

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



Eficiencia Electromecánica en Sistemas de Bombeo de Pozo Profundo

Por:

JAYRO LÓPEZ MORENO

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
Diciembre del 2011.**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Eficiencia Electromecánica en Sistemas de Bombeo de Pozo Profundo


Por:

JAYRO LÓPEZ MORENO


TESIS

Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador como Requisito
Parcial para Obtener el Título de:


INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN




DR. Javier de J. Cortés Bracho
Asesor Principal



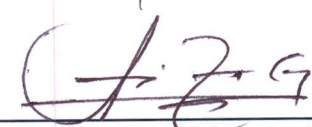
MC. Sergio Z. Garza Vara
Sinodal




MC. Tomás Reyna Cepeda
Sinodal "ANTONIO NARRO"



DR. Luís Samaniego Moreno
Sinodal



MC. Luís Rodríguez Gutiérrez
Coordinador de la División de Ingeniería



Coordinación de
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
Diciembre de 2011.

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero dar gracias a Dios por darme la existencia, por estar con migo en las buenas y en las malas, por darme las fuerzas y el conocimiento para terminar mi carrera; por todo esto y más, Gracias Dios Mío.

Agradezco de manera muy especial a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por brindarme la oportunidad de estudiar una de las mejores carreras que ofrece, por las facilidades que me ha otorgado para mi formación profesional, Gracias Alma Mater.

También agradezco de manera muy especial al Dr. Javier de J. Cortés Bracho, por haberme brindado su tiempo y apoyo incondicional en la realización de esta investigación, Gracias Doctor.

Al MC. Sergio Z. Garza Vara por brindarme su tiempo y apoyarme en la revisión de este trabajo, así como, por sus consejos y asesoramiento para poder realizar una investigación excelente, Gracias Checo.

Al MC. Tomas Reyna Cepeda por apoyarme en la revisión de esta investigación y tiempo brindado.

También quiero agradecer de forma general a todos los maestros del Departamento de Riego y Drenaje que influyeron en mi formación académica, profesional y personal, ya que sin ellos, mi visión seria otro. En especial al MC. Luis Edmundo, por apoyarme durante mi estancia en la universidad, por sus consejos brindados y la amistad que me ofreció.

A mis compañeros de la Generación CXII, por esa larga amistad, por los apoyos que me ofrecieron, por estar conmigo en los momentos buenos y malos.

A Todos Muchas Gracias

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis queridos padres, como una pequeña muestra de que sus sacrificios y desvelos que hicieron para darme estudio, no han sido en vano. Que Dios me los bendiga.

Soledad Moreno León
Gervacio López Méndez

Tambien dedico este trabajo a mis hermanos, por su confianza y apoyo incondicional que me brindaron, ya que gracias a ellos y sus sacrificio he terminado mi carrera profesional.

- Fidel
- Cecilia
- Norvery
- Roselvin
- Orlando
- Berlain
- Estrella

Al mismo tiempo quiero dedicárselos a mis abuelos que, gracias a sus sabios consejos he salido adelante.

Margarita León H.
Felipe Moreno G.

Ricarda Méndez
Arturo López +

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
Índice de Cuadros.....	vii
Índice de Figuras.....	viii
Palabras Claves.....	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Eficiencia Energética	4
2.1.1. Eficiencia en Motores eléctricos	4
2.1.2. Eficiencias de la Bomba y Electromecánica	10
2.1.3. Factor de Potencia.....	13
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
3.1 Antecedentes.....	16
3.1.1 Aguas subterráneas en Coahuila	16
3.1.2 Clima	18
3.1.3 Orografía.....	19
3.2. Localización del Área de Estudio.	20
3.3. Materiales	23
3.4. Descripción de la Metodología.	23

3.4.1 Método de la eficiencia ajustada o de la curva de eficiencia.....	23
3.4.2. Eficiencias de la Bomba y Electromecánica	25
3.4.3. Medición de las Variables Eléctricas.	26
3.4.4. Medición de las variables hidráulicas.....	28
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1 Cálculo de las Eficiencias Electromecánicas.....	37
V. CONCLUSIONES.....	58
VI. RECOMENDACIONES.....	60
VII. LITERATURA CITADA.....	63

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
2.1. Depreciación de la eficiencia de un motor rebobinado en función de la temperatura utilizada.....	10
2.2. Valores de referencia para la eficiencia del motor sumergible (NOM-010-ENER-1996).....	14
2.3. Valores de referencia para la eficiencia de la bomba sumergible (NOM-010-ENER-1996).....	15
2.4. Valores mínimos de eficiencia electromecánica con base en la (NOM-006-ENER-1995).....	15
3.1. Principales acuíferos en el estado de Coahuila, y su disponibilidad media anual (Mm ³).....	20
3.2. Coordenadas geográficas de los pozos en la UAAAN.....	24
4.1. Características Hidráulicas de los equipos de bombeo en estudio.....	34
4.2. Características Eléctricas de los equipos de bombeo en estudio.....	35
4.3. Resultados de las Eficiencias Electromecánicas.....	57
4.4. Cálculo de los ajustes de los motores estándar por el método de la eficiencia ajustada.....	58
4.5. Cálculos de los ahorros económicos a lograr al implementar las acciones mencionadas.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1. Eficiencia típica vs. Curvas de carga para motores de inducción de jaula de ardilla, 1800 RPM.....	8
2.2. Curva de comportamiento de la eficiencia de acuerdo al factor de carga de operación.....	9
2.3. Perdida de eficiencia del motor de acuerdo al número de reembobinados.....	11
2.4. Depreciación de la eficiencia de un motor en función de la desviación del voltaje respecto al nominal.....	11
2.5. Factor de Ajuste sobre la eficiencia del motor en función del Desbalance de voltaje.....	12
2.6. Diagrama esquemático de las eficiencias que integran la eficiencia electromecánica.....	13
2.7. Cargo por tener bajo Factor de Potencia (menor de 90%).....	16
2.8. Bonificación por tener Alto Factor de Potencia (mayor de 90%).....	17
3.1. Mapa de acuíferos por grado de explotación en el estado de Coahuila. INE. (Datos de 2003).....	18
3.2. Localización geográfica de los pozos en la UAAAN.....	23
3.3. Medición de la tensión (voltaje) en equipos de bombeo.....	29
3.4. Medición de la corriente eléctrica en equipos de bombeo.....	30
4.1. Recolección de datos de campo.....	36
4.2. Características de los equipos de bombeo.....	37
4.3. Medición de las variables hidráulicas.....	37
4.4. Características de las instalaciones eléctricas.....	38
4.5. Levantamiento de datos eléctricos.....	38

PALABRAS CLAVES

Bomba

Carga total de bombeo

Corriente eléctrica (I)

Eficiencia de la bomba

Eficiencia del Motor

Eficiencia electromecánica

Factor de potencia

Factor de servicio

Motor eléctrico

Potencia activa

Potencia de entrada a la Bomba

Potencia de salida de la bomba

Potencia eléctrica

Potencia aparente y reactiva

Tensión eléctrica (V)

Sonda Eléctrica

Voltamperímetro de gancho

GPS

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha visto una tendencia particular a promover el uso racional del agua y la energía eléctrica, en virtud del constante crecimiento de la población a beneficiar, la disminución de la precipitación, el abatimiento de los niveles freáticos por falta de recarga, la sobreexplotación y contaminación de los mantos; es lo que nos lleva a definir como una crisis energética e hidráulica.

En la actualidad, los volúmenes de extracción de las aguas subterráneas son muy grandes y los costos de extracción se incrementan constantemente, debido a la sobre explotación de los acuíferos, lo que se refleja en niveles de bombeo cada vez más profundos y a su vez la baja eficiencia en los equipos de bombeo.

Para conocer el grado de eficiencia en la utilización de la energía eléctrica en sistemas de bombeo de agua potable de pozo profundo, se requiere la realización de los diagnósticos de eficiencia electromecánica con lo cual se determinará la factibilidad técnica y con ello la económica para decidir si es conveniente la aplicación de recursos económicos en la mejora de esta.

En el presente trabajo se hace un diagnóstico del estado actual en consumo de energía eléctrica en los equipos de bombeo instalado en los pozos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), demostrando mediante mediciones realizadas en varios equipos la eficiencia alcanzada, todo esto con la finalidad de conocer el ahorro económico que se puede obtener si se mejora el desempeño de los equipos.

En el proyecto de eficiencia se analiza la situación actual y se proponen soluciones prácticas, económicas y de implantación a corto plazo, para el funcionamiento óptimo de los equipos de bombeo, con un enfoque integral hacia el ahorro de energía eléctrica.

Esta investigación describe los conceptos básicos para incrementar la eficiencia, especificaciones, pruebas que se realizaron, condiciones, métodos de medición, requerimientos de pruebas, predicción y determinación de la eficiencia, factores que la afectan y aquellos que la incrementan.

El método utilizado para la determinación de la eficiencia electromecánica está fundamentado en Normas Oficiales Mexicanas, que a más adelante se mencionan.

Los principales elementos en que se basa el diagnóstico de eficiencia son la integración de la información existente, la generación de datos complementarios con mediciones de campo, la evaluación de las eficiencias electromecánicas de los equipos de bombeo, y el análisis de medidas de ahorro de energía optimizando el funcionamiento hidráulico del sistema de agua potable.

