

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería de Petróleo



**Proyecto de Electrificación de 33 Pozos
que Producen con el Sistema Artificial de
Bombeo Mecánico con Motores a Gas en el
Yacimiento Merina Operaciones Nor - Oeste**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO PETROQUIMICO**

FEDERICO NOGUERA ZAVALA

Promoción 78 - 2

Lima - Perú - 1991

PROYECTO DE ELECTRIFICACION DE 33 POZOS QUE PRODUCEN CON
EL SISTEMA ARTIFICIAL DE BOMBEO MECANICO CON MOTORES A GAS
EN EL YACIMIENTO MERINA OPERACIONES NOR-OESTE.

SUMARIO

La zona donde se desarrolla este proyecto es un campo petrolífero ubicado en el area nor-occidental de nuestra costa a unos 30 kms. de la ciudad de Talara, sector denominado Merina. Este yacimiento es una zona con características propias dentro de la cuenca de Talara, cuya producción proviene de 70 pozos no muy profundos, hablamos de más o menos 2500 pies de profundidad promedio, explotados con el sistema artificial de bombeo mecánico o unidades de bombeo.

El presente estudio consiste en evaluar la factibilidad de cambiar por motores eléctricos los motores a gas de 33 pozos de esta zona, trabajo con el cual se obtendrían buenos beneficios para la empresa nacional Petróleos del Perú S.A.

INDICE

1.0 INTRODUCCION

2.0 ANTECEDENTES

2.1 VISION GENERAL DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCION EN EL NOROESTE

2.2 PLAN INTEGRAL DE ELECTRIFICACION DEL CAMPO DE PRODUCCION DEL NOR-OESTE

2.3 PROYECTOS ACTUALES DE ELECTRIFICACION

2.3.1 CAMPOS YA ELECTRIFICADOS

2.3.2 PROYECTOS EN EJECUCION Y NUEVOS

2.4 PRESENTACION DEL PROYECTO

3.0 MARCO TEORICO DE ESTE PROYECTO

3.1 DISEÑO OPTIMO DE UN EQUIPO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE BOMBEO MECANICO

3.1.1 METODO API

3.1.2 METODO DE LOS FACTORES DE IMPULSO O METODO DE MILLS

3.1.3 DISCUSION SOBRE LA EFICIENCIA DE BOMBEO EN EL NOR-OESTE

3.2 DISCUSION DEL CALCULO DE LA POTENCIA UTILIZADA EN MOTORES DE UNIDADES DE BOMBEO

3.2.1 CALCULO GENERAL DE LA POTENCIA DE MOTORES DE UNIDADES DE BOMBEO

3.2.2 COMPARACION ENTRE LA POTENCIA TEORICA CALCULADA Y LA POTENCIA REAL OBTENIDA A PARTIR DE CARTAS DINAMOMETRICAS

3.3 USO DE LA ENERGIA ELECTRICA EN OPERACIONES DE PRODUCCION

3.3.1 REPASO DE LA TEORIA DE LA ELECTRICIDAD APLICADA A NUESTRO CASO

3.3.2 TEORIA DEL MOTOR ELECTRICO DE INDUCCION

3.4 COMPARACION ENTRE MOTORES A GAS MOTORES ELECTRICOS CONVENCIONALES Y MOTORES ELECTRICOS DE ULTRA-ALTO DESLIZAMIENTO

4.0 DESARROLLO DEL PROYECTO DE ELECTRIFICACION

4.1 DESCRIPCION GENERAL DEL POOL MERINA

4.1.1 UBICACION DE POZOS

4.1.2 DATOS DE SUBSUELO Y CARACTERISTICAS DE OPERACION ACTUALES

4.2 SELECCION DE EQUIPOS Y MATERIALES PARA LA ELECTRIFICACION

4.2.1 CALCULO DE LAS CONDICIONES DE OPERACION OPTIMAS PARA CADA POZO

4.2.2 CALCULO Y SELECCION DE LOS MOTORES ELECTRICOS PARA CADA POZO, INCLUYENDO LA POLEA

4.2.3 REQUERIMIENTO TOTAL DE ENERGIA Y SELECCION DEL GRUPO ELECTROGENO

4.2.4 ESTIMADO DE REDES ELECTRICAS Y ACCESORIOS

4.3 ESPECIFICACIONES TECNICAS RECOMENDADAS PARA LOS EQUIPOS A UTILIZAR EN EL PROYECTO

4.3.1 MOTORES ELECTRICOS DE ULTRA-ALTO DESLIZAMIENTO

4.3.2 GRUPOS ELECTROGENOS

4.3.3 OTROS ACCESORIOS

5.0 EVALUACION TECNICO ECONOMICA

5.1 INVERSION TOTAL

5.1.1 AHORRO INICIAL

5.1.2 INVERSION INICIAL

5.1.3 LINEAMIENTOS ECONOMICOS PARA LA EVALUACION DEL PROYECTO Y METODOLOGIA

5.2 INGRESOS Y EGRESOS

5.2.1 PRODUCCION NO DIFERIDA

5.2.2 MEJOR APROVECHAMIENTO DEL GAS COMBUSTIBLE

5.2.3 AHORRO DE ACEITE LUBRICANTE

5.2.4 GASTOS OPERATIVOS

5.3 FLUJO DE CAJA

5.4 RESULTADOS

6.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.0 APENDICE

7.1 FIGURAS

7.2 TABLAS

7.3 ANEXOS

8.0 BIBLIOGRAFIA

1.0 INTRODUCCION

Un campo petrolero como el del NOR-OESTE que tiene un gran número de pozos merece una supervisión especial de tal modo que se pueda cotidianamente evaluar la producción individual de cada pozo. Para tal fin existe toda una organización técnico-operativa donde cada pozo es observado por lo menos una vez por día por un "recorredor" de pozos. Cuando tratamos acerca de pozos que producen con equipo de BOMBEO MECANICO (EBM) esta inspección rutinaria incluye observar si el pozo aporta su producción normal e inspeccionar el buen funcionamiento de la unidad de bombeo mecánica y el motor (prime mover) de la misma. Usando motores accionados con gas en un área determinada se ha observado que existe un sin número de problemas mecánicos reportados diariamente debido también a diversas fallas de los equipos instalados, lo que origina producción diferida por la parada de estos equipos. Además una unidad de bombeo mecánica accionada con motor a gas nos da menos opción de poder optimar la producción de un pozo, es decir es difícil programar el trabajo de la unidad en forma periódica o por ciclos, teniendo que mantenerla necesariamente operando por 24 horas ininterrumpidamente; situación común en nuestros campos. Este trabajo continuo es perjudicial para todo el sistema tanto para la instalación de superficie como la de subsuelo, ocasionando problemas como son golpe fluido, atascamiento de bomba de subsuelo, deterioro de la sarta de varillas, fallas en la caja de

engranajes de la unidad de bombeo, derrame de crudo en boca del pozo debido al deterioro prematuro de las copas de la prensa estopa al momento que el pozo "bombea en seco" y recalienta el varillón pulido, y muchos problemas más. Todos estos problemas se derivan porque el aporte de los pozos es menor que la capacidad de extracción instalada, mejor dicho que los pozos tienen un bajo nivel de fluido y la instalación secará el pozo.

Todo lo anterior descrito es susceptible de ser superado en la actualidad mediante el uso de motores eléctricos en las unidades de bombeo, más aun existe un marcado interés en la industria por mejorar el servicio y rendimiento de estos motores de tal modo que ahora se cuenta con motores eléctricos de ultra-alto deslizamiento que han sido diseñados especialmente para estas unidades y son de uso común en todos los campos petroleros.

El proyecto del cual nos vamos a ocupar se refiere específicamente al caso de la electrificación de 33 pozos del yacimiento MERINA, se analizarán las ventajas técnico-económicas de cambiar por motores eléctricos los motores a gas ya existentes en la zona. Para tal propósito mostraremos las bondades de un campo petrolero electrificado, se detallará el cálculo óptimo de los motores eléctricos a utilizar así como se presentará las óptimas condiciones de trabajo requeridas en las unidades de bombeo utilizadas, incluyendo la instalación de subsuelo de cada pozo involucrado, se seleccionará el

grupo electrógeno a utilizar y finalmente se hará la evaluación económica del proyecto para tres casos posibles.

2.0 ANTECEDENTES

2.1 Visión General de los Sistemas de Producción en el Nor-Oeste.

Los campos explotados en el Nor-Oeste se caracterizan por tener una diversidad de métodos de producción. Sin embargo sabemos que el mayor porcentaje corresponde a pozos que producen con el sistema de BOMBEO MECANICO o UNIDADES DE BOMBEO (EBM).

La distribución es como sigue :

POZOS SURGENTES Y DE SWAB	:	95 pozos x	2,529 bpd
POZOS CON PUG	:	1,400 pozos x	18,215 bpd
POZOS CON PUE	:	370 pozos x	2,130 bpd
POZOS CON GAS LIFT	:	52 pozos x	291 bpd
POZOS CON BOMBEO HIDRAULICO	:	9 pozos x	198 bpd
POZOS CON CATALINAS	:	94 pozos x	189 bpd
TOTAL		2,020 pozos x	23,552 BPD

Del universo anterior podemos destacar que el 87.6 % de los pozos trabajan con unidades de bombeo mecánico, y de este total el 21 % utiliza motores eléctricos para su accionamiento mientras que el 79 % restante acciona con motores a gas natural (Ver figs. 1, 2 y 3).

Cabe notar que debido a las características de nuestros pozos y a las facilidades ya existentes, la tendencia en el Nor-Oeste es de aumentar el número de

pozos que trabajan con el sistema de levantamiento artificial de bombeo mecánico. Los principales motivos para que esto suceda pueden ser :

1° Pozos nuevos de surgencia natural (flowing), que tienen una rápida declinación de energía y producción, debido al sistema de gas en solución (gas drive), predominante en nuestros reservorios.

2° Carencia de gas comprimido necesario para los requerimientos del gas lift, debido a que la presión promedio de las estaciones de compresión existentes no sobrepasan los 500 psi, lo que limita a usar este sistema en pozos menores de 4,000 pies de profundidad efectiva. Además las facilidades necesarias para este sistema como son compresores, líneas de inyección de alta presión, controladores de ciclo, válvulas de gas lift y mandrels, macarrón, etc; hacen que las inversiones iniciales sean mayores bajando la rentabilidad de este tipo de instalación en los pozos del N.O.. También afecta a este tipo de sistema el bajo aporte de nuestros pozos actuales en operación y el excesivo consumo de gas, estamos hablando de más o menos 6 bpd y 900 de IGOR. Todo esto hace muy difícil ampliar este sistema para otros pozos.

3° El sistema de bombeo hidráulico que existe en nuestras operaciones está sobre-dimensionado para la producción actual de los pozos del Nor-oeste. Existen en la operación solo dos tipos de instalaciones, una de ellas

la de menor capacidad posee una bomba de subsuelo capaz de extraer 286 bpd (143 bpd al 50% de eficiencia) y la de mayor capacidad diseñada para producir 517 bpd como máximo. Ambas instalaciones sobrepasan largamente las producciones promedio de nuestros pozos actuales. Esto ha limitado la expansión de este eficiente sistema de levantamiento artificial y en la actualidad se están reubicando las instalaciones operativas de bombeo hidráulico a yacimientos que últimamente se ha desarrollado con pozos direccionales, volviendo los pozos salientes al sistema de bombeo mecánico.

De todo el breve análisis anterior se deduce la importancia del sistema de bombeo mecánico en las operaciones de producción en el Nor-Oeste el cual sin embargo mantiene al gas natural producido por los mismos pozos como fuente de energía principal.

2.2 Plan Integral de Electrificación del Campo de Producción en el Nor-Oeste

Si se considera que el uso de motores eléctricos es una gran ventaja en un campo como el nuestro, la tendencia debe ser de electrificar nuestras instalaciones. Sin embargo este proceso se hace lento debido principalmente a la estrategia que debemos utilizar para ello, la cual debe contemplar una serie de problemas conexos. Una de estas es la fuente de energía, es decir debemos trabajar con grandes centrales eléctricas o agrupar áreas y utilizar grupos electrógenos locales. Definitivamente si PetroPerú cuenta ya con cuatro Plantas de Energía Eléctrica en el Nor-Oeste es lógico que la primera opción debe primar. Pero esto lleva a trabajos de mayor envergadura y por ende el plan de electrificación debe ser corporativo incorporando en sus redes a otros usuarios (plantas industriales, talleres de mantenimiento, población), hay que tener en cuenta que esta Empresa tiene ciertos compromisos sociales inherentes a su condición, de tal modo que esto se hace más complejo y difícil aún.

Existen en la actualidad ya áreas electrificadas, proyectos antiguos y otros nuevos. Justamente PetroPerú tiene ya un Plan Integral de Electrificación en el Nor-Oeste en marcha, donde se aprovechará toda la energía disponible en nuestro campo de producción. Especialmente se está llevando electricidad de la Planta Eléctrica de Malacas hacia el Norte para la electrificación de los

campos de Carrizo, Ballena, Reventones, Los Organos y yacimientos aledaños. Por el sur se está trabajando en reemplazar grupos electrógenos ya instalados por energía de alta tensión proveniente de la Planta Eléctrica de Verdún.

Nuestro proyecto es compatible con lo anterior, se plantea inicialmente para ser energizado con una red local de un grupo electrógeno, factible de conectarse con la futura red de alta tensión Area Norte, lo que da validez para integrarse al Plan de Electrificación Nor-Oeste.

2.3 Proyectos Actuales de Electrificación Resultados Obtenidos

2.3.1 Campos ya Electrificados

Algunos de nuestros yacimientos están ya electrificados, los principales son los siguientes :

Yacimiento de Hualtacal -Baterías 341 y 342 con 35 pozos por 81 bpd, energía proveniente de grupos electrógenos.

Yacimiento de Golondrina -Batería 402 con 13 pozos por 177 bpd , energía proveniente de grupos electrógenos.

Yacimiento de Merina-Yegua Baterías 607 y 602 con 24 pozos y 320 bpd, energía proveniente de grupos electrógenos

Yacimiento de Portachuelo - Baterías 202, 203 y 206 con 25 pozos y 392 bpd, energía de alta tensión.

Yacimiento de Alvarez - Baterías 191, 192, 193, 194 y 195 con 65 pozos por 407 bpd, energía de alta tensión.

Yacimientos Lomitos, Ancha y Lagunitos-Proyecto de Pozos Ata-con 126 pozos y 500 bpd, con energía de grupos electrógenos, actualmente en trabajos de cambio por alta tensión.

El resto de pozos con unidades de bombeo con motores eléctricos se distribuyen en áreas no concentradas y están electrificados con energía de alta tensión, provenientes de redes ya existentes.

De la experiencia que se tiene con estos campos podemos citar algunas conclusiones :

- Cuando se trabaja con grupos electrógenos debe ser norma tener un grupo en stand by ya sea instalado o listo para reemplazo. Esto aumenta la confiabilidad del sistema.

Operativamente es mas fácil controlar un campo de unidades de bombeo electrificados que uno con motores a gas.

- Se puede llegar a optimar la producción con niveles de sumergencia muy bajos, mediante trabajos horarios de los pozos.

El mantenimiento mecánico es mucho menor y más económico y las fallas son menos frecuentes.

