064	300-400
Redablack EER	0.0199	0.0115	0.0058	0.0043	
Redalead ELB	0.0281	0.0169	0.0086	0.0064	400-450
Redalead ELBE	0.0202	0.0116	0.0058	0.0042	

**TABLA B-3 AISLAMIENTO DEL MATERIAL EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DEL CABLE**

## ANEXO C

Partida	Descripción	Precio unitario (USD)
1	Unidad de Bombeo Mecánico Convencional C-228	62,803.61
2	Unidad de Bombeo Mecánico Mark II mejorada RM-228	67,199.86
3	Varilla de succión ¾" x 25' con cople.	53.00
4	Varilla de succión 7/8" x 25' con cople.	60.00
5	Bomba de tubería designación API 30-275-THBM-25-5-2	4,200.00
6	Bomba de tubería designación API25-225-THBM-22-5-2	4,000.00
7	Varilla pulida 1 ¼" x 22'	922.00
8	Cople liso ¾" API-11 AX clase T	15.00
9	Cople combinación ¾" - 7/8"	35.00
10	Bomba rotoria de tornillo (unidad completa) desplazamiento positivo, marca Geremia consistente en: *Cabezal Vertical mod. AV1-9-7/8", motor eléctrico. ■ Bomba integrada por rotor undersize y estator de 2 hélices con elastómero HBRA. ■ Tablero de control. ■ Juego de poleas, bandas, tee y cubierta. ■ Varilla pulida 1 ¼" x 16' con cople. ■ Limitador de torque.	34,000.00

**TABLA C-1 COTIZACIÓN (ESTIMADA) DEL MATERIAL DE BOMBEO MECÁNICO Y BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS "WEATHERFORD"**

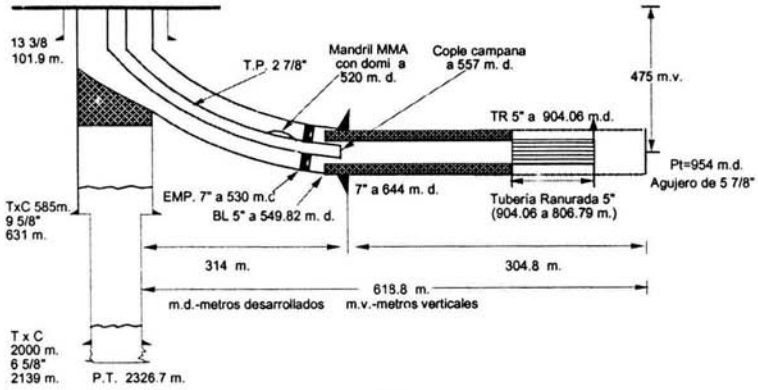
Partida	Descripción	Precio unitario (USD)
1	Variador de velocidad Speedstar 2000	37,111.00
2	Transformador elevador de frecuencia variable	16,478.00
3	Carrete adaptador y demás accesorios para la instalación de todo el equipo superficial	51,432.00
4	Bomba DN3000, S-400, 50 etapas	9,405.00
5	Motor S-456, 50 HP, 22.5 amp	33,295.00
6	Manejador de gas avanzado S-400	20,708.00
7	Sistema protector modular, serie 400 de tres cámaras	12,755.00
8	Sensor de fondo Surveyor, 2 canales, serie 375, acero al carbón	20,160.00
9	Guía del motor, serie 456	625.00
10	Cable trifásico Redalene #4 y accesorios \$30.58/metro	16,223.20
11	Accesorios, materiales para la instalación y servicio de puesta en operación	10,845.00

