

Universidad Nacional de Ingeniería

**Programa Académico de Ingeniería de Petróleo
y Petroquímica**



**EVALUACION DEL BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO
EN UN YACIMIENTO DE LA SELVA NORTE
DEL PERU**

T E S I S

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO DE PETROLEO

PEDRO B. TIMANA JARAMILLO

PROMOCION 1974 - II

Lima • Perú 1981

"EVALUACION DEL BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO EN UN
YACIMIENTO DE LA SELVA NORTE DEL PERU"

- I. INTRODUCCION
- II. RESEÑA HISTORICA DEL YACIMIENTO
 - II.1. Aspectos Geológicos
 - II.2. Reservorios encontrados
 - II.2.1. Reservorio Vivian
 - II.2.2. Reservorio Cetico
 - II.2.3. Reservorio Pona
 - II.3. Esquemas de Completación
- III. DESCRIPCION DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO
 - III.1. Equipo de Subsuelo
 - III.1.1. Motor Eléctrico
 - III.1.2. Protector
 - III.1.3. Bomba Centrífuga
 - III.1.4. Cable Eléctrico
 - III.1.5. Separador de Gas
 - III.2. Equipo de Superficie
 - III.2.1. Transformadores
 - III.2.2. Panel de Control
 - III.2.3. Corriente Eléctrica

- IV. SELECCION DE LOS POZOS Y EQUIPOS
 - IV.1. Selección de Pozos
 - IV.2. Selección de Equipos
 - IV.2.1. Equipos de Subsuelo
 - IV.2.2. Equipo de Superficie

- V. INSTALACION DE BOMBAS ELECTROCENTRIFUGAS EN EL YACIMIENTO.

- VI. PROBLEMAS Y FALLAS
 - VI.1. Problemas
 - VI.2. Fallas

- VII. RESULTADOS OBTENIDOS
 - VII.1. Producción
 - VII.2. Económicos

- VIII. CONCLUSIONES

- IX. RECOMENDACIONES

- X. APENDICE

EVALUACION DEL BOMBEO ELECTRO-CENTRIFUGO EN UN

YACIMIENTO DE LA SELVA NORTE DEL PERU

I. INTRODUCCION

Petróleos del Perú, después de haber realizado estudios relacionados con mecanismos de producción artificial en Operaciones Selva, decidió utilizar el método de bombeo electrocentrífugo para mantener y/o incrementar su producción.

En el año 1977 se adquirieron tres (3) bombas Reda, con el fin de evaluar su rendimiento en una de sus áreas, sin embargo, los pozos de de signados para la evaluación demostraron un buen potencial productivo, a tal punto que hasta la fecha continúan produciendo por surgencia natural.

En el yacimiento que vamos a evaluar el bombeo electrocentrífugo, se encontraron pozos de gran producción que, debido al alto corte de agua, tuvieron un período productivo relativamente corto, siendo necesario instalarles equipo de bombeo artificial. Por lo tanto, se decidió instalar estas bombas en este yacimiento, a fin de compensar la baja de producción manifestada.

En los próximos capítulos se indicará los resultados logrados hasta el momento con el sistema de bombeo electrocentrífugo sumergible.

II. RESEÑA HISTÓRICA DEL YACIMIENTO

El yacimiento en evaluación es una estructura petrolífera en forma an

ticlinal, detectada en base a información sísmica. Fue descubierto el 26 de marzo de 1972 con la perforación del pozo 1PX-24, cuya producción inicial fue de 167 x 0 x 1/4 x 24 hrs.

En el año 1973 se perforó un pozo confirmatorio, denominado 2PX-24. Con este resultado se desarrolló el área, llegando a perforarse un total de diecisiete (17) pozos, de los cuales tres (3) resultaron secos y catorce (14) productores, como se muestra en el Anexo N° 1.

A partir de febrero 1978 se inició la producción continua de nueve (9) pozos con un crudo de 25 °API. En los meses de julio y agosto del mismo año, se perforaron y produjeron dos (2) pozos, obteniéndose un incremento de producción de 3,700 BOPD de 40 °API.

La máxima producción del campo por surgencia natural en este yacimiento se obtuvo en noviembre de 1978, con una producción de 6500 BOPD.

En 1979 se puso en operación otro pozo, sin embargo, la producción declinó rápidamente llegando a 2,200 BOPD. Por esta razón se les instaló equipo de bombeo electrocentrífugo, logrando un inmediato incremento de producción; el total producido en el campo fue de 8,400 BOPD.

En junio de 1980 entraron en producción dos (2) pozos más, a los que se les instaló de inmediato equipo de bombeo electrocentrífugo, haciendo un total de nueve (9) pozos, obteniéndose una producción de 9,000 BOPD, que ha sido la máxima producción alcanzada hasta el momento, sin contar los cinco (5) pozos restantes, actualmente muertos a los que se les instalará equipo de bombeo hidráulico. Actualmente la producción es de 4,200 BOPD, encontrándose tres (3) bombas electrocentrífugas inoperativas, esperando ser extraídas y reemplazadas con la unidad de servicio de pozos.

II.1. Aspectos Geológicos

En la Fig. N° 1 se muestra la columna estratigráfica del yacimiento la cual está constituida por rocas Pre-Mesozoicas y del Cenozoico, conformadas principalmente por areniscas, conglomeradas, lodolitas, lutitas y calizas de origen continental a marino.

II.2. Reservorios encontrados

En esta área se han encontrado dos (2) formaciones productivas: Vivian y Chonta. Esta última, consta de tres (3) miembros: Cético, Pona y Lupuna, en este último no se ha encontrado petróleo.

II.2.1. Reservorio Vivian

Este reservorio es del tipo anticlinal asimétrico, con un eje NO-SE. Está formado por dos (2) arenas bien definidas, a quienes se ha denominado Arena N° 6 y Arena N° 7.

Arena N° 6 (Vivian Inferior)

Consta de arenas fluviales y fluvio deltaicas, intercaladas con cuerpos delgados de arcilla y limo correspondiente a la llanura de inundación.

Arena N° 7 (Vivian Superior)

Se encuentra en el tope de la formación Vivian, está constituida por areniscas cuarzosas, de grano medio, con selección de grano de regular a pobre, con bajo contenido de arcilla y limo.

II.2.2. Reservorio Cetico

Las arenas inferiores del miembro Cetico, constituyen el reservorio más prolífico de la formación Chonta y es el principal objetivo de producción.

El reservorio Cetico es un anticlinal con tres (3) culminaciones. La tendencia general del eje es NO-SE. Se han definido dos arenas petrolíferas importantes, con contenido mineralógico y características físicas de reservorio diferentes. Estas arenas están ubicadas en la parte central del miembro Cetico y por debajo de la zona de calizas.

Las arenas están separadas, en su mayor parte, por una delgada capa de lutita, que desaparece por erosión en cierta área, dejando los reservorios comunicados entre sí.

II.2.3. Reservorio Pona

Es el objetivo secundario del yacimiento.

En la parte central del anticlinal, este miembro tiene dos arenas petrolíferas separadas por una capa delgada de caliza impermeable que podría individualizarlas como reservorios independientes. A estas arenas se les ha denominado Arena N° 4 y Arena N° 5.

II.3. Completación de Pozos

De los catorce (14) pozos productores, siete (7) son verticales y siete (7) dirigidos, existiendo cuatro (4) plataformas para éstos.

Como algo peculiar, los pozos dirigidos fueron desviados desde ± 250 m. (forros de superficie), hasta la formación Pozo ($\pm 2,600$ m.), a partir de la cual la perforación vuelve a ser vertical.

