

Permite reducir gastos

Por Hernán Silva

El consumo de energía en un yacimiento petrolero juega un papel preponderante en los gastos operativos de explotación.

El trabajo *Estudio sobre la mejor utilización de la energía en la extracción por bombeo mecánico* resultó ganador del concurso de trabajos estudiantiles organizado por la Sección Argentina de la Society of Petroleum Engineers, con motivo de la realización del III Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería del Petróleo efectuado en Buenos Aires en abril de este año.

El estudio determina el comportamiento del coeficiente de cargas cíclicas y su variación con la dispersión relativa del torque obtenida a partir de las curvas dinamométricas, cuantificando el incremento de producción y ahorro de consumo -al quitar los packers- y calculando las pérdidas por potencia reactiva provocadas por el sobredimensionamiento de los motores.

Estudio sobre la mejor utilización de la energía en la extracción por bombeo mecánico

Este informe tiene por objeto la mejor utilización de la energía en pozos con bombeo mecánico.

El mismo consta de cuatro partes:

- Selección de la muestra de pozos. La misma se compone por pozos que captan gas por entrecolumna y por pozos que poseen packers.
- Medición de potencia activa, reactiva, aparente y $\cos\phi$.
- Procesamiento de la información.
- Análisis de la información procesada. Dentro de este punto los tópicos estudiados fueron los siguientes:
 - Efecto del contrapeso en las pérdidas de energía por carga cíclica en motores trifásicos.
 - Comparación del consumo de energía en pozos que captan gas por entrecolumna con aquellos que tienen packers. Análisis de la variación que sufrirían las distintas variables (caudal, potencia en el vástago, coeficiente de forma) si se quitasen los packers y pasasen a captar gas por el anular.
 - Efecto del sobredimensionamiento de los motores sobre el $\cos\phi$.

Selección de la muestra de pozos

Los pozos elegidos para la muestra fueron divididos en dos grupos: aquellos que poseen packers y aquellos que captan gas por entrecolumna.

El criterio de selección fue el siguiente: se tomaron siete pozos que produzcan alto caudal y ocho con bajo caudal para cada grupo, totalizando una muestra de 30 pozos.

La muestra quedó constituida de la siguiente manera:

- 6 pozos con packers que producen alto caudal.
- 7 pozos que captan gas por entrecolumna

y producen alto caudal.

- 8 pozos con packers que producen bajo caudal.
- 8 pozos que captan gas por entrecolumna y producen bajos caudales.

Nota: En realidad la cantidad muestreada fue de 29 pozos, ya que sólo se encontraron 6 pozos con packers que producen altos caudales en lugar de 7, tal cual se había convenido.

Tarea de campo

Se efectuaron mediciones de potencia activa, reactiva, aparente y $\cos\phi$. El aparato utilizado fue un HIOKI, el cual toma los registros de las distintas variables en forma instantánea, no pudiendo obtener de esta manera, un valor promedio representativo de las distintas magnitudes medidas. Dicho inconveniente fue salvado de la siguiente manera: se tomaron los registros instantáneos en cuatro momentos distintos:

- A-punto muerto superior
- B-mitad de carrera descendente
- C-punto muerto inferior
- D-mitad de carrera ascendente

De los cuatro valores se obtuvo un único valor representativo del ciclo entero. Este procedimiento se repitió cuatro veces con el fin de minimizar los errores.

También fue medida la potencia de arranque de los respectivos motores.

El aparato de medición se conectó a los tableros de comando de los distintos pozos de la siguiente manera: medición de tensión en las tres fases RST de 380v entre cada una; instalación de pinzas amperométricas a las fases RT. La alimentación del equipo HIOKI es de 220v. Para ello se conectó una fase de entrada con tierra obteniendo de esta manera la energía requerida por el aparato.

Procesamiento

Una vez obtenida la información de

Hernán Silva es estudiante de quinto año de la carrera de Ingeniería del Petróleo del Instituto Tecnológico de Buenos Aires.

campo, la misma fue volcada a una planilla de cálculo donde se aprecian los valores promedios de las distintas magnitudes medidas. Para la potencia activa se calculó la dispersión.

La planilla consta además de diversos datos de los pozos muestreados: AIB, producción bruta, relación gas-líquido, nivel dinámico, potencia nominal de los motores.