**TABLA C-2 COTIZACIÓN (ESTIMADA) DEL MATERIAL DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO "SCHLUMBERGER"**

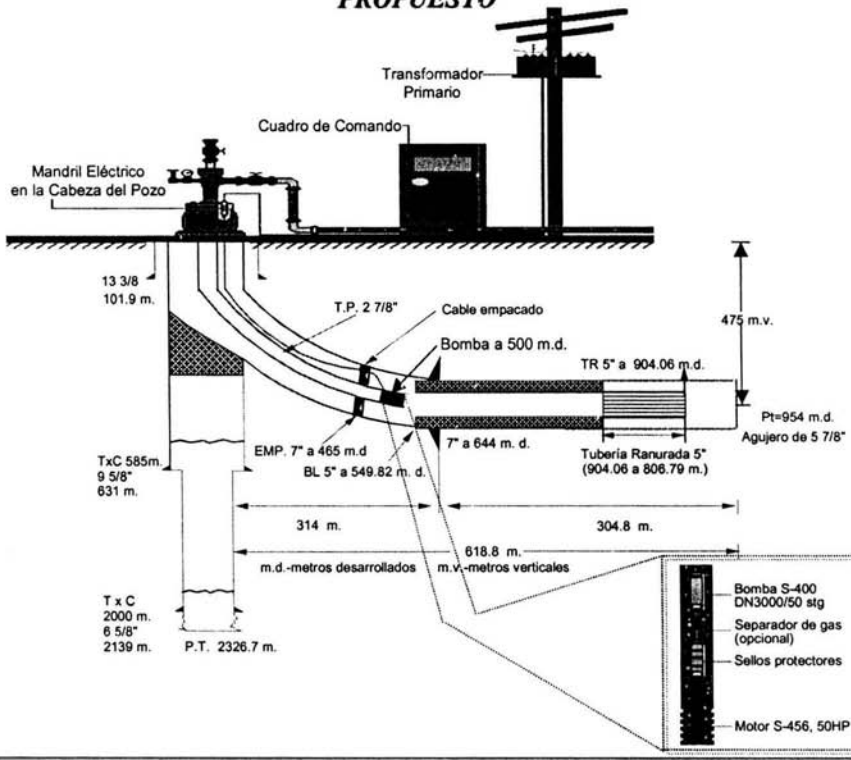
## ANEXO D

### CERRO NANCHITAL 6H

*ACTUAL*

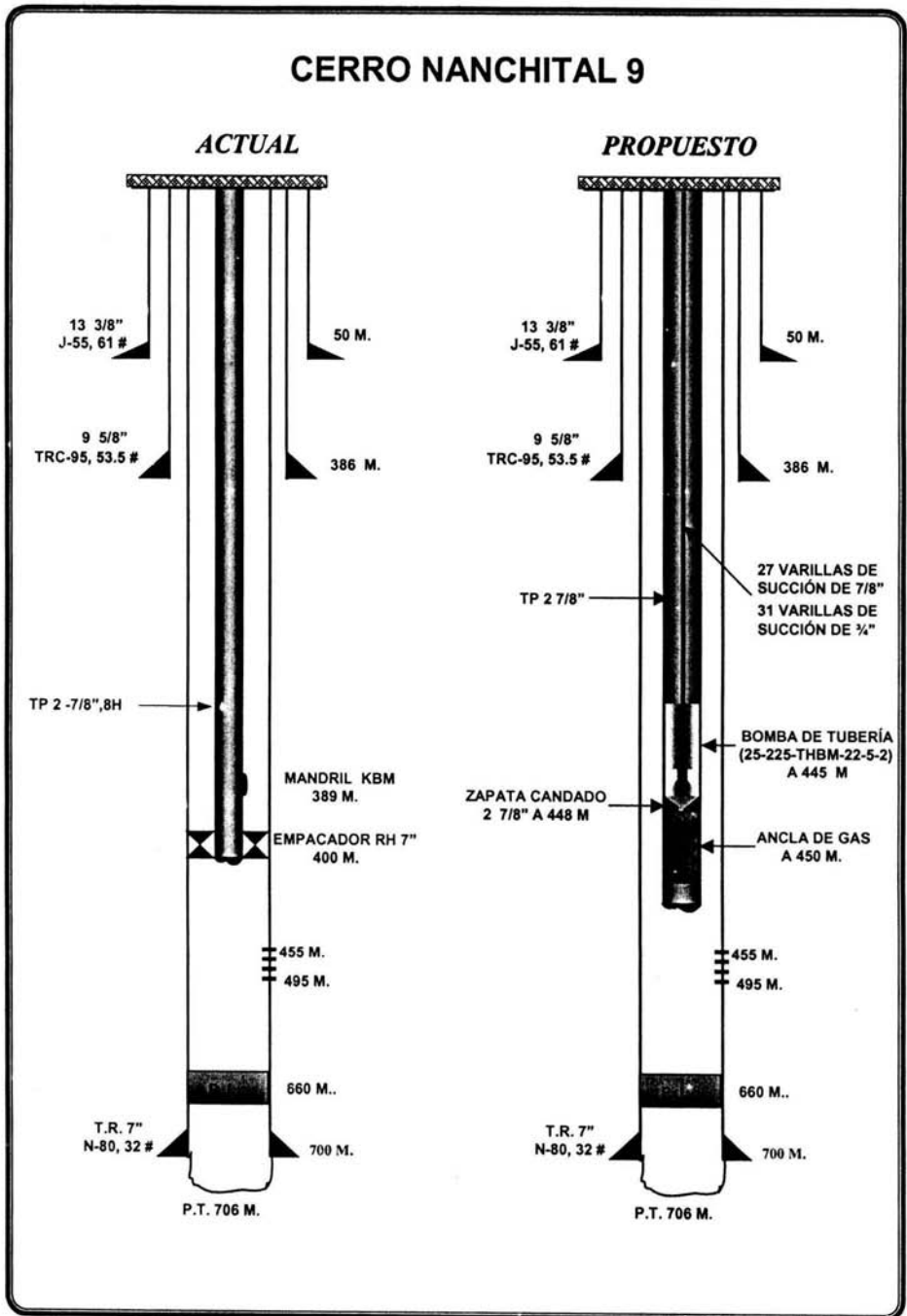


*PROPUESTO*



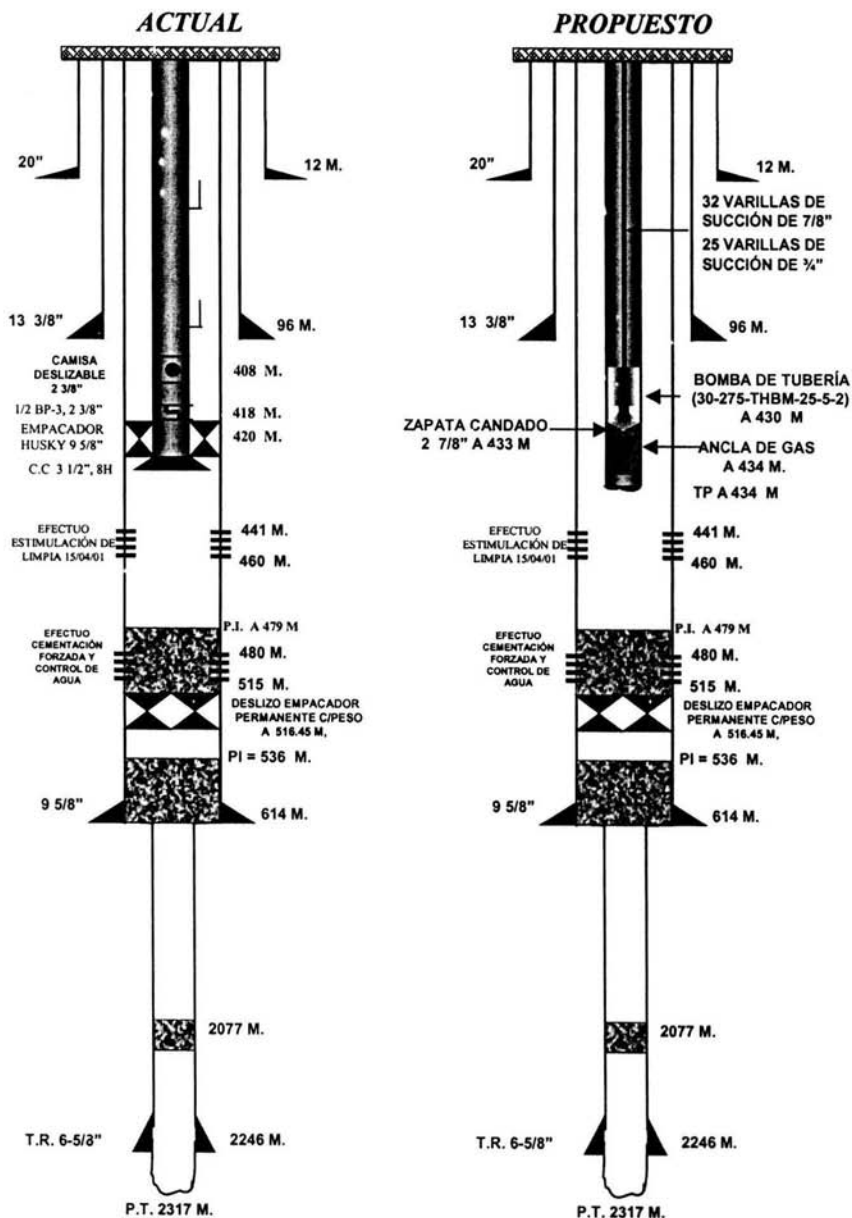


# CERRO NANCHITAL 9





## CERRO NANCHITAL 12



## NOMENCLATURA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
$A_e$	Área equivalente	$cm^2$
$A_R$	Área del rotor	$cm^2$
$B_o$	Factor del volumen de aceite	$m^3/m^3$
CBE	Contrabalanceo	lbs
$C_t$	Factor de corrección por temperatura	
Sb	Sumergencia de la bomba	m
D	Diámetro exterior del rotor (cresta-cresta)	cm
FI	Presión en la línea de flujo	$Kgf/cm^2$
G	Gravedad específica del fluido	$Kgf/cm^3$
H	Distancia del estator al niple de paro	cm
Hc	Profundidad de colocación de la bomba	m
$I_{motor}$	Corriente del motor	amp
J	Índice de productividad	bpd/psi
L	Longitud del estator	cm
$\Delta L$	Elongación total de las varillas	cm
MPRL	Mínima carga de la varilla pulida	lbs
P	Ganancia	Dlls
Pth	Presión en la cabeza del pozo	$Kg/cm^2$
PRHP	Potencia de la varilla pulida	HP
PPRL	Máxima carga de la varilla pulida	lbs
Pr	Potencia requerida que se tiene en la varilla pulida	HP
Pwf	Presión de fondo fluyendo	$Kg/cm^2$