1.1 Objetivo

Realizar un diagnóstico de las eficiencias electromecánicas en los equipos de bombeo que actualmente operan en el área de la universidad, con la finalidad de proponer alternativas que mejoren y contribuyan en la reducción de consumo de energía eléctrica en los equipos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El ahorro de energía comienza desde la selección apropiada de los motores. Siempre hay uno adecuado a las necesidades que se tienen, tanto en lo que respecta a su tipo por condiciones ambientales de operación, por condiciones de arranque o regulación de velocidad, así como por su tamaño o potencia. Los mayores ahorros de energía eléctrica se obtienen cuando el motor y su carga operan a su máxima eficiencia (CONAGUA, 2007).

Es significativo el hecho de que los motores eléctricos, suministran en su mayor parte, la energía que mueve los accionamientos industriales, por lo que la operación y conservación de los motores, representa uno de los campos más fértiles de oportunidades en el ahorro de energía, que se traducen en una reducción en los costos de producción (Schiavo. R. y Gallo M. A. 2011).

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana la eficiencia de los equipos de bombeo debe ser superior al 80 %, aunque como se especifica en la misma norma, la prueba debe ser en laboratorio y es aplicable "únicamente a bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical". Aunque como también es conocido los equipos sumergibles normalmente tienen menor eficiencia (DOF, 2000).

No toda la energía eléctrica que un motor recibe, se convierte en energía mecánica. En el proceso de conversión, se presentan pérdidas, por lo que la eficiencia nunca será del 100%.

Si las condiciones de operación de un motor son incorrectas o este tiene algún desperfecto, la magnitud de las pérdidas, puede superar con mucho las de diseño, con la consecuente disminución de la eficiencia.

Por lo tanto, emplear motores de mayor eficiencia, reduce las pérdidas y los costos de operación.

Si un motor con una baja eficiencia se sustituyera por otro con una eficiencia mayor, la potencia ahorrada (PA) se puede calcular aplicando la siguiente ecuación (Schiavo. R. y Gallo M. A. 2011).

$$PA(kW) = 0.746 * HP \left(\frac{100}{E1} - \frac{100}{E2} \right) \quad (1)$$

Donde:

0.746 = Factor de conversión de HP a kW

HP = Caballos de potencia

E1 = Eficiencia del motor de rendimiento menor

E2 = Eficiencia del motor de rendimiento mayor

2.1 Eficiencia Energética

Es el grado de eficiencia con la que es utilizada la energía en un sistema de agua potable, además de especificar cuanta de esa energía es desperdiciada.

2.1.1. Eficiencia en Motores eléctricos

La eficiencia de un motor eléctrico es la medida de su habilidad para convertir la potencia eléctrica que toma de la línea, en potencia mecánica útil. Ya que no toda la energía eléctrica que un motor recibe, se convierte en energía mecánica; en el proceso de conversión, se presentan pérdida, por lo que la eficiencia nunca será del 100%. Se expresa usualmente en porcentaje de la relación de potencia mecánica entre la potencia eléctrica (CONAGUA, 2007).

$$\text{Eficiencia motor } (\eta_m) = \frac{\text{potencia mecánica}}{\text{potencia eléctrica}} * 100 \quad (2)$$

Para calcular la eficiencia, las unidades de las potencias deben ser iguales. Como la potencia eléctrica se expresa usualmente en kilowatts (kW) en tanto que la potencia mecánica en caballos de potencia (HP), las siguientes equivalencias son útiles para la conversión de unidades:

$$1 \text{ HP} = 0.746 \text{ KW} \quad (3)$$

$$1 \text{ KW} = 1.34 \text{ HP} \quad (4)$$

$$\text{Entonces la Potencia mecánica} = \text{HP} \times 0.746 \quad (5)$$

Para el cálculo de la Potencia eléctrica:

$$P_e = \left(\frac{I_{prom}}{I_{placa}} \right) * P.p. \quad (6)$$

Donde:

Pe = Potencia eléctrica del sistema (HP)

I prom = corriente medida en campo promedio de las fases (Amperes)

I placa = corriente de la placa del motor (Amperes)

P.p. = Potencia de placa del motor (HP)

Entonces:

$$Eficiencia\ motor\ (\eta_m) = \left(\frac{HP * 0.746}{\left(\frac{I_{prom}}{I_{placa}} \right) * P.p} \right) * 100 \quad (7)$$

Para evaluar la eficiencia del motor existen varios métodos, como:

1. Método del deslizamiento:

Consiste en comparar la velocidad de rotación real con la de diseño, lo cual es bastante complicado de realizar y requiere del paro del equipo. Además, no aplica para motores rebobinados o que no están operando al voltaje de diseño.

2. Método de la eficiencia ajustada o de la curva de eficiencia:

Este es un procedimiento iterativo basado en la comparación de la eficiencia calculada contra la reportada por las curvas características de eficiencia y en función del factor de carga para el motor en estudio. Este procedimiento resulta más viable de aplicar y proporciona resultados aceptables para fines de diagnóstico energético (CONAGUA, 2009).

Este método implica la medición de los siguientes parámetros eléctricos:

a) Tensión eléctrica de entrada (Voltaje) entre fases: V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} (Volt) y valor trifásico (V)

b) Corriente por fase: I_A , I_B , I_C , y valor promedio trifásico: I_T (Amperes)

c) Potencia activa por fase: P_A , P_B , P_C , y valor trifásico: P_T (kW)

d) Potencia reactiva por fase: P_{RA} , P_{RB} , P_{RC} , y valor trifásico: P_{RT} (kVAR)

e) Factor de potencia por fase: FP_A , FP_B , FP_C , y valor trifásico: FP (%)

El factor de potencia es un indicativo de la eficiencia con que se está utilizando la energía eléctrica para producir un trabajo útil, para motores trifásicos es igual a:

$$FP = \frac{P_{Act} * 1000}{(1.732 * V * A)} \quad (8)$$

Donde:

FP: factor de potencia

PAct: potencia activa (kW)

V=Voltaje

A=Amperaje

Los pasos a seguir para el cálculo de eficiencia del motor con el método de eficiencia ajustada son los siguientes:

- ❖ **Paso 1.** A partir de las características nominales del motor ($H_{p_{nominal}}$, RPM, I, V, etc.), se deberá identificar la curva de eficiencia del motor; como se muestra en la Figura 2.1, donde se presenta una gráfica con curvas para diferentes capacidades nominales de motores con 1800 rpm.

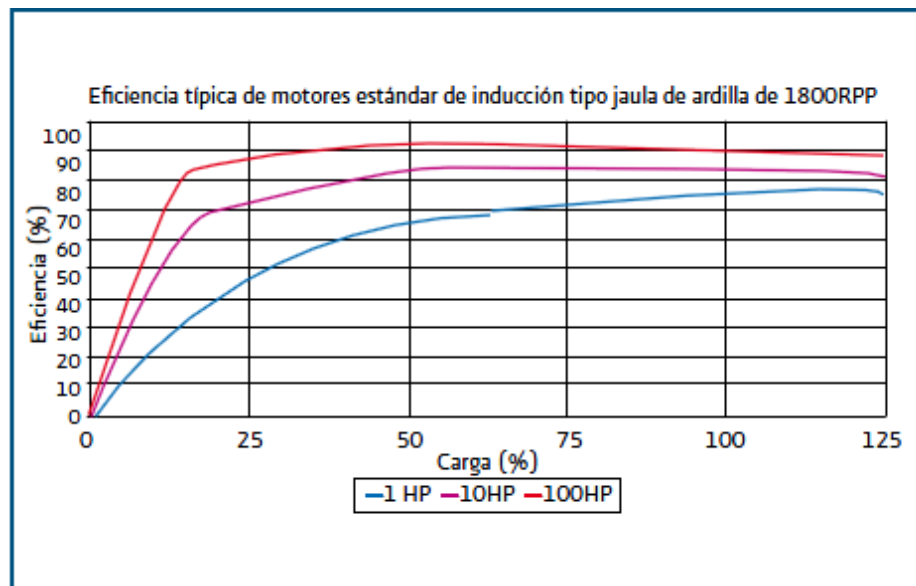


Figura 2.1. Eficiencia típica vs. Curvas de carga para motores de inducción de jaula de ardilla, 1800 RPM (CONAGUA, 2009).

- ❖ **Paso 2.** A partir de la potencia eléctrica demandada por el motor (medición efectuada), se calcula el factor de carga nominal mediante la ecuación.

$$FC = \left(\frac{P_{med}}{\frac{Pot_{Plac}}{Ef_{Plen\ Carg}}} \right) * 100$$

9

Donde:

FC = Factor de carga de operación del motor (adimensional)

$PMed$ = Potencia eléctrica Medida (Mediciones de campo en KW)

$Pot\ Plac$ = Potencia de la placa (Hp)

$Ef\ Plen\ Carg$ = Eficiencia a Plena Carga

Los motores eléctricos tienen una curva de comportamiento de eficiencia de acuerdo al factor de carga al que están operando, estando definida por el diseño del fabricante y los procedimientos de fabricación (Téllez, 2011).