Análisis de la información procesada

■ Estudio de las pérdidas de energía por efecto de las cargas cíclicas.

El coeficiente de carga cíclica se define como:

$$CF = \frac{\text{corriente rms}}{\text{corriente media}}$$

$$CF = \frac{\sqrt{(\sum i^2) \times 1/n}}{1/n \times \sum i} \quad (1)$$

i: intensidad de corriente

n: número de mediciones por ciclo. (En nuestro caso n=4).

Como la tensión en los motores permanece constante (trabajan a 380v), se puede afirmar que la potencia consumida es directamente proporcional a la intensidad de corriente:

$$CF = \frac{\sqrt{(\sum HP^2) \times 1/n}}{1/n \times \sum HP} \quad (2)$$

$$CF = \frac{\sqrt{(Hp_a^2 + Hp_b^2 + Hp_c^2 + Hp_d^2) \times 1/n}}{(Hp_a + Hp_b + Hp_c + Hp_d) \times 1/n}$$

El coeficiente de carga cíclica o coeficiente de forma representa directamente las pérdidas de energía:

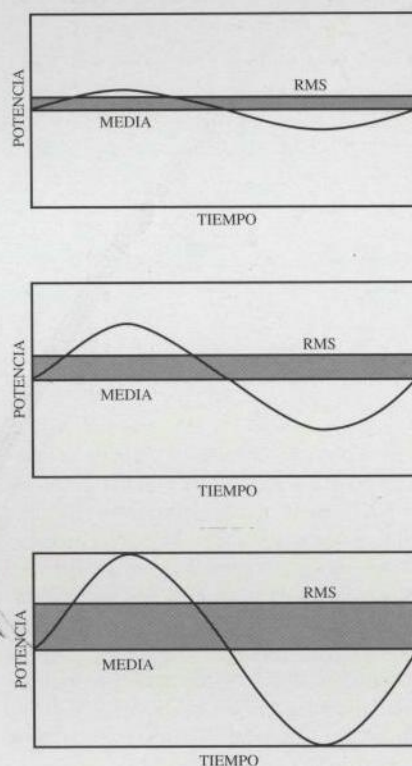
$$HP_{\text{motor}} = HP_{\text{vástago}} \times CF$$

Nota: A los efectos prácticos no se consideran las pérdidas mecánicas entre el motor y el vástago. Lo que se intenta estudiar en este ítem son las pérdidas térmicas que sufre un motor cuando está sometido a cargas cíclicas.

El coeficiente de forma es ≥ 1 y cuanto

más se aleja de la unidad, mayores son las pérdidas del sistema y, en definitiva, menor es la rentabilidad. De allí la importancia del estudio de su comportamiento.

Si se tomaran tres diferentes pozos que trabajaran a una misma intensidad de corriente media, pero con variaciones distintas, se observaría que cuanto mayor es el rango de valores que toma la curva en el tiempo, mayor es la diferencia entre la corriente RMS y la media:



El área sombreada representa directamente las pérdidas.

Estos principios básicos están avalados por las mediciones realizadas. Para ello se plotearon los pares CF obtenidos mediante la fórmula (3) vs la dispersión relativa, que se define de la siguiente manera:

$$\sigma_T = \frac{\sigma}{HP_{\text{med}}}$$

σ = dispersión de potencias activas.

HP_{med} : medida de las potencias activas.

El motivo por el cual se tomó la dispersión relativa para el análisis en lugar de la absoluta, fue que esta última no presentaba una influencia directa en el coeficiente de forma, lo cual es bastante lógico ya que lo que interesa es la variación porcentual. Por ejemplo, no son iguales las pérdidas en un motor cuya potencia varía entre 1HP y 10HP que en otro cuya potencia varía entre 50HP y 60HP. En el primer caso la potencia aumenta desde el valor mínimo al máximo un 1.000%, mientras que en el segundo caso lo hace en un 20%. Indudablemente las pérdidas no son las mismas aunque la dispersión en ambos casos puede que sea igual. De allí la importancia de relativizar el valor de la dispersión al valor medio de la potencia activa.

Cargados los pares de puntos en la computadora y ajustando la mejor curva, se encontró que seguían una ley exponencial:

$$CF = 0.91 \times e^{0,38\sigma_T}$$

(Ver Figura 1)

La fórmula ajusta bastante bien con sigma tomada como dispersión de la potencia, lo cual no lo hace muy operativo, ya que se necesitaría tomar registros de potencia activa con aparatos especiales cada vez que se requiera de este dato.