Pws	Presión de fondo estático	$Kg/cm^2$
Pb	Presión de burbujeo	$Kg/cm^2$
$\Delta P$	Diferencial de presión	$Kg/cm^2$
$\Delta P_e$	Perdida de presión por elevación	$Kg/cm^2$
$\Delta P_f$	Perdida de presión por fricción	$Kg/cm^2$
$P_f$	Perdida de presión del fluido por fricción	$Kg/cm^2$
$T_t$	Torque total	$N \cdot m$
$T_h$	Torque hidráulico	$N \cdot m$
$T_o$	Torque de fricción	$N \cdot m$
$T_r$	Torque resistivo	$N \cdot m$
$T_{wb}$	Temperatura del fondo del pozo	$^{\circ}C$
$T_{sup}$	Temperatura superficial	$^{\circ}C$
S.S.Eng	Potencia requerida para motor eléctrico	HP
M.C.Eng	Potencia requerida para motor de combustión interna	HP
$\phi_{casing}$	Diámetro exterior de la TR	Pg
$\phi_{linner}$	Diámetro exterior del linner	Pg
$\mu$	Viscosidad del fluido	cp
V	Voltaje	volts

## REFERENCIAS

1. Garaicochea P. F.: Transporte de Hidrocarburos por Ductos, Colegio de Ingenieros Petroleros de México, A.C., 1991.
2. Martinez, John & Dr. Blann Jack R. Manual de Gas Lift, Production Associates.
3. Blann J. R.: Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial Lift Methods.
4. Prado G. M.: Manual del Curso de Bombeo Mecánico, The University of Tulsa, Petroleum Engineering Department Artificial Lift Projects.