Las cargas calculadas de los motores eléctricos varían mucho con las reales. Ya sea en algunos casos sobredimensionados en otros subdimensionados, lo que ha originado modificaciones sustanciales en los proyectos ejecutados. Tal es el caso que en cierta área se eliminó 3 grupos electrógenos de 7 instalados inicialmente, debido a la poca carga con que estaban trabajando. En el caso opuesto en otra situación, se tuvieron que cambiar los motores diseñados originalmente, ya que estos no podían con la carga de sus respectivos pozos. Todo esto se explicará en detalle en los capítulos posteriores de este estudio.

2.3.2 Proyecto en Ejecución y Proyectos Nuevos

Dentro del plan integral ya explicado anteriormente se esta llevando a cabo los siguientes proyectos :

- Proyecto de Electrificación de 17 pozos en Portachuelo, actualmente en trabajos finales de ejecución.

Proyecto de Electrificación de 78 pozos en Ballena-Central, actualmente en trabajos en forma acelerada, tiene un avance total de 50 % teniendo 28 pozos ya electrificados.

- Proyecto de Electrificación de 94 pozos en Carrizo etapa I, en proceso de compra de materiales, bases técnicas listas y aprobadas.

- Proyecto Electrificación Recuperación Secundaria Talara, bases técnicas en consulta.

Proyecto de Electrificación de Portachuelo etapa II preparando bases técnicas.

- Proyecto de Electrificación de 61 pozos en Los Organos Sur, anteproyecto en revisión.

2.4 Presentación del Proyecto de Electrificación de 33 Pozos en el Yacimiento Merina - Batería 604

Habiendo visto los antecedentes y conociendo las ventajas de un campo electrificado, se determinó la conveniencia de desarrollar un estudio a fin de electrificar un área cuyos pozos presentaran las condiciones más favorables para este fin, por ejemplo cercanía entre ellos y no muy profundos, y se pueda aprovechar la energía proveniente de grupos electrógenos disponibles en nuestra operación, cuyo número se ha ido incrementando por las razones ya expuestas. De este modo se va agilizando el Plan Integral de Electrificación y además se saca provecho con antelación de las ventajas de la electrificación, hasta que este proyecto se integre al futuro sistema de alta tensión Area Norte previsto en el plan integral.

El yacimiento Merina tiene parte de sus pozos ya electrificados los que corresponden a las baterías 607 Yegua y batería 602 La Tuna. La zona escogida comprende específicamente pozos de la batería 604.

La relación de pozos es la siguiente :

7372	6868	6744	6979
6982	7374	6124	6998
6818	7373	996	6751
6739	6008	A-106	5862

3.0 MARCO TEORICO DEL PROYECTO

Básicamente podemos definir que este proyecto tiene dos puntos de mayor interés para el ingeniero de Producción.

El primer punto se refiere a mejorar la extracción de crudo con las unidades ya existentes mediante la optimación o mejoramiento de las condiciones de operación de éstas; llámese profundidad óptima de la bomba de subsuelo, tipo y modelo de ésta, cambio de carrera y golpes por minuto de las unidades; de tal forma de mejorar la eficiencia de los equipos o mejor dicho obtener un mayor porcentaje de utilización de la capacidad instalada. Todo lo anterior nos lleva a alargar la vida útil de la Unidad de Bombeo (especialmente de la caja reductora) y a disminuir la frecuencia de intervenciones por servicio de pozos (lo óptimo es que ésta sea de un servicio por pozo por año).

El segundo punto es el de mejorar la operatividad de las unidades, de tal modo que la optimación de la producción sea el reflejo del trabajo sobre el pozo y no sobre la eficiencia mecánica de las unidades y motores. Lo que nos dará margen para programar trabajos por ciclos (horarios) de pozos de poco aporte, encontrar la sumergencia adecuada a fin de evitar problemas como son golpe de fluido, golpe de gas en los pozos involucrados y analizar con dinagramas el trabajo de nuestras

instalaciones. Lógicamente este segundo punto solo se logrará cuando tengamos un campo con mínimos problemas mecánicos, es decir con muy pocas paradas de nuestros equipos por fallas mecánicas, lo cual es difícil de lograr usando motores accionados con gas en un campo de unidades de bombeo mecánico como el nuestro.

En este capítulo analizaremos estas dos consideraciones que están íntimamente ligadas, estudiando primeramente 2 métodos para diseñar un equipo de levantamiento artificial de bombeo mecánico y luego se hará énfasis en la selección de los motores a utilizar, investigando bajo varios aspectos esta selección, detallando las bondades de los motores eléctricos de alto deslizamiento que son los más usados en la industria actualmente.

3.1 Diseño Optimo de un Equipo de Levantamiento Artificial de Bombeo Mecánico

Para dar mayor amplitud a este punto se ha escogido 2 métodos de diseño a fin de comparar metodologías de análisis, lo que nos da un mejor criterio al hacer una selección o cambio de condiciones de operación de una unidad de bombeo. Estos son los métodos de Mills o el Método de los Factores de Impulso y el método recomendado por la API en su recomendación API-RP11L. Ambos métodos son los mas usados en nuestras operaciones y su inclusión en el presente estudio nos servirá como guía al analizar los cambios de condiciones de operación sugeridos en los pozos a electrificar.

Antes de empezar debemos mencionar que normalmente al iniciar un diseño tenemos ciertos parámetros ya definidos y estos son :

1. Producción a extraer en bpd o un estimado muy próximo.
2. Profundidad del líquido. Normalmente usamos la profundidad del niple de asiento del tubing a fin de ubicarnos en el punto más desfavorable para el diseñador.
3. Gravedad específica del líquido a extraer. Normalmente usamos 1.04 considerando que se va a extraer agua de formación. Aunque en casos rigurosos puede tomarse el valor de la muestra de fluido extraído.

4. Restricciones propias de Operaciones Nor-Oeste. Aquí nos referiremos a condiciones propias del Nor-Oeste que difícilmente serán diferentes en cuanto a equipos a utilizar en pozos de unidades de bombeo mecánico. Estas son :

- Tubing de $2\frac{3}{8}$ " o $2\frac{7}{8}$ " de diámetro nominal tipo E.U.E.

Bombas de subsuelo insertables para tubing de $2\frac{3}{8}$ ", cuando se usa tubing de $2\frac{7}{8}$ " solo se cambia el asiento de la bomba, para compatibilizar ambas medidas.

- Varillas telescópicas en combinación de tres tipos como máximo : $5/8$ ", $3/4$ " y $7/8$ ", grado C o D.
- Unidades de bombeo que van desde capacidades de 16D hasta MII 320D disponibles.
- Gas de forros no venteado, se produce el gas a la línea de flujo. Situación que muchas veces es un inconveniente, pero resulta imprescindible en nuestras operaciones. Recolectar el gas asociado producido es parte de nuestras funciones, para recuperar los líquidos de éste en las plantas de absorción.

3.1.1 Método API RP-11L

Este método recomendado por el Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute), basa el diseño de las unidades de bombeo mecánico en la aplicación y uso de FACTORES ADIMENSIONALES definidos de acuerdo a la carta dinamométrica de un pozo (ver figura N° 4) .

Introducción al Método API RP-11L

Este método fue el resultado de las pruebas de la investigación de un grupo de fabricantes y usuarios de equipos de bombeo mecánico. Donde los cálculos de diseño se basan en una correlación de datos obtenidos a partir de un catálogo de más de 1,100 cartas dinamométricas obtenidas en una computadora analógica. Básicamente se estudiaron tres puntos:

- A. Características de vibración de las sargas de varillas.
- B. Características físicas de las varillas.
- C. Análisis dimensional de los sistemas de Bombeo a varillas.

Con la información obtenida el API desarrolló un programa donde se obtuvieron valores para profundidades de 2,000 pies a 12,000 pies, con incrementos de 500 pies y para rangos de 100 bpd hasta 1,500 bpd. Se utilizaron diversas combinaciones de varillas y bombas de tal manera que se obtuvo una tabla bastante completa. También se desarrolló un segundo programa donde se obtuvieron una serie

de curvas para seleccionar Unidades de Bombeo convencionales para profundidades de 1,600 pies a 9,900 pies y varios rangos de producción y combinación de varillas, bombas y velocidades de bombeo.

En el anexo 1 mostramos la nomenclatura utilizada y en la figura N° 4 tenemos la carta dinamométrica base para obtener los datos necesarios.

Tomando como referencia la figura N° 4 se desarrollarán las fórmulas utilizadas :

a. Para velocidad de bombeo $N \sim 0$:

La carga máxima de las varillas : $PPRL = W_{rf} + F_0$

La carga mínima sobre las varillas : $MPRL = W_{rf}$

b. Para velocidades de bombeo $N > 0$:

La carga máxima sobre las varillas : $PPRL = W_{rf} + F_1$

La carga mínima sobre las varillas : $MPRL = W_{rf} - F_2$

Generalizamos el problema usando parámetros adimensionales:

A.- Las variables adimensionales independientes son :

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

F_0/S_{kr} (dimensionalmente = $\frac{\text{lbs}}{\text{pulgadas} \times \text{lbs/pulg.}} = 1$)

donde :

$N = \text{spm}$ ó golpes por Minuto

$N_0 = \text{spm}$ ó golpes por Minuto a la frecuencia natural de la sarta de varillas

$S = \text{Carrera}$

K = Constante elástica del resorte de la sarta de varillas. Es la carga en lbs necesaria para que la sarta completa se estire una pulgada.

B.- Las variables dependientes no dimensionales son:

- Carga Máxima : $PPRL = F_1/S_{kr}$
- Carga Mínima : $MPRL = F_2/S_{kr}$
- Torque máximo : $PT = 2T/S_{kr}^2$
- Potencia requerida en el vástago $PRHP = F_3/S_{kr}$
- Carrera de la Bomba $SP = SP/S$

Con las fórmulas anteriores se crearon familias de curvas para diversos valores de N/N_0 y F_0/S_{kr} (variables independientes adimensionales), midiendo en cada caso los valores de las variables dependientes adimensionales. Para los cálculos de diseño se pueden usar estas curvas y sustituir valores en las siguientes fórmulas :

-Carrera de la bomba :

$$SP = [(SP/S) \times S] - [(F_0 \times 1/k_t)] , \text{ cuando el tubing está anclado el valor de } 1/k_t = 0.$$

-Desplazamiento de la bomba :

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

-Carga máxima sobre las varillas :

$$PPRL = W_{rf} + [(F_1/S_{kr}) \times S_{kr}]$$

-Carga mínima sobre las varillas

$$MPRL = W_{rf} - [(F_2/S_{kr}) \times S_{kr}]$$

-Torque máximo :

$$PT = (2T/S^2 k_r) \times S_{kr} \times S/2 \times T_a$$

-Potencia en el vástago :

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

-Contrapeso requerido :

$$CBE = 1.06 (W_{rf} + 1/2 F_0)$$

La nomenclatura puede ser revisada en el anexo 1.

Procedimiento General de Diseño

El método general puede decirse que es de ensayo y error, tiene 3 pasos principales:

1. Se efectúa una selección preliminar de condiciones, con la información mínima conocida del pozo :

- Nivel de fluido = H en pies.
- Profundidad de la bomba = L en pies.
- Velocidad de bombeo = N en golpes por minuto.
- Longitud de carrera = S en pulgadas
- Diámetro del pistón de bomba = D en pulgadas.
- Gravedad específica del fluido = G .

- Diámetro nominal del tubing y, si está o no anclado
- Tamaño y diseño de sarta de varillas.

2. Las condiciones de operación calculadas, son el resultado de la utilización de la hoja de cálculo proveída con este método, que a su vez va ejecutándose mediante el uso de fórmulas, tablas y figuras presentadas por el API (ver anexo 2).
3. Luego el desplazamiento de la bomba calculada y las cargas de tensión obtenidos, se comparan con los volúmenes, rangos de cargas, tensiones y otras limitaciones preliminares. Normalmente es necesario más de un cálculo para llegar a un resultado congruente a lo que se tiene y desea.

Todo el procedimiento detallado está descrito paso a paso en el API RP-111.

Breve Discusión Sobre la Validez del Método de los Parámetros Adimensionales.

- A. El desarrollo matemático de este método ha sido bastante simplificado, si se hace un análisis riguroso se vería que se ha utilizado condiciones promedio producidas en el bombeo con varillas, en vista de lo difícil que es ejecutar ecuaciones matemáticas que representen los puntos críticos del bombeo los cuales se producen en la apertura y cierre de válvulas, tanto al expresar el movimiento como el estado de tensión de

las varillas en estas condiciones. Esto puede dar predicciones erradas para cálculos de condiciones en pozos profundos y/o para regímenes de altas velocidades de bombeo.

B. El modelo matemático se ha simplificado de la siguiente forma :

Representación inadecuada de la sarta de varillas. Donde se ha considerado que la masa de la varilla está concentrada en un punto, esto para poder usar la ecuación diferencial del resorte y así simular las características de las varillas. Lo real es que la masa está distribuida a lo largo de la varilla y el modelo adecuado para representarla es la ecuación de onda, ecuación diferencial parcial que presenta una solución matemática difícil de resolver.

Régimen inadecuado de la acción de la bomba de profundidad. Las condiciones límites del comportamiento de la bomba de subsuelo se producen en la apertura de válvulas; situación de difícil representación matemática, ya que está relacionada muy de cerca con el comportamiento de las varillas. Para solucionar este problema los investigadores han hecho suposiciones ideales de comportamiento (una puede ser considerar que la apertura y cierre de válvulas se producen en forma instantánea), de tal forma que el presente modelo sea más cercano a la

realidad cuanto más cercano a estas suposiciones ideales trabaje la bomba estudiada.

- C. La velocidad de bombeo adimensional N/N_0' , es la relación entre la velocidad de bombeo N y la frecuencia natural no amortiguada de la sarta de varillas N_0' , esta última está definida como :

$$N_0' = \frac{F_C \times a}{4L}$$

Donde:

F_C = Constante de proporcionalidad

a = velocidad del sonido en el acero

L = longitud de la varilla

$F_C = 1$ para sarta de varillas simples

$F_C > 1$ para varillas telescópicas

La velocidad "a" de propagación del sonido en el acero tiene un valor aproximado de 1,700 pies/seg, sin embargo este valor es variablemente afectado por el tamaño de las varillas siendo menor en las varillas largas y estrechas. El acoplamiento de las varillas también disminuye la velocidad de propagación.

- D. Factor de estiramiento de las varillas F_0/S_{kr} ; este parámetro adimensional para varillas simples se define como :

$$K_r = EA/L = \text{Cte. elástica del resorte};$$

Para sargas telescópicas es :

$$1/k_r = 1/E [L_1/A_1 + L_2/A_2 + \dots]$$

donde el término F_0/S_{kr} indica el estiramiento de las varillas como un porcentaje de la carrera producida por la aplicación estática de la carga de fluido.

Ejemplo: $F_0/S_{kr} = 0.1$ quiere decir que el estiramiento de las varillas es el 10 % de la carrera.

A velocidades muy bajas pueden darse:

$$S_p/S = 1 - F_0/S_{kr} \quad \text{cuando se aproxima a condiciones estáticas.}$$

Lo anterior no se cumple para velocidades mayores ya que los efectos dinámicos van siendo más importantes en el estiramiento de las varillas.