En general, los pozos han sido completados con forros de superficie de $13 \frac{3}{8}$ " H-40, 48 lbs/pie y forros de producción de 7", N-80, 29 lbs/pie o de $5 \frac{1}{2}$ " N-80, 17 lbs/pie; los pozos dirigidos son completados además con forros intermedios de $9 \frac{5}{8}$ " N-80, 9.3 lbs/pie, excepto en los pozos con $5 \frac{1}{2}$ ", que tienen tubing de $2 \frac{7}{8}$ " N-80, 6.5 lbs/pie. En la Fig. N° 2 se muestran los esquemas de los diferentes tipos de completación usados.

Para el punzonamiento se usan hyperjets de $1/2$ ". El lodo usado en la zona petrolífera es de lignosulfonato con 9.5 - 10.5 lbs/gal. de peso y 38-42 sg. de viscosidad.

La cementación es del tipo convencional. En la mayoría de los pozos se tomó registro CBL-VDL, a fin de comprobar la adherencia del cemento, debiendo realizar trabajos de cementación forzada en muchos de ellos.

III. DESCRIPCION DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

Básicamente el sistema de producción artificial tipo electrocentrífugo se compone de equipo de subsuelo y equipo de superficie.

III.1. Equipo de Subsuelo

Para funcionar la unidad queda suspendida de la tubería de producción, sumergida en el fluido del pozo y conectada con la su-

perficie mediante un cable que le suministra la electricidad al motor. La bomba y el motor pueden ser instalados a cualquier profundidad, pues están diseñados para trabajar bajo cualquier presión de inmersión existente en los pozos.

La unidad eléctrica sumergible tiene varios componentes básicos, los más importantes son el motor, protector, bomba centrífuga y el cable conductor.

En la Fig. N° 3 se muestran las partes de que consta la instalación del bombeo electrocentrífugo, recalcando que la profundidad de la bomba depende del nivel dinámico del fluido.

III.1.1. Motor Eléctrico

Es trifásico, inducido de barras, es enfriado y lubricado por un aceite dieléctrico especial que llena totalmente el casco. Tiene un efecto de inercia muy bajo, que le permite alcanzar la velocidad de operación en menos de 0.3 segundos, eliminando así la prolongada caída de energía y la necesidad de instalar costosos sistemas de arranques de voltaje reducido.

El motor tiene casco de acero de bajo contenido de carbono, con laminaciones de acero y latón comprimidas por dentro.

Las secciones del rotor y las camisas de bronce de los cojinetes son armadas y se acoplan a un eje de acero de gran resistencia. El eje es hueco para la circulación del aceite a lo largo del motor, con el fin de brindar lubricación y enfriamiento.

Al aplicarse corriente al motor, el calor generado casi instantáneamente hace que las laminaciones de latón se expandan y opriman los cojinetes individuales del rotor, para que gire solamente la porción interna de ellos. Frente a dichos cojinetes hay un orificio en el eje hueco, para suministrarles lubricación.

Es muy difícil concebir la existencia de un motor de 120 HP de potencia, 32 pies de longitud y 4.56 pulgadas de diámetro exterior. Sin embargo, esto se explica porque apenas se energiza el motor, se crea un campo magnético de gran magnitud, pues cada uno de los motores que forma parte de la porción giratoria del motor, contiene barras sesgadas de cobre. Debido a que las fuerzas magnéticas dentro del estator dependen en gran parte del cobre que contienen, el efecto de oblicuidad permite el rápido arranque y elimina los puntos muertos que se observa a veces en los motores tipo superficie.

Cuando la potencia del motor no es suficiente, se instalan motores en tándem.

III.1.2. Protector

Va montado entre el motor y la bomba. Sus principales funciones son:

1. Aislar el motor del fluido del pozo para lo cual iguala la presión interna del aceite del motor con la presión del fluido producido por el pozo.
2. Proveer un depósito para el aceite lubricante.

3. Suministrar un sello mecánico para el eje.
4. Crear un cojinete mecánico para soportar parte del empuje de la bomba.

El protector va lleno de aceite, el cual se comunica con el aceite del motor mediante conductos.

El caso del protector, así como el cabezal, la base y la sección central son de acero de bajo contenido de carbono; el eje es de aleación Monel.

El protector consta de dos cámaras de aceite puestas en tándem, cada una contiene un sello mecánico que permite la expansión y contracción del aceite del motor, a la vez que impide la entrada de agua al mismo, a medida que la unidad se calienta y enfría al ponerse en marcha o pararse.

III.1.3. Bomba Centrífuga

Es la parte más importante de la unidad de bombeo eléctrico.

Consta de una serie de etapas que encajan en el eje, cada etapa está formada por un difusor y un impulsor diseñado de modo tal que soportan su propio empuje, por ello es que con frecuencia se denominan impulsores flotadores.

Si una etapa determinada puede producir 2,500 BPD y su capacidad total de levantamiento es de 30 pies, para producir el mismo volumen de 3,000 pies de profundidad se necesitan 100 etapas.

Cuando es necesario usar más etapas de las que entran en un solo casco entonces las bombas se construyen en tándem, es decir, una bomba se emperna sobre la otra y en ese punto se acoplan los ejes.

Mediante este método es posible producir fluidos desde profundidades de más de 10,000 pies sin temor de desalineamientos ni de los consiguientes desgastes dentro de la bomba.

Es necesario hacer hincapié que la bomba tiene un rango de operación óptima. Sin una de ellas se opera por encima o por debajo de ese rango, el empuje ascendente o descendente reduce la duración efectiva de la bomba, razón por la cual es muy importante determinar la productividad del pozo para elegir la bomba adecuada.

III.1.4. Cable eléctrico

Este elemento suministra la corriente al conjunto de subsuelo; es resistente al petróleo y al agua.

Se utiliza cable plano o redondo debidamente aislado, capaz de resistir 300 °F de temperatura.

En la parte comprendida entre la bomba y el protector se utiliza cable plano. El cable va normalmente cubierto de blindaje de acero galvanizado para impartirle protección mecánica, pero también se fabrica con blindaje de Monel para contrarrestar el ataque de elementos corrosivos, como el ácido sulfhídrico.

El aislamiento y la cubierta se diseñan especialmente

para que resistan la penetración de gases y agua. Cuando se conocen las condiciones específicas de trabajo, es posible seleccionar un cable para una duración efectiva de más de 8 años. El cable representa una parte considerable de la inversión total en la unidad de bombeo eléctrico.

III.1.5. Separador de Gas

Este elemento sirve para separar el gas en solución y el gas libre del fluido del pozo, antes de que entre a la bomba.

Al entrar en el separador y al fluir a través de él, el fluido del pozo cambia de dirección dos veces antes de entrar en el impulsor receptor.

El casco del separador es de acero de bajo contenido de carbono, pero con revestimiento de plomo-estaño en la bocatoma para impartirle resistencia a la corrosión y erosión. El eje es de Monel, debido a que permanece en contacto con los fluidos del pozo y gira dos veces antes de entrar en el impulsor receptor.

III.2. Equipo de Superficie

III.2.1. Transformadores

Son unidades trifásicas autoenfriantes, llenas de aceite, diseñadas para convertir el voltaje primario de sistemas eléctricos a condiciones de operación de las unidades de subsuelo.

III.2.2. Panel de Control

Sirve para controlar automáticamente el funcionamiento de la Unidad de subsuelo. Generalmente se fabrican en una gran variedad de tamaños, los más simples están compuestos de botones de contacto magnético y protección contra sobrecarga, mientras que las más elaboradas constan de fusibles, amperímetros, protectores de baja o sobre carga, luces indicadoras e instrumentos para operaciones de control automático.