Pero como la potencia es directamente proporcional a la intensidad de corriente y ésta a su vez es proporcional al torque, en definitiva la potencia es proporcional al torque:

$$HP \approx T \Rightarrow HP = \alpha \times T$$

$$\sigma HP = \alpha \times \sigma T$$

T = torque

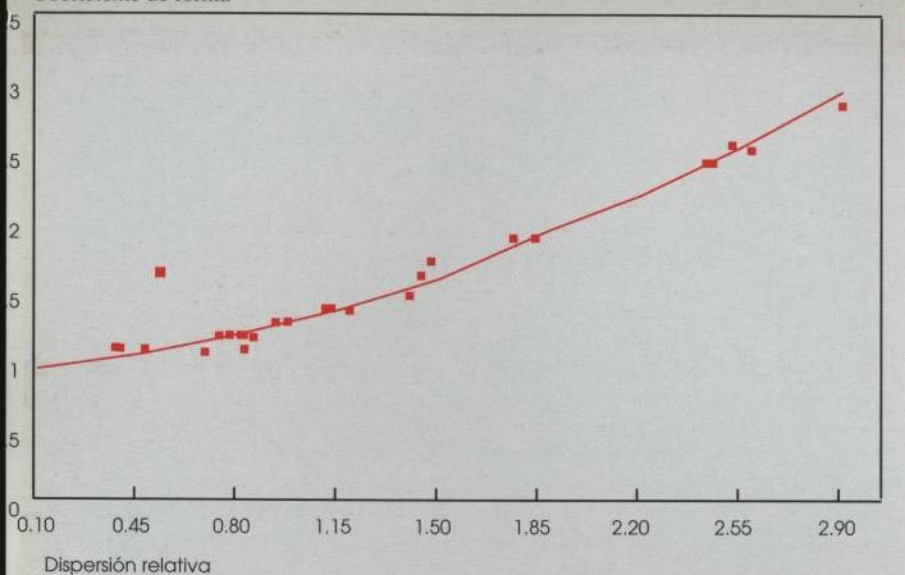
σT = dispersión del torque

Tanto la dispersión del torque como su valor medio pueden obtenerse de las cartas dinamométricas.

Aquí se puede apreciar la importancia de un buen contrapeso ya que cuanto mejor sea el balanceado, menor será el valor de la dispersión del torque y menores serán las pérdidas (CF), disminuyendo de esta manera la potencia requerida por el motor:

$$HP_{\text{requeridos}} = CF \times HP_{\text{vástago}}$$

En este sentido los equipos que mejor optimizan el efecto del contrapeso son los



neumáticos ya que se puede obtener una variación continua del balanceado. El inconveniente de estos equipos es el elevado costo de mantenimiento.

■ Conversión de pozos con packers a pozos que captan gas por entrecolumna.

¿Cuánto aumentaría la producción de un pozo con packer si éste se le quitara?, o ¿cuánta energía extra implicaría el cambio?, son algunas de las preguntas que trataré de contestar en este ítem.

A tal efecto se confeccionaron cuatro tablas, cada una de ellas para cada grupo de pozos:

- pozos con packers y altos caudales.
- pozos con packers y bajos caudales.
- pozos que captan gas por entrecolumna y con altos caudales.
- pozos que captan gas por entrecolumna y con bajos caudales.

Se le asigna a cada pozo el respectivo valor de potencia unitaria.

Nota: Se define potencia unitaria a aquella necesaria para producir $1\text{m}^3/\text{d}$.

De esta manera se observa que los pozos que tienen packers y producen altos caudales de bruta necesitan en promedio 0.62HP para extraer $1\text{m}^3/\text{d}$, mientras que los pozos que captan gas por entrecolumna y producen altos caudales requerirán sólo 0.44HP, en promedio, para producir $1\text{m}^3/\text{d}$.

Este último grupo de pozos está consumiendo un 29% menos de energía unitaria que los pozos del primer grupo.

Entre los pozos de bajo caudal no se aprecia una notable diferencia.

Si quitásemos los packers, cabría esperar que la potencia unitaria descendiese un 29%.