- E. El modelo análogo estudiado asumió tubería de producción anclada, por lo tanto ésta no tiene movimiento. Sin embargo en muchos casos esto no es así (en el Nor-Oeste se anclan los tubos a partir de los 6,500 ó 7,000 pies de profundidad), y existe un estiramiento de la tubería en la carrera descendente de la bomba y un acortamiento de ésta en la carrera ascendente. Sin embargo las correcciones efectuadas por este efecto en la carrera neta del pistón no son muy aproximadas al no tomar en cuenta los efectos dinámicos de la misma sarga de varillas y de la tubería de producción según este modelo.

F. En este modelo se utilizó unidades de bombeo convencionales (tipo C o sea contrapesada en la manivela ó crank). Para unidades de geometrías diferentes tipos B (contrapesada en el balancín) ó tipo Unitorque (Mark II); los resultados no serán muy aproximados sobre todo en el torque que varía mucho del real.

Los valores de carga máximas, mínimas y la carrera de la bomba son bastante buenos en estos tipos de unidades.

G. El accionamiento de la unidad del modelo se asumió proporcionado por un motor de deslizamiento medio; si se usa motores de alto deslizamiento puede introducirse errores por las características propias de estos motores sobretodo en cuanto al régimen de bombeo ya que estos disminuyen la carga máxima y elevan la mínima (esto lo veremos en un capítulo posterior).

3.1.2 Método de los Factores de Impulsión o Método de Mills.

Este método es el usado convencionalmente en el Nor-Oeste para el diseño y cálculo de unidades de bombeo y motores, se utiliza con una hoja de cálculo (ver anexo 3), la cual va desarrollándose con ayuda de tablas y familias de curvas preparadas para este método.

De acuerdo a lo visto en capítulos precedentes la metodología es similar, es decir se parte de ciertos supuestos de condiciones de operación, los cuales serán

validados al final del cálculo. Cabe notar que cuanto más experiencia tenga el diseñador más cerca de los cálculos finales hará su estimado inicial, lo que ahorrará trabajo adicional.

A continuación describiremos las principales fórmulas utilizadas :

1. Peso de Fluido : P_f

$$P_f = (a_p - a_{pb}) (L_t - h) d_f/10$$

donde:

a_p = Area del pistón de la bomba escogida

a_{pb} = Area promedio de las varillas escogidas.

L_t = Profundidad del niple de asiento

h = Sumergencia de la bomba

d_f = Densidad del fluido

2. Diseño de la Sarta Telescópica de Varillas:

Este se realiza considerando que las tensiones en la parte superior de cada tramo son iguales. En el anexo N° 4 puede apreciarse la tabla de valores donde se muestra los porcentajes recomendados de acuerdo al tamaño de pistón de la bomba utilizada.

3. Carga Máxima (C_{max}):

Fórmula de Slonneger :

$$C_{max} = (P_{bb} + P_f) (1 + S \times N/13716)$$

donde:

- C_{max} = Carga máxima en Kg.
 P_{bb} = Peso de varillas en el aire en Kg
 P_f = Peso de fluido en Kg
 S = Carrera en el varillón pulido en cm.
 N = Velocidad de bombeo en GPM

El P_{bb} es la sumatoria de cada tipo de varilla:

$$P_{bb} = (W_1L_1 + W_2L_2 + W_iL_i + \dots)$$

Fórmula de Mills:

$$C_{max} = P_f + P_{bb} (1 + S \times N^2/178900)$$

La fórmula de Slonneger es precisa en profundidades medias y bajas velocidades, sin embargo la de Mills es más exacta en condiciones más severas.

Los factores de impulsión F_i se definen para cada caso:

- De Slonneger:

$$F_i = (S \times N/13716) + 1 = 1 + b$$

- De Mills:

$$F_i = (S \times N^2/178900) + 1 = 1 + b$$

donde b = factor de aceleración

4. Carga Mínima:

Primero debe calcularse el peso de las varillas sumergidas y afectarles por el factor de impulsión:

$$P_{bbs} = P_{bb} (1 - d_f/d_h)$$

P_{bbs} = Peso de varillas sumergidas en Kg.

d_f = Densidad del fluido

d_h = Densidad del acero (7.87 gr/cc)

La carga mínima es :

$$C_{\min} = P_{bbs} (1 - b)$$

5. Acortamiento de la tubería de subsuelo (tubing):

Se produce cuando el tubing no está anclado, según:

$$A_{1t} = 47.6 \times 10^{-6} \times P_f = L_t / a_t$$

donde:

A_{1t} = Acortamiento del tubing en cm.

P_f = Peso del fluido en Kg.

L_t = Profundidad de la bomba en m.

a_t = Area anular del acero en el tubing en cm^2 .

$$a_t = 8.41 \text{ cm}^2 \text{ para } 2^{3/8}''$$

$$a_t = 11.69 \text{ cm}^2 \text{ para } 2^{7/8}''$$

$$a_t = 16.71 \text{ cm}^2 \text{ para } 3^{1/2}''$$

Cuando la tubería está anclada $A_{1t} = 0$ (cero).

6. Alargamiento de las varillas de bombeo:

$$A_D = 47.6 \times 10^{-6} P_f \times L_t / a_{eb}$$

a_{eb} = área promedio de las varillas

$$a_{eb} = L_t / (L_1/a_1 + L_2/a_2 + L_i/a_i + \dots)$$

L_t = longitud total

L_i = longitud de cada sarta

a_t = área de cada tipo de varilla

entonces:

$$A_b = 47.6 \times 10^{-6} P_f \times (L_1/a_1 + L_2/a_2 + L_i/a_i + \dots)$$

7. Sobre-recorrido del Pistón:

Para movimiento armónico simple se aplica :

$$\theta = 26.9 \times 10^{-5} \times SN^2 (L_t/1000)^2$$

Fórmula de Gilbert y Coberly

8. Carrera Neta del Pistón:

$$S_p = S - A_{1t} - A_b + \theta$$

S = carrera del pistón de la bomba

A_{1t} = acortamiento de la tubería

A_b = Alargamiento de las varillas.

θ = Sobre-recorrido del pistón

9. Producción Q (M³/d).

$$Q = 1.44 \times S_p \times N \times a_p$$

10. Velocidades Críticas de Bombeo

Se producen cuando la velocidad de bombeo de las varillas se encuentran en fase con las vibraciones armónicas de la frecuencia natural de la sarta de varillas. Comunmente se utiliza un gráfico (ver figura N°5), para verificar si la velocidad calculada se encuentra dentro de las velocidades sincrónicas o asincrónicas.

Estas curvas las desarrollo J.C. Slonneger según :

$$N = 72237/nL_t$$

N = velocidad de bombeo

L_t = profundidad de la bomba

n = número sincrónico (entero) ó número
asincrónico (entero + 0.5)

Las velocidades asincrónicas deben evitarse. Para
sartas telescópicas L_t se debe reducir en un 10%

11. Contrapesado

Si no hubiera contrapesado la unidad necesitaría:

a. En carrera ascendente : $P_f + P_{bb}$

b. En carrera descendente : $-P_{bb}$

Todo para elevar el fluido en la carrera ascendente; lo
que nos daría una variación de carga total igual a
($P_f + 2 P_{bb}$)

De tal modo que se cumpla lo anterior el contrapesado C
debe ser :

$$C = 1/2 (P_f + 2P_{bb}) = 1/2 P_f + P_{bb}$$

C = efecto de contrapeso en Kg. ó Lb

En la práctica se utiliza :

$$C = 1/2 (C_{max} + C_{min}) = C_{min} + 1/2 R_C$$

donde:

$$R_C = \text{Rango de cargas} = C_{max} - C_{min}$$

12. Torque Máximo

$$T_{\max} = R_C \times S/4$$

(fórmula simplificada que no siempre es cercana al valor real)

13. Potencia en el Vástago ó varillon pulido

$$\text{HP ó HHP} = 1.09 \times 10^{-3} \times T_{\max} \times N$$

De acuerdo a las condiciones de operación este valor puede distar considerablemente del valor de la potencia real necesaria para mover la unidad de bombeo a utilizar. Este punto se tocará en detalle en la discusión sobre el cálculo de la potencia de motores.

14. Esfuerzos Unitarios Máximos y Mínimos

Nos referimos a esfuerzos de la sarta de varillas.

La tensión máxima puede estar dada por:

$$S_{\max i} = C_{\max i} / a_{b i}$$

donde :

$S_{\max i}$ = Tensión máxima en el punto considerado

$C_{\max i}$ = carga máxima en el punto considerado

$a_{b i}$ = sección de la varilla en el punto considerado

Del mismo modo se calcula la tensión mínima teniendo la sarta de varillas seleccionada:

Debemos tener en cuenta que ambas tensiones deben cumplir los requisitos del diagrama de Goodman modificado.

15. Diagrama de Goodman Modificado

Este nos da la tensión de trabajo máxima admisible en función de la tensión mínima (ó viceversa) para una determinada calidad de acero. Es decir que existe una correlación entre la carga máxima y la carga mínima, que no debe de sobrepasar ciertos límites (ver figura N° 6).

16. Cálculo de la polea del motor

$$D_m = N \times R_t \times D_r / \text{rpm} \quad \text{donde :}$$

D_m = diámetro de la polea del motor

D_r = diámetro de la polea de la unidad

N = GPM (golpes por minuto)

R_t = Relación de engranajes de la unidad

rpm = velocidad del motor

3.1.3 Discusión Sobre la Eficiencia del Bombeo en el Nor-Oeste

El resultado de la aplicación de las técnicas de diseño ya mencionadas en el Nor-Oeste se ve afectada seriamente en nuestras operaciones por una diversidad de problemas propios de la operación. Esto da como resultado que en un diseño o cálculo ejecutado para ciertas condiciones de operación sea afectado por un factor de experiencia equivalente a 0.8 (80%) como norma práctica,

el cual acercara el diseño o cálculo a la realidad de nuestro caso.

A continuación se tratará en forma breve los diversos problemas a que está sujeto el sistema de extracción artificial de bombeo mecánico en nuestras operaciones.

Bajo Aporte de los Pozos

Más del 50% de nuestros pozos tienen una producción de 10 bpd o menos, como se vera este poco aporte proviene muchas veces de arenas a más de 5,000 pies de profundidad, lógicamente este porcentaje incluye diversos tipos de unidades de bombeo, es decir desde las tipo 16-D (las de menor capacidad) hasta 160-D (las de mayor capacidad a esta profundidad). Por otro lado las bombas de subsuelo usadas en la actualidad tienen pistones con diámetros de 1.25" y 1.5" solamente, por lo que el operativo a fin de obtener las mejores condiciones de trabajo posible del equipo tiene que relacionar de la mejor manera BPD, Profundidad, PU utilizada, diámetro de pistón a fin de no sobredimensionar en demasía sus instalaciones.

De acuerdo a lo anterior podemos hacer el siguiente ejemplo: Se tiene un pozo que produce 08 bpd a 2,500 pies de profundidad, le instalamos una unidad de bombeo con condiciones mínimas de trabajo :

- PU (unidad de bombeo) más pequeña = modelo B-16-D
- carrera mínima de esta PU = 20"

- Rpm promedio del motor 550 (considerando un motor a gas lento)
- Relación de engranajes = 35.7
- Polea de la unidad = 15.3"

Obtenemos los SPM mínimos:

$$\frac{5.4 \times 550}{35.7 \times 15.3} = 5.4 \text{ SPM}$$

La producción que extraerá esta instalación será:

$$Q \text{ (BPD)} = 5.4 \times 20 \times 0.146 = 16 \text{ BPD}$$

donde 0.146 es el factor volumétrico de la bomba de subsuelo (pistón = 1.25" φ), a 80 % de eficiencia.

Esto quiere decir que en nuestro ejemplo tenemos una instalación 100 % sobredimensionada. Lógicamente si se aplicara este ejemplo a profundidades mayores, se necesitaría una unidad de mayor capacidad, el sobredimensionamiento es mucho mayor.

La rápida declinación de la producción de nuestros pozos, debido al sistema de empuje predominante de gas en solución en nuestros reservorios, encarece los gastos operativos al tener que variar muy a menudo las condiciones de trabajo de las instalaciones de los pozos.

Inherentes al sobredimensionamiento debido al poco aporte de nuestros pozos ocurren dos problemas que son de alta incidencia en nuestros campos :

- Golpe fluido, con toda la secuela de consecuencias que trae: fatiga de varillas y de caja de engranajes, aumento de intervenciones por servicio de pozos, atascamientos de bombas de subsuelo, etc.

- Bloqueo por gas, al extraer a mayor velocidad que el aporte de líquidos del reservorio se llega a una situación de conificación de gas, al tener éste mayor movilidad que los líquidos. Situación bastante perjudicial para los equipos con la consiguiente pérdida de la producción y baja eficiencia de bombeo.

Eficiencia de las Bombas de Subsuelo

Como parte fundamental de una instalación de bombeo mecánico, su rendimiento es determinante en la eficiencia total de bombeo, para nuestro caso consideramos una eficiencia volumétrica de 80 % en promedio debido a los siguientes motivos :

- Esgurrimiento excesivo entre pistón y barril, considerando la norma de 0.002" como máximo de luz entre ambos, muchas veces se utiliza hasta 0.006".
- Falta de una selección detallada de los materiales de las bombas a utilizar, especialmente en cuanto a la metalurgia de las bolas y asientos, para cada caso en particular.
- Malas prácticas en el transporte y manipulación de las bombas antes de ser bajadas en los pozos. Esto ocasiona que muchas veces a pesar de las pruebas de buen rendimiento en el taller a profundidad trabajen deficientemente.

- Malas prácticas al bajarlas y sentarlas, se refiere especialmente a sentados ó corregidos de espaciamiento demasiados bruscos cuando la bomba no levanta presión.

Aquí podemos detenernos a examinar el cálculo del resbalamiento ó escurrimiento de una bomba de subsuelo. Este normalmente se mide como huelgo (o luz), entre el pistón y la camisa o barril, se mide en milésimas de pulgada, donde :

- De 0.002" a 0.003" se considera normal, la bomba tiene una eficiencia de 80 al 100%
- De 0.004" a 0.006" se considera luz especial, se usa para pozos sucios y casos especiales, la eficiencia está entre un 80 a 70 %.
- Más de 0.006" no se recomienda, ya que la bomba no levantará presión

Existe un cálculo empírico para medir el escurrimiento efectivo de la bomba :

$$BA = \frac{2.69 \times H \times D \times 0.8 \times S^{3.2}}{L \times Y}$$

donde:

BA = escurrimiento en bpd

H = Elevación del fluido en miles de pies

D = Diámetro del pistón en pulgadas

S = Huelgo (ó luz) en milésimas de pulgada

L = Longitud del pistón

Y = Viscosidad cinemática en centistokes

Problemas de Control de la Operación

Aunque este punto pareciera no afectar la eficiencia de nuestros equipos diseñados, si es de importancia al momento de seleccionar los equipos que se adquirirán usarán, a fin de que estos sean adecuados a nuestros requerimientos, conociendo la problemática de nuestro campo: un gran número de pozos con poco aporte cada uno.