Para la elección del panel de control y motores eléctricos, es muy importante que cuente con la protección de sobrecarga y protección de baja carga.

El paro por baja carga ocurre cuando la bomba empieza a trabajar en seco, o cuando el motor trabaja bajo condiciones anormales de parada o cercanas a ella.

Los requisitos de carga del motor bajan a medida que la unidad se acerca a la condición de parada.

Entre los controles automáticos, el más importante es el amperímetro registrador, y es el único dispositivo que requiere revisión diaria con el fin de cambiarle discos o cartas de registro.

Estas cartas constituyen el historial permanente de las condiciones del fondo del pozo; pues en ellas puede determinarse si el pozo está funcionando normalmente o si ha empezado a declinar.

III.2.3. Corriente Eléctrica

La energía eléctrica puede ser tomada de la red de distribución, si existiera ésta en el lugar de trabajo, en caso contrario es necesario utilizar generadores individuales por pozo, o para un grupo de pozos.

El tipo de generador o generadores depende básicamente de la potencia del motor requerida en cada pozo y del número de pozos.

Cuando estos generadores se instalan en áreas relativamente poco accesibles, requieren de tanques de almacenamiento de combustible, tubería, bombas de transferencia, etc.

La ubicación de los generadores depende de las condiciones operativas. Existen 3 alternativas

Un generador en cada pozo

Un generador para un grupo de pozos

Un generador para el total de pozos del campo.

La evaluación de estas alternativas debe hacerse para cada área o yacimiento, debido a que las condiciones de terreno y de operación son diferentes.

IV. SELECCION DE POZOS Y EQUIPOS

IV.1. Selección de Pozos

Los pozos de Operaciones Selva tienen una profundidad promedio de 10,000 pies. De los 53 pozos productores, 22 son verticales

y 31 dirigidos. De los 22 pozos verticales, 9 fueron completados con forros de producción de 5 1/2", y los 13 restantes con lana o forros de producción de 7".

Los pozos han sido abiertos a producción, baleando los intervalos superiores de las arenas productivas. Gran parte de los pozos tienen una instalación de completación múltiple, con el fin de producir selectivamente todas las arenas y aislar cualquier arena productora de agua.

En cuanto a la producción, es posible clasificar a los pozos en tres categorías:

- 1) Pozos con más de 2,500 BFPD.
- 2) Pozos con producciones entre 1,000 y 2,500 BFPD.
- 3) Pozos con menos de 1,000 BFPD.

Según la categoría de los pozos y considerando las capacidades productivas de los sistemas de producción artificiales, así como sus limitaciones para nuestras operaciones, se ha determinado lo siguiente:

- a) Pozos de 1ra. categoría: Producirlos con bombeo electrocentrífugo.
- b) Pozos de 2da. categoría: Pueden producir con bombeo electrocentrífugo y/o hidráulico.
- c) Pozos de 3ra. categoría: Producirlos con bombeo hidráulico.

Estas consideraciones fueron tomadas en cuenta para el estudio de bombeo artificial.

En el yacimiento en evaluación, la distribución de pozos por ca-

tegorías es la siguiente:

<u>CATEGORIA</u>	<u>TOTAL DE POZOS</u>
1	2
2	5
3	<u>7</u>
	14

A los pozos de las categorías 1 y 2, se les ha instalado equipo de bombeo electrocentrífugo.

Se ha decidido instalar un sistema de bombeo hidráulico en cinco (5) de los siete (7) pozos de la Categoría 3, ubicados en la parte Oeste del área.

IV.2. Selección de Equipo

Para hacer una correcta selección del equipo, es necesario contar con una buena y completa información del pozo elegido.

Asimismo, es conveniente contar con literatura específica sobre el tema, de las diferentes firmas fabricantes de equipos de bombeo electrocentrífugo.

IV.2.1. Equipo de Subsuelo

La selección correcta del tipo y tamaño de la unidad de bombeo centrífugo sumergible depende, para cada pozo en particular, tanto de la capacidad de producción, como del tamaño de los forros.

Los datos necesarios para el diseño son los siguientes:

- Diámetro de forros y de tuberías de producción (en pulgadas)
- Profundidad de las perforaciones (en pies)
- Régimen de producción (en BPD)
- Relaciones agua-aceite (en bbl/bbl) y gas aceite (SCF/bbl).
- Presión Estática y Fluyente de fondo (en psi)
- Gradiente de presión (en psi/pie)
- Temperatura de fondo (en °F)
- Gravedad específica del fluido
- Presión en la cabeza del pozo (en psi)

BOMBA ELECTRICA

El diseño consiste básicamente en calcular el N° de etapas de la bomba.

$$N^{\circ} \text{ Etapas} = \frac{\text{columna hidrostática total}}{\text{columna desarrollada por etapa}} \quad (\text{Fórmula N}^{\circ} 1)$$

Columna hidrostática total (CHT)

Se determina a partir de la fórmula:

$$\text{CHT} = \text{Altura de levantamiento} + \text{pérdida por fricción} \\ \mp \text{presión de descarga}$$

a) Altura de levantamiento. - Se determina:

Profundidad al plano de referencia - nivel estático del fluido.

Profundidad al plano de referencia: es la profundidad a la cual se toma la presión estática de fondo.

Nivel estático del fluido: Se calcula dividiendo la presión estática a la profundidad de referencia entre la gradiente del fluido

- b) Pérdidas por fricción.- Se calcula utilizando cualquiera de las fórmulas para hallar pérdidas de fricción de tuberías verticales, generalmente se usan las fórmulas de Fanning o de William-Hazen.
- c) Presión de descarga.- Se convierte la presión en la cabeza en psi a pies, utilizando la fórmula:

$$\text{Presión de descarga} = \frac{\text{Presión en la cabeza, psi} \times 2.31}{\text{Gravedad específica del fluido}}$$

Columna Desarrollada por Etapa y Diseño de la Bomba

Nos permite determinar el tipo de bomba requerido. Para esto, con los datos de tamaño de forros y producción deseada, se escoge la curva de rendimiento de la bomba cuyo rango óptimo de producción, generalmente en color, corresponde a la producción estimada.

Para el cálculo de la columna desarrollada por etapa, con los datos de producción se corta la curva capacidad de cabeza hidráulica y se lee en el eje vertical la columna hidrostática desarrollada por 100 etapas, calculándose posteriormente la columna desarrollada por etapa.

Con los datos obtenidos se aplica la fórmula 1 y se determina el número de etapas.

DISEÑO DEL MOTOR

Se utiliza la fórmula siguiente:

$$HP = N^{\circ} \text{ etapas} \times (HP/\text{etapa}) \times \text{gravedad específica del aceite.}$$

Los HP/etapa se determinan a partir de las curvas de rendimiento de la bomba seleccionada.

Limitaciones en el diseño del motor

1. En algunos casos es necesario instalar motores en tándem, debido a que la potencia del motor, de un diámetro determinado, no es suficiente para el rendimiento efectivo de la unidad de subsuelo.

El cuadro siguiente nos muestra el límite de potencia para instalar motores en tándem:

<u>Serie</u>	456	540
<u>O.D.</u>	4.56"	5.43"
<u>Casing</u>	5 1/2"	7"
	10	20
	.	.
H P	.	.
	.	.
	110	200
	120	225
	MOTORES EN TANDEM	
	140	240
H P	160	260
	240	3300

2. Emplear motores de 480 V ó 762/830 V para profundidades tope de 1500 pies y potencia de 60 HP.
3. Emplear motores de 762/830 V hasta 3,600' y 120 HP.
4. Emplear motores de 900/1500 V para profundidades mayores de 10,000 pies.
5. Para potencias mayores de 225 HP, usar motores sólo de 2400 V. Es interesante anotar que los costos son inversamente proporcionales al diámetro del motor.

