

# **Universidad Nacional de Ingeniería**

**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA  
DE PETRÓLEO Y PETROQUÍMICA**



## **“ Diseño y Economía de la Electrificación del Campo de Producción Barrancos en Petróleos del Perú - Ono ”**

**T E S I S**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE PETRÓLEO**

**RUPERTO INGA SOSA**

**PROMOCION 1961**

**LIMA • PERU • 1979**

DISEÑO Y ECONOMIA DE LA ELECTRIFICACION DEL  
CAMPO DE PRODUCCION BARRANCOS DE PETROLEOS  
DEL PERU - ONO

- I. OBJETIVOS
- II. INTRODUCCION
- III. DISEÑO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCION
  1. Evaluación de Cargas y Selección de Motores.
  2. Cálculos de Caída de Voltaje, Diseño y Construcción de Redes.
  3. Selección del Generador Eléctrico
- IV. ANALISIS ECONOMICO
  1. Lineamientos Económicos
  2. Cálculo de la Tasa de Rentabilidad

V . CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI. GRAFICOS Y TABLAS

VII. BIBLIOGRAFIA.

\* \* \*

DISEÑO Y ECONOMIA DE LA ELECTRIFICACION DEL  
CAMPO DE PRODUCCION BARRANCOS DE PETROLEOS  
DEL PERU - ONO

I. O B J E T I V O S

1. Probar la factibilidad técnico económica para electrificar grupos de 20 a 40 pozos utilizando un generador eléctrico portátil, de potencia reducida.
2. Aprovechar y usar los resultados de este proyecto piloto en otros proyectos de electrificación futuros en áreas aún no electrificadas

II. I N T R O D U C C I O N

En los campos de producción de petróleo del noroeste peruano el sistema de levantamiento artificial más popular es el de bombeo mecánico tipo balancín. En 1974 de un total de 2170 pozos en producción, 1580 (73%) producían con este sistema,

de los cuales, 1280 eran accionados por máquinas a gas de 9 a 42 HP y 300 por motores eléctricos de corriente alterna de 3 a 25 HP, produciendo un total de 26,000 barriles de petróleo por día, que representaba el 78.5 % de la producción de petróleos del Perú en el Nor-Oeste.

Para optimizar las operaciones de producción, reduciendo costos de inversión, de operación y gastos de mantenimiento, Petróleos del Perú, progresivamente ha electrificado pozos ubicados en áreas cercanas a campos ya electrificados, aprovechando energía eléctrica disponible.

Sin embargo, después del año 1972, la extensión de proyectos de electrificación fue forzosamente suspendida, debido a la falta de disponibilidad de energía eléctrica. Este hecho sumado a la escasez en el mercado mundial de motores a gas de baja potencia y a la necesidad operativa de reactivar pozos de producción marginal, llevó a petroperú, en el año de 1971 a concebir la idea de electrificar el

campo de producción de Barrancos, utilizando como central eléctrica un generador eléctrico portátil de 135 Kw, para servir a 21 pozos de dicha zona.

El éxito técnico económico logrado con este proyecto justificó plenamente la electrificación de otras áreas, como las de carrizo, yegua, hualtacal, donde 70 pozos han sido electrificados.

El campo de producción Barrancos está ubicado en un área de producción primaria, distante 70 Km. al norte de la ciudad de Talara. Veintiun pozos de este reservorio, que operaban con unidades de bombeo accionadas por motores a gas de 10 a 32 HP fueron seleccionados para electrificarlos. La producción total de estos pozos era de 365 barriles de petróleo por día con una relación gas-petróleo de 600 pies cúbicos por barril y una profundidad promedio de 3,365 pies.

La construcción del proyecto empezó en Setiembre de 1974 y terminó en Enero de 1975, habiendo al-

canzado una tasa de rentabilidad de 49% DCF.

### III. DISEÑO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCION

Este Capítulo se refiere al cálculo de las - cargas de las unidades de bombeo instaladas en cada pozo, selección de motores, conductores, generador e lectrico, y otros materiales y dispositivos usados en el proyecto de electrificación.

Las siguientes etapas se siguieron para dise- ñar el sistema de distribución.

- i. Se determinó la cantidad total de energía en kilowatts requerida, en base al caballaje to- tal necesario para accionar cada uno de los - 21 pozos por electrificar. La relación de es- tos pozos se indica en la tabla N° 1, en la cual también se muestran, la producción en ba- rriles por día, tipo de unidad y motor reque-

rído, profundidad de bombeo, tipo de bomba y ciclo de operación.

- ii. Se hizo un trazado gráfico del área por electrificar que se indica en la Fig. N° 1 en la cual se muestran las cargas de cada pozo, las vías de acceso y características del terreno.
- iii. Se seleccionó el uso de voltaje de 480 voltios por ser el mas usual en operaciones de producción, con bombeo mecánico.
- iv. Se determinó el centro de carga o ubicación del generador y la ruta de las redes de distribución mas apropiadas, calculando la caída de voltaje de la carga mas alejada al generador, el cual se ubicó equidistante de grupos de cargas de similar magnitud, y lo mas alejado y práctico posible.
- v. Se estimó las cargas esperadas en el futuro en un 100% de las cargas actuales.



## 1. EVALUACION DE LAS CARGAS Y SELECCION DE MOTORES.

Las cargas de las unidades de bombeo se determinaron en base a las pruebas de producción diaria de cada pozo, la profundidad de bombeo, diámetro del pistón de la bomba y ciclo de bombeo. Con esta información y aplicando el método de diseño del API - (Instituto Americano del Petróleo), según la norma - RP-II, se calculó los caballos de potencia al vástago pulido (PRHP) requeridos para cada pozo. Un modelo de estos cálculos se muestra en la Fig. N° 2.