Existen dos problemas fundamentales :

- **Problemas Mecánicos.**- Se refiere al funcionamiento deficiente de los equipos de superficie, los cuales representan un 10 al 12 % aproximadamente de producción diferida (producción no obtenida en el día); de los cuales el 80 % o más es debido a problemas en los motores a gas de las unidades de bombeo. Estos motores por sus características propias de accionamiento presentan elevada vibración y además permanecen ininterrumpidamente en funcionamiento (24 hrs), lo cual origina un sinnúmero de problemas mecánicos.

La problemática de los motores a gas en el Nor-Oeste se puede resumir en los siguientes puntos :

- No existe un verdadero mantenimiento preventivo, este se lleva en forma muy limitada. Para evitar problemas de paradas imprevistas con altos costos por producción diferida debemos implementar este programa en forma efectiva y utilizando los repuestos adecuados.
- Excesiva vibración en las instalaciones usadas.

Graves problemas de incrustación, debido al agua sin tratamiento utilizada en los radiadores y/o condensadores.

- Gas húmedo usado en su accionamiento.
- Falta de una oportuna reposición de repuestos que en un 95 % son importados.
- Consumo excesivo de gas combustible.

Problema de detección de pozos sin producción.- La organización actual utiliza 36 parejas de recorredores de pozos para verificar el buen funcionamiento de los 1800 pozos del Nor-Oeste. Lo que da un promedio de 50 pozos por recorredor en jornada diurna, considerando solo los de bombeo mecánico. Si cada pareja verificara todos los pozos de su área todos los días nos da un promedio de 9.6 minutos de tiempo por pozo; en los cuales tendría que hacer los siguientes trabajos:

- Hacer una prueba manométrica.
- Verificar los SPM de la Unidad
- Verificar el buen estado de la unidad y el motor, lo que incluye rellenar de aceite y agua al motor.
- trasladarse al otro pozo.

Hay que tener en cuenta que en la realidad casi el 60 % del tiempo empleado en cada pozo se utiliza en rellenar de agua y aceite al motor, repartiendo el resto del tiempo en una verificación visual rápida del estado de la UB y el motor. Esto debido a que sin este trabajo el motor se detendría indefectiblemente en cualquier momento.

Indudablemente hacer todo el trabajo descrito en los 50 pozos es imposible, además habría que descontar de las 8 hrs., 30 minutos para sacar el reporte de la batería, y 30 minutos para trasladarse del patio de producción a su sector; lo que nos da un tiempo real de recorrido de 7 horas (sin imprevistos). Todo esto lleva fundamentalmente a que la detección de los pozos sin aporte de producción demore como mínimo 48 hrs; suponiendo que se realiza por día solo el 50 % del recorrido de los pozos asignados. Además si consideramos que en cada batería solo es posible obtener 3 ó 4 pruebas diarias de pozos, lógicamente cuanto menos aporta un pozo al total de producción neta de la batería tanto más difícil es detectar la pérdida de producción de éste.

Solución a los Problemas Planteados

A continuación se describirán brevemente las soluciones a los problemas planteados. Estas ya se han aplicado a ciertas áreas críticas, siendo objetivo aplicarlas a toda la operación.

1° Las consecuencias del sobredimensionamiento de nuestros equipos (debido al bajo aporte de nuestros pozos), se pueden menguar siguiendo las pautas que describimos a continuación :

- Disminuyendo las horas trabajadas de las unidades de bombeo. Es decir programar trabajos horarios de los pozos; en lugar de 24 hrs. pueden trabajar 6, 8, 12,

ó 15 hrs. de acuerdo a la instalación y su aporte. Sin embargo esto solo puede lograrse en forma eficaz y eficiente mediante el uso de motores eléctricos accionados con controladores de tiempo (timers). Por otro lado es factible variar estos tiempos de trabajo según la extracción de crudo obtenida a tal punto de optimar éste y alcanzar niveles muy bajos de sumergencia o los deseados según las recomendaciones de los reservoristas.

Instalando inicialmente equipos que den flexibilidad de variación de condiciones de operación según vaya declinando la producción del pozo. En otras palabras puede decirse de instalar unidades de bombeo que puedan variarse su carrera y motores que se adecúen a estos cambios, sin tener que hacer nuevas instalaciones .

2° La eficiencia de las bombas de subsuelo pueden mejorarse al utilizar dispositivos para amenguar los efectos del golpe fluido y golpe de gas, estos son :

- Válvulas tipo anillo (ring valve)
- Dispositivos Sargent 927
- Pistones Loc-No
- Separador de gas Guiberson
- Anclas de gas
- Tubos de aire (mosquito bill)

3° Los problemas del control de la operación, realmente ya han sido superados en otras operaciones mediante la

electrificación del campo y utilizando motores de ultra alto deslizamiento.

Por un lado un campo petrolero electrificado permite optimar el control sobre la producción como ya se explicó anteriormente, por otro lado, los problemas mecánicos o eléctricos son mucho menores, teniendo una incidencia 90 % menor que los reportados con motores a gas. Además los repuestos utilizados son menores en cantidad aparte de muchas otras ventajas que se detallarán en capítulos posteriores.

También cabe destacar que administrativamente el personal que tiene a cargo recorrer un campo electrificado hará una mejor labor de producción, al prestar mayor atención a la extracción de crudo del pozo al tener mejor redistribuido sus tiempos de trabajo. Esto último disminuye el tiempo de detección de los pozos sin aporte productivo, dando en general mayor eficiencia a la operación.

.

3.2 Discusión del Cálculo de la Potencia Utilizada en Motores de Unidades de Bombeo

Los métodos que normalmente se utilizan en el diseño y cálculo de unidades de bombeo dan finalmente una relación matemática muy sencilla donde calcular los HP del motor a utilizar. Esto muchas veces no es conveniente ya que la selección del motor a utilizar se deja a criterios prácticos que aunque en la mayoría de los casos cumple su función, no siempre es la más óptima, y por ende estos motores están casi siempre sobredimensionados consumen mayor energía de la necesaria y/o presentan fallas mecánicas debido a que trabajan en condiciones límite.

A continuación presentaremos el cálculo de la potencia de un motor de una unidad de bombeo.

Definición:

Un motor es una máquina que produce energía mecánica a partir de un combustible o una fuente de energía. En un campo petrolero existen dos tipos de motores.

Motores de Combustión Interna :

- A gas natural
- A Diesel

Motores Eléctricos :

- Convencionales (tipo NEMA C)
- Alto - deslizamiento (tipo NEMA D)
- Ultra alto deslizamiento

3.2.1 Cálculo General de la Potencia de Motores de Unidades de Bombeo

Los factores que intervienen en la determinación de la potencia de un motor que acciona una Unidad de Bombeo Mecánico son :

1. Potencia Hidráulica de la bomba (HHP)
2. Pérdidas en superficie
3. Pérdidas en el subsuelo
4. Factor de carga cíclica (CLF), que es un factor que compensa la pérdida de potencia por el calentamiento del motor debido al ciclo natural de bombeo.

La fórmula general es :

$$\text{NPHP} = \frac{\text{HHP} + \text{Pérdidas en subsuelo}}{\text{Eficiencia en superficie}} \times \text{C.L.F}$$

Donde NPHP o HP (nominal) del motor son los HP requeridos del motor a utilizar.

Cualquier fórmula utilizada para éste cálculo debe ser congruente con estos factores, sin embargo como las pérdidas en el subsuelo y el C.L.F varían mucho con las características y condiciones de operación utilizadas, no es posible dar un valor exacto a estos de tal modo de sacar una fórmula reducida válida para cualquier caso. En la industria existe un gran número de fórmulas rápidas que aproximan estos valores y pueden dar según las restricciones valores válidos de potencia de acuerdo a como se utilicen.

A continuación se detallará el contenido de la fórmula general:

- Potencia Hidráulica: HHP .- Se basa en la razón de producción, la cabeza neta de fluido en la bomba de subsuelo (sumergencia) y en la gravedad específica del fluido a bombear por el tubing.

$$\text{HHP} = \frac{Q \times H \times \text{SPGR}}{135,600}$$

Donde :

SP.GR = Gravedad específica del fluido en el tubing

H = Nivel del fluido o distancia en pies entre la superficie y el nivel de fluido en el casing.

Q = Rate de producción de la Bomba en BPA (Barriles por día).

El valor en Q puede calcularse de la siguiente manera :

$$Q = \frac{(D^2SN) \times \text{Eficiencia Volumétrica}}{8.583} \rightarrow \text{Bls por 24Hs}$$

donde :

D = diámetro del pistón en pulgadas

S = carrera del pistón en pulgadas

N = strokes por minuto (o golpes por minuto)

Eficiencia volumétrica es un valor de acuerdo a la realidad de cada operación. Sin embargo si consideramos una bomba en buenas condiciones este debe ser de 95%, la fórmula anterior se puede reducir :

$$Q = \frac{D^2 \times S \times N}{9} \text{ en BPD}$$

Carrera efectiva del pistón (EPS).- Esta puede ser mayor o menor que la carrera de la unidad, esto debido a que la sarta de varillas es elástica.

Si se desea calcular "Q" en exactitud es necesario calcular la carrera efectiva; esto puede hacerse usando una relación bastante aproximada que proviene de la simplificación de una fórmula teórica rigurosa :

$$EPS = \frac{S}{\cos (0.0004 LN)^0} - \frac{W_oAL}{2 (10)^6} \left(\frac{1}{A_R} + \frac{1}{A_T} \right)$$

donde :

S = Carrera de la UB en pulgadas

L = Longitud de la sarta de varillas , pulgadas

N = G.P.M (o SPM)

W_oA = Carga diferencial de fluido (o peso neto del fluido en toda el área del pistón) en lbs.

A_R = Area seccional de los varillas, pulgadas

A_T = Area seccional del tubing, pulgadas

Además se debe considerar que el término $1/A_T = 0$ para tubing no anclado.

Pérdidas en el Subsuelo .- Es difícil de predecir debido a la diversidad de causas que la originan como son: Grado de desviación del pozo, arena y otros finos suspendidos en el fluido, parafina acumulado en el tubing, gravedad específica y viscosidad del fluido bombeado. La

práctica común no calcula estas pérdidas sino que conjugan este valor con las pérdidas de superficie y los otros factores y simplemente multiplica la potencia hidráulica por un factor general, comunmente 2. Esta práctica esta asumiendo que las pérdidas en el subsuelo son múltiplo de la potencia hidráulica. Sin embargo si analizamos correctamente esto no es así, pues las principales pérdidas son causados por la fricción que existe entre varillas y tubing, fricción del fluido que se desplaza en el tubing y la fricción de las varillas y acoplamientos moviendose en el fluido. Todos estos componentes hacen que este término sea proporcional a la longitud de las varillas más no al diámetro del pistón de la bomba que es el que afecta directamente a la Potencia Hidráulica. Por tal motivo es mas exacto sumar estas pérdidas con la Potencia Hidráulica que considerar las pérdidas en el subsuelo como un simple múltiplo de éste.

Una experiencia realizada por los Sres. Howell y Howood muestran lo anteriormente descrito; este se basó en pruebas de un pozo de 3500' y 4° de desviación , carrera de la UB = 42" y varillas de 3/4", se probó con 2 diámetros de pistón y una sarta sin bomba; los resultados de la pérdida en el subsuelo eran casi similares para los 3 casos (Es decir no importaba el diámetro del pistón de la bomba usada) haciéndose notar la variación solo en las velocidades de bombeo. Ellos defirieron para este caso la velocidad lineal de bombeo $SPM \times carrera \times 2;$

obteniendo que a 10 SPM y una velocidad lineal de 844 pies/min se tenía una pérdida de 0.35 HP/1000 pies de profundidad y para 30 SPM y 2532 pies/min una pérdida de 2.39 HP/1000 pies (Ver figura N° 7). En N.O podemos aproximarnos a esta curva ya que nuestras velocidades de bombeo varían entre 06 y 14 SPM. Lógicamente si tuvieran condiciones más severas en cuanto a fricción estos valores serán notablemente más altos.

Pérdidas en la Superficie o Eficiencia :

Esta se puede expresar en proporción de los HP requeridos respecto a los HP en el varillón pulido (o vástago) Esta pérdida se debe a los engranajes, poleas y fajas en V de la transmisión de potencia del motor a la unidad de bombeo. Las variaciones de esta eficiencia está siempre sobre los 85% según las publicaciones, sin embargo como nunca tenemos una unidad de bombeo a plena carga un porcentaje práctico es de 65%; el cual es muy aproximado para los casos del N.O.

Efecto de la carga cíclico.-

Un motor eléctrico desarrolla performance de acuerdo a la temperatura que alcanza durante su trabajo y la facilidad de disipar este calor. Este calentamiento es función de la corriente RMS (Root Mean Square), la cual está definida como el promedio de los mismos cuadrados de corriente de diferentes intervalos de tiempo o sea que:

$$I_{RMS} = \frac{\sqrt{I^2_1 + I^2_2 \dots I^2_n}}{n}$$

A su vez la corriente consumida por el motor es proporcional a la carga de la unidad de bombeo. Esta es la corriente promedio.

Si esta carga es constante y no cíclica sería igual a la I_{RMS} . En cargas cíclicas como es nuestro caso de las unidades de bombeo donde existen picos de carga, la I_{RMS} excede a la corriente promedio, esta razón se le llama factor de carga cíclica (C.L.F. = Ciclic Load Factor)

$$C.L.F = \frac{\text{Corriente RMS}}{\text{Corriente promedio}}$$

El efecto de este factor se nota principalmente tanto en la velocidad de las Unidades de bombeo (SPM) como en el buen balanceo de las mismas, siendo afectado también por la geometría de las unidades usadas; tan es así que a velocidades de bombeo lineales menores de 2000 pulg/min las unidades tipo C (con las pesas en el crank) tienen factores de carga cíclica menores que las unidades tipo B (con las pesas en la balanza). Igualmente los motores eléctricos de alto deslizamiento presentan un C.L.F mucho menor.

Habiendo analizado la fórmula general para calculo de motores podemos concluir en lo siguiente :

- Los factores correspondientes a eficiencias, pérdidas en el subsuelo y de carga cíclica son predecibles solo en

la medida que se haga un exhaustivo estudio de los mismos en el campo. Es decir cada operación o campo debe tener los propios factores de acuerdo a las características de sus pozos e instalaciones usadas, haciendo mediciones a diferentes condiciones de operación.

- Las fórmulas rápidas utilizadas, así como la de los fabricantes son de una confianza relativa; al basarse generalmente en situaciones poco críticas es decir, bajas velocidades de bombeo, sin serios problemas de fricción ni desviación, y fluido limpios.
- En la mayoría de los casos los motores no han dado problemas de diseño, esto sin embargo es muy superficial afirmarlo ya que en casi todos los casos están sobredimensionados de tal modo que si bien es cierto trabajan sin problemas, tienen un excesivo consumo de energía y su mayor tamaño nos hace tener inversiones iniciales mayores.

Fórmulas Rápidas para Cálculos en el Campo

Para velocidades lineales de bombeo bajas y buenas condiciones del pozo se puede aproximar los cálculos de motor con las siguientes fórmulas :

HP Requeridos
de motor

$$= \frac{D^2 SNH}{450000}$$

Para motores eléctricos
de deslizamiento normal

$$\text{HP Requeridos de motor} = \frac{D^2 SNH}{540000} \quad \text{Para motores eléctricos de alto deslizamiento}$$

Se asume en ambos casos; que los HP Requeridos son el doble de los HHP con factores de carga cíclica de 1.33 para motores de deslizamiento normal y 1.1 para alto deslizamiento.