5. Lufkin Industries, Inc. Catálogo de Unidades de Bombeo Mecánico, CAT. 88-89, Lufkin Texas.
6. Brown, K. The Technology of Artificial Lift Methods, Petroleum Publishing Co., Tulsa (1980) 2b, Capítulos 5, 6 y 9.
7. Gosline, J.E. y O'Brien, M.P.: Aplicación de la Bomba de Inyección de Agua a la Bombeo de Pozos de Petróleo, University of California Publication in Eng. (1933).
8. Gibaldi, J.: PC Pump Under Pumping-off Conditions, Limitations and Possibilities to Optimise Production in Artificial Lift, Paper Presented at the SPE-ATW Workshop, Puerto la Cruz – Venezuela – Jan 23&24/2001.
9. Gibaldi, J.: Anexos del Manual del Curso de Progressive Cavity Pump, Tablas A15, A16 y A17, September/2001.
10. Prado G. M.: Manual del Curso de Bombeo Electrocentrífugo, The University of Tulsa , Petroleum Engineering Department Artificial Lift Projects. Julio/2001
11. Martínez G. J. L.: Manual del Curso de Bombeo Electrocentrífugo, Julio/2001.
12. Gibaldi, J.: Manual de Bombas PCP.
13. REDA Copyright 1995. Manual de Equipo Superficial y Equipo Subsuperficial.
14. Cotización Económica del equipo de Bombeo Mecánico y del Equipo de Bombeo por Cavidades Progresivas. "Compañía Weatherford Artificial Lift Systems"
15. Cotización Económica del Equipo de Bombeo Electrosumergible" Compañía Schlumberger REDA.