Para determinar el tamaño del motor requerido para cada pozo, se aplicó la fórmula:

$$HP = \frac{PR.HP}{7} \times 1.25$$

En donde PRHP son los caballos de potencia al vástago pulido que incluye el caballaje hidráulico mas el

de fricción de subsuelo; 0.7 es la eficiencia mecánica asumida de la unidad de bombeo que considera las pérdidas por fricción interna del equipo de bombeo - de superficie; 1.25, es el factor de carga cíclica aplicable debido a la naturaleza cíclica de las cargas manipuladas por las unidades de bombeo.

Luego, aplicando el método de adición de cargas individuales se sumó y totalizó todas las cargas determinándose que se requerían 70 HP o 53-Kw.

Por razones de estandarización y necesidades de energía futuras se seleccionaron motores de 5, 10 y 15 HP, del tipo Jaula de ardilla, diseño nema C, de 1200 RPM, teifásico, a prueba de goteo abierto, de alto torque de arranque (200 - 250%), de resbalamiento normal (L 5%), 6 polos, para operar con corriente alterna de 440 voltios y 60 ciclos.

Se eligió estos motores debido a su bajo costo, disponibilidad de stock, confiabilidad de servi-

cio y porque se adaptan mejor a las necesidades de -  
carga de pozos de petróleo.

En total se utilizaron 18 motores de 5 HP, 1  
motor de 10 HP., y 2 motores de 15 HP. que totalizó  
una potencia instalada en motores de 130 HP., o sea  
185 % de la potencia teórica requerida para operar -  
los 21 pozos del proyecto.

## 2. CALCULO DE LA CAIDA DE VOLTAJE, DISEÑO Y CONSTRUCCION DE REDES.

Para diseñar las redes de distribución se efect  
tuó el cálculo eléctrico para determinar la pérdida-  
de tensión en cada red, determinándose las secciones  
respectivas de las líneas, su resistencia mecánica, -  
el número de postes requeridos 75 y otros dispositi  
vos necesarios para la electrificación de acuerdo a  
la ubicación y distribución de las cargas se diseñó,  
4 redes principales de distribución, que se pueden a  
preciar en las Fig. N° 3 y Fig. N° 4, cada una de --

las cuales suministra energía eléctrica a los pozos-  
siguientes:

<u>RED N°</u>	<u>P O Z O S N°</u>	<u>H.P. INSTALADOS</u>
A	2296, 2531,1289,2212,2216 2157,2131	40
B	2037,2158,2159,2129	30
C	1685,1705,2069,2132,2128	35
D	2161,2209,2211,299,2156	35

Los diámetros de los cables se determinaron--  
para obtener mínima caída de voltaje, máxima eficien-  
cia en la transmisión de energía, mínima fluctuación  
en el factor de potencia, espaciamiento económico de  
postes y para proveer la máxima seguridad por daños-  
que puedan originarse por efectos ambientales: vien-  
to y/o lluvia teniendo en cuenta lo anterior.

El cálculo de la pérdida de tensión se efec -  
tuó considerando la condición más crítica, esto es  
cuando el motor mas alejado del generador, está arran-  
cando mientras que todos los otros motores de una -

red están operando. En estas condiciones la pérdida de tensión máxima permisible para fines de diseño puede variar entre 15% y 20%. Los cálculos eléctricos para el diseño que nos ocupa y cuyo desarrollo - se muestra en la Tabla N° 2, arrojaron caídas de voltaje de 11, 7.5 7.5 y 11.3% para los ramales A, B, C y D, respectivamente, que están por debajo del límite máximo permisible.

En la Fig. N° 4 se muestra un diagrama de corriente a carga plena, en amperios, requerida para cada pozo y por ramal, en el cual también se indican los calibres de los conductores seleccionados, las distancias de las cargas, que sirvieron en base para desarrollar la Tabla N° 2, considerando que se seleccionó conductores de cobre. El sistema de distribución seleccionado fue el de líneas aéreas montadas - en postes de fierro de 9.15 Mt. de alto (Ver Fig. N° 5), espaciados 80 metros y la caída de voltaje se - calculó aplicando la fórmula para corriente eléctrica alterna trifásica:

$$\Delta V = \frac{1.73 \times I \times L \times \cos \phi}{\gamma \times S}$$

En donde:

$\Delta V$ , Caída de voltaje en voltios

I, Corriente en Amperios

L, Longitud en Metros

$\gamma$ , Conductividad, 58 cobre

S, Sección del Conductor en  $MM^2$

$\cos \phi$ , Factor de Potencia

Esta fórmula se aplicó iterativamente para cada tramo de los ramales, considerando los siguientes criterios de diseño:

- i. La corriente en amperios para un motor operando, es igual a la corriente admisible a carga plena, es decir cuando el factor de potencia es igual a 0.8. Esta corriente se obtuvo de información del fabricante:

7.5 Amperios para motores de 5 HP

14.1 Amperios para motores de 10 HP.

21.0 Amperios para motores de 15 HP.

También se puede estimar la corriente a carga plena, aplicando la fórmula:

$$I = \frac{H.P \times 746}{1.73 \times V \times \cos \phi \times \eta}$$

En donde:

HP = Potencia en caballos de fuerza

V = Tensión en voltios

$\eta$  = Eficiencia del motor

- ii. La corriente en amperios para un motor arrancando es igual a 5 veces la corriente admisible a carga plena.
- iii. Se asumió un factor de potencia promedio igual a 0.80 para todos los motores trabajando y un factor de potencia igual a 0.3 para motores - en condición de arranque.
- iv. Las secciones de los conductores de cobre seleccionados se obtuvieron de la Tabla N° 3.

Las longitudes de los ramales fueron de 1,200 metros para el ramal "A", y 880 metros para los ramales B, C y D. Se utilizó conductores de cobre de calibres N° 1/0, N° 2 y N° 4 AWG para las redes de distribución; N° 4/0 AWG para los conductores de salida del generador A los 4 postes principales de distribución, y N° 6 AEG para los conductores de los postes de servicio a los motores instalados en cada pozo.