Según se definió con anterioridad la mis-

ma es:

$$PU = \frac{HP_{\text{motor}}}{Q}$$

$$PU = \frac{HP_{\text{vástago}} \times CF}{Q}$$

$$PU = \frac{(HP_{\text{bba.}} + \Delta p \times Q) \times CF}{Q}$$

Si la potencia unitaria así definida se reduce en un 29%, habría que estudiar cuáles de los parámetros que la componen ($HP_{\text{bba.}}$, pérdidas de carga, caudal, CF), absorbería ese cambio para que la igualdad se mantenga.

- Se comenzó estudiando la eficiencia volumétrica de las bombas de profundidad de los distintos pozos.

Nota: se define eficiencia volumétrica como el cociente entre el caudal que extrae la bomba y el caudal máximo que extraería en condiciones óptimas.

Se tomaron los siguientes datos: longitud de carrera, golpes por minuto y diámetro de pistón de cada pozo. Luego con los mismos se determinó el caudal teórico. (Se consideró a este valor igual al 80% del máximo definido por GPM, longitud de carrera y ϕ pistón, independizándonos de esta manera de las pérdidas que sufre el sistema).

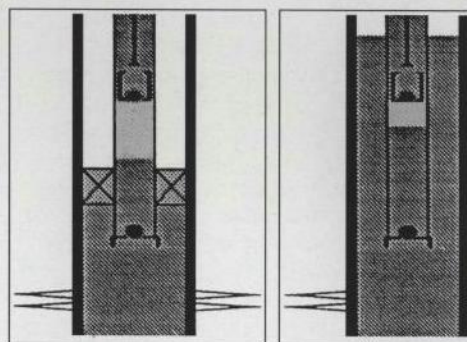
Se registró la siguiente información:

- pozos con packers:
 - eficiencia promedio: 34%
 - carrera promedio: 102
 - GPM promedio: 8.5
- pozos que captan:
 - eficiencia promedio: 49%
 - carrera promedio: 85.2

GPM promedio: 8.6

Entre los pozos de alto caudal se encontró que la eficiencia volumétrica en aquellos que poseen packers es del 55.27%, mientras que en los que captan la relación promedio es del 75.38%. De esta manera la eficiencia asciende en un 36.38%.

Esta diferencia se justifica en el efecto nocivo que tiene el gas en la producción por bombeo mecánico. En los pozos con packers la entrecolumna está obstruida y todo el gas está obligado a ascender por la bomba, mientras que en los pozos que captan por entrecolumna, parte del gas escapará por el casing y parte ingresará a la bomba. Cuanto menor sea la contrapresión en el espacio anular, mayores serán los volúmenes de gas captados por entrecolumna:



Estos datos son comparables ya que la relación gas-líquido promedio y los caudales de producción son similares para ambos tipos de pozos:

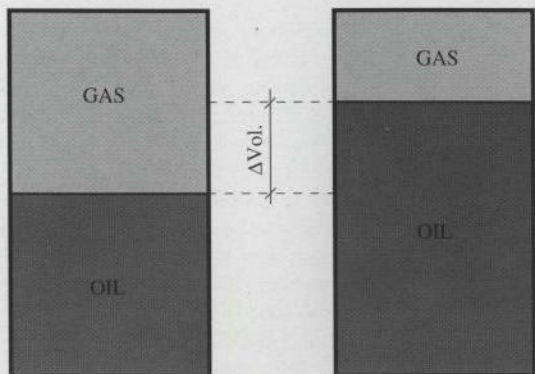
Pozos con packers:	GLR = 29
	Q = 45
Pozos sin packers:	GLR = 28.6
	Q = 46

De esta manera los m^3 de gas promedio producidos son iguales para pozos con packers y pozos que captan.

Finalmente si se quitaran los packers la eficiencia volumétrica de la bomba aumentaría un 36.4%. Luego ese incremento en el llenado se traduce en un aumento del caudal de producción.