Fórmula para calcular los HP en el varillón pulido (o vástago) a partir de una carta dinamométrica :

$$\text{HPvástago} = \frac{S \times N \text{ Rc}}{750 \times 1000}$$

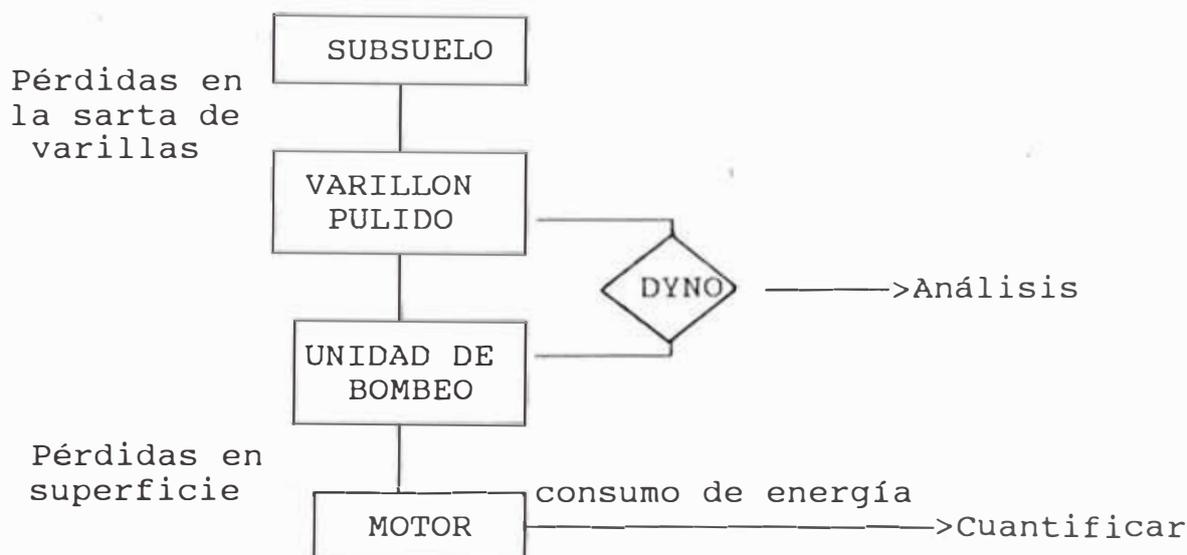
S en pulgadas
N en golpes/min
Rc = Rango de Cargas lbs.

$$\text{HPvástago} = \frac{S \times N \text{ Rc}}{9000}$$

S en metros
N en golpes/min
Rc = Rango de cargas en Kg.

3.2.1 Comparación entre la Potencia Teórico calculada y la Potencia Real Obtenida a partir de cartas dinamométricas

Las fórmulas y métodos empíricos utilizados para aproximarnos a la Real Potencia usada en nuestros pozos para levantar el petróleo del subsuelo pueden ser corroboradas o desestimadas mediante el uso de métodos modernos de análisis de un Equipo de Bombeo Mecánico. El Dinamómetro nos da esa facilidad como también lo es el uso de motores eléctricos. Si hacemos un esquema de bloques de nuestro sistema de bombeo artificial tenemos:



El dinamómetro es un instrumento que mide cargas en el varillón pulido.

A lo largo del ciclo de bombeo, con el podemos hacer un análisis cualitativo, especialmente usado para ver problemas de producción del pozo y trabajo de la bomba, y un análisis cuantitativo para determinar las cargas reales máxima y mínima, contrapesado, cálculo del torque de la unidad y los HP en el vástago (o varillón pulido), entre otros cálculos. Con este instrumento y mediante una toma de mediciones de carga en el motor eléctrico usado podemos sacar valiosas conclusiones de como estamos diseñando y que tan aproximado están estos cálculos de la real.

Por ejemplo podemos medir los HP consumidos por nuestro motor usando un watiometro, para hacer este cálculo entonces :

$$\text{HP promedio} = \frac{\text{Watts}}{746} \times \text{eficiencia motor}$$

la eficiencia del motor puede ser sacado del fabricante teniendo en cuenta la corriente RMS consumida, la cual puede ser calculada con mediciones con un amperímetro térmico.

Existen muchos otros métodos para medir la carga consumida por un motor eléctrico, incluyendo el uso de dispositivos muy modernos y fáciles de usar.

Por otro lado con el uso del dinagrama podemos calcular los HP en el vástago con exactitud entonces podemos obtener :

$$\text{Eficiencia en superficie} = \frac{\text{HP en el Vástago}}{\text{HP motor consumidos}}$$

$$\text{Eficiencia de la Unidad de Bombeo} = \frac{\text{Eficiencia superficie}}{\text{Eficiencia del motor}}$$

También es posible obtener las pérdidas en el subsuelo :

$$\text{HHP Teórico} - \text{HP Vástago medido}$$

A todo esto hay que agregar que existen métodos mucho más sofisticados con los que se podría analizar incluso la potencia y esfuerzos en diversos puntos de la sarta de bombeo como es el NABLA SURFAN PROGRAM de S.Gibbs con lo

cual obtendríamos realmente información valiosa para optimar nuestros diseños.

3.3 Uso de la Energía Eléctrica en Operaciones de Producción

A continuación se desarrollará en forma breve y concisa los principios básicos de electricidad que es necesario tener en cuenta para un diseño óptimo de un campo petrolero electrificado. Es importante notar que las bondades de esta electrificación también están dadas en la medida de poder minimizar las pérdidas de esta energía tanto en las redes de distribución como en los motores seleccionados.

Normalmente se tiene poco cuidado al diseñar y operar sistemas electrificados; esto debido a que existe un abaratamiento artificial de esta energía y hace poco viable invertir sumas en mejorar la eficiencia de nuestros sistemas. Sin embargo en la situación actual que el proceso inflacionario eleva los costos de operación y la importación de bienes de capital se hace mas difícil cada día, operar y/o diseñar un sistema electrificado óptimamente redundará en ahorro tremendo tanto en el consumo de la energía utilizado como en la inversión inicial al evitar el uso de equipos sobredimensionados en nuestras instalaciones.

3.3.1 Repaso de la Teoría de Electricidad aplicada a nuestro caso

La ley de Ohm = $V = IR$ (1)

V = Voltaje o caída de tensión - voltios

I = intensidad de corriente - Amp.

R = Resistencia, ohmios

La Resistencia esta presente en cualquiera de las formas que se convierta la energía eléctrica, ya se movimiento, calor, luz o sonido, en tales casos esta conversión es irreversible.

Cuando la energía se usa en los sistemas de inductancia o capacitancia algo de esta se almacena en los campos electromagnéticos, siendo aún posible retomarla al sistema. De allí que en un sistema sinusoidal de potencia variable, durante cada ciclo la energía es extraída, almacenada y luego devuelta al sistema.

La impedancia z , nos relaciona la corriente y el voltaje para cuantificar esta energía almacenada; este término complejo se define como :

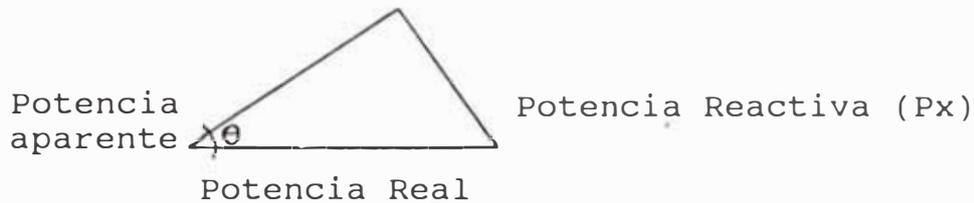
$$z(f) = R + j X(f) \quad \dots\dots\dots(2)$$

donde :

R = Resistencia

X = Reactancia, función de la frecuencia de un sistema de variación periódico.

Un Sistema de Potencia de nivel de corriente eléctrico podemos expresarlo con el triángulo de potencia



Donde la potencia reactiva es almacenada en los campos electromagnéticos del sistema, y la potencia real es lo que se ha convertido en otra forma de energía (calor, neomovimiento, etc), definiéndose la potencia total aparente PA como :

$$PA = P_R + j P_x$$

$$PA = \sqrt{P_R^2 + P_x^2}$$

y

$$P_R = IV \cos\theta$$

$$P_x = IV \operatorname{sen}\theta$$

De estas ecuaciones obtenemos la definición de los siguientes factores :

$$\cos\theta = \text{es el factor de potencia} = \frac{P_R}{PA}$$

donde la potencia real se mide en watts (w) o Kw

- $\operatorname{sen}\theta$ = factor de potencia reactiva

donde Px (potencia reactiva) se mide en Kivolt-amp-reactivo (KVAR)

- y la potencia total aparente se mide en

Kivolt-amp (KVA) o Volt-amp (VA)

Todo lo anterior esta realizado para sistemas monofásicos.

Cuando hablemos de sistemas trifásicos, los voltajes y las

impedancias son iguales y las intensidades de corriente están desplazadas 120° ; por lo que en estos casos :

$$P_R = \sqrt{3}IV \cos\theta \quad \Rightarrow \quad I = \frac{P_R}{\sqrt{3}V\cos\theta}$$

De todo esto podemos concluir lo sgte :

- Mayor potencia requiere aparentemente un sistema que lo requerido por su carga.

- El factor de potencia $\cos\theta = \frac{P_R}{P_A}$ es un término usado

para definir la porción de la potencia total aparente que hace trabajo útil o también puede decirse que a un determinado voltaje para desarrollar una gran potencia real se necesita una mayor intensidad de corriente si se tiene un factor de potencia bajo.

- Cuando la corriente eléctrica se transmite a través de conductores de un sistema, existen pérdidas debido al calentamiento de estos debido a su resistencia. Las pérdidas de potencia son : $P_H = I^2R'$

Este fenómeno es una de los principales fuentes de ineficiencia o pérdidas en los sistemas de producción electrificadas.

- Adjunto en el Anexo 12 hemos colocado un conjunto de fórmulas útiles a fin de facilitar el calculo de algunos parámetros útiles como son HP, R_w , Kva, etc.

3.3.2 Teoría del Motor Eléctrico de Inducción

En la industria del Petróleo se usan en un gran porcentaje los motores eléctricos, para diversos sistemas. Principalmente en la actualidad los motores eléctricos usados son los llamados motores de inducción de 3 fases de Jaula de Ardilla (squirrel cage induction motor), cuando hablamos de motores que accionan unidades de bombeo mecánico normalmente se habla de motores convencionales (tipo NEMA C) y motores de alto deslizamiento (Tipo NEMA D) y motores de ultra alto deslizamiento. Siendo estos últimos motores diseñados exclusivamente para unidades de bombeo por las características que describiremos a continuación.

3.3.2.1 Principio de Funcionamiento de los Motores Eléctricos de Inducción de Jaula de Ardilla

Si se aplica una carga polifásica de voltaje en el estator (normalmente es trifásico y a 60 ciclos/seg) del motor se generará un campo electromagnético entre el stator y el rotor. Este campo por condiciones de diseño creará flujos de corriente termomagnética que rotará a una velocidad sincrónica siendo este flujo el único contacto entre el rotor y el estator y mediante el cual el Rotor rotará a cierta velocidad y sin el cual no se producirá el torque necesario para accionar la máquina.

A su vez el Rotor es un cilindro construido de barras de metal de baja resistividad cuyo circuito o jaula de

ardilla está embebida de acero laminado de alto grado magnético y que tiene mucho mayor resistividad que el Rotor mismo.

Si el Rotor gira a la misma velocidad que el flujo de corriente inducido (velocidad sincrónica) no hay líneas de corriente cortados por las barras del Rotor y no habrá voltaje inducido en las barras del motor; por otro lado lo anterior es algo ideal puesto que siempre el Rotor gira a menor velocidad que las líneas de corriente (velocidad asincrónica) por lo que siempre existe un voltaje inducido en el Rotor que es función de las líneas de corriente del campo magnético y de la velocidad de "deslizamiento" (Termino que se definirá a continuación). Este voltaje inducido y las líneas de corriente que giran a una velocidad mayor que el Rotor producen pues un torque (o par motor) o fuerza en la misma dirección del giro del campo magnético. Esto puede resumirse en el principio de Fleming de la "mano izquierda": Colocándose entre si en ángulo recto los dedos índice, pulgar y medio; el dedo índice representa el sentido de giro del campo magnético (o líneas de corriente) y del Rotor; el dedo medio representa el flujo de corriente inducida en el Rotor y el dedo pulgar la dirección del Torque o fuerza.

Deslizamiento del Motor de Inducción (S) Este término es una medida relativa entre la velocidad de giro del Rotor (N_s) y la velocidad de giro de las líneas de corriente del

campo magnético producido (n) (velocidad sincrónica); se define como :

$$S = \frac{n_s - n}{n} \quad \text{se da en \%}$$

Este término se relaciona estrechamente con el Torque del motor y es un parámetro de selección de motores eléctricos.

Características del Para Motor Asíncronico o Torque

El torque del motor eléctrico según lo descrito se expresa como :

donde :

$$C = \frac{W_s \theta^2 R}{2(R^2 + W_s^2 L^2)}$$

C = Torque
 θ = Flujo magnético
 n = Resistencia ol del Rotor
 $W_s = W_1 - W_2$ = Velocidad angular de deslizamiento
 L = inductancia del circuito del Rotor

Para encontrar el valor máximo del torque, derivamos la expresión anterior :

$$\frac{dc}{dws} = \frac{2\theta^2 R(R^2 - W_s^2 L^2)}{4(R^2 + W_s^2 L^2)^2} = 0$$

Cuando $R = W_s L$

$$W_s = \frac{R}{L} \quad \text{Cuando el torque es máximo}$$

$$C_{\text{máx.}} = \frac{R^2 \theta^2 / L}{2(R^2 + R^2 L^2 / L^2)} = \frac{\theta^2}{4L}$$

De donde se concluye lo siguiente :

- 1.- Cuando el resbalamiento es cero, el Torque es cero. Esta situación es ideal, aunque al funcionar un motor en vacío se acerca a este valor.
- 2.- El Torque máximo no depende de R; pero si de la inductancia del Rotor que depende del diseño de su circuito; o sea que mejorando este puede llegarse a mejores valores del Torque máximo.
- 3.- El Torque es proporcional al cuadrado del flujo, es decir al cuadrado de la tensión aplicada; lo cual indica una notable sensibilidad a cambios del voltaje aplicado a estos motores.
- 4.- Cuando R es mayor es decir el Motor se calienta y se mantiene constante la carga, la velocidad es menor; así mismo cuando crece la carga disminuye la velocidad.
- 5.- El Torque no es proporcional linealmente a la velocidad, sino que se ve afectado por los factores mencionados, entonces puede darse una curva de las características que se muestran adjunto. (Ver figura 8).

Donde se nota que (a menor velocidad) al arranque se tiene el máximo Torque y este debe ser capaz de mover la unidad de bombeo en las condiciones más desfavorables: mal balance, mucha fricción de varillas, etc; luego tenemos una sección de la curva que representa un instante después del arranque donde la carga tiende a estabilizarse ante la aceleración del motor y luego el torque en 100% a plena carga donde la carga ya está estabilizada y también la velocidad del motor.