Todos los conductores aereos se instalaron en posición vertical a lo largo del eje del poste espaciados 2.75 cm entre si, utilizando tres aisladores tipo carrete. En puntos críticos o de cambio de dirección se instaló vientos de cable de acero con anclajes para aliviar el esfuerzo transmitido a los postes (ver Fig. N° 6 y Fig. N° 7). A través del sistema de distribución se instaló líneas a tierra para disipar la electricidad estática.

En la Fig. N° 8 se puede apreciar la instalación a tierra efectuada en un pozo electrificado, en



la cual utilizando un cable de cobre de calibre N° 4 AWG, se conectó al tubo revestidor del pozo, la armadura del motor, la base de la unidad de bombeo y el cuadro de control. Esta conexión se hizo de acuerdo a normas API para protección y seguridad del personal operativo.

En cada uno de los postes de los cuatro ramales de distribución se instaló cuadros de control eléctrico (V en AG N° 9 y Fig. N° 10) de 50 HP, 125 amperios, 600 voltios, con el fin de poner en servicio cada ramal o aislar cualquiera de ellos para facilitar operaciones de reparación o mantenimiento sin tener que parar todo el sistema.

En cada pozo se delimitó un área de 45 metros de radio para acceso de equipos y se instaló un poste de servicio en el cual se montó el cuadro de control del motor. Cada control estuvo provisto de un relé de arranque secuencial, para evitar que después de un corte de energía, arranquen dos o más motores al mismo tiempo evitando así la caída brusca de voltaje la cual puede dañar los motores. También cada-

control estuvo provisto de un programador de tiempo- de bombeo, para evitar las condiciones de sobrebombeo y aumentar la vida de servicio de las bombas de subsuelo de los pozos. Además cada control tiene -- instalado dispositivos de protección como relé de sobrecarga térmico, relé de bajo voltaje para dar protección confiable y parar el motor cuando se producen condiciones de bajo voltaje, apertura de fases o sobrecargas en el motor.

La construcción de todas las redes del proyecto fue ejecutada por personal de Petroperú y se instalaron de acuerdo a prácticas estándar de instalaciones eléctricas. En la Fig. N° 11 se muestra el plano completo de las redes de distribución de energía eléctrica.

### 3. SELECCION DEL GENERADOR ELECTRICO.

La potencia del generador eléctrico se determinó teniendo en consideración la potencia necesaria para electrificar las 21 unidades de bombeo (53 kilo

watts) y estimando en 100% de las cargas actuales, - las cargas esperadas en el futuro; además también se incluyó las pérdidas de energía en las líneas de -- transmisión, eficiencias del generador y motor y potencia requerida para iluminación del generador y pa- ra suministro de energía para los motores del siste- ma de enfriamiento y del gobernador del motor. En - base a estas cargas se determinó instalar un genera- dor de 135 Kw, 1800 RPM, 3 fases, 480 volts, 60 Her- tz, 0.8 factor de potencia, accionado por un motor a gas de 6 cilindros de 1.87 cm x 2.36 cm., 4 tiempos, 1800 RPM, relación de compresión 8:1 con turbo ali- mentadores accionados con la energía de los gases de escape y con sistema de enfriamiento adicional del - aire de admisión.

El generador y motor estan acoplados directa- mente y montados en una base de fierro común.

El generador está equipado con un regulador - de voltaje, transformador de corriente; interruptor-

de circuito, teniendo otros dispositivos de protección en el panel de control.

El motor está equipado con dispositivos de protección de sobrevelocidad, alta temperatura de agua, bajo nivel de agua, baja presión de aceite lubricante y vibración. El sistema de arranque es del tipo neumático con gas natural comprimido regulado a 120 PSIG, para lo cual se utilizó gas de alta presión del sistema de bombeo neumático de la zona. El gas combustible para el motor fue suministrado del sistema de gas de baja presión (20 PSIG) de la zona, habiéndose probado un consumo de 17 pies<sup>3</sup>/HP x hora.

El panel de control eléctrico de 135 Kw, 480-volt. 60 H<sub>2</sub> está equipado con lo siguiente:

- 1 voltímetro de rango 0-500 volts
- 1 amperímetro de rango 0-360 Amp.
- 1 Frecuencímetro de rango 55-65 H<sub>z</sub>.
- 1 Wattímetro, rango 0-200 Kw.

- 1 Interruptor magnético
- 1 Conmutador de voltaje
- 2 Transformadores de corriente
- 1 Interruptor de sincronización
- Fusibles y barra de cobre

El sistema de enfriamiento adicional está com puesto por un radiador y un ventilador accionado por un motor eléctrico de 1.2 HP, 440 volts, 1700 RPM, - 60 H<sub>2</sub>.

Para accionar el gobernador del motor y para el sistema de alumbrado del generador se instaló cer ca al panel de control un transformador de corriente eléctrica de 440 voltios a 110 voltios, 1 KVA, 1 fase.

El conjunto generador-motor, sistema de enfria miento adicional y tablero de control se montaron en bases de concreto de 1.5 MT x 3.7 MT x 0.6 Mt. 1.2 Mt x 1.2 MT x 0.6 MT, 1.2 MT x 2.1 MT x 0.6 MT, respectivamente.

- 1 Interruptor magnético
- 1 Conmutador de voltaje
- 2 Transformadores de corriente
- 1 Interruptor de sincronización
- Fusibles y barra de cobre

El sistema de enfriamiento adicional está com puesto por un radiador y un ventilador accionado por un motor eléctrico de 1.2 HP, 440 volts, 1700 RPM, - 60 H<sub>2</sub>.

Para accionar el gobernador del motor y para el sistema de alumbrado del generador se instaló cer ca al panel de control un transformador de corriente eléctrica de 440 voltios a 110 voltios, 1 KVA, 1 fase.