Selección del Tipo de Protector

Los tipos de protector dependen del tipo de motor utilizado.

Se escoge considerando lo siguiente:

Tipo 52 para motores de baja potencia

Tipo 53 para instalaciones normales con motor simple

Tipo 66 tanto para motores simples como en tándem

Tipo 68-B para unidades especiales de bombeo.

Selección del Cable

Se utiliza la información indicada en los manuales de diseño. Se recomienda tener en cuenta lo siguiente:

Diámetro

Es recomendable que la suma del diámetro exterior del cople de la tubería y el diámetro del cable, sea 0.25" menor que el diámetro interior de los forros, para obtener una luz adecuada.

Tipo

La selección del tipo de cable se basa en la temperatura de fondo del pozo, condiciones del fluido y del diámetro de los forros. Una mayor temperatura incide en el uso de un cable de mayor costo, así como la corrosividad hace necesario el uso de cable con armadura de monel (aleación níquel y cobre).

IV.2.2. Equipo de Superficie

Selección del Transformador

El voltaje necesario en el subsuelo es alto, por lo cual se hace necesario utilizar transformadores de voltaje de superficie a lo requerido en la unidad sumergida.

Selección del Panel del Control

La selección de éste depende básicamente de la potencia del motor sumergible, en base al cual se determina el tipo y clase, así como el amperaje máximo.

Selección del Generador

Cuando en el lugar de instalación de las bombas no existe red de distribución de corriente eléctrica, es necesario instalar generadores ya sea individuales para cada pozo, como para suministrar electricidad a varios pozos a la vez.

En este caso, lo más importante es determinar la potencia de los generadores, en función de la potencia requere

rida por el motor sumergible, considerando un factor de eficiencia para balancear las caldas de potencia por trabajo y temperatura.

Asimismo, debe definirse el voltaje de los generadores, considerando la utilización de transformadores.

V. INSTALACIONES DE BOMBAS ELECTROCENTRIFUGAS EN OPERACIONES SELVA

En el mes de marzo, 1979, Petróleos del Perú inició el uso del método de bombeo electrocentrífugo, con la instalación de tres bombas Reda.

Las operaciones de instalación fueron efectuadas por un técnico de la firma "Reda".

A partir de mayo del mismo año, las operaciones de instalación son realizadas por personal propio de Petróleos del Perú - Operaciones Selva, logrando minimizar las pérdidas de producción por reinstalación y costos por servicios contratados.

En el Anexo N° 2 se muestra la relación actual de los pozos con bombeo electrocentrífugo instalado.

VI. PROBLEMAS Y FALLAS

VI.1. Problemas

Se han presentado problemas tanto en la instalación como en la operación propiamente dicha.

El principal problema, se presenta antes de la instalación de

los equipos, radicando en el transporte y manipuleo de los mismos.

El traslado de los materiales y equipos, se hace en cargas externas por helicópteros, en cuyo caso, a pesar del extremo cuidado con que se realiza esta operación, siempre existe riesgo de golpes, rozamientos, etc., que, a su vez, debilitan al equipo o materiales.

En la instalación podemos mencionar el inconveniente de los fenómenos climatológicos, como es el caso de las lluvias tan frecuentes en la zona de trabajo. Cuando esto sucede, puede originar el ingreso de agua al motor, así como también afectar el aislamiento en el cable principal al momento de realizar los empalmes. Esta situación trae como consecuencia demoras en la instalación y la necesidad de contar con protección especial en los equipos que realizan las labores de instalación.

Es preciso mencionar que la mayor parte de las bombas instaladas en este yacimiento no han sido diseñadas para las características de dicho yacimiento.

El motivo de esta decisión se debió a que los pozos asignados para instalar el bombeo electrocentrífugo (B.E.) estaban aún produciendo por surgencia natural, cuando llegaron las bombas a nuestras operaciones. En cambio, los pozos del yacimiento en evaluación estaban declinando y había tres (3) pozos que habían tenido buena producción y habían dejado de hacerlo debido al gran volumen de agua producida, con lo que la presión de la columna hidrostática era mayor que la de la formación.

Esto originó un problema de diseño, puesto que los pozos debie-

ron adecuarse a las características de las bombas adquiridas.

Al poco tiempo, a uno de los pozos con B.E., el nivel de fluido empezó a bajar hasta quedar a casi 50 pies encima de la bomba. Fue necesario cambiar el equipo, instalándose una bomba de menor capacidad, durante cuya labor se desenroscó la tubería y la bomba cayó al fondo del pozo. Esto ocurrió en dos oportunidades.

Otro problema se presenta por la falta de servicio a los pozos con bombas electrocentrífugas paradas por fallas, esto se debe a que sólo se cuenta con un equipo de servicio de pozos.

VI.2. Fallas

Aún cuando no se cuenta sino con un solo informe oficial de lo observado por los fabricantes al desmantelar las unidades enviadas para reparación a U.S.A., la inspección efectuada en el campo permite catalogar las fallas así:

1) Motor-Protector

Al drenar el conjunto se ha notado que el volumen de aceite lubricante es poco y contaminado de fluido del pozo (agua). Esto se puede atribuir a la excesiva vibración del equipo de subsuelo.

2) Bomba

Se han encontrado dañadas debido a la presencia de arena, la cual trajo como consecuencia el desgaste de los álabes.

3) Cable Principal

Durante las operaciones de sacada, enrollada y de empalme,

se ha podido observar que el cable no presenta corrosión en su armadura externa y que las capas aislantes se encuentran en buenas condiciones de trabajo; es decir, que el cable conductor "REDALENE G3F, 3KV" con armadura de acero galvanizado, ha cumplido con las condiciones específicas.

Las fallas de las bombas han ocurrido en 3 pozos como puede observarse en el Anexo N° 3.

En el Anexo N° 4 se presenta un resumen de todas las fallas ocurridas desde el inicio de la instalación del bombeo electrocentrífugo hasta febrero de 1981.

VII. RESULTADOS OBTENIDOS

Al cabo de dos años de instalada la primera bomba en Operaciones Selva, podemos indicar que el resultado ha sido relativamente bueno, pues la producción ha sido estabilizada, deteniendo la tendencia de disminución de la producción por surgencia natural. Sin embargo, económicamente no ha sido del todo beneficioso el proyecto, pues si bien es cierto que se ha obtenido muy buenas ganancias, el costo de reparaciones e intervenciones del equipo de perforar en labores de reinstalación, ha resultado muy alto.

A continuación presentamos una apreciación desarrollada de lo mencionado.

VII.1. Resultados de Producción

La historia productiva de los nueve (9) pozos que actualmente se encuentran con bombeo electrocentrífugo y han sido motivo de eval

luación, se inicia el año 1978.

En febrero de ese año iniciaron su producción tres (3) pozos. En julio, agosto y octubre del mismo año entraron en producción tres (3) más. En febrero de 1979 y julio de 1980 los tres (3) restantes, ver Anexo N° 1.

En el Anexo N° 5 se muestra un cuadro resumen con el incremento de producción logrado con la instalación de equipo de bombeo electrocentrífugo.

En la Fig. N° 4 se muestra la Curva de Producción del yacimiento. Puede observarse con línea continua, la producción de pozos fluyentes que, en enero de 1980, producen menos de 100 BPD, levantando en abril y luego en junio; con la perforación de dos (2) pozos cuya producción surgente declinó rápidamente hasta volver a menos de 100 BPD en enero de 1981.