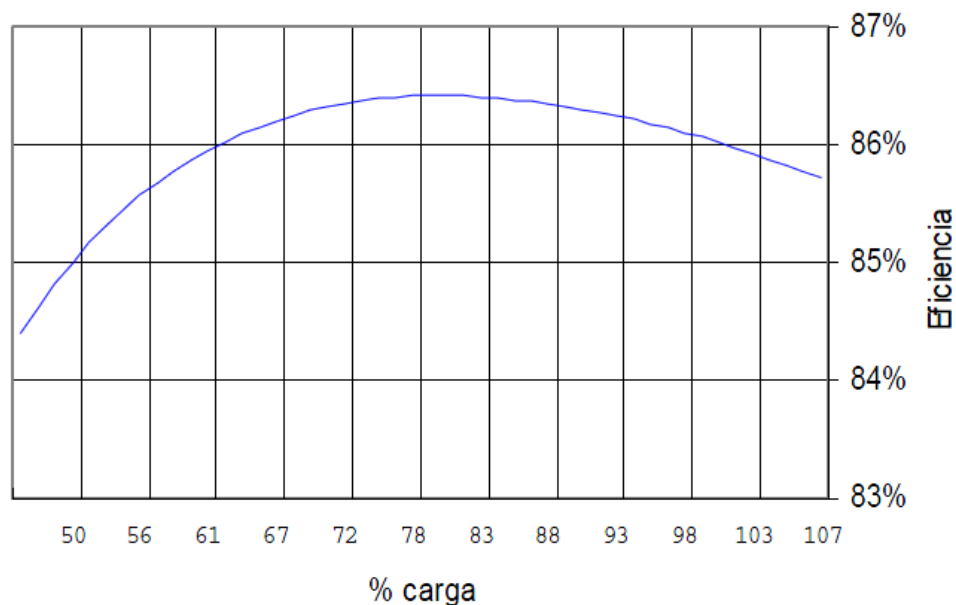


Figura 2.2. Curva de comportamiento de la eficiencia de acuerdo al factor de carga de operación (Téllez, 2011).

❖ **Paso 3.** Comprobar en la curva del motor, que la eficiencia utilizada en el Paso 1, corresponda al factor de carga calculado.

En caso contrario, se repite el paso anterior, utilizando la eficiencia que corresponda al FC calculado hasta que ambos valores coincidan, poniendo fin al proceso iterativo.

Los últimos valores de eficiencia del motor y factor de carga son los resultados reales del motor en estudio.

❖ **Paso 4.** Una vez determinada la eficiencia del motor y factor de cargas nominales, la eficiencia del motor se deprecia de acuerdo a los siguientes criterios:

- a) Si el motor tiene más de 10 años de antigüedad, depreciar un punto porcentual.
- b) Si el motor ha sido rebobinado, depreciar dos puntos porcentuales; cuando se conoce la temperatura a la que se expuso el motor durante el proceso de rebobinado, le eficiencia se deprecia de acuerdo al Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Depreciación de la eficiencia de un motor rebobinado en función de la temperatura utilizada (CONAGUA, 2009).

Temperatura (C°)	Puntos de reducción de la eficiencia
633	0.0053
683	0.0117
733 (soplete)	0.0250
Químico	0.0040

La eficiencia de un motor puede mantenerse después de la reparación, pero si se desvía de los procedimientos adecuados, puede disminuir de 1 a 3 puntos %, aun cuando se tienen casos documentados donde se han medido reducciones de hasta 4.9 puntos %, sin embargo, es común que se considere un 2.0% de disminución de eficiencia por cada re-embobinado realizado al motor (Ortega, S., J., 2006).

También se considera la disminución de la eficiencia de los motores de acuerdo al número de rebobinados que se le ha realizado, considerando la siguiente figura.

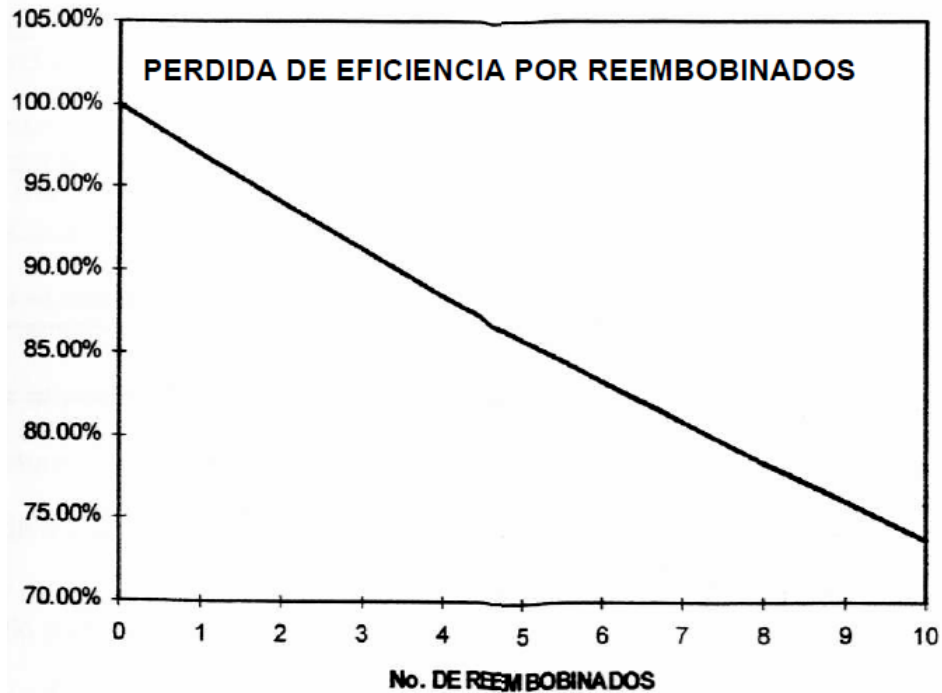


Figura 2.3. Perdida de eficiencia del motor de acuerdo al número de reembovinados (Ortega, S., J., 2006).

c) Si el voltaje de alimentación es diferente al de la placa, aplicar el ajuste a la eficiencia indicado en la curva mostrada en la Figura 2.4.

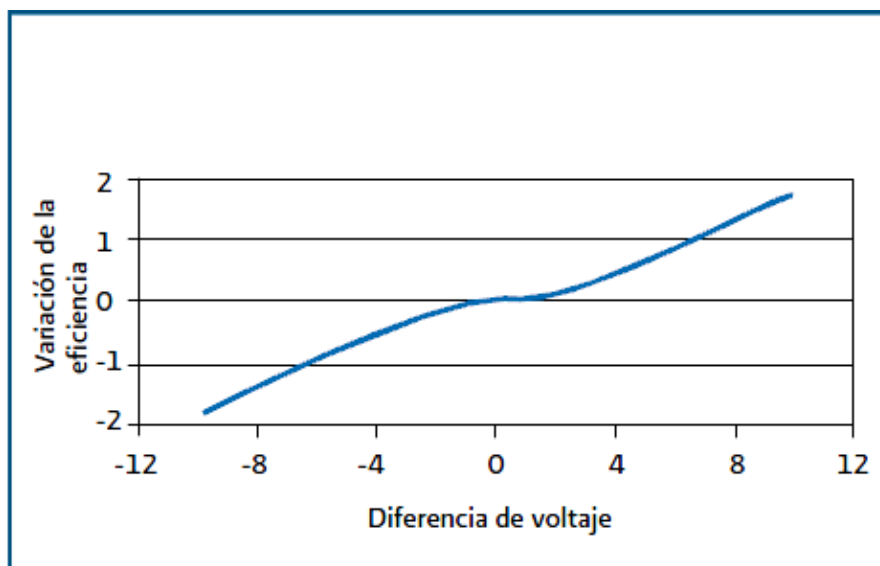


Figura 2.4. Depreciación de la eficiencia de un motor en función de la desviación del voltaje respecto al nominal (CONAGUA, 2009).

d) Si el voltaje de alimentación medido presenta un desbalance, aplicar el ajuste a la eficiencia indicado en la curva de la Figura 2.5.

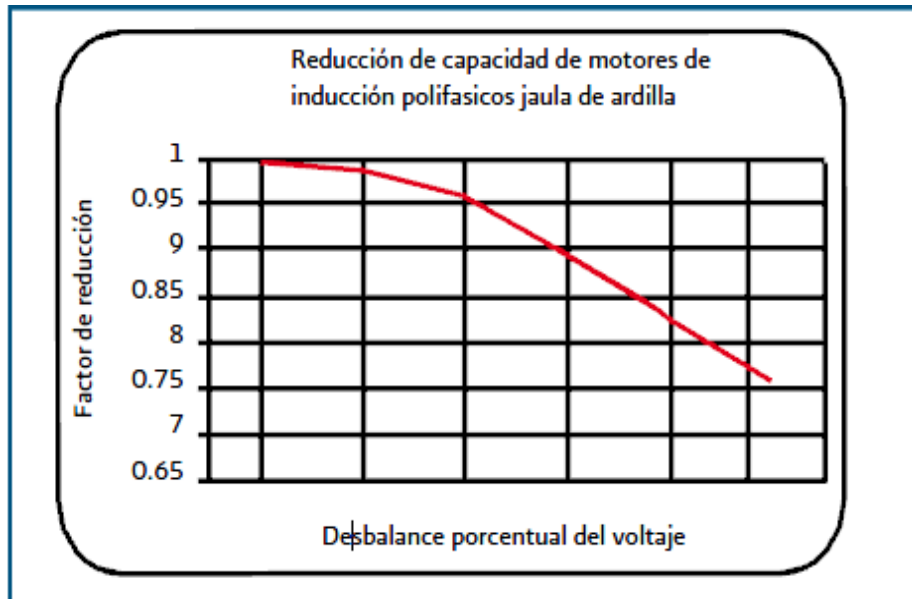


Figura 2.5. Factor de Ajuste sobre la eficiencia del motor en función del Desbalance de voltaje (CONAGUA, 2009).