El conjunto generador-motor, sistema de enfria miento adicional y tablero de control se montaron en bases de concreto de 1.5 MT x 3.7 MT x 0.6 Mt. 1.2 Mt x 1.2 MT x 0.6 MT, 1.2 MT x 2.1 MT x 0.6 MT, respectivamente.

El generador con sistema de enfriamiento adicional, el tablero de control, así como una nulidad de bombeo electrificada, pueden apreciarse en las -- Fig. N° 12, Fig. N° 13 y Fig. N° 14.

#### IV. ANALISIS ECONOMICO

El análisis económico de este proyecto se efectuó aplicando el método de flujo de efectivo descontado (Discounted Cash Flow), habiendo alcanzado -- una tasa de rentabilidad DCF de 49 %, La inversión -- capital fue de S/. 5'000,000, los ingresos por año -- se calcularon en S/. 1'430,000, y en el primer año -- se obtuvo un ingreso adicional de S/. 4'500,000 debi -- do a la recuperación de 21 motores a gas y 40,000 -- pies de tubería de gas combustible.

1. LINEAMIENTOS ECONOMICOS PARA CALCULAR EL DCF  
DEL PROYECTO DE ELECTRIFICACION DE 21 POZOS  
DEL RESERVORIO BARRANCOS.

1) Ingreso anual por menores gastos de operación y  
mantenimiento : MS/. 735

i. Costo de operación y mantenimien-  
to de un motor a gas : MS/ 65

ii. Costo de operación y mantenimienu  
to de un motor eléctrico: MS/ 30

Diferencia:MS/ 35

Total: 21 x 35 = MS/ 735

2) Ingreso anual por diferir menor produc-  
ción debido al mayor número de horas de  
parada que registran los motores a gas-  
en relación a los eléctricos.

(4000  $\frac{\text{Bbl}}{\text{año}}$  x \$/ 176/Bbl) MS/ 704

3) Ingresos totales por año : MS/ 1,439

4) Ingreso en el primer año por mate-  
rial y equipo a recuperarse: MS/ 4,500



2. CALCULO DEL DCF PARA EL PROYECTO DE ELECTRI-  
FICACION DE 21 POZOS DEL RESERVORIO BARRANCOS

(M S/.)

Inversión	(5,000)		
Material a recuperarse		4,500	
Ingresos anuales		1,439	1,439
Depreciación		500	500
Ingresos antes de impuesto		939	939
Ingresos después de imp.		469.5	469.5
Flujo neto de efectivo	(5,000)	5,469.5	969.5

<u>AÑOS</u>	<u>F.E.</u>	<u>FACTORES DE DESCUENTO*</u>		<u>VALOR</u>	<u>PTE</u>
		<u>45%</u>	<u>50%</u>	<u>45%</u>	<u>50%</u>
1-10		2,1681	1.9653		
1	5469.5	.6897	.6667	3772.31	3646.51
2-10	969.5	1.4784	1.2986	1433.31	1258.99
				5,205.62	4,905.50

DCF = 49 %

\* Ver Tabla N° 4

- |     |  |     |            |
|-----|--|-----|------------|
| i)  | 40,000 de línea de 1" de gas<br>combustible (S/ 12.5/ft) | MS/ | 500        |
| ii) | 21 motores a gas (190 M/S/<br>motor)                     | MS/ | 4,000      |
| 5)  | Costo de la inversión capital:                           |     | MS/ 5,000  |
|     | Labor :  | MS/ | 500        |
|     | Materiales y Equipos :                                   |     | 3,800      |
|     | Recargos :   |     | 300        |
|     | Diseño :   |     | 100        |
|     | Imprevistos :  |     | <u>300</u> |
|     | Total M S/   |     | 5,000      |
| 6)  | Depreciación lineal de 10 años                           |     |            |
| 7)  | Impuestos 50 %   |     |            |

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES:

1. La electrificación de grupos de 20 a 40 pozos utilizando un generador eléctrico portátil, puede implementarse en otras áreas de producción debido a que este sistema ha probado ser eficiente y altamente rentable.
2. La electrificación de pozos habilita la disponibilidad de motores a gas, permitiendo poner en bomba otros pozos ubicados en áreas marginales.
3. La potencia nominal promedio instalada de las - 21 unidades de bombeo fue de 6.19 HP y la potencia consumida real promedio por pozo fue de 2.86 Kw ó 3.83 HP lo que dió un factor de carga de 62 %.
4. El bajo factor de carga se debió a que los motores están mecánicamente subcargadas debido a -- los factores de seguridad considerados en el

cálculo de la potencia requerida para las unidades de bombeo y al hecho de que todos los pozos electrificados fueron puestos en bombeo intermitente.

RECOMENDACIONES:

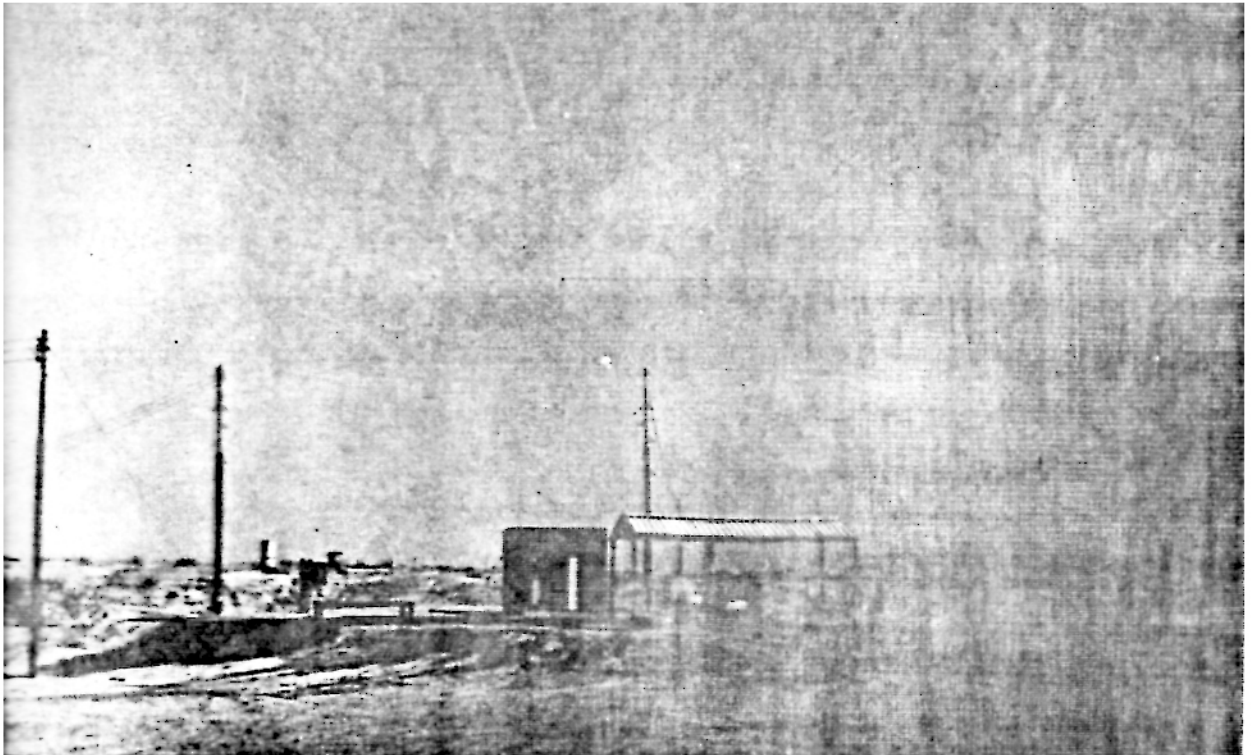
1. Continuar con la ejecución de proyectos de electrificación de pozos, en otras áreas aún no electrificadas.
2. Reducir progresivamente la compra de motores nuevos a gas.
3. En áreas seleccionadas para electrificar; incluir en el diseño la electrificación de las bombas de transferencia de crudo de las baterías de producción.
4. Evaluar este sistema de electrificación utilizando un generador de 500 Kw.

5. Utilizar motores eléctricos no convencionales de ultra alto deslizamiento y torque limitante, los cuales reducen la demanda de corriente durante el arranque, mejoran el factor de potencia, reducen el Peak Torque, la carga máxima sobre el varillon pulido y aumentan la producción.