EL CAUDAL AUMENTA UN 36.4%

- La potencia en la bomba también variará ya que los volúmenes de gas comprimidos varían así como los m^3 de fluido bombeados por carrera:



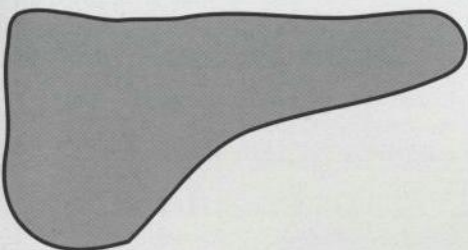
Este gráfico representa la curva dinamométrica de fondo. La escala del eje horizontal inferior marca el porcentaje de llenado del barril de la bomba. Así, cuando la eficiencia volumétrica es de 100%, la válvula móvil encontrará fluido al comenzar la carrera descendente y la carta dinamométrica tendrá la forma de un rectángulo.

Por otro lado, cuando la eficiencia sea un infinitésimo mayor que 0%, la carrera descendente comprimirá gas y sólo al final de la misma la válvula móvil abrirá, descargando el peso en la válvula fija. Este sería el caso límite más cercano al bloqueo por gas. La gráfica se acercará a un triángulo.

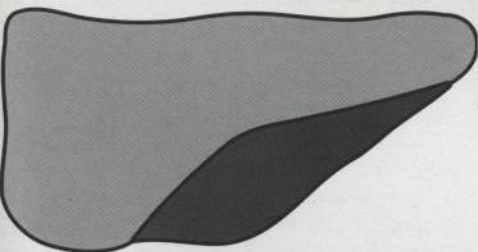
Entre estos dos casos se encuentran todos los posibles en los que no haya bloqueo por gas. El eje inferior fue dividido en 10 partes iguales.

Ahora se está en condiciones de saber cuál es el aumento porcentual de la potencia en la bomba sabiendo que la eficiencia de llenado varía desde 55.27% hasta 75.38%:

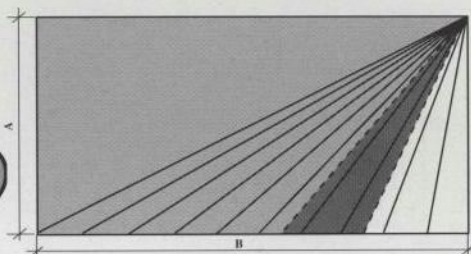
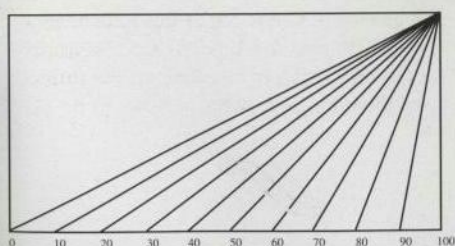
El problema sería cuantificar el cambio de potencia consumida. La misma está representada por el área encerrada por la curva dinamométrica de fondo:



Al disminuir el efecto de compresión de gas, el área aumenta:



Midiendo el aumento areal se solucionaría el problema. Para ello se diseñó el siguiente modelo:



$$\Delta \text{SUP} = 0.20 (A \times B) / 2$$

$$\text{SUP}_0 = (A \times B) / 2 + 0.55 (A \times B) / 2 = 1.55 (A \times B) / 2$$

$$100 \times \Delta \text{SUP} / \text{SUP}_0 = 0.20 / 1.55 \times 100 = 12.9\%$$

generalizando

$$\Delta \text{HP}_{\text{bba}} (\%) = \frac{\text{EF}_2 - \text{EF}_1}{100 + \text{EF}_1} \times 100$$

LA POTENCIA EN LA BOMBA AUMENTA UN 12.9%

- La potencia hidráulica se define como:

$$\text{HP}_{\text{hidráulico}} = \Delta p \times Q$$

donde Δp son las pérdidas de carga que sufre el fluido en su camino ascendente hasta la boca de pozo.

Aplicando la fórmula de Darcy para flujo en cañerías, se llega a que las pérdidas de carga son proporcionales al cuadrado del caudal:

$$\Delta p = \frac{\beta \times Q^2}{V \times D^5} \times L \quad \therefore b = \frac{8 \times \lambda}{P^2 \times g} \quad \therefore$$