2.1.2. Eficiencias de la Bomba y Electromecánica

La eficiencia de la bomba (η_b) se calcula como el cociente de la potencia hidráulica de salida (P_h) entre la potencia mecánica absorbida (P_m). La ecuación muestra la manera de calcular la eficiencia de la bomba (CONAGUA, 2009).

$$\eta_b = \frac{\text{Potencia hidráulica de salida } (P_h)}{\text{Potencia mecánica absorbida } (P_m)} * 100 \quad (10)$$

Debido a la dificultad de medir la potencia mecánica por separado y de ahí medir la eficiencia de la bomba, se recomienda evaluar la eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba como se observa esquemáticamente en la figura siguiente (CONAGUA, 2009).

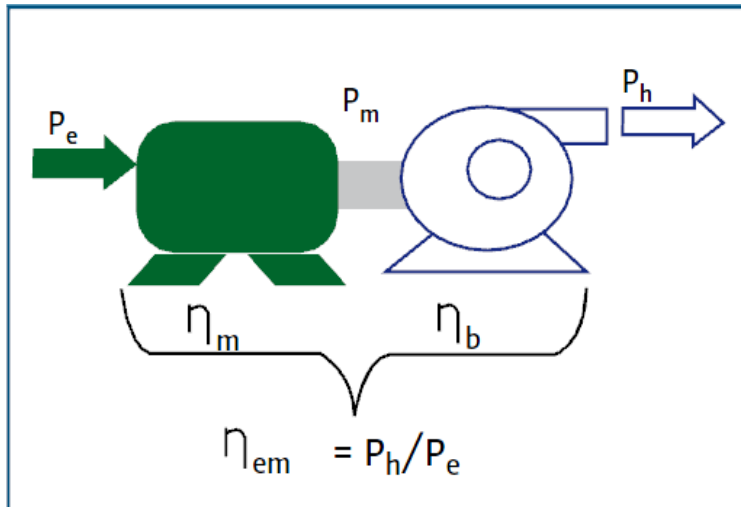


Figura 2.6. Diagrama esquemático de las eficiencias que integran la eficiencia electromecánica (BID, 2011).

La eficiencia de la bomba y la eficiencia electromecánica se calculan de la forma siguiente:

Paso 1. Se calcula la potencia hidráulica de salida a través de la ecuación.

$$Ph = \frac{H_b * Q * \rho * g}{1000} \quad (11)$$

Donde:

P_h = Potencia hidráulica de salida (kW)

H_b = Carga hidráulica de bombeo (m.c.a.)

Q = Caudal que pasa por la tubería, a la descarga de la bomba (m^3/s)

ρ = Densidad del agua (kg/m^3)

g = Aceleración de la gravedad en (m/s^2)

Paso 2. Con el valor de la potencia hidráulica (P_h) calculada y la potencia eléctrica medida (P_e), se calcula la eficiencia electromecánica final con la ecuación siguiente.

$$\eta_{em} = \frac{Ph}{Pe} \quad (12)$$

Donde:

η_{em} = Eficiencia electromecánica

P_h = Potencia hidráulica de salida (kW)

P_e = Potencia eléctrica medida (kW)

Paso 3. Para el cálculo de la eficiencia de la bomba se tiene:

Una vez calculada la η_{em} , se sustituye en la ecuación de eficiencias (motor-bomba) y se determina despejando la eficiencia de la bomba η_b de la manera siguiente:

$$\eta_b = \frac{\eta_{em}}{\eta_m} \quad (13)$$

Los valores determinados de la eficiencia electromecánica (η_{em}) deben compararse durante el Diagnostico de Eficiencia con al menos los valores recomendados por las Normas de eficiencia energética aplicables a los motores y equipos de bombeo existentes en nuestro país, con el fin de determinar los niveles de ahorro de energía potenciales (DOF, 1995).

Con los datos obtenidos en campo y las lecturas impresas en los recibos de consumo, se analiza lo que mejor convenga para corregir el factor de potencia hasta un valor mínimo del 90%, haciéndolo tender al 99% para lograr la bonificación del 2.5 % en el consumo eléctrico, lo cual se consigue con la instalación de bancos de capacitores adecuados.

A continuación se presentan los valores mínimos de eficiencia para el conjunto motor-bomba sumergible que la norma establece (DOF, 1996).

Cuadro 2.2. Valores de referencia para la eficiencia del motor sumergible (NOM-010-ENER-1996)

Motor kW	Motor hp	Eficiencia %
Hasta 1,5	Hasta 2,0	68
Mayor que 1,5 hasta 2,2	Mayor que 2,0 hasta 3,0	72
Mayor que 2,2 hasta 3,7	Mayor que 3,0 hasta 5,0	73
Mayor que 3,7 hasta 5,6	Mayor que 5,0 hasta 7,5	75
Mayor que 5,6 hasta 7,5	Mayor que 7,5 hasta 10,0	77
Mayor que 7,5 hasta 11,2	Mayor que 10,0 hasta 15,0	79
Mayor que 11,2 hasta 14,9	Mayor que 15,0 hasta 20,0	80
Mayor que 14,9 hasta 22,4	Mayor que 20,0 hasta 30,0	81
Mayor que 22,4 hasta 29,8	Mayor que 30,0 hasta 40,0	83
Mayor que 29,8 hasta 44,7	Mayor que 40,0 hasta 60,0	86
Mayores que 44,7	Mayores que 60,0	87

Cuadro 2.3. Valores de referencia para la eficiencia de la bomba sumergible (NOM-010-ENER-1996).

Capacidad de la bomba l/s	Eficiencia %
Hasta 2,0	48
Mayor que 2,0 hasta 5,0	61
Mayor que 5,0 hasta 15,0	71
Mayor que 15,0 hasta 25,0	72
Mayor que 25,0 hasta 30,0	74
Mayor que 30,0 hasta 60,0	77
Mayor que 60,0	78

Cuadro 2.4. Valores mínimos de eficiencia electromecánica con base en la (NOM-006-ENER-1995)

Intervalo de potencias		Eficiencia electromecánica (%)
kW	HP	
5.6 - 14.9	7.5-20	52
15.7 - 37.3	21-50	56
38.0 - 93.3	51-125	60
94.0 - 261	126-350	64

2.1.3. Factor de Potencia

El factor de potencia es un indicativo de la eficiencia con que se está utilizando la energía eléctrica para producir un trabajo útil (DOF, 2000).

Un bajo factor de potencia significa energía desperdiciada y afecta a la adecuada utilización del sistema eléctrico.

En el Diario Oficial de la Federación de fecha 10 de Noviembre de 1991 se publica el acuerdo que autoriza el ajuste y reestructuración de la tarifa para suministro y venta de energía eléctrica, en el cual, en el resolutive Décimo Segundo se especifica lo siguiente:

“El usuario procurará mantener un factor de potencia (FP) tan aproximado a 100 % (cien por ciento) como le sea posible, pero en el caso de que su factor de potencia durante cualquier periodo de facturación tenga un promedio menor de 90 % (noventa por ciento) atrasado, determinado por métodos aprobados por la Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, el suministrador tendrá derecho a cobrar al usuario la cantidad que resulte de aplicar al monto de la facturación el porcentaje de recargo que se determine según la fórmula que se señala (DOF, 1991) .

En el caso de que el factor de potencia tenga un valor igual o superior de 90 % (noventa por ciento), el suministrador tendrá la obligación de bonificar al usuario la cantidad que resulte de aplicar a la factura el porcentaje de bonificación según la fórmula que también se señala (DOF, 1991).

Cálculo de recargo:

FP en %, menor que 90 %

$$\%Recargo = \frac{3}{5} * \left(\left(\frac{90}{fp} \right) - 1 \right) * 100 \quad (14)$$

En la siguiente figura se muestra el recargo por tener bajo factor de potencia.

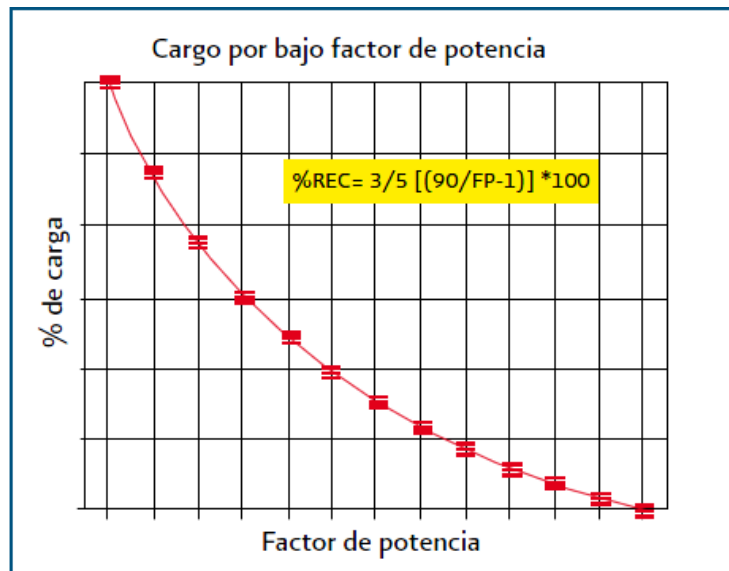


Figura 2.7. Cargo por tener bajo Factor de Potencia, menor de 90% (CONAGUA, 2009).