Figura N°3

MINICENTRAL ELECTRICA DE 135 Kw - BARRANCOS  
PETROPERU - ONO





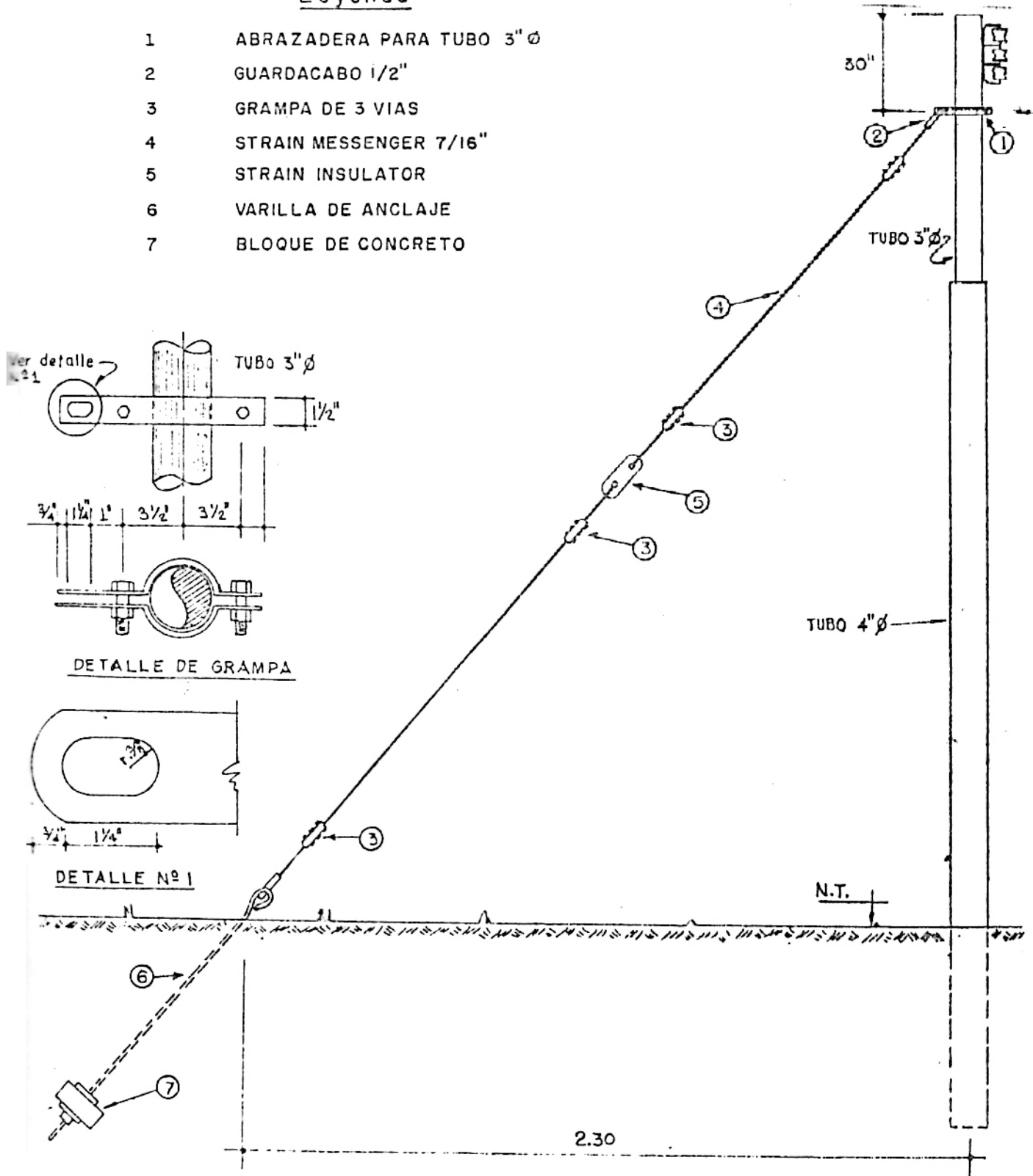




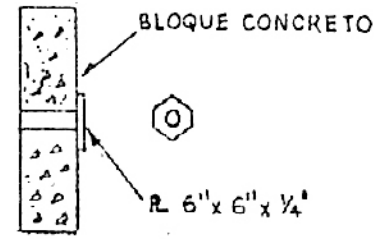
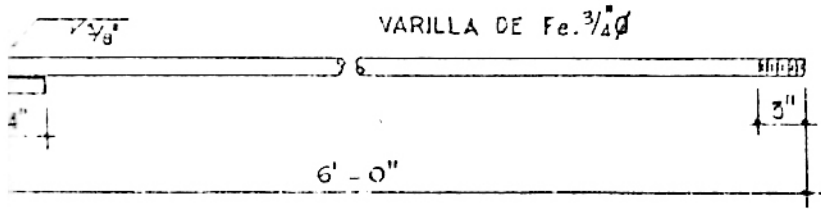
# VIENTO TIPO POSTE DE RED SECUNDARIA

## Leyenda

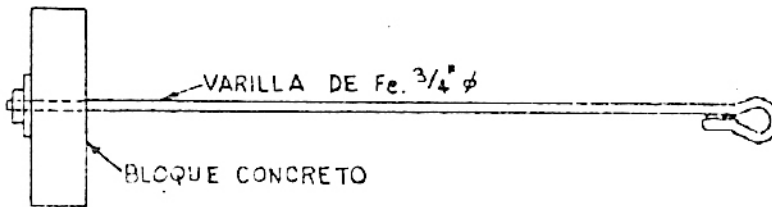
- |   |                                |
|---|--------------------------------|
| 1 | ABRAZADERA PARA TUBO 3" $\phi$ |
| 2 | GUARDACABO 1/2"                |
| 3 | GRAMPA DE 3 VIAS               |
| 4 | STRAIN MESSENGER 7/16"         |
| 5 | STRAIN INSULATOR               |
| 6 | VARILLA DE ANCLAJE             |
| 7 | BLOQUE DE CONCRETO             |