$$\lambda = 64 / R \quad \therefore R = V \times L /$$

$$R_2 = 1.364 R_1$$

$$\lambda_2 = 0.73 \lambda_1$$

$$\beta_2 = 0.73 \beta_1$$

$$Q_2^2 = 1.86 Q_1^2$$

$$\Delta p_2 = 1.36 \Delta p_1$$

$$\Delta p_2 \times Q_2 = 1.85 \Delta p_1 \times Q_1$$

La potencia hidráulica aumenta un 85%

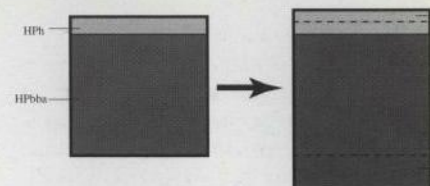
- Para estudiar el aumento de potencia en el vástago, se debe tener en cuenta el aumento de potencia en la bomba y el aumento de potencia hidráulica:

$$\text{HP}_{\text{vástago1}} = \text{HP}_{\text{bba1}} + \text{HP}_{\text{hidr1}}$$

Quitando los packers:

$$\text{HP}_{\text{vástago2}} = 1.129 \text{HP}_{\text{bba1}} + 1.85 \text{HP}_{\text{hidr1}}$$

Se tomó como convención que la potencia hidráulica es del orden del 5% de la potencia consumida en la bomba:



$$\text{HP}_{\text{vástago2}} = 1.129 \text{HP}_{\text{bba1}} + 1.85 \times 0.05 \text{HP}_{\text{hidr1}}$$

$$\text{HP}_{\text{vástago2}} = 1.2215 \text{HP}_{\text{bba1}}$$

$$\text{HP}_{\text{vástago2}} / \text{HP}_{\text{vástago1}} = 1.1633$$

La potencia en el vástago aumenta un 16.33%

- Sólo restaría conocer cómo variará CF con el cambio. Para ello se recurre a la ecuación general de potencia unitaria:

$$PU = (HP_{\text{vástago}} \times CF) / Q$$

$$PU_2 = (HP_{\text{vástago2}} \times CF_2) / Q \Rightarrow$$

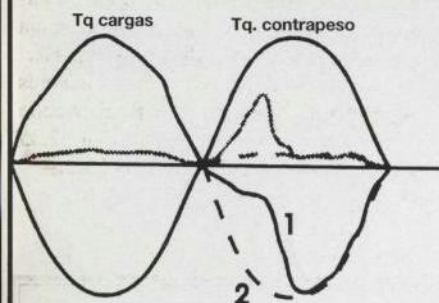
$$0.71 PU_1 = (1.163 HP_{\text{vástago1}} \times CF_2) / 1.364 Q_1$$

$$(0.71 \times 1.364 / 1.163) \times (PU_1 \times Q_1 / HP_{\text{vástago1}}) = CF_2$$

$$0.83 \times CF_1 = CF_2$$

El coeficiente de forma disminuye un 17%

Este resultado se justifica en el hecho que la compresión de gas disminuye al quitar los packers. De esta manera la carta dinométrica mejora. El diagrama de torques se modifica de tal manera que el torque de cargas tiende a asemejarse al torque en el contrapeso desfasado 180°:



1-con packer
2-sin packer

Finalmente el torque neto, que es la suma algebraica de ambas curvas (torque de cargas y torque del contrapeso), tenderá a disminuir su dispersión y, por lo tanto, el coeficiente de forma o cargas cíclicas disminuirá tal cual se demostró en el punto "Estudio de las pérdidas de energía por efecto de las cargas cíclicas."

- La potencia consumida por el motor es:

$$\begin{aligned} HP &= HP_{\text{vástago}} \times CF \\ HP_2 &= HP_{\text{vástago2}} \times CF_2 \\ HP_2 &= 1.163 HP_{\text{vástago1}} \times 0.83 CF_1 \\ HP_2 &= 0.96 HP_1 \end{aligned}$$

La potencia requerida por el motor se reduce en un 4%

Conclusión: si se quitan los packers a los seis pozos que producen altos caudales, la producción de los mismos aumentaría un 36.4%. Esto provocaría un incremento de 12.6m³ de petróleo seco por día. Si bien la potencia en el vástago aumenta un 16.3% con el cambio, como las pérdidas por cargas cíclicas se reducen en un 17%, en definitiva la potencia requerida por los motores se ve reducida en un 4%. De esta manera se estaría utilizando mejor la energía.

Estos resultados deberían corroborarse con ensayos de producción.