Clasificación de los Motores de Inducción

Los Motores Eléctricos de acuerdo a sus características de Performance han sido clasificados por la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) según :

- Motores tipo NEMA B : Su torque de arranque varía entre el 100 y 175% del Torque a plena carga. Su deslizamiento es menor al 5% no se usa normalmente en la industria del Petróleo.

Motores tipo NEMA C : Su Torque de arranque es del 200 al 250% del Torque a plena carga. Su deslizamiento es menor al 5%

- Motores tipo NEMA D o de alto deslizamiento: Su Torque de arranque es de 275% o más del Torque a plena carga, su deslizamiento varía entre el 5 al 8%

Los motores tipo NEMAC y NEMAD son usados en la industria del Petróleo. (Ver figura 9).

- Motores de Ultra Alto Deslizamiento : Estos motores son una versión mejorada de los motores NEMAD tienen un deslizamiento que va del 8 al 13% y su torque de arranque puede llegar hasta 330% del torque a plena carga. Se caracteriza entre otras cosas :
- Disminuye su velocidad al aumentar la demanda de torque
- Su corriente de arranque es mucho menor, lo que permite tener caídas de tensión en las barras menores y dar un arranque óptimo ya que el torque varía con el cuadrado de la tensión aplicada.
- Estos motores han sido diseñados para uso exclusivo de unidades de bombeo por lo que presentan las siguientes ventajas para este tipo de trabajo.

La característica velocidad torque que es elástica, permite que en circunstancias de elevada carga el motor entregue mayor torque (carrera ascendente de la PU) a menor velocidad, en la carrera descendente el motor entrega un mínimo de carga al aprovechar de la energía cinética de las contrapesas de la PU. Esto permite al conjunto unidad de bombeo y varillas de subsuelo, obtener rangos de carga mucho menores, al disminuir la carga máxima y aumentar la carga mínima del sistema. Los beneficios que se obtiene directamente por esta son :

- Menores valores de pico de potencia requeridos (ahorro en la inversión inicial).

Menores valores de pico de torque aplicado al reductor de la unidad (mejor r de la unidad).

- Efecto de fatiga menos marcado en la unidad de bombeo y varillas.
- Disminuye el valor de efecto cíclico de carga (CLF) al tener menores valores pico de consumo.

En nuestras operaciones tenemos 2 clases de motores en ultra-alto deslizamiento operando estos son :

- Econopac - Sargent
- Delcrosa

Estos últimos son de fabricación nacional y su rendimiento ha sido muy satisfactorio, superando en muchas de sus características a los importados.

Normalmente estos motores están siendo fabricados por tamaños (o sizes) siendo el menor un size 1 hasta size 5 (tamaño 5 el más grande). Cada tamaño tiene 4 modalidades de trabajo (o rango)

- Torque Bajo
- Torque Medio
- Torque Medio Alto
- Torque Alto

Siendo muy sencillo cambiar de modalidad de trabajo de acuerdo a nuestro requerimientos de carga.

Otras Clasificaciones de Estos Motores

De acuerdo a su envoltura los motores han sido clasificados por NEMA :

- 1.- A prueba de goteo
- 2.- A prueba de salpicadura
- 3.- TEFC (totalmente cerrados autoenfriados)
(totally enclosed fan-cooled)

De acuerdo al Sistema de Aislamiento:

Teniendo en cuenta la Resistencia Térmica para rangos de Temperatura

<u>CLASE</u>	<u>TEMPERATURA MAXIMA INTERNA</u>
A	105°C
B	130°C
F	155°C
H	180°C

3.4 Comparación entre Motores a Gas, Motores Eléctricos Convencionales y Motores Eléctricos de Ultra Alto Deslizamiento

A continuación se hace una breve comparación operativa entre estos tipos de motores, supuestamente instalados en iguales condiciones de operación.

Considerando : Mot.Gas = Motor a Gas Motocilindrico de
2 o 4 tiempos.

Mot.Elect. = Motor Eléctrico NEMAC
convencional

Mot.EKP/DEL = Mot.Eléctrico de Ultra Alto
Deslizamiento

Es necesario hacer notar que actualmente la industria nacional nos provee de una gran variedad de motores eléctricos. Incluso la Cía. Delcrosa fabrica los motores de ultra-alto deslizamiento. Los motores a gas son importados en su totalidad dándose el caso de usar sólo bujías y algunas pequeñas conexiones nacionales.

Además teniendo en cuenta que el alambre de cobre del rebobinado de los motores eléctricos es un 50% de todo el motor y que existen algunos accesorios eléctricos de fabricación nacional, podemos afirmar que los motores eléctricos tienen un 70% de componentes netamente nacionales.

Detalle	Motor Gas	Motor Elect.	EKP/ DEL
Inversión Inicial	Mayor	Menor	Mayor
Facilidades Instalación general	Menor	Mayor	Mayor
Facilidades Instalación en unidad B	Mayores	Menores	Menores
Facilidad Operación en Pozo	Menor	Medio	Mayor
Mantenimiento Diario	Necesita	No Necesita	No Necesita
Costo Mantenimiento	Mayor	Menor	Menor
Facilidades para Reparaciones Mayores	En el campo	En taller	En taller
Repuestos	Importados 95%	Nacionales 80%	Nacionales 70%
Tiempo de Vida	Mayor	Medio	Medio
Disponibilidad (tamaños menores)	Importación	Nacional	Nacional
Factor Crítico de Diseño	Pot/RPM	Torque arranque	Torque arranque
Torque Arranque Producido	Medio	Mayor	Mayor +
Torque Máximo de la UB	No afecta	Mayor	Menor
Potencia Nominal del Motor	Mayor	Mayor	Menor
Potencia en el Vástago	No influye	Mayor	Menor
Factor de Potencia (cos)	--	Menor	Mayor
Deslizamiento del Motor	--	Mayor	Mayor
Corriente RMS	--	Mayor	Menor
Rango de Cargas	No influye	Mayor	Menor
Caída de Tensión de Arranque	--	Mayor	Menor
Factor Cíclico de Carga	No examinado	Mayor	Menor
Consumo Total de Energía	Mayor	Medio	Menor

4.0 DESARROLLO DEL PROYECTO DE ELECTRIFICACION

4.1 Descripción General del Yacimiento Merina

Este es un yacimiento productivo comprendido entre los cuadrantes P-21 y T-23 perteneciente al área de Concesiones Lima. Actualmente esta zona está administrada por la División Norte del Departamento de Producción y pertenece al distrito de Ballena. (Ver figura Mapa General). Toda la producción de crudo es recolectado en la Batería 604 Merina y el gas comprimido en la misma estación.

Los pozos de esta área son de una profundidad promedio de +2500' y todos producen por el sistema de extracción artificial de bombeo mecánico. Las arenas productivas son: Echino y Hélico habiéndose comprobado que algunos pozos son productores de crudo LCT. La separación entre pozos es de aproximadamente 20 acres lo que facilita la ejecución de este proyecto.

Por tener casi todos los pozos características de profundidad, producción, condiciones de operación similares, y una topografía adecuada, hace aún más atractivo este proyecto; el cual podrá ejecutarse sin mayores dificultades en el campo.

4.1.1 Ubicación de Pozos del Yacimiento Merina

En el mapa de distribución general podemos ver la distribución de los 33 pozos a ser electrificados, donde

se nota la cercanía entre ellos, así como la ubicación de los otros pozos del área.

4.1.2 Datos de Subsuelo de los Pozos Involucrados y Característicos de las Condiciones de Operación Actuales

En las tablas N° 1 y N° 2 podemos apreciar estas características actuales de los pozos que se electrificarán con este proyecto. Según lo dicho anteriormente sus unidades de bombeo son de poca capacidad (16D o sea 16,000 lbs pulgada de torque y 40D o sea 40,000 lbs pulgada de torque), y sus motores a gas son de una potencia máxima de 7HP que son los motores para UB's de menor capacidad fabricados por la industria. Asimismo casi en su totalidad se vienen usando bombas de subsuelo con pistón de 1.25" ($1 \frac{1}{4}$) y sus sartas de varillas son en su totalidad de una sola dimensión, 5/8" (esto no está en la tabla). Todas las dimensiones están en sistema inglés, es decir las profundidades en pies, diámetros en pulgadas (forros casing y tubing), carrera de las unidades en pulgadas y SPM en golpes por minuto. Para mejor comprensión podemos aclarar algunos términos de las tablas:

Prof.Efect. : Se refiere a profundidad del pozo en pies o F.C (float collar) ya que ningún pozo tiene tapones.

- PT : Punta tubos, profundidad de la punta del tubing, en la mayoría de casos es un tubo perforado.
- NA : Niple de Asiento, profundidad donde va sentada la bomba de subsuelo.
- Bomba : Especificación de la bomba de subsuelo:
2 x φ " x L : 2 → para tubing de 2 ³/₈"
 φ → diámetro del pistón en pulg.
L → Longitud del barril de la bomba en pies.

4.2 Selección de Equipos y Materiales para la Electrificación

Según lo visto en capítulos anteriores para el cálculo y selección de los motores eléctricos, se han considerado las condiciones más desfavorables de los pozos a fin de asegurar la capacidad adecuada de los equipos. A priori se ha decidido utilizar motores de ultra alto deslizamiento para todos los casos por ser los motores de mejores características para unidades de bombeo según lo ya explicado anteriormente. Son motores trifásicos de 440 - 460 voltios 60 ciclos/seg con sistema automático de arranque y parada.

4.2.1 Cálculo de las Condiciones Óptimas de Operación de Cada Pozo

En la tabla N° 3 se puede apreciar las condiciones más adecuadas para trabajar las unidades de bombeo ya instaladas. Lógicamente estas están ligadas íntimamente a la selección del motor que se verá en el siguiente punto. De acuerdo a las características de los pozos como son :

- Poca profundidad
- Bajos niveles de sumergencia de las bombas de subsuelo
- No hay problemas de bloqueo por gas
- No hay presencia de parafina, ni scale, ni fluidos corrosivos.

Se han adoptado las siguientes características generales para determinar las condiciones óptimas o mejoradas de operación.

Bajos regímenes de extracción con velocidades de bombeo (SPM) medianas (8 a 11 SPM), no se ha considerado utilizar velocidades de bombeo mayores para evitar sincronismo, y menores nos causará problemas para conseguir poleas muy pequeñas, ya que los RPM de estos motores son de 1000 a 1200.

- Se han considerado las mismas bombas de subsuelo y casi en su mayoría los mismos Pf y NA, esto evitará intervenir el pozo para hacer cambio de condiciones de subsuelo.
- Es muy importante el valor del "Timer" el cual es el período de trabajo del motor en las 24 hrs. Para este caso en particular es fundamental para evitar :
 - Secar el pozo o trabajarlo en "pumping off", lo que evitará el golpe fluido y conificación de gas.
 - Ahorrar el máximo energía disponible del sistema
 - Balancear correctamente el trabajo del grupo eléctrico.

4.2.2 Cálculo y Selección de los Motores Eléctricos para cada Pozo, incluyendo Poleas

En la tabla N^o 3 tenemos las condiciones finales de selección y operación de todos los pozos. En el anexo 5

está la tabla general de cálculo lo cual se ha confeccionado según los siguientes criterios y decisiones.

Según se dijo al inicio de este capítulo se vio por conveniente la utilización en este proyecto de motores de ultra-alto deslizamiento, por tal motivo se ha utilizado el método descrito por la Cía Sargent Econopac para cálculo de los motores eléctricos.

Esto ha sido conveniente ya que este método ha dado buenos resultados para la selección de motores de este tipo.

- Se ha tratado de compensar la velocidad de bombeo (SPM) con los "timer" utilizados, ya que existe un limitado acceso a poleas para motores eléctricos de dimensiones pequeñas (menores de 5"), las poleas solicitadas son los que existen en el mercado habitualmente.

Metodología de Cálculo

- 1.- Se determina la carrera de la unidad, los SPM iniciales óptimos, y diámetro del pistón de la bomba.
- 2.- Con los datos del pozo y según la fórmula propuesta por Sargent Econopac (ver página siguiente) se calcula la carga necesaria del motor.
- 3.- De la tabla N^o 4 se selecciona el tipo de motor y modalidad de torque, que corresponda a la carga del motor mas próximo al calculado.

METODO PARA SELECCIONAR EL TAMAÑO OPTIMO DEL MOTOR
ECONOPAC

$$\text{CARGA CALCULADA} = T \times P \times C \times V \times G$$

donde:

T = Cte. de acuerdo al pistón de la bomba.

P = Profundidad del fluido en pies.

C = Carrera en pulgadas.

V = Factor de velocidad.

G = Gravedad específica del fluido.

METODO PARA DETERMINAR EL PROMEDIO DE RPM Y CALCULAR LA
POLEA DEL MOTOR

$$1200 - \left[\frac{\text{CARGA CALCULADA}}{\text{CAPACIDAD DE CARGA}} \times (1200 - \text{RPM} \times \text{CP}) \right] = \text{RPM PROMEDIO}$$

- 4.- Se calcula los RPM promedio del motor según la 2ª. fórmula propuesta (recordar que son motores asincrónicos de velocidad variable según los requerimientos).
- 5.- Con los RPM promedio, los datos de SPM, polea de la UB y relación de engranajes de la misma unidad se encuentra la polea del motor necesaria que satisfaga estas condiciones : (fórmula en cap.3.1.2).
- 6.- Con la polea calculada se aproxima a la polea comercial de dimensión más próxima.
- 7.- Con esta nueva polea se encuentran los SPM finales según la misma fórmula usada en el punto 5.
- 8.- Con estas SPM_f , la carrera en superficie y el factor de la bomba (según el φ del pistón). Se encuentra la producción del sistema en 24 hrs. de operación, notar que este factor está con 80% de eficiencia.
- 9.- Con la producción esperada del pozo (BPD) y la producción en 24 hrs. obtenemos el timer u horario de operación.
- 10.- De acuerdo al tipo de canales de la polea de la unidad se escoge la polea del motor.

Según lo anterior hemos determinado que para todos los casos satisface el motor Econopac size 1 en modo de torque bajo, sin embargo este motor es equivalente al motor DELCROSA tipo NVB modelo 160L6 en modo de torque bajo. Como ya se dijo el motor Delcrosa de fabricación nacional

es un motor de muy buenas características y es utilizado en nuestros campos últimamente electrificados del N.O, por lo que la selección final recae en este motor.

No debe sorprender la similitud de condiciones de operación de los pozos pues como se dijo inicialmente todo el yacimiento tiene características muy similares en todos sus pozos.

Sus especificaciones técnicas se describen posteriormente.

4.2.3 Requerimiento total de Energía y Selección del Grupo Electrónico

Siendo el timer o período de bombeo un factor muy importante para determinar la capacidad real del grupo electrónico a seleccionar es necesario observar lo siguiente:

Los timers de los motores seleccionados funcionan en ciclos de 15 min., vale decir por ejemplo que si un motor es de 50% timer ó 12 horas, el trabajo real del motor es de 7.5 minutos por 7.5 minutos de descanso en un total de 96 ciclos/día. Esto es beneficioso en los siguientes aspectos:

- Permite la recuperación del aporte del pozo de tal modo de tener un bombeo efectivo en cada ciclo.
- Permite el trabajo mejor balanceado del grupo electrónico o central de energía utilizada.