Cálculo de bonificación:

FP en %, mayor o igual a 90 %

$$\%Bonificación = \frac{1}{4} * \left(1 - \left(\frac{90}{fp} \right) \right) * 100 \quad (15)$$

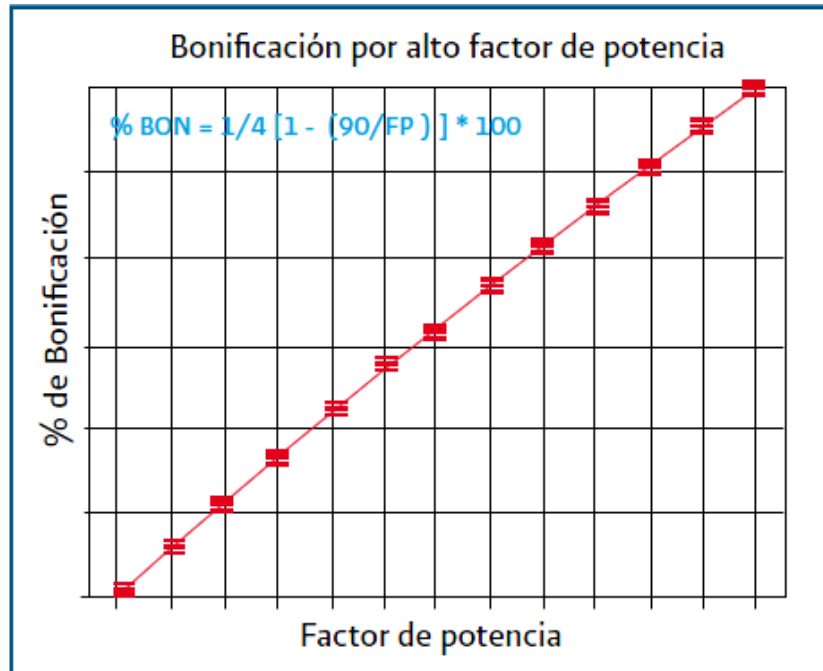


Figura 2.8. Bonificación por tener alto Factor de Potencia, mayor de 90% (CONAGUA, 2009).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Antecedentes

3.1.1 Aguas subterráneas en Coahuila

Coahuila no dispone de agua superficial suficiente a causa de un clima adverso caracterizado por escasas precipitaciones pluviales y elevada evaporación natural. Ante la creciente necesidad de la población, los recursos de agua subterránea representan la principal fuente de abastecimiento, para satisfacer los diferentes usos, como son público urbano, doméstico, agrícola, e industrial.

En la entidad se han identificado 28 unidades Hidrogeológicas cuya recarga media anual es de alrededor de 871 Mm³/anuales, de las que se extraen alrededor 1535 Mm³/anuales, un 70% de ese volumen es destinado a la agricultura.

En la siguiente figura se puede observar los acuíferos identificados en el estado de Coahuila, y el grado de explotación en que se encuentran.

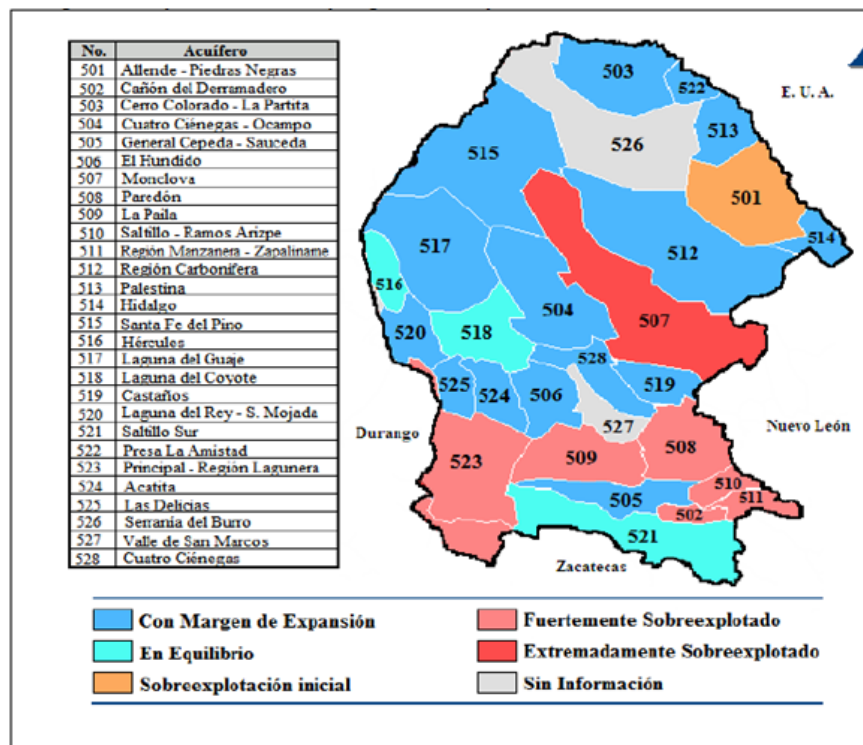


Figura 3.1. Mapa de acuíferos por grado de explotación en el estado de Coahuila. (INE, 2003).

En Coahuila existen 4 zonas de veda, tres en el ámbito de competencia de la Dirección Local Coahuila, que comprenden los municipios Arteaga, Ramos Arizpe y Saltillo y en la Región Lagunera, que depende del Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte (CONAGUA, 2008-2009).

El 31 de enero de 2003, se publicó el primer acuerdo de disponibilidad de aguas subterráneas, y hasta 2006 se contaba con la publicación oficial de la disponibilidad media anual de 202 acuíferos.

Durante 2007 y 2008 se publicaron 50 y 30 acuíferos más, y en el mes de junio de 2009, se ha publicado la disponibilidad de agua subterránea de 282 acuíferos, correspondiente al 93% del volumen extraído del subsuelo a nivel nacional, de un universo de cobertura de 653 acuíferos que constituye la meta establecida para 2012 en el Programa Sectorial; y se espera que al finalizar 2009 se publiquen 100 acuíferos más para avanzar en la consecución de la meta sexenal.

Al compararse la disponibilidad media anual de los 282 acuíferos publicados en el DOF durante los primeros dos años y medio de este Gobierno (2007 a junio de 2009) con la de los 188 acuíferos registrados en el mismo periodo de la pasada administración, se observa un incremento de 50% (CONAGUA, 2008-2009).

La sobreexplotación de los acuíferos es un asunto que compete a la CONAGUA, que es la entidad responsable de regular el aprovechamiento y de otorgar las concesiones para el uso del agua.

Sin embargo, esta dependencia no ha tenido los recursos ni la capacidad para vigilar que los usuarios ajusten sus niveles de extracción y uso a los volúmenes concesionados, ya que en el caso de las concesiones para pozos, existe la obligación del concesionario de instalar medidores, y de que estén en funcionamiento para verificar los volúmenes extraídos, lo que no siempre ocurre por la falta de capacidad de supervisión por parte de la (CONAGUA, 2008-2009).

Cuadro 3.1. Principales acuíferos en el estado de Coahuila, y su disponibilidad media anual en Mm³. (CONAGUA, 2008-2009)

Acuífero	Recarga media anual	Descarga natural comprometida	Volumen concesionado de agua subterránea	Volumen de extracción consignado en estudios técnicos	Disponibilidad media anual de agua subterránea	Déficit
502. Cañón de Derramadero	18.0	1.1	17.3	18.4	0.0	-0.4
504. Cuatro Ciénegas-Ocampo	52.9	1.4	33.6	49.6	18.0	0.0
505. G. Cepeda-Sauceda	57.4	0.0	48.6	26.4	8.8	0.0
506. El Hundido	20.2	0.0	21.9	5.1	0.0	-1.7
507. Monclova	30.0	12.9	107.8	108.0	0.0	-90.7
510. Saltillo-Ramos Arizpe	29.5	5.4	45.4	37.3	0.0	-21.2
511. Región Manzanera Zapalinamé	55.5	3.6	44.7	69.9	7.2	0.0
512. Región Carbonífera	161.2	144.7	32.5	10.7	0.0	-16.0
523. Principal Región Lagunera	518.9	0.0	701.8	1010.8	0.0	-182.9
528. Cuatro Ciénegas	143.0	130.2	1.9	7.1	10.9	0.0

Al mismo tiempo de la escases de los recursos hídricos, también existen grandes problemas económicos y energéticos en nuestro país, elevado consumo de energía eléctrica para la producción y distribución del agua, por lo que es conveniente la realización de proyectos que permitan diagnosticar el consumo de energía eléctrica a través de la determinación de la eficiencia electromecánica en los equipos de bombeo. Y al final poder hacer las recomendaciones necesarias para mejorar estas condiciones.