En el mismo gráfico, con línea punteada se muestra la producción total del campo obtenida con bombas electrocentrífugas, siendo la zona sombreada, el incremento de producción logrado por el uso de este método de bombeo artificial. Puede observarse que en el mes de setiembre de 1980 se obtuvo la máxima producción del campo, 9,138 BOPD, que fue disminuyendo paulatinamente hasta 5000 BOPD en febrero de 1981, debido a que fallaron dos bombas.

La conclusión en este acápite es que, desde el punto de vista productivo, el uso de bombeo artificial ha dado muy buenos resultados, obteniéndose entre marzo de 1979 y marzo de 1981 un incremento total de 3'171,552 barriles, que significa un incremento promedio de 4,338.6 BOPD de sólo nueve (9) pozos.

VII.2. Resultados Económicos

En el Anexo N° 6 se muestran los valores de inversión por equipo, instalación y reparación y reinstalación de las bombas sumergibles. Como puede observarse, la inversión por reparación y reinstalación de bombas del año 1979 es 3.4 veces mayor que en 1980, debido al mayor número de fallas de bombas, ocurridas en tres (3) pozos. En dos de ellos por presencia de arena y en el tercero por problemas de pesca no atribuibles al equipo sumergible, sino a problemas operativos.

En el Anexo N° 7 se indican los costos operativos ocasionados desde 1979, por cada uno de los 9 pozos. Podemos observar que la mayor incidencia en los costos reside en el combustible, ya que éste debe ser transportado por barcazas desde Iquitos hasta la batería, y de allí a los pozos mediante líneas de flujo; cabe mencionar que hasta mediados del año 1980, el combustible se transportaba de la batería a los pozos, por helicópteros.

En el Anexo N° 8, se muestra el análisis económico del proyecto, durante los tres (3) años que está en ejecución. Hemos considerado para esto, solamente el incremento de producción alcanzado. Se observa que el Índice de Rentabilidad (DCF) del Proyecto es mayor de 1000 %; el valor presente del 20 % es de 28,255 M\$ y la inversión ha sido recuperada en 3.2 meses.

Con esto se demuestra que, a pesar de los problemas ocurridos y de los cuantiosos gastos por reparaciones y reinstalaciones, el proyecto es altamente rentable.

VIII. CONCLUSIONES

1. En el Anexo N° 8 se puede apreciar que aún cuando los gastos por reparación y reinstalación de equipo son muy altos, la inversión total se ha recuperado en 3.2 meses con un índice de rentabilidad mayor de 1000 %.
2. Los gastos de operación son bajos siempre y cuando se cuente con los equipos y la infraestructura adecuada para la operación de este sistema
3. El transporte y abastecimiento de combustible para los grupos electrógenos, incide enormemente en los costos de operación del sistema de bombeo electrocentrífugo.
4. Los gastos de instalación de equipo electrocentrífugo en nuestras operaciones no s representa aproximadamente 4 veces mayor que el costo de los equipos.
5. Las fallas de los equipos que se han presentado en los pozos mencionados se han debido a:
 - Contaminación del aceite Reda N° 2 con agua de formación tanto en el motor como en el protector.
 - Bombas trabadas por acción de partículas de arena.
6. En ninguno de los pozos, se han presentado recalentamiento en los motores por baja refrigeración.
7. Los volúmenes de fluídos obtenidos con el sistema electrocentrífugo, se encuentran comprendidos en el rango de operación, lo que in dica una buena eficiencia de las bombas.

IX. RECOMENDACIONES

1. *Asignar una unidad de servicio de pozos (Pulling Unit) al yacimiento en evaluación a fin de evitar producción diferida en los pozos con bombeo electrocentrífugo, reduciendo los gastos de re-instalación de equipos de subsuelo.*
2. *Instalar una Central Eléctrica a fin de optimizar el consumo energético del sistema de bombeo electrocentrífugo, reduciéndose los gastos operativos.*
3. *Construir y proporcionar medio de transporte a las locaciones de los pozos, a fin de garantizar el buen manipuleo de los equipos de subsuelo.*
4. *Analizar el grado de corrosividad del agua de formación de los reservorios para determinar su efecto en los sellos de los protectores en nuestras operaciones (tipo 66P).*
5. *Instalar equipos de control de arena frente a las formaciones Vivian en los pozos que producen de ésta.*
6. *Evaluar con un proyecto piloto la aplicación de este sistema en los yacimientos en recuperación secundaria con inyección de agua en el Noroeste del Perú.*

X. APENDICE

Anexos

- N° 1 Distribución de pozos en el yacimiento
- N° 2 Bombas electrocentrifugas instaladas
- N° 3 Bombas electrocentrifugas malogradas
- N° 4 Resumen de fallas de equipo de subsuelo - Bombeo electrocentrifugo.
- N° 5 Incremento de producción con equipo de bombeo electrocentrifugo
- N° 6 Inversión de equipo de bombeo electrocentrifugo
- N° 7 Costos operativos del sistema del bombeo electrocentrifugo
- N° 8 Análisis económico del proyecto de bombeo electrocentrifugo

Figuras

- N° 1 Columna estratigráfica
- N° 2 Esquemas de completación
- N° 3 Diagrama de instalación del sistema de bombeo artificial electrocentrifugo.
- N° 4 Comportamiento productivo de los pozos con bombeo electrocentrifugo.

ANEXO 1

DISTRIBUCIÓN DE POZOS EN EL YACIMIENTO

<u>POZO</u>	<u>COMPLETACIÓN</u>	<u>CONDICIONES INICIALES DE PRODUCCIÓN</u>			<u>CONDICIONES ACTUALES (FEB. 81)</u>	
		<u>FECHA</u>	<u>BOPD</u>	<u>METODO</u>	<u>BOPD</u>	<u>METODO</u>
1PX-24	Mayo, 1972	Febrero 1978	25	ST	0	Muerto
2PX-24	Marzo, 1973	Febrero 1978	104	ST	269	B.E.
3PX-24	Octubre 1975	Febrero 1978	427	ST	0	Muerto
4PX-24	Noviembre 1975	Marzo 1978	101	ST	0	Muerto
5PX-24	Enero 1976	Marzo 1978	483	ST	0	Muerto
6PX-24*	Marzo 1976	-	-	-	-	-
7PX-24	Mayo 1977	Febrero 1978	439	ST	418	B.E.
8PX-24	Julio 1978	Febrero 1978	526	ST	620	B.E.
9PX-24	Enero 1978	Marzo 1978	280	ST	0	Muerto
10PX-24	Diciembre 1977	Octubre 1978	138	ST/SF	726	B.E.
11PX-24*	Marzo 1978	-	-	-	-	-
12PX-24	Julio 1978	Julio 1978	2000	ST/SF	0	B.E. (1)
13PX-24	Agosto 1978	Agosto 1978	1200	ST/SF	0	B.E. (1)
14PX-24	Febrero 1979	Febrero 1979	21	ST	773	B.E.
15PX-24*	Enero 1980	-	-	-	-	-
16PX-24	Abril 1980	Abril 1980	1200	ST	1350	B.E.
17PX-24	Julio 1980	Julio 1980	499	ST/SF	316	B.E.

* Pozo abandonado

S.T. Surgente por Tubos

S.F. Surgente por Forros

B.E. Bombeo Electrocentrífugo

(1) Bomba Electrocentrífuga Inoperativa.