- Minimiza el tamaño del grupo electrógeno o central de energía a utilizar por tener una baja incidencia de simultaneidad al arrancar y trabajar pozos. Es decir en un ciclo de 15 min. se alternan los arranques y trabajos de pozos de tal modo de que coinciden en forma mínima y se aproveche al máximo la capacidad del grupo electrógeno seleccionado.

Por otro lado debemos considerar los siguientes factores a fin de seleccionar la capacidad del grupo electrógeno.

Los motores seleccionados en el modo torque bajo tienen :

Corriente máximo de trabajo : 7.7 Amp.

Corriente máximo arranque : 19.7 Amp.

El promedio de timer utilizado por motor es de 34% (de la tabla de cálculo Anexo N° 5).

Esto significa que cada motor solo utiliza 1/3 del ciclo para que el pozo bombee su producción, esto induce a concluir que en cada ciclo de bombeo trabajan los 33 pozos en grupos de 11. Sin embargo esta conclusión lleva a calcular que podríamos utilizar un grupo electrógeno de 11 x 77.7 84 Amperios de carga a 100% sin considerar el arranque de los pozos.

Actualmente tenemos en el Departamento de Producción grupos electrógenos disponibles de 100 Kw de potencia, analizaremos a continuación si cubre nuestra demanda de energía :

- Capacidad del grupo = 100 Kw
- Voltaje de salida = 480 voltios

Corriente Total Proporcionada a 0.8 de F.P

(Factor de Potencia)

$$I = \frac{100 \times 1000}{480 \times 1.73 \times \text{Kw}} = 150.5 \text{ Amperios}$$

- Considerando un trabajo de 80 % de la carga total disponible → Corriente disponible = 120.4 Amperios
- Esto nos da el siguiente cuadro de trabajo y arranque, según las condiciones iniciales de los motores seleccionados:

Caso A:	3 motores arrancan	
	8 trabajan	= consumo total = 120.7
Caso B:	2 motores arrancan	
	10 trabajan	= consumo total = 116.4
Caso C:	1 motor arranca	
	13 motores trabajan	= consumo total = 119.8
Caso D:	15 motores trabajan	

Entonces si se cumpliera cualquiera de las cuatro condiciones en cualquier momento o tiempo del ciclo de trabajo estaríamos cubriendo nuestra demanda de trabajo y podríamos utilizar este grupo.

En la figura N^o 10 se muestra el cuadro confeccionado de arranque y trabajo para estos motores con un grupo de

las características mencionadas, que satisface las condiciones dadas.

Lo anterior es muy importante ya que en la práctica muchas veces se ha sobrestimado las capacidades de los grupos y hemos tenido casos de grupos que trabajan con 20 a 30% de toda su capacidad disponible, lo que va en desmedro de su eficiencia mecánica y vida útil.

Las características principales de este grupo seleccionado son los siguientes :

- Potencia • 100 Kw
- Voltaje : 480 voltios
- Ciclaje : 60 ciclos/seg
- Amperaje : 150 Amperios de capacidad
- Motor : A Gas Natural de aspiración
Natural.

Las especificaciones técnicas se detallarán en el Anexo 9

4.2.4 Estimado de Redes Eléctricas y Accesorios

De acuerdo a los requerimientos de energía y a condiciones operativas conocidas se confeccionó el mapa de distribución general. Este mapa nos proporciona la cantidad de postes a utilizar y por ende la cantidad de cable a utilizar.

Las consideraciones del sistema de distribución son las siguientes :

$$E = \frac{19.7 \times 2 \times 5000 \times 10.8}{60370} = 32 \text{ por línea}$$

ó $E = 0.32 \text{ K volts/1000 Amp. para } 80\% \text{ F.P } \dots\dots\dots(2)$

$$\Rightarrow AE = \frac{0.32 \text{ K.V} \times 5000 \text{ pies} \times 19.7}{1000 \text{ Amp}} = 31.52 \text{ volt.}$$

Valor de la figura N° 2.4 Howell y Hogwood. Según esto un motor que trabaja en este punto tendrá un voltaje de 448 voltios al arranque, los motores escogidos pueden trabajar con $\pm/- 10\%$ de su voltaje nominal; o sea estaríamos dentro del rango adecuado.

(1) y (2) son métodos descritos por Howell y Hogwood, Electrified Oil Production, 1962

Distribución de Pozos por Circuitos

Circuito N° 1

7372
6818
996
6982
6739
6868
6124
7373
6989

Circuito N° 2

6666
6008
7374
6744
A-118
6751
A-106
5862

Circuito N° 3

6979

6998

2427

6819

A-121

5917

6171

Circuito N° 4

6999

6988

7201

A-94

6991

5686

5732

A-68

A-105

Circuitos trifásicos de 480 Voltios, cable AWG #2

4.3 Especificaciones Técnicas Recomendadas de los Equipos a Utilizar en el Proyecto

Estas especificaciones están de acuerdo con los requerimientos de Petroperú S.A a fin de cumplir con las normas de seguridad estipuladas, asegurar una correcta instalación y operación de equipos y permitir el abastecimiento oportuno de los repuestos necesarios. Todos ellos en concordancia con las normas internacionales de la industria del Petróleo.

4.3.1 Motores Eléctricos de Ultra Alto Deslizamiento

Están descritos en el anexo 8.

4.3.1 Grupos Electrógenos

Están descritos en el anexo 9

4.3.2 Otros Accesorios Principales

Están descritos en el anexo 10

5.0 EVALUACION TECNICO - ECONOMICA

5.1 Inversión Total

En el anexo N° 11 tenemos el valor en US\$ de todos los materiales necesarios para llevar a cabo el Proyecto, siendo 100% adquiridos en el País. Es importante notar que el Grupo electrógeno a utilizar no es un gasto para la empresa, puesto que se usará un Grupo electrógeno disponible dentro de los que tiene el Departamento de Producción, esto es importante recalcar ya que uno de los puntos favorables para iniciar este proyecto fue la de aprovechar estos equipos reinvertidos, mucho de los cuales provienen de recuperación de campos electrificados con G.E y ahora interconectadas a las Redes de Alta Tensión de Petroperú N.O.

5.1.1 Ahorro Inicial

Parte útil de este proyecto es la utilización en nuestras operaciones de los materiales salientes después de la electrificación. Esto se refiere principalmente a los 33 motores a gas que quedarán disponibles para usarse en las instalaciones de pozos nuevos. Debemos tener en cuenta que en el NOR-OESTE OESTE existe un numero apreciable de motores a gas péndientes de compra, (hace más de 3 años) los cuales por ser importados es muy difícil su adquisición en la situación económica de la Empresa y el País.

Motores a Gas Disponibles:

Modelo C-46 de 7 HP	= 33	
Costo de Motor Nuevo puesto en Talara	= 11,180	US\$
Factor aplicado a materiales de 2da condición (Por PetroPerú)	= 0.65	
Ahorro por utilización por motor	= 7,267	US\$/motor
Línea de alimentación de Gas a Motores para recuperar	= 10395	pies en total
Considerando 15 tubos de 1"φ 21' STD		
Costo de tubería por pozo 1"φ STD	= 0.81	\$/pies
Ahorro por línea de 1"φ	= 5473	US \$

5.1.2 Inversión Inicial

Consideramos para este caso los costos de los equipos y materiales necesarios y los gastos de instalación del G.E, postes, cables, motores eléctricos, etc. En el Anexo 6 podemos apreciar en detalle los gastos de instalación.

Equipos y materiales	243,357	US\$
Gastos de instalación	15,907	
Total inversión inicial	259,264	US\$ (1)

Para efectos de un mejor análisis se han considerado 3 casos, a cada uno de los cuales se realizará la evaluación económica.

Caso A : Se recuperan los 33 motores a Gas :

- Ahorro por los 33 motores	=	7,267\$ x 33	
	=	239,811 \$	
- Ahorro por línea de 1"φ	=	5,473 \$	
- Ahorro total	=	245,284 \$	(2A)
Inversión neta (1) - (2A)	=	13,980 \$	

Caso B : Se recuperan 17 motores y se dan de baja a 16 motores.

- Ahorro por 17 motores	=	123,539 \$	
- Ahorro por línea de 1"φ	=	5,473 \$	
		129,012 \$	(2B)
- Inversión neta (1) - (2B)	=	130,252 \$	

Caso C : Se recuperan 17 motores y se compra un G.E nuevo.

- Inversión inicial	=	259,264 + 50,000 = 309,264	(1c)
- Inversión neta (1c)-(2B)	=	180,252	

5.1.3 Lineamientos Económicos para la Evaluación del Proyecto y Metodología

Se han considerado los indicadores económicos que rigen la evaluación de Proyectos en PetroPerú.

Valor del Crudo N.O : 19.8 \$/barril

Tasa de Impuestos a la Renta : 35%

Tasa de descuento para Proyectos de Riesgo Mínimo: 15%

Depreciación Lineal en 5 años: 20%

La justificación técnica económica se va a hacer en base de los mayores ingresos ocasionados por la disminución de la producción diferida en este campo, ahorro en gas

natural (combustible) y aceite lubricantes de motores; siendo los gastos operativos, egresos para lo cual hemos considerado los mantenimientos preventivos del G.E de 500 Hs. y una descarbonización del motor a los 8000 Hs. de operación y el combustible utilizado.

Como ya se dijo se hará la evaluación para los 3 casos A, B y C de inversión neta, considerando además :

- Los gastos operativos se mantienen constantes para los 3 casos.
- La producción tiene una declinación de 10% anual.

5.2 Ingresos y Egresos

5.2.1 Producción No Diferida

Los ingresos que genera este proyecto se refiere a la disminución de la producción diferida diaria reportada; esto es del orden del 15% de la producción total de los pozos o sea 70 bpd, debido a problemas mecánicos del motor a gas.

Con el campo electrificado podemos alcanzar una producción diferida mínima, según lo visto en los primeros capítulos lo cual puede ser de 5% diaria, esto nos lleva a obtener un mejor rendimiento productivo de 10% diario o sea de 47 bpd.

En conclusión los ingresos adicionales por menor producción diferida son 47 bpd a 930.6 \$/día.

5.2.2 Mejor Aprovechamiento del Gas Combustible

El gas combustible utilizado en los motores a gas de este sector es de 1,656.2 pie³/día por motor, en promedio según las cartas de Gas de la Bat. 604.(1)

Lo que da un promedio diario de 54,656.25 pies³/día para los motores de nuestro proyecto.

El gas natural consumido por un Grupo.Electrógeno es del orden de los 8 pie³/hr./HP según la literatura y de las mediciones de gas realizadas en grupos electrógenos

(1) Fuente de información de los Balances de Gas del Dpto. de Producción y costo del gas promedio de Petroperú N.O.

utilizados en Nor-Oeste este consumo es del orden de los 22,125 pies³/día para este tipo de Grupos. (1)

$8 \text{ pie}^3/\text{hr.}/\text{HP} \times 24 \text{ hr}/\text{día} \times 110 \text{ HP} \times = 21,120 \text{ pies}^3/\text{día} .$

Ahorro por Gas = $54,656 - 22,125 = 32,531 \text{ pies}^3/\text{día}$

Ahorro en \$ = $32,531 \times 2.61 \text{ \$/Mpie}^3 (1) = 84.9 \text{ \$/día}$

2,547 \\$/mes

5.2.3 Ahorro de Aceite Lubricante:

El consumo de aceite lubricante por motor es de aproximadamente : 1/4 galón á 1/8 galón por día. Aceite tipo Minerol 150; (Petroperú)

Tomando en mínimo valor:

$1/8 \text{ GL}/\text{día} \times 33 \text{ motores}/\text{GL} \times 8\$/\text{GL} = 33 \text{ \$/día}$

$= 990 \text{ \$/mes}$

5.2.4 Gastos Operativos del Grupo Electrógeno

Sólo se refiere al G.E en vista que es el equipo que genera egresos previstos.

- Mantenimiento Diario : El G.E no se detiene. Consiste en revisión de Niveles de Aceites, agua y verificación del tablero de instrumentos, lo hace el personal de producción, consumo normal de aceite 1/4 Gl. x día (aceite G-40 equivalente SAE 40).

Costo/día $1/4\text{GL.}/\text{día} \times 8\$/\text{GL} = 2\$/\text{día}$

El personal no es gasto en vista que es el mismo Recorredor que tiene a cargo los pozos (antes y después de la electrificación).

- Mantenimiento de 500 Hs. (cada 21 días)

Consiste en cambio de aceite 7 1/4 Gls. = 58 \$

cambio de filtro de aceite = 15 \$

ocasionalmente cambio de bujías (6) = 12 \$

Personal Mecánico especializado realiza verificaciones y ajuste, sale fuera de servicio el grupo por 8 Hs.

Mano de Obra 32 Hs-H x 12 \$/Hs-H = 384 \$

Producción diferida 469 x 8/24 = 156 bpd = 3,089 \$

Total mantenimiento 500 Hrs. = 3,558 \$

Costo por día = 169 \$/día

- Mantenimiento de 8000 Hs (Aprox. 1 año)

Consiste en un mantenimiento en taller del G.E tanto del motor como del generador.

Costo Mano de Obra 64 Hs-H x 12\$/Hr-H = 768 \$
en taller

Materiales = 940 \$

Total

1,708 \$ (A)

Para este mantenimiento se reemplaza el G.E por otro en stand By y solo hay producción diferida 4 Hs:

78 bpd = 1,544 \$ (B)

Desmontaje y montaje de G.E 4 Hs-H x 12 \$/Hr.-H = 48\$(C)

$$\text{Costo por día} = (A + B + C)/330 = \frac{3,300 \$}{330} = 10 \$/\text{día}$$

$$\begin{aligned} \text{Total Gastos Operativos} &= 2 \$ \text{ día} + 169 \$/\text{dia} + 10\$/\text{dia} = \\ &= 181 \$/\text{día} \\ &= 5,430 \$/\text{mes} \end{aligned}$$

Resumen :

- Ingresos :

$$\text{Prod. No Diferida Anual} = P \times 19.8 \times 365, (\text{donde } P=\text{bpd})$$

$$\text{Ahorro por Gas} = 84.9 \$ \times 365$$

$$\text{Ahorro por Lubricante} = 33.0 \$ \times 365$$

$$= 43,034 + P \times 7,229 \$/\text{año}$$

- Egresos :

$$\text{Gastos Operativos} = 181 \$/\text{día}$$

$$= 65,160 \$/\text{año}$$

5.3 Flujo de Caja

Adjunto se obtiene los flujos de caja para los 3 casos

5.4 Resultados

De las tablas mostrados podemos observar que para los 3 casos nuestro proyecto es rentable.

	Caso A	Caso B	Caso C
VAN	621188 \$	504916 \$	466649 \$
TIR	>1000%	161%	115%
PAY OUT	1 mes	8 meses	11 meses

No es de extrañar estos resultados ya que del caso A podemos concluir que este proyecto prácticamente se paga con la recuperación de los motores a gas ya instalados, lo cual no está lejos de la realidad porque los proyectos de este tipo han sido priorizados en la Empresa.