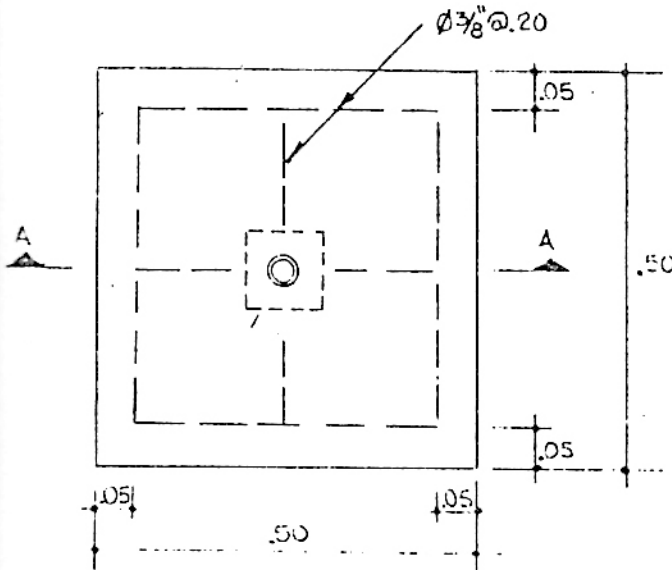
# ANCLAJE PARA POSTES DE RED SECUNDARIA



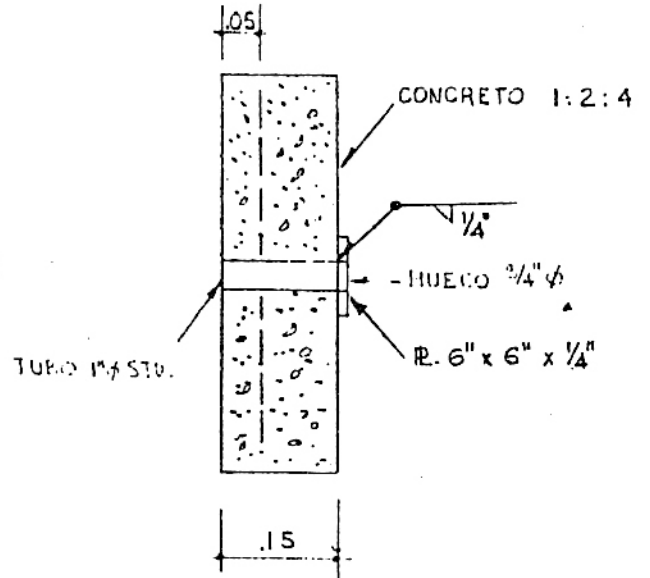
VARILLA DE ANCLAJE



VARILLA DE ANCLAJE

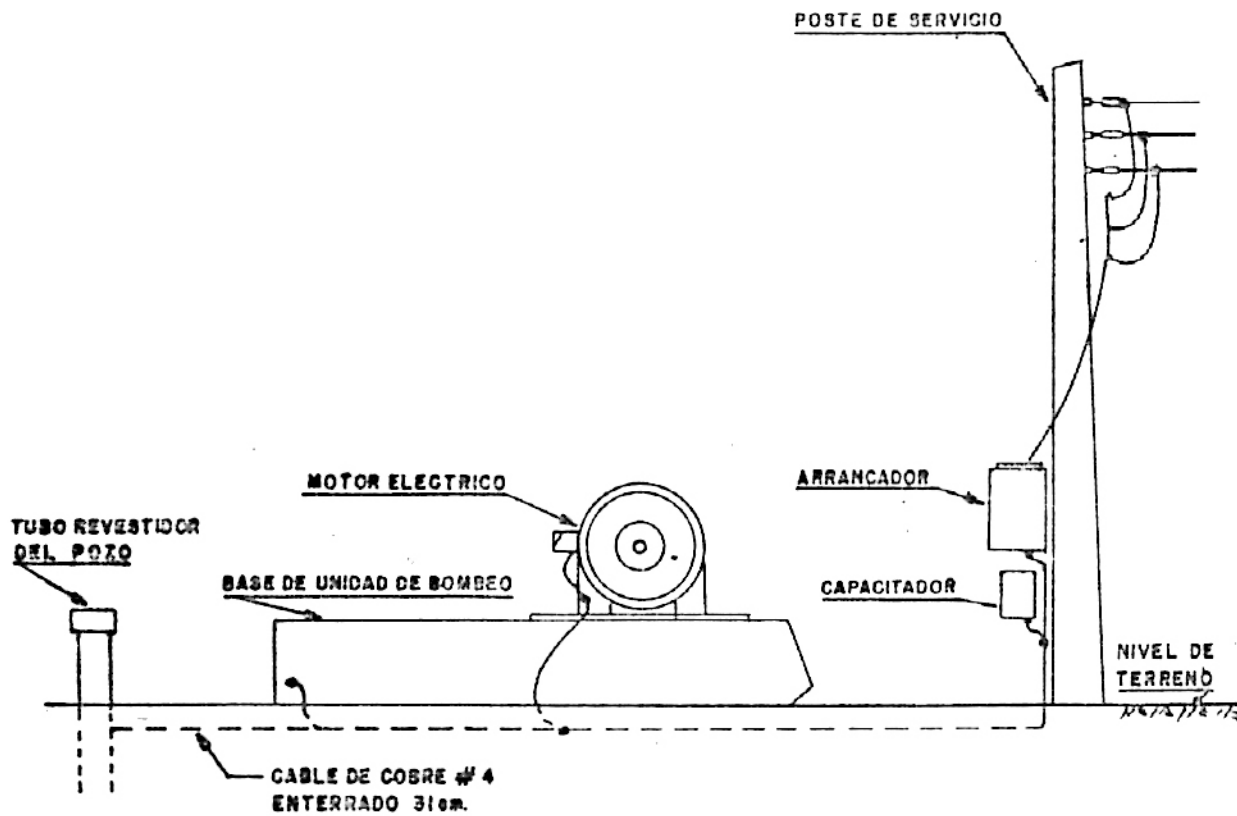


PLANTA



CORTE 'A-A'

BLOQUE DE CONCRETO



ESQUEMA DE INSTALACION A TIERRA DE UNA UNIDAD DE BOMBEO ELECTRIFICADA

FIG. # 8

FIG. # 9

# INSTALACION CONTROL ELECTRICO

## Leyenda

- 1 COVER 3773
- 2 CONDUIT 1"  $\phi$
- 3 CINTA BAND-IT
- 4 ABRAZADERA
- 5 CONTROL
- 6 ALAMBRE COBRE 6 AWG
- 7 CONECTOR
- 8 VARILLA COPPERWELD