ANEXO 2

BOMBAS ELECTROCENTRIFUGAS INSTALADAS

TIPO	B O M B A		MOTOR HP	POZO	FECHA DE INSTALACION	PRODUCCION ACTUAL	
	N° ETAPAS	RANGO (BPD)				PETROLEO	AGUA
1) D-40	72	950-1800	30	7PX-24	20.07.79	418	856
2) D-40	147	950-1800	60	14PX-24	01.05.80	773	626
3) D-82	89	2100-3500	50	8PX-24	14.06.80	620	557
4) D-55	111	1400-2450	60	10PX-24	20.07.80	726	1,496
5) A-25	151	660-1100	22.5	2PX-24	25.07.80	269	116
6) D-82	140	2100-3500	80	13PX-24	30.08.80	Inoperativa	
7) E-127	25	2750-5300	50	12PX-24	04.09.80	Inoperativa	
8) I-42B	39	1075-1900	40	16PX-24	08.09.80	1,350	282
9) D-20	133	550- 890	30	17PX-24	15.09.80	316	131

ANEXO 4

RESUMEN DE FALLAS DE EQUIPOS DE SUBSUELO - BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

	<u>1979</u>	<u>1980</u>	<u>1981 (Feb.)</u>
Bombas operando	11	12	9
Bombas malogradas	6	5	2
Tipo de falla	-	-	-
Cable principal	-	-	-
Cable extensión	-	-	-
Bomba	1	2	-
Motor - Protector	2	2	-
Bomba - Motor - Protector	3	1 (1)	2

(1) Equipo desenroscado de la tubería, cayó al fondo del pozo.

ANEXO 5

INCREMENTO DE PRODUCCION CON EQUIPO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

AÑO/MES	1 9 7 9		1 9 8 0		1 9 8 1		TOTAL
	BPD	BPM	BPD	BPM	BPD	BPM	
Enero	-	-	3,598	111,538	5,618	174,158	
Febrero	-	-	2,453	71,137	4,901	137,228	
Marzo	446	13,826	1,341	45,571	-	-	
Abril	6,864	205,920	1,355	40,650	-	-	
Mayo	4,172	129,332	3,658	113,398	-	-	
Junio	3,962	118,860	2,837	85,110	-	-	
Julio	4,579	141,949	4,775	148,025	-	-	
Agosto	3,632	112,592	6,077	188,387	-	-	
Setiembre	4,348	130,440	8,888	266,640	-	-	
Octubre	4,138	124,140	8,015	248,465	-	-	
Noviembre	4,469	134,070	7,548	226,440	-	-	
Diciembre	4,018	124,558	5,778	179,118	-	-	
		1'235,687		1'624,479		311,386	3'171,552
Nº de días	306		366		59		731
Promedio (BOPD)							4,338.6

ANEXO 6

INVERSION DE EQUIPO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

(M\$)

POZO	AÑO 1978			AÑO 1979			AÑO 1980		
	EQUIPO	INSTALAC.	REPARAC. Y REINSTALAC.	EQUIPO	INSTALAC.	REPARAC. Y REINSTALAC.	EQUIPO	INSTALAC.	REPARAC. Y REINSTALAC.
12PX-24	78.5	0	0	0	160.0	298.2	0	0	99.4
13PX-24	78.5	0	0	0	160.0	453.6	0	0	113.4
14PX-24	78.5	0	0	0	160.0	239.3	0	0	119.7
7PX-24	0	0	0	40.0	136.3	0	0	0	0
8PX-24	0	0	0	48.0	0	0	0	146.5	0
10PX-24	0	0	0	45.0	158.5	143.0	0	0	0
17PX-24	0	0	0	60.0	0	0	0	175.0	0
2PX-24	0	0	0	0	0	0	39.0	116.8	0
16PX-24	0	0	0	0	0	0	53.0	175.0	0
	<u>235.5</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>193.0</u>	<u>774.8</u>	<u>1,134.1</u>	<u>92.0</u>	<u>613.3</u>	<u>332.5</u>

TOTAL 1978	235.5
TOTAL 1979	2,101.9
TOTAL 1980	<u>1,037.8</u>
GRAN TOTAL	3,375.2

ANEXO 7

COSTOS OPERATIVOS DEL SISTEMA DEL BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO (M\$)

<u>ANO/POZO</u>	<u>1979</u>	<u>1980</u>	<u>1981 (FEB.)</u>
17PX-24	-	38.3	21.9
16PX-24	-	43.8	21.9
14PX-24	87.6	76.7	21.9
13PX-24	82.1	41.1	-
12PX-24	63.5	32.9	-
10PX-24	60.4	45.8	18.3
8PX-24	-	59.5	18.3
7PX-24	45.8	109.8	18.3
2PX-24	-	45.8	18.3
TOTAL	339.4	493.7	138.9 = 972

NOTA: Incluye:

- Mantenimiento de equipo de superficie : 20 %
- Combustible : 50 %
- Supervisión : 5 %
- Personal subalterno : 10 %
- Apoyo de helicópteros : 15 %

ANEXO 8

ANALISIS ECONOMICO DEL PROYECTO DE BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

(M\$)

<u>ANOS</u>	<u>PRODUCC. (BLS)</u>	<u>INGRESOS</u>	<u>COSTO DE OPERACION</u>	<u>DEPRECIAC.</u>	<u>INGRESOS ANTES IMP.</u>	<u>INGRESOS DESP. IMP.</u>	<u>INVERSION</u>	<u>FLUJO DE EFECTIVO</u>
0	-	-	-	-	-	-	(235.5)	(235.5)
1	1'235,687	22,424	339.4	91.8	21,992.8	10,996.4	(2,101.9)	8,986.3
2	1'624,479	51,837	493.7	1,076.7	50,266.6	25,133.3	(1,037.8)	25,172.2
3	311,386	12,202	138.9	101.9	11,965.2	5,982.6	-	6,084.5
	3'171,552	86,467	972.0	1,270.4	84,224.6	42,112.3	3,375.2	40,007.5

DCF = Mayor de 1,000 % PERIODO DE RETORNO = 3.2 meses VALOR PRESENTE AL 20 % = 28,255 M\$

LINEAMIENTOS ECONOMICOS

Inversión :	Equipo	520.5 M\$
	Instalación	1,388.1 M\$
	Reparac. y Reinstalac.	1,466.6 M\$
	TOTAL	3,375.2 M\$

Gastos de Operación:	972.0 M\$
Depreciación :	En base a la producción, en 3 años
Producción :	3'171,552 barriles de incremento (4,338.6 BOPD promedio)
Precio del crudo :	18.20 \$/bl. en 1979
	31.91 \$/bl. en 1980
	39.20 \$/bl. en 1981
Impuestos :	50 %

BIBLIOGRAFIA

1. *"Oasis Submersible Lift Operations"*
by Homer N. Mead - SPE-AIME - 1975
2. *"Handbook for Oilfield Subsurface Electrically Driven Pumps"*
by Centrilift Inc. - Second Edition
3. *"TRW Reda Pumps"*
by Service Manual - Nov. 1978