6.0 Conclusiones

- Este Proyecto es sumamente rentable según lo analizado en los tres casos presentados. Esto se debe a los grandes ingresos generados y a la poca inversión neta realizada.
- La economía de este Proyecto del punto de vista de la empresa es más atractiva aún en vista que se obtendría de inmediato motores a gas disponibles para zonas de desarrollo o reemplazo en pozos que están difiriendo producción actualmente por falta de motores.
- Los motores de ultra alto deslizamiento son los motores ideales para campos como los nuestros del Nor-Oeste, es decir poco aporte productivo y bajos niveles de sumergencia de las bombas de subsuelo; dando la posibilidad de hacerlos trabajar en forma automática y horaria sin perjuicio de la fuente de alimentación y con un máximo de ahorro de energía.
- Para obtener los mejores rendimientos en cuanto a vida útil de los grupos electrógenos es necesario balancear correctamente las cargas de tal manera que estos trabajen a un 80% de su carga nominal sin alteraciones bruscas en ellas.
- Un campo petrolífero electrificado nos da una serie de ventajas en diversos aspectos:

Técnicos, los cuales nos permiten trabajar mejor los pozos y tener un cabal conocimiento de su aporte y

niveles de fluido para poder así disminuir las intervenciones de servicio de pozos y dar las condiciones de operación apropiadas a los equipos instalados a fin de poder asegurarles una vida útil mayor.

Económicos, los cuales nos permiten tener mucho menor producción diferida por fallas mecánicas de los motores, situación muy común utilizando motores de explosión y como también los gastos de mantenimiento, son mucho menores.

Administrativos, el control sobre la producción se hace más eficiente al poder usar menos personal y poder redistribuir la carga de trabajo de recorrido del campo más adecuadamente.

Desarrollo de la industria nacional, punto muy importante ya que puede afirmarse que en la actualidad la industria provee un 80% de los elementos necesarios para la instalación y mantenimiento de un campo petrolífero electrificado.

El consumo de gas de baterías o gas asociado como combustible en los motores de las U.B. es excesivo y además se pierde la recuperación de los líquidos que pudieran recuperarse de éste antes de ser usado.

- La producción diferida en el N.O. se debe en un 80% a problemas mecánicos de los motores de explosión de las U.B., debido a la alta vibración con que trabajan y a que permanecen trabajando las 24 horas

ininterrumpidamente, la formación de incrustaciones por el uso de agua sin tratamiento también es causa importante de este problema.

- Existe un marcado sobredimensionamiento de los equipos instalados en los pozos del N.O. debido a la rápida declinación de producción de éstos causados por el mecanismo de empuje de gas en solución predominante en nuestros reservorios. Situación que supone cambiar continuamente de condiciones de trabajo y que encarece nuestros costos de operación.

El trabajo ininterrumpido de las U.B. con motores accionados a gas y el sobredimensionamiento de las mismas causa serios problemas en nuestras instalaciones, siendo el principal el GOLPE FLUIDO, que a su vez origina fatiga de la caja reductora de la U.B., debilitamiento de la sarta de varillas, derrame de crudo en la boca del pozo y otras consecuencias más.

- El cálculo y selección rápido no detallado de un motor eléctrico a utilizar puede dar buenos resultados, sin embargo si profundizamos este cálculo vamos a encontrar muchos motores sobredimensionados que consumen más energía de la necesaria y nos incrementan nuestras inversiones iniciales.

El principal problema que puede presentarse al usar motores eléctricos de ULTRA-ALTO-DESLIZAMIENTO es que puede darse una deficiente extracción de fluido si es que la bomba utilizada tiene cierto resbalamiento y/o

interferencia de gas. Esto se debe a que los motores de este tipo trabajan en ciclos de 15 minutos; es decir, si se tiene un pozo de bajo nivel de fluido con un ciclo de trabajo (timer) de 6 horas tiene un tiempo de trabajo de 3.65 minutos por ciclo, el número de emboladas totales por ciclo en este caso es demasiado poco de tal forma que con el problema presente no se obtiene la producción deseada.

- Es necesario efectuar un análisis detallado del consumo de energía instantáneo de un campo electrificado con arranque y paradas automáticas de motores, como es el propuesto. Esto da como resultado aprovechar al máximo la capacidad del grupo electrógeno o banco de transformadores instalados y poder estimar con precisión su demanda real de energía en cualquier tiempo.

7.0 Recomendaciones

- Ejecutar este Proyecto al más corto plazo en vista de la magnífica rentabilidad del mismo, hay que tener en cuenta que existen grupos electrógenos disponibles en la Empresa para llevarlo a cabo.

Dar la máxima prioridad a los Proyectos de Electrificación en ejecución y a los presentados a fin de obtener los beneficios que de estos se derivan al menor tiempo posible.

- Es necesario hacer los estudios correspondientes a fin de obtener los valores reales en el Nor-Oeste de las eficiencias en subsuelo y en superficie para el cálculo de los motores de las unidades de bombeo, esto redundará en un ahorro ingente de egresos al no calcular motores sobredimensionados. Tenemos un campo con más de 1,800 unidades trabajando en un 20% electrificados, lo cual nos permite hacer mediciones de carga fácilmente y completar el estudio con cartas dinamométricas que se toman rutinariamente en nuestra operación.

- El Proyecto presentado en una segunda fase puede adecuarse al Proyecto Integral de Electrificación de Nor-Oeste reemplazando solamente el grupo por un banco de transformadores , trabajo no muy difícil, que ya se ha ejecutado en nuestras operaciones. Por otro lado este campo está muy cerca de las líneas de Alta Tensión de Feeder Uno (no más de 2 kms.), lo cual puede ser una

variante interesante en este trabajo presentado, si los estudios pertinentes, que involucran otras condiciones que escapen al presente estudio, así lo permitieran.

- Es necesario realizar estudios de optimación o mejoramiento de las condiciones de operación de los pozos utilizando el dinamómetro, medidores de nivel de fluido y otros instrumentos, lo cual nos dará como resultado :

- Alargar la vida útil de los equipos instalados especialmente de la caja reductora de la U.B., bomba de subsuelo y sarta de varillas.

Disminuir las intervenciones por servicios de pozos, factor de mayor incidencia en nuestros costos de producción.

- A fin de aminorar el efecto del sobredimensionamiento de nuestros equipos debemos implementar lo siguiente:

- Trabajos horarios o por ciclos en los pozos en forma flexible.
- Instalar unidades de bombeo con suficiente flexibilidad para adecuarse a sucesivos cambios de condiciones de operación.

- Debe ser norma la toma de mediciones físicas (nivel de fluido y dinagrama) y el control de la carga consumida por los motores eléctricos de las U.B. en forma periódica en nuestros pozos. Esto proporcionará información valiosa para optimar diseños y cálculos tanto de las unidades de bombeo, motores, grupos electrógenos y transformadores.

- Se debe hacer estudios para optimar la utilización de los grupos electrógenos instalados en diversas áreas del Nor-Oeste a fin de asegurarles una carga balanceada, un mayor porcentaje de utilización y mayor vida útil y poder aprovechar al máximo su capacidad.
- Al trabajar con grupos electrógenos debe contarse con un grupo electrógeno en stand-by ya sea instalado en la locación o listo para reemplazo; esto dará mucho mayor confiabilidad al sistema y evitará diferir producción por fallas imprevistas del grupo.
- Debe coordinarse con los fabricantes de motores eléctricos para implementar motores de ULTRA-ALTO-DESLIZAMIENTO con ciclos mayores de 15 minutos, pueden ser de 30 ó 40 minutos. Esto favorecerá a los pozos con deficiencias en sus sistemas de bombeo o con interferencia de gas que impiden un bombeo eficiente.
- Se debe detallar al máximo el cálculo y selección de los motores utilizando los valores más reales que se puedan encontrar de los factores de pérdidas en el subsuelo, pérdidas en superficie y de carga cíclica para cada área, si fuera posible.
- Las bombas de subsuelo pueden ser mejoradas en su eficiencia utilizando los siguientes dispositivos:
 - Válvulas tipo anillo
 - Dispositivos Sargent 927
 - Pistones Loc-No
 - Separador de gas Guiberson

- Anclas de gas
- Tubos de aire
- Al diseñar un sistema electrificado de pozos que trabajen en forma automática se debe confeccionar la tabla de arranque y trabajo de los pozos. Esto nos proporcionará un estimado muy próximo al real de la carga consumida por el sistema y hacer las predicciones de consumo de energía en forma acertada, lo cual permite seleccionar el grupo electrógeno óptimo.

PROYECTO DE ELECTRIFICACION DE 33 POZOS EN MERINA BAT 604
OPERACIONES NOR-OESTE

FLUJO DE CAJA CASO A (SE RECUPERAN 33 MOTORES A GAS)
INVERSION INICIAL = EQ.e INST= 259264 U.S. \$

AÑOS	0	1	2	3	4	5
PRODUCCION		469	422.1	379.9	341.9	307.7
INVERSION NETA	13980					
FLUJO DE FONDOS :						
PROD. NO DIFERIDA		46.9	42.2	38.0	34.2	30.8
INGRESOS POR PROD. ADICIONAL		338946	305052	274547	247092	222383
AHORRO EN GAS COMB.		43034	43034	43034	43034	43034
GASTOS OPERATIVOS		65160	65160	65160	65160	65160
DEPRECIACION		51853	51853	51853	51853	51853
INGRESOS ANTES DE IMP.		264968	231073	200568	173113	148404
IMPUESTOS		92739	80876	70199	60590	51941
INGRESOS DESPUES DE IMP.		172229	150197	130369	112523	96463
FLUJO EFECTIVO	-13980	224082	202050	182222	164376	148315
1/(1+.15) ⁿ *n FLUJO ACTUALIZADO		194854	152779	119814	93983	73739

NPV (FLUJO ACTUAL ACUM.)	635168	DATOS	
VAN	621188	% DECLINACION ANUAL	0.1
TASA DE DESCUENTO (VAN = 0)	15.9	PRECIO CRUDO \$	19.8
TIR	% PROD. NO DIFERIDA	0.1
		%DEPRECIACION LINEAL	0.2
		TASA IMPOSITIVA	0.35
		TASA DE DESCUENTO	0.15

RESULTADOS	
VALOR ACTUAL NETO U.S. \$	621188
TASA INTERNA DE RETORNO	1593%
PAY OUT (MESES)	1

**PROYECTO DE ELECTRIFICACION DE 33 POZOS EN MERINA BAT 604
OPERACIONES NOR- OESTE**

**FLUJO DE CAJA CASO B (SE RECUPERAN 17 MOTORES A GAS)
INVERSION INICIAL = EQ.e INST= 259264 U.S. \$**

AÑOS	0	1	2	3	4	5
PRODUCCION		469	422.1	379.9	341.9	307.7
INVERSION NETA	130252					
FLUJO DE FONDOS :						
PROD. NO DIFERIDA		46.9	42.2	38.0	34.2	30.8
INGRESOS POR PROD. ADICIONA		338946	305052	274547	247092	222383
AHORRO EN GAS COMB.		43034	43034	43034	43034	43034
GASTOS OPERATIVOS		65160	65160	65160	65160	65160
DEPRECIACION		51853	51853	51853	51853	51853
INGRESOS ANTES DE IMP.		264968	231073	200568	173113	148404
IMPUESTOS		92739	80876	70199	60590	51941
INGRESOS DESPUES DE IMP.		172229	150197	130369	112523	96463
FLUJO EFECTIVO	-130252	224082	202050	182222	164376	148315
1/(1+.15) ⁿ FLUJO ACTUALIZADO		194854	152779	119814	93983	73739

NPV (FLUJO ACTUAL ACUM.)	635168	DATOS	
VAN	504916	% DECLINACION ANUAL	0.1
TASA DE DESCUENTO (VAN = 0)	1.61	PRECIO CRUDO \$	19.8
TIR	161.37%	% PROD. NO DIFERIDA	0.1
		%DEPRECIACION LINEAL	0.2
		TASA IMPOSITIVA	0.35
		TASA DE DESCUENTO	0.15

RESULTADOS	
VALOR ACTUAL NETO U.S. \$	504916
TASA INTERNA DE RETORNO	161%
PAY OUT (MESES)	8

PROYECTO DE ELECTRIFICACION DE 33 POZOS EN MERINA BAT 604
OPERACIONES NOR- OESTE

FLUJO DE CAJA CASO C (SE RECUPERAN 17 MOTORES A GAS Y SE COMPRA G.E. NUEVO)
INVERSION INICIAL = EQ.e INST= 309264 U.S. \$

AÑOS	0	1	2	3	4	5
PRODUCCION		469	422.1	379.9	341.9	307.7
INVERSION NETA	180252					
FLUJO DE FONDOS :						
PROD. NO DIFERIDA		46.9	42.2	38.0	34.2	30.8
INGRESOS POR PROD. ADICIONAL		338946	305052	274547	247092	222383
AHORRO EN GAS COMB.		43034	43034	43034	43034	43034
GASTOS OPERATIVOS		65160	65160	65160	65160	65160
DEPRECIACION		61853	61853	61853	61853	61853
INGRESOS ANTES DE IMP.		254968	221073	190568	163113	138404
IMPUESTOS		89239	77376	66699	57090	48441
INGRESOS DESPUES DE IMP.		165729	143697	123869	106023	89963
FLUJO EFECTIVO	-180252	227582	205550	185722	167876	151815
1/(1+.15) ⁿ * FLUJO ACTUALIZADO		197897	155425	122115	95984	75479

NPV (FLUJO ACTUAL ACUM.)	646901	DATOS	
VAN	466649	% DECLINACION ANUAL	0.1
TASA DE DESCUENTO (VAN = 0)	1.15	PRECIO CRUDO \$	19.8
TIR	114.94%	% PROD. NO DIFERIDA	0.1
		%DEPRECIACION LINEAL	0.2
		TASA IMPOSITIVA	0.35
		TASA DE DESCUENTO	0.15

RESULTADOS	
VALOR ACTUAL NETO U.S. \$	466649
TASA INTERNA DE RETORNO	115%
PAY OUT (MESES)	11

8.0 BIBLIOGRAFIA

1. J.K Howell, E. Hogwood Jr.: Electrified Oil Production por la Westinghouse Electric Corporation y The Petroleum Publishing Company (1962).
2. D.R Skinner : "Efficient Use of Electric Power in Production Operations", J.P.T (Agosto 1964).
3. Jorge Mastronardi, Ricardo Bauab : Fundamentos del Sistema Artificial de Extracción de Petróleo por Bombeo Mecánico, Yacimientos Petrolíferos Fiscales S.E. Argentina
4. Manual de Diseño de Unidades de Bombeo, Petróleos del Perú, Operaciones Nor Oeste (1968).
5. T.E.W Nind: Fundamentos de Producción y Mantenimiento de Pozos Petroleros (1987).
6. Drilling/Production Reales of Thumb Handbook, Word Oil., Golf.Publishing Co. (1971).
7. Normas para Elaborar y Evaluar Proyectos de Inversión, PetroPerú S.A (Junio 1985).
- 8 Expediente Técnico de Reactivación de 306 pozos ATA: Instalaciones Eléctricas de Pozos de la II etapa, 89 Pozos, PetroPerú S.A Abril 1985.