El abastecimiento de agua potable de la "UAAAN", se realiza a partir de la extracción del agua subterránea, por medio de un sistema de pozos profundos, que se localizan en el área de la universidad, el cual se encuentra a diferentes profundidades.

Se tiene conocimiento que los equipos de bombeo que operan en el área de la universidad tienen más de 15 años trabajando, por lo que es necesario diagnosticar las eficiencias de trabajo y realizar acciones para mejorarlas.

3.1.2 Clima

Coahuila es el tercer estado del país con menor precipitación, su media anual es del orden de los 350 milímetros. Sus valores van de los 150 a los 550 milímetros anuales, dependiendo de las diferentes regiones.

Las mayores precipitaciones ocurren en la parte norte del estado. La temporada de lluvias se presenta de junio a septiembre, cuando se precipita el 75 por ciento de la lluvia media anual.

En cuanto a la temperatura, junio y julio son los meses más calurosos, con temperaturas de hasta 47 °C en la ciudad de Monclova; y por lo contrario, los inviernos son fríos con temperaturas mínimas de 0 a -16 °C, en la sierra de Arteaga.

Los meses de transición entre el período húmedo y seco son mayo y octubre y la estación seca corresponden al período de noviembre a abril, presentándose los valores mínimos en febrero y marzo.

En un estudio sobre escenarios climáticos en Coahuila, realizado por Mendoza, se concluye que en forma general se observa un aumento de la temperatura promedio en las diferentes regiones del Estado, con un cambio de la estacionalidad de las mismas (Mendoza. H., J. M., 2009).

Antes los meses más cálidos eran de julio a agosto, ahora en los últimos años son de abril a mayo; también se observa una tendencia a la disminución del número de días con presencia de heladas y de la intensidad de las mismas. En los pronósticos a largo plazo, se prevé un incremento promedio de uno o dos grados Celsius para el 2020 y de cerca de 3.5 para el 2080 si no se cambian las conductas actuales de uso de los recursos del medio ambiente (Mendoza. H., J. M., 2009).

Mendoza también observa una alteración en los regímenes de lluvia. Aún y cuando los promedios de precipitación anual no han cambiado significativamente, si ha variado su distribución en el año, pues en forma general se ha recorrido el período de lluvias de mayo-septiembre a julio-octubre, y han aumentado las precipitaciones durante el invierno.

Además, del cambio en la época de lluvias, se observa que hay menos días lluviosos, pero con precipitaciones más torrenciales, lo que también se traduce en sequías más prolongadas, mayores riesgos de erosión y menor infiltración de agua al subsuelo (Mendoza. H., J. M., 2009).

3.1.3 Orografía

La Sierra Madre Oriental constituye el sistema montañoso natural del estado, cuya altura máxima es de 3000 msnm.

Algunas de los principales sistemas montañosos del estado son las sierras de Arteaga, Zapalinamé, Paila, Patos, Parras, Jimulco, Los Alamitos, Lafragua, entre otros.

3.2. Localización del Área de Estudio.

El presente trabajo se realizó en los equipos de bombeo que se localizan en el área de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, la cual se sitúa en la localidad de Buenavista, municipio de Saltillo, estado de Coahuila, con coordenadas geográficas de 25° 21’ 10” de Latitud Norte y 101° 02’ 00” de Longitud Oeste, con una altitud media de 1742 msnm.

Teniendo una temperatura media anual de 19.8 °C, una precipitación media anual de 298.5 mm con clima BWhw(x¹) (e) perteneciente al clima seco o árido (Mendoza, 1983).

La Figura 3.2 se muestra la localización de los pozos en el área de la universidad y en el Cuadro 3.2 se detallan la localización geográfica de los pozos.

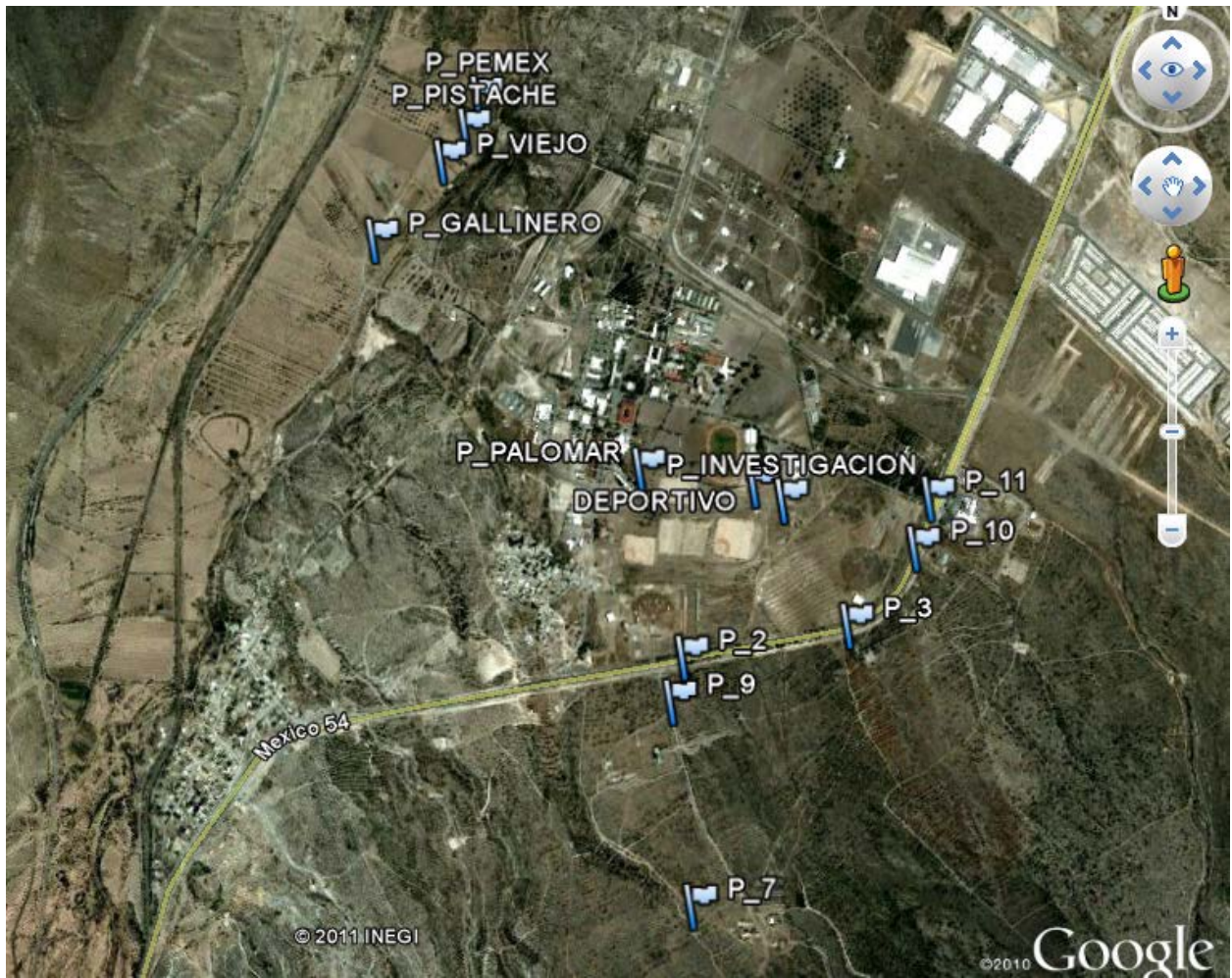


Figura 3.2. Localización geográfica de los pozos en la UAAAN.

Cuadro 3.2. Coordenadas geográficas de los pozos en la UAAAN.

No.	NOMBRE DE POZO	COORDENADAS GEOGRAFICAS		ALTIMETRIA msnm	CARACTERISTIC DE LA BOMBA	POZO(IDENTIFICACIÓN)
		LATITUD	LONGITUD			
1	El Gallinero	25° 21' 23"	101°2'24"	1750	Franklin Electric	P-15
2	Pistache	25° 21' 33"	101° 2' 14"	1746	Franklin Electric	P-13; SH28
3	Viejo	25° 21' 33"	101° 2' 17"	1752	Franklin Electric	P-8
4	Deportivo	25° 20' 59"	101° 1' 43"	1802	Franklin Electric	P-6; L-211
5	Investigación	25° 20' 57"	101° 1' 40"	1807	Franklin Electric	P-5
6	Los Pinos P-7	25° 20' 27"	101° 2' 0"	1837	Franklin Electric	P-7
7	Los Pinos L210	25° 20' 42"	101° 1' 51"	1836	Franklin Electric	P-2; L-210
8	Pemex	25° 21' 37"	101° 2' 13"	1748	Franklin Electric	P-PEMEX
9	Los Pinos P-9	25° 20' 38"	101° 1' 52"	1842	ND	P-9
10	Los Pinos P-3	25° 20' 45"	101° 1' 33"	1839	ND	P-3
11	Corrales Engorda	25° 20' 53"	101° 1' 26"	1813	ND	P-10
12	El Rastro	25° 20' 58"	101° 1' 24"	1818	ND	P-11
13	Los Palomares	25°21' 0"	101° 1' 55"	1787	ND	P-4
14	Los Pinos P- 1	25° 20' 18"	101° 1' 50"	1844	ND	P-1

3.3. Materiales.

Para la realización del diagnóstico electromecánico de las instalaciones, se utilizaron equipos adecuados a nuestras necesidades, que a continuación se mencionan:

- Voltamperímetro de gancho
- GPS
- Sonda eléctrica
- Libreta de campo
- Flexómetro

Con base en el resultado de esas mediciones se determinó:

- La eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba.