COLUMNA ESTRATIGRAFICA

ESCALA 1=20,000

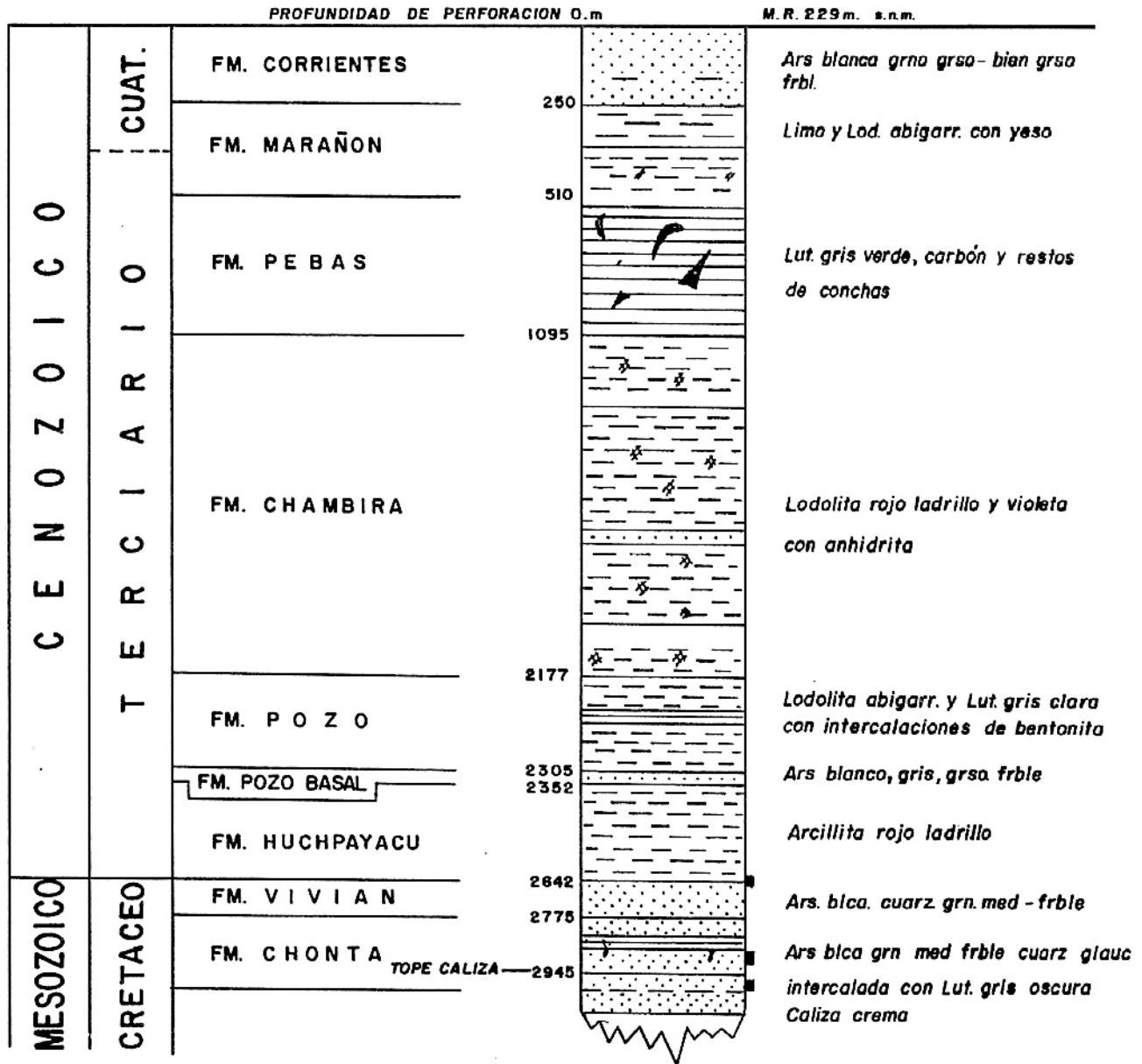


FIG. No. 1

ESQUEMAS DE COMPLETACION DE POZOS

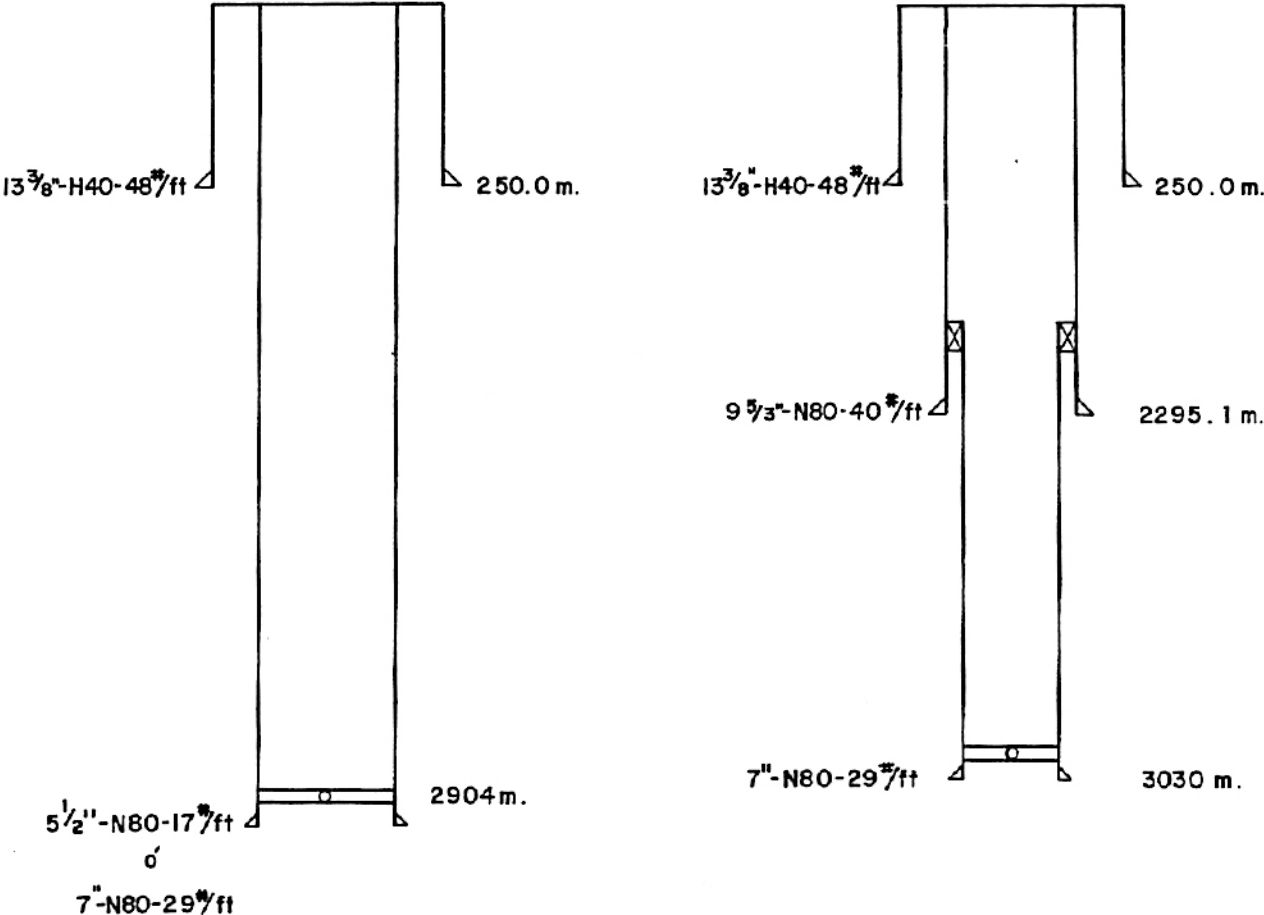


FIG. N° 2

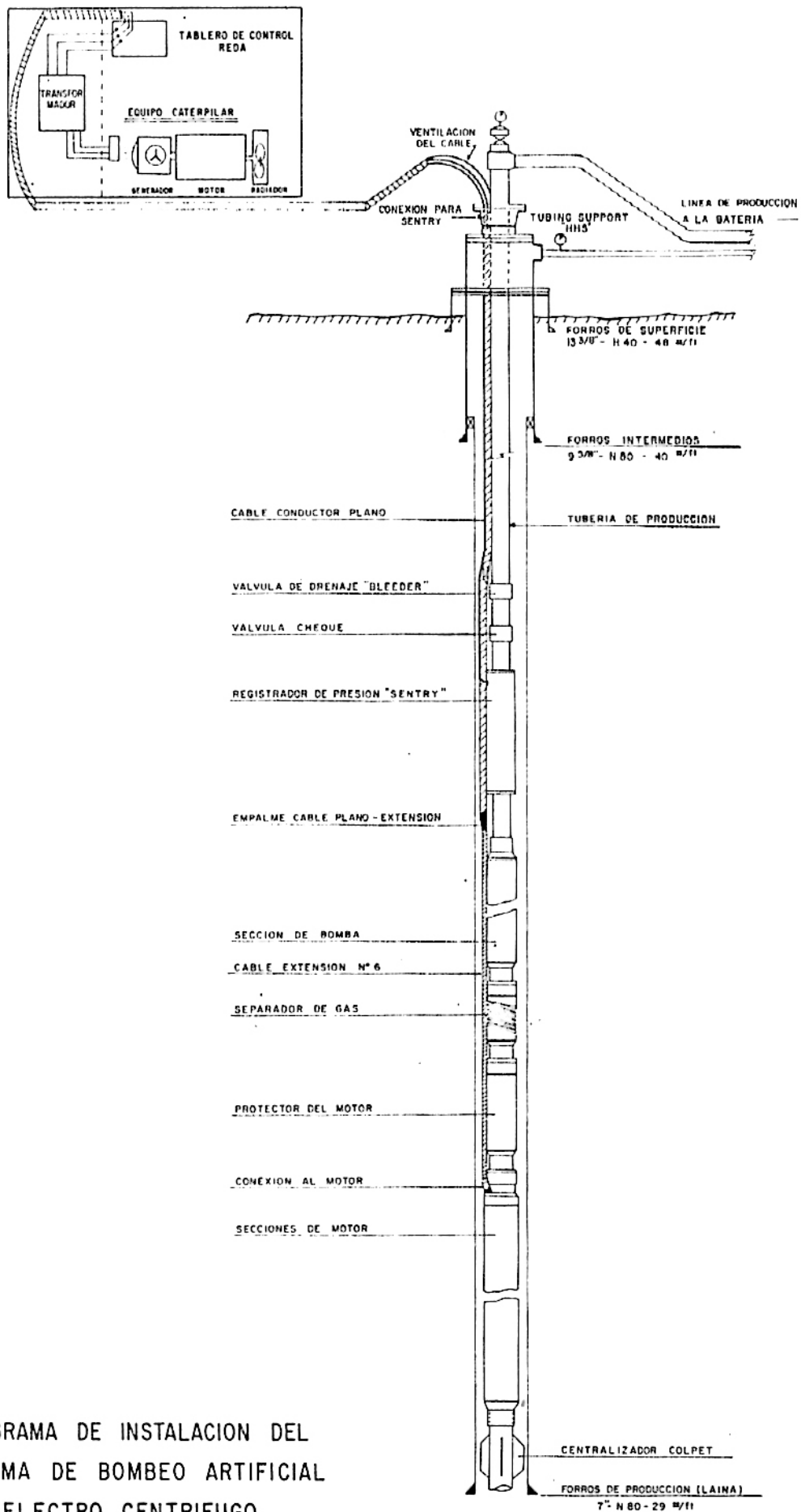