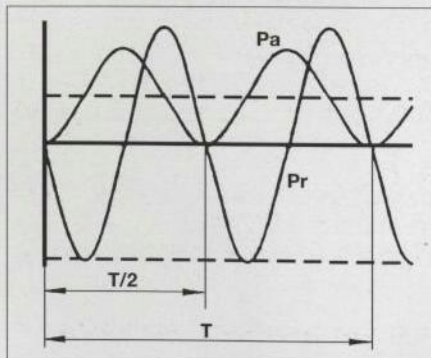
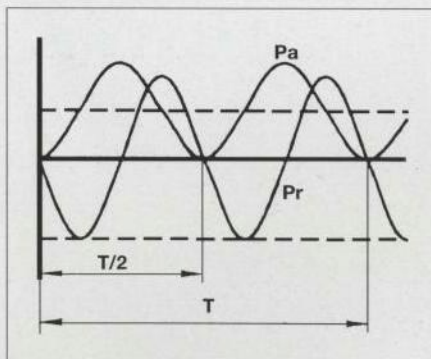
Efecto del sobredimensionamiento de los motores sobre el cosφ

La potencia activa se define como aquella que se transforma en calor en un resistor. Es la potencia utilizable.

Por otro lado la potencia reactiva es aquella que está en juego en los campos magnéticos y eléctricos.

Si se tienen dos motores trabajando a una misma potencia activa, uno de potencia nominal mayor que el otro (Pnom.a mayor que Pnom.b), el rotor y estator del motor A van a tener dimensiones mayores que los de B y como la inductancia depende de valores geométricos, las mismas van a ser diferentes (La mayor que Lb). Luego la potencia reactiva en A va a ser mayor que en B.

Demostración:



La potencia reactiva corresponde a la energía acumulada por los campos magnéticos y eléctricos en un cuarto de período. Luego el área encerrada por la curva de potencia reactiva instantánea en T/4 da la idea de la energía involucrada en el sistema.

Como la amplitud de la ondulada de Pre-act. depende, entre otras cosas, de la inductancia, la misma va a ser mayor en A que en B. Luego el ángulo de desfase φ es mayor en A que en B.

Siendo φa > φb, cosφb > cosφa

Estos principios teóricos se verifican con las mediciones de campo, pues se ha observado cierta relación entre el coeficiente de sobredimensionamiento y las pérdidas por cargas capacitivas e inductivas.

Nota: se define al coeficiente de sobredimensionamiento como el cociente entre la potencia media consumida y la potencia nominal.

Se demuestra, de esta manera, que cuanto más sobredimensionados están los motores, mayor es la tendencia que tiene el cosφ a alejarse de la unidad:

$$\cos\phi = 0.740 + 0.175 \times \ln(S)$$

S = coef. sobredimensionamiento

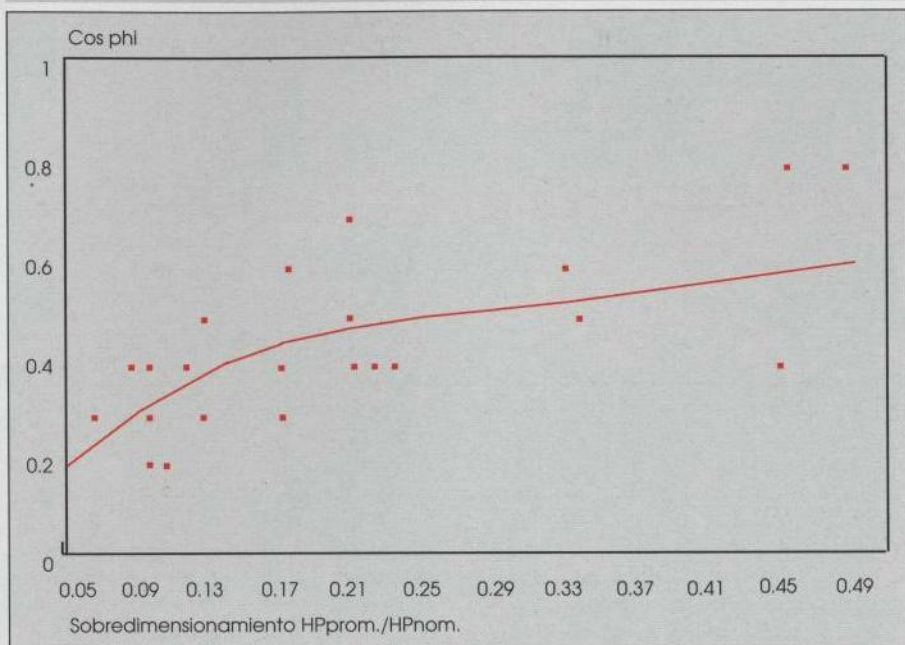
Ver Figura 2

Según el artículo *Rod Pumping Selection and Desing* by Joe Dunn Clegg, editado en la revista *Petroleum Engineer International*, julio del '91, un motor sobredimensionado es aquel cuyo promedio de potencias máximas no supera el 40% de la potencia nominal. En base a esto se ha observado que 15 de los 29 motores se encuentran en condiciones de sobredimensionamiento.

A tal efecto se propone una redistribución. La potencia nominal para los nuevos motores se obtuvo de la siguiente manera: se tomó el promedio de las potencias activas máximas de cada motor y se la dividió por 0.4; luego se verificó que este valor fuera menor o a lo sumo igual a seis veces la potencia de arranque medida.

Una vez realizada la distribución se calculó el ahorro en potencia reactiva, ya que, como se ha demostrado, al disminuir el coeficiente de sobredimensionamiento se reducen las pérdidas por cargas inductivas y el cosφ aumentará. Con el valor de S inicial (antes de la redistribución) se obtiene el cosφ inicial. Luego, con la relación de po-

Figura 2 Pérdidas por cargas capacitivas e inductivas



tencial final, se llega al $\cos\phi$ con los motores ya distribuidos.

La potencia reactiva se calcula mediante:
 $P_{reactiva} = P_{act} \times \tan(\arccos z)$
 con $z = \cos\phi$

Con la potencia activa consumida antes de la redistribución y su correspondiente $\cos\phi$ se obtiene la potencia reactiva inicial. Sabiendo que la potencia activa no cambia,

con el $\cos\phi$ final se obtiene la potencia reactiva después de la redistribución. Si se comparan la potencia reactiva inicial con la final, se llega al ahorro en potencia reactiva por pozo. El ahorro total, muestreado el 10% del total de los pozos del yacimiento, asciende a 32.35 KW.

Nota: Las mediciones de $\cos\phi$ han sido tomadas en los pozos. El proveedor de ener-

gía eléctrica registra los consumos de potencia activa y reactiva en la entrada al yacimiento. Entre el punto de medición y los pozos existen instalados capacitores que mejoran el valor del $\cos\phi$ en la entrada. Luego, el ahorro mencionado anteriormente no es tal ya que el $\cos\phi$ es mejorado y toma valores aceptables.

No obstante, para futuras instalaciones en el yacimiento o para el desarrollo de futuras áreas, cabe destacar la importancia de un buen dimensionamiento de los motores ya que de ello dependerán las pérdidas por potencia reactiva y la consecuente instalación de capacitores.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Existe una relación biunívoca entre las pérdidas por cargas cíclicas y la dispersión relativa del torque, que puede ser obtenido a partir de dinamómetros. Mejorar el balanceo significa optimizar el consumo de energía.
- Al producir sin packers, la producción aumenta un 36.4% mientras que la potencia requerida por el motor disminuye un 4%.
- Un buen dimensionamiento de los motores mejorará los valores de $\cos\phi$ disminuyendo el consumo de potencia reactiva en 32.35 KW, muestreado el 10% de los pozos.



ENERGIA Para el futuro

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN ARGENTINA PARA EL USO RACIONAL DE LA ENERGÍA A.A.P.U.R.E.



A.A.P.U.R.E.

ASOCIACION ARGENTINA PARA
EL USO RACIONAL DE LA ENERGIA

Tucumán 435 - 1º Dto. 4 (1049) Capital Federal
Tel.: 311-2611 y 312-2762/2692 Fax: (54-1) 311-5351

EL USO RACIONAL DE LA ENERGIA

DEBE SER HOY LA CONSIGNA ESTRELLA EN
TODOS LOS NIVELES.

USTED TIENE TODO EN SUS MANOS
PARA LOGRARLO, Y A.A.P.U.R.E., EL RESORTE
PARA IMPULSARLO.

UNA ACTITUD INTELIGENTE ES
COMPROMETERNOS POR EL CRECIMIENTO
Y BIENESTAR DEL FUTURO.