Se recorrió a cada una de las instalaciones donde se ubican los pozos y se verificó las condiciones en que se encuentran.

En general, el área de los pozos requiere de mantenimiento menor como es limpieza, reparación de las mallas de protección perimetral y otros accesorios necesarios para la protección. Así mismo de la identificación de cada uno de los pozos, ya que no todos cuentan con esa característica, debido a que es muy importante para su fácil localización.

3.4. Descripción de la Metodología.

Después del recorrido realizado, se continuó con la medición de las variables eléctricas el cual se mencionan. El método que se utilizó para medir las variables, se describen a continuación, y consisten en lo siguiente.

3.4.1 Método de la eficiencia ajustada o de la curva de eficiencia.

Este es un procedimiento iterativo basado en la comparación de la eficiencia calculada contra la reportada por las curvas características de eficiencia y en función del factor de carga para el motor en estudio. Este procedimiento resulta más viable de aplicar y proporciona resultados aceptables para fines de diagnóstico energético (CONAGUA, 2009).

Este método implica la medición de los siguientes parámetros eléctricos:

a) Tensión eléctrica de entrada (Voltaje) entre fases: V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} (Volt) y valor trifásico (V)

b) Corriente por fase: I_A , I_B , I_C , y valor promedio trifásico: I_T (Amperes)

c) Potencia activa por fase: P_A , P_B , P_C , y valor trifásico: P_T (kW)

d) Potencia reactiva por fase: P_{RA} , P_{RB} , P_{RC} , y valor trifásico: P_{RT} (kVAR)

e) Factor de potencia por fase: FP_A , FP_B , FP_C , y valor trifásico: FP (%)

El factor de potencia es un indicativo de la eficiencia con que se está utilizando la energía eléctrica para producir un trabajo útil, que es igual:

$$FP = \frac{P_{Act} * 1000}{(1.732 * V * A)}$$

Donde:

FP: factor de potencia

PAct: potencia activa (kW)

V=Voltaje

A=Amperaje

Los pasos a seguir para el cálculo de eficiencia del motor con el método de eficiencia ajustada son los siguientes:

❖ **Paso 1.** A partir de las características nominales del motor ($H_{p_{nominal}}$, RPM, I, V, etc.), se deberá identificar la curva de eficiencia del motor, en una gráfica con curvas para diferentes capacidades nominales de motores con 1800 rpm.

❖ **Paso 2.** A partir de la potencia eléctrica demandada por el motor (medición efectuada), se calcula el factor de carga nominal mediante la ecuación.

$$FC = \left(\frac{P_{med}}{\frac{Pot\ Plac}{Ef\ Plen\ Carg}} \right) * 100$$

Donde:

FC = Factor de carga de operación del motor (adimensional)

PMed = Potencia eléctrica Medida (Mediciones de campo en KW)

Pot Plac=Potencia de la placa (Hp)

Ef Plen Carg = Eficiencia a Plena Carga

- ❖ **Paso 3.** Comprobar en la curva del motor, que la eficiencia utilizada en el Paso 1, corresponda al factor de carga calculado. En caso contrario, se repite el paso anterior, utilizando la eficiencia que corresponda al *FC* calculado hasta que ambos valores coincidan, poniendo fin al proceso iterativo.

Los últimos valores de eficiencia del motor y factor de carga son los resultados reales del motor en estudio.

3.4.2. Eficiencias de la Bomba y Electromecánica

La eficiencia de la bomba (η_b) se calcula como el cociente de la potencia hidráulica de salida (P_h) entre la potencia mecánica absorbida (P_m). La ecuación muestra la manera de calcular la eficiencia de la bomba (CONAGUA, 2009).

$$\eta_b = \frac{\text{Potencia hidráulica de salida } (P_h)}{\text{Potencia mecánica absorbida } (P_m)} * 100$$

Debido a la dificultad de medir la potencia mecánica por separado y de ahí medir la eficiencia de la bomba, se recomienda evaluar la eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba.

Los pasos a seguir para la evaluación electromecánica son los siguientes:

La eficiencia de la bomba y la eficiencia electromecánica se calculan de la forma siguiente:

Paso 1. Se calcula la potencia hidráulica de salida a través de la ecuación.

$$P_h = \frac{H_b * Q * \rho * g}{1000}$$

Donde:

P_h = Potencia hidráulica de salida (kW)

H_b =Carga hidráulica de bombeo (m.c.a.)

Q =Caudal que pasa por la tubería, a la descarga de la bomba (m³/s)

ρ = Densidad del agua (kg/m³)

g = Aceleración de la gravedad en (m/s²)

Paso 2. Con el valor de la potencia hidráulica (P_h) calculada y la potencia eléctrica medida (P_e), se calcula la eficiencia electromecánica final con la ecuación siguiente.

$$\eta_{em} = \frac{P_h}{P_e}$$

Donde:

η_{em} = Eficiencia electromecánica

P_h = Potencia hidráulica de salida (kW)

P_e = Potencia eléctrica medida (kW)

Paso 3. Para el cálculo de la eficiencia de la bomba se tiene:

Una vez calculada la η_{em} , se sustituye en la ecuación de eficiencias (motor-bomba) y se determina despejando la eficiencia de la bomba η_b de la manera siguiente:

$$\eta_b = \frac{\eta_{em}}{\eta_m}$$

Y para hacer los cálculos de Recargo o Bonificación, con respecto al Factor de Potencia (F_p):

Fórmula de recargo:

FP en %, menor que 90 %

$$\%Recargo = \frac{3}{5} * \left(\left(\frac{90}{f_p} \right) - 1 \right) * 100$$

Fórmula de bonificación:

FP en %, mayor o igual a 90 %

$$\%Bonificación = \frac{1}{4} * \left(1 - \left(\frac{90}{f_p} \right) \right) * 100$$

3.4.3. Medición de las Variables Eléctricas.

Medición de tensión eléctrica (Voltaje):

Para realizar la medición de la tensión eléctrica en los equipos de bombeo, se utilizó un voltímetro, teniendo como referencia la Figura 3.3, y continuando de la forma siguiente:

- Tomar la lectura de la medición en los cables de tensión eléctrica que salen del contactor hacia el motor de la bomba.
- Colocar el cable rojo del voltímetro sobre la punta de salida del contactor en la línea “a”.
- Colocar el cable negro del voltímetro sobre la punta de tierra “n”.
- Registrar la lectura de tensión (V_{an}), correspondiente a la fase “a”.
- Repetir la acción, colocando el cable rojo del voltímetro en la punta de salida “b” y “c” del contactor (con el negro a tierra) y tomar lecturas respectivas de tensión (V_{bn}) en fase “b” y tensión (V_{cn}) en fase “c”.
- En el caso de la medición de tensión eléctrica entre fases, se debe repetir el procedimiento anterior colocando a la salida del contactor el cable rojo del voltímetro en punta “a” y el cable negro en la punta “b”; después entre “a” y “c”; por ultimo entre “b” y “c”.

Con el promedio de estos tres valores se calcula el valor de la tensión eléctrica trifásica (V).

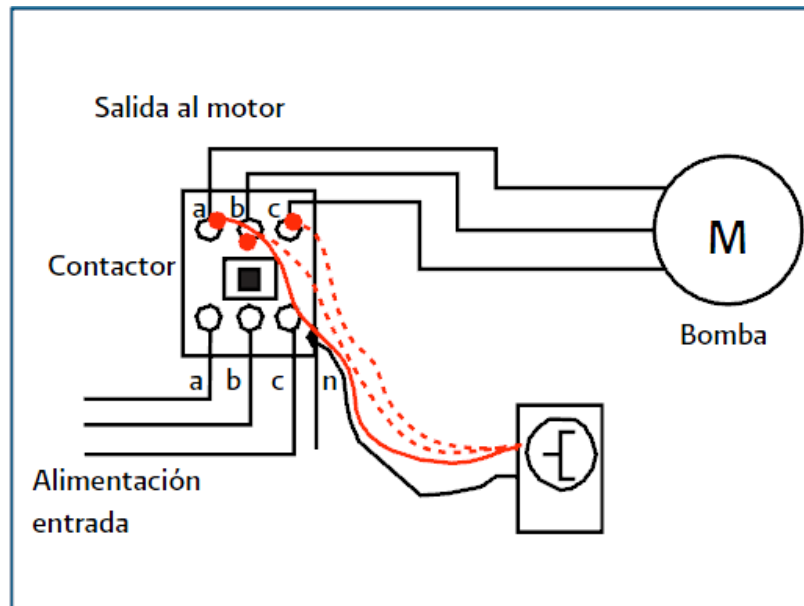


Figura 3.3. Medición de la tensión (voltaje) en equipos de bombeo (BID, 2011)

Medición de corriente eléctrica (amperaje):

La medición de la corriente eléctrica se efectúa con un amperímetro. El procedimiento de medición se efectúa de la manera siguiente, referido a la Figura 3.4:

- Cuando se utiliza un amperímetro monofásico, las lecturas de corriente eléctrica se realizan una por una, colocándolo en cada uno de los tres cables que salen del contactor y que alimentan al motor.