DIAGRAMA DE INSTALACION DEL SISTEMA DE BOMBEO ARTIFICIAL ELECTRO CENTRIFUGO

COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DE LOS POZOS CON BOMBEO ELECTROCENTRIFUGO

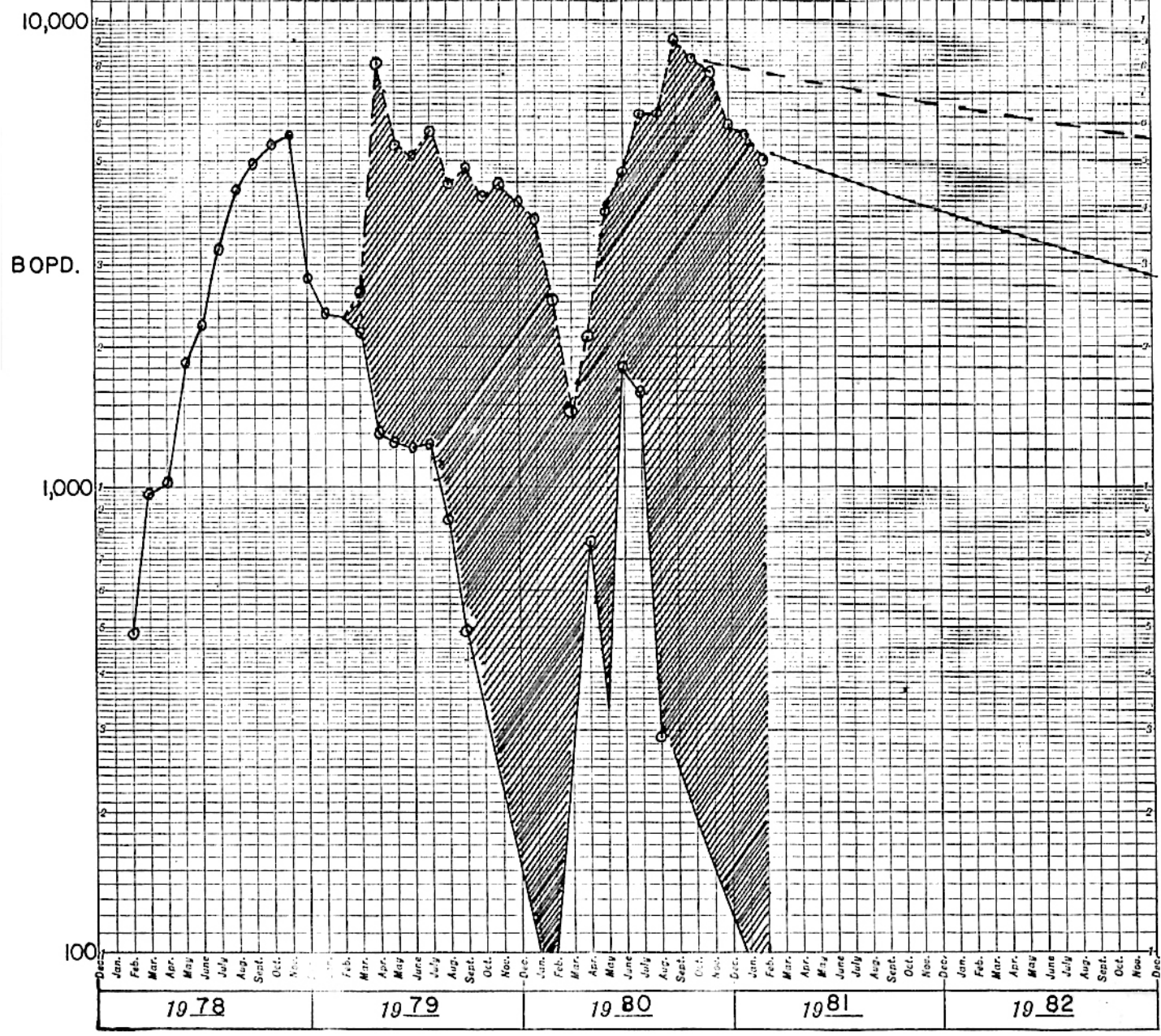


FIG. N° 4