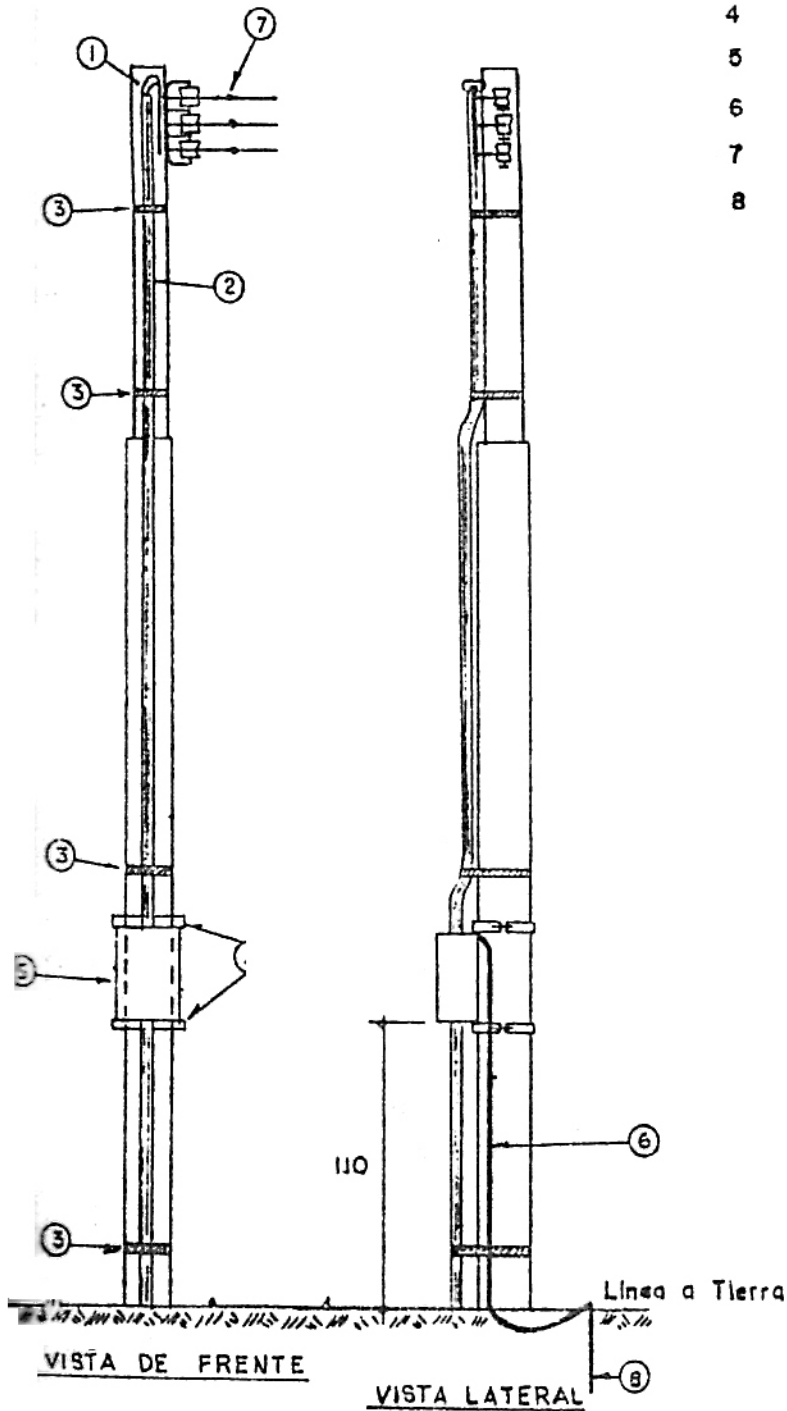
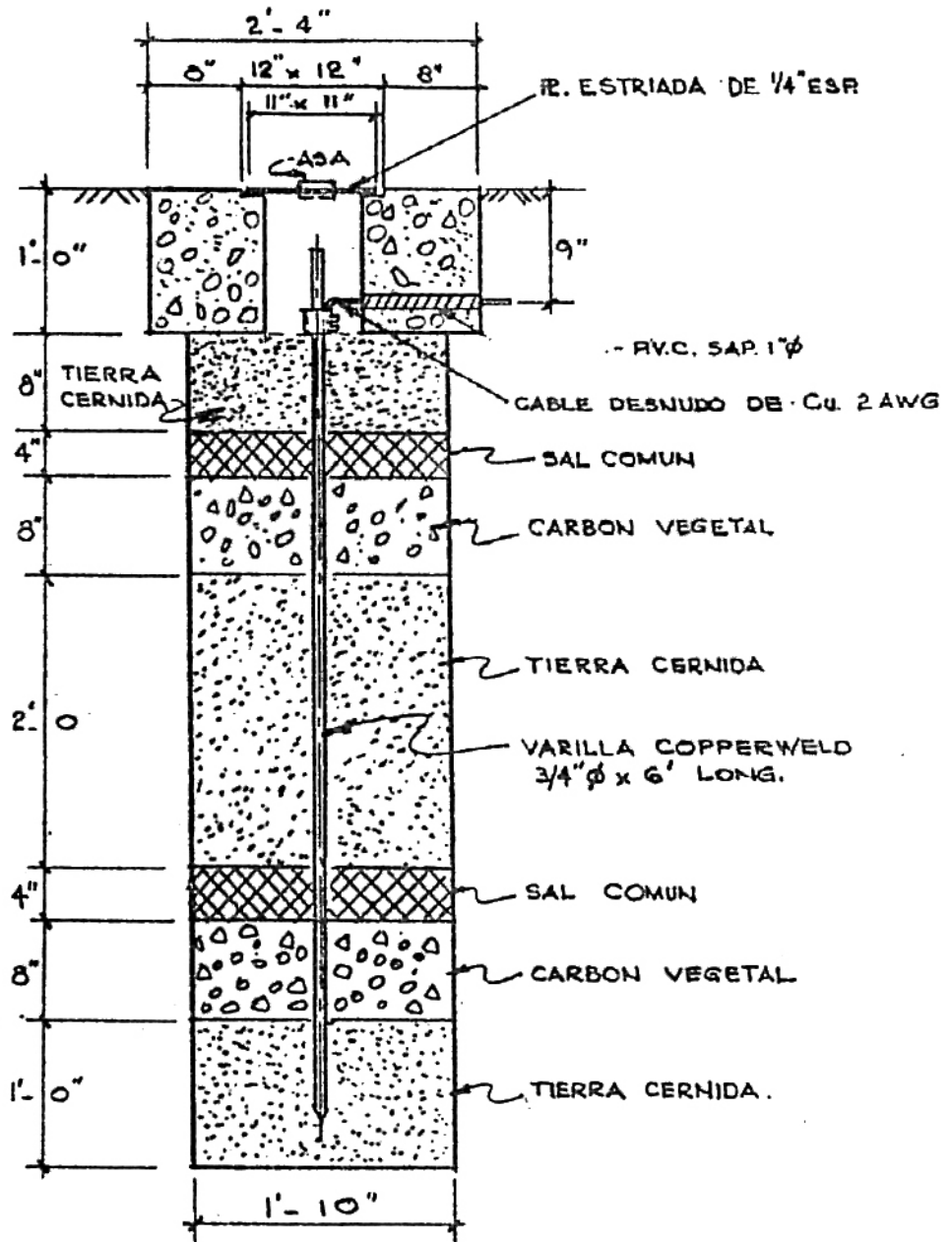


FIG. # 10 PUESTA A TIERRA



## **BIBLIOGRAFÍA**

Electrified oil production by J.K. Howell

Bethlehem Electrified Pumping Systems, Bokpet 1572 of Bethlehem Steel Corporation

Lowest Electric Power Costs are no accident, by John M. Stevenson

Gas engines or electric motors, by John M. Stevenson.

How to stretch your dollars in lease modernization by Jack F. Jerry