Las lecturas, registradas en cada cable, serán a las corrientes de las fases Ia, Ib, Ic, respectivamente. Con estos tres valores se calcula la corriente promedio de fases que es la corriente eléctrica trifásica total (I_{tt}).

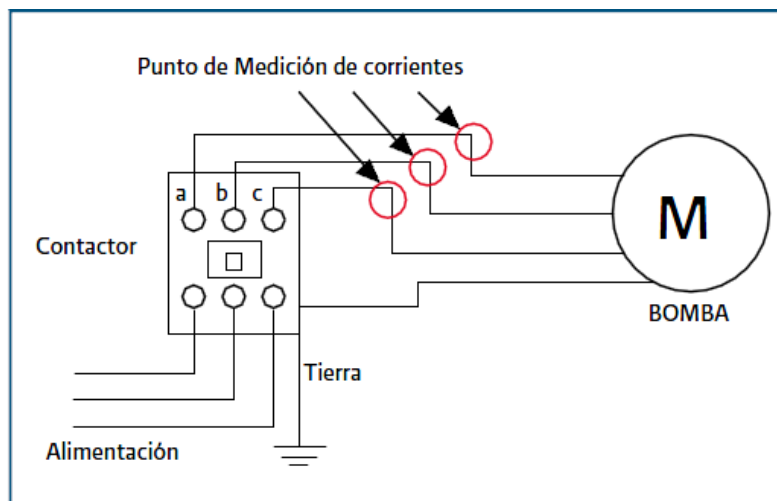


Figura 3.4. Medición de la corriente eléctrica en equipos de bombeo (BID, 2011)

3.4.4. Medición de las variables hidráulicas

Como en el caso de la medición de parámetros eléctricos, para la medición de los parámetros hidráulicos se deberán tener los equipos de medición calibrados y en buenas condiciones de uso.

Asimismo, cuando se efectúen las mediciones, el sistema no debe tener perturbaciones.

La curva de funcionamiento gasto vs carga hidráulica total de bombeo (Q-H_b) se construye realizando mediciones de estos dos parámetros, modificando en cada

lectura de datos las condiciones de operación. Los parámetros hidráulicos y los datos de referencia que se deben obtener son los siguientes:

- Medición del caudal a la descarga en la bomba (Q_d)
- Medición del nivel dinámico de succión (ND_s)

Medición del caudal en la descarga (Q_d)

Para la medición del caudal (Q_d) esta se leyó directamente en el medidor de gasto instalado en el sistema.

El caudal bombeado, (Q_d), es el otro factor que es susceptible a generar desperdicio de energía eléctrica.

Cada litro de agua bombeada hacia las tuberías requiere de un consumo de energía y, por ende, representa un costo. Si después de ser bombeada el agua se pierde en la fugas, entonces también la energía eléctrica utilizada es desperdiciada.

Las fugas incrementan la demanda de agua potable, lo que se refleja en un mayor caudal de bombeo y, por lo tanto, en un mayor consumo de la energía eléctrica.

Medición del nivel dinámico de succión (ND_s):

El nivel dinámico de succión (ND_s) es la distancia vertical entre el nivel de referencia y el espejo de agua de donde se está bombeando, en condiciones de operación normal y estable.

La medición se realizó con una sonda eléctrica y con ayuda de un flexómetro, dependiendo de las condiciones del lugar.

Determinación de la carga hidráulica (H)

La carga hidráulica total de bombeo está constituida por la suma de varios valores y que son las siguientes:

- La presión en la descarga de la bomba (p_d)
- El nivel dinámico de succión (ND_s)

- Las pérdidas de carga en la tubería (h_f) por el efecto cortante
- Y la carga de velocidad (H_v)

La carga hidráulica (H), depende de cada sistema hidráulico y de las condiciones particulares, como la profundidad del acuífero, desniveles topográficos y capacidad de conducción de las tuberías.

El exceso de la carga puede ser provocado directamente por el deterioro interno de las tuberías por donde es conducida el agua bombeada.

El envejecimiento de las tuberías, la calidad del agua y el funcionamiento en condiciones cambiantes de presión y caudal, aumentan su rugosidad interna y con ello sus coeficientes hidráulicos de cortante (Darcy-Weisbach o Hazen Williams), trayendo como consecuencia este aumento de la carga dinámica de operación de las bombas y entonces el incremento de consumo de energía eléctrica.

Sumado a lo anterior, si el diseño del sistema hidráulico es deficiente o si se presentan obstrucciones como válvulas parcialmente cerradas, aire atrapado, o si hay fugas en las tuberías, se tendrán enormes pérdidas de carga hidráulica con el consecuente incremento de la carga hidráulica del bombeo y el alto consumo de energía eléctrica.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Actualmente la UAAAN cuenta con catorce (14) pozos profundos, de los cuales solamente trabajan ocho (8), el resto, seis (6) se encuentran clausurados; por lo tanto se tienen registros de ocho (8) equipos de bombeo tipo sumergible, con características que a continuación se mencionan.

De acuerdo a las mediciones realizadas en campo y con los datos de la placa del motor, existe un desbalance y diferencia de voltaje que pudo ser calculado.

Debido a la antigüedad de los equipos de bombeo, aunado a la mala selección de estos, la eficiencia electromecánica de los equipos en operación está muy por debajo de lo que la norma nos indica como límite mínimo requerido.

Se pudo observar que en un equipo de bombeo, el suministro que CFE realiza a la universidad se encuentra muy desfasado de lo normal, de las tres fases de suministro, solamente uno funciona. Por lo que es importante hacer esa corrección para que el equipo esté funcionando correctamente.

También de los ocho equipos, uno opera eficientemente, esto debido a que hace poco tiempo fue instalado.

Cuadro 4.1. Características Hidráulicas de los equipos de bombeo en estudio.

No.	NOMBRE DE POZO	PROF (m)	DIAM(pgl)	GASTO (m3/s)	ND (m)	CARGA (Hb)	COORDENADAS GEOGRAFICAS		ALTIMETRIA msnm	CARACTERISTIC DE LA BOMBA	POZO(IDENTIFICACION)
							LATITUD	LONGITUD			
1	El Gallinero	102.8	14	0.007	62	79.6	25° 21' 23"	101° 2' 24"	1750	Franklin Electric	P-15
2	Pistache	200	10	0.009	67.1	87	25° 21' 33"	101° 2' 14"	1746	Franklin Electric	P-13
3	Viejo	90	10	0.004	44.1	65.5	25° 21' 33"	101° 2' 17"	1752	Franklin Electric	P-8
4	Deportivo	100	10	0.003	60	79	25° 20' 59"	101° 1' 43"	1802	Franklin Electric	P-6; L-211
5	Investigación	84.5	10	0.003	62	91	25° 20' 57"	101° 1' 40"	1807	Franklin Electric	P-5
6	Los Pinos P-7	150	10	0.002	92.5	128.5	25° 20' 27"	101° 2' 0"	1837	Franklin Electric	P-7
7	Los Pinos L210	150	12	0.002	80	104	25° 20' 42"	101° 1' 51"	1836	Franklin Electric	P-2; L-210
8	Pemex	300	12	0.009	120	139	25° 21' 37"	101° 2' 13"	1748	Franklin Electric	P-PEMEX
9	Los Pinos P-9	ND	ND	ND	ND	ND	25° 20' 38"	101° 1' 52"	1842	ND	P-9
10	Los Pinos P-3	ND	ND	ND	ND	ND	25° 20' 45"	101° 1' 33"	1839	ND	P-3
11	Corrales Engorda	ND	ND	ND	ND	ND	25° 20' 53"	101° 1' 26"	1813	ND	P-10
12	El Rastro	ND	ND	ND	ND	ND	25° 20' 58"	101° 1' 24"	1818	ND	P-11
13	Los Palomares	ND	ND	ND	ND	ND	25° 21' 0"	101° 1' 55"	1787	ND	P-4
14	Los Pinos P- 1	ND	ND	ND	ND	ND	25° 20' 18"	101° 1' 50"	1844	ND	P-1

En el cuadro 4.2 se presentan las características eléctricas de cada uno de los equipos de bombeo de los pozos que están en funcionamiento en la universidad. Se describen en orden de acuerdo al Cuadro 4.1, en el cual los primeros ochos pozos son los que están en funcionamiento.

Cuadro 4.2. Características Eléctricas de los equipos de bombeo en estudio.

VOLTAJE				AMPERAJE				POTENCIA ACTIVA POR FASE (kW)				POTENCIA APARENTE POR FASE (KVA)				FP	KVA	DATOS DE LA PLACA DEL MOTOR					
F1	F2	F3	PROM	F1	F2	F3	PROM	Σ fases	F1	F2	F3	PROM	F1	F2	F3	PROM	(Pot Act Trif *1000)/ ($\sqrt{3}$ *V*A)	KVA	Hp nom	RPM	I	V	Pot (Kw)
467	471	473	470.3	49.8	44.3	50.5	48.2	144.6	23.26	20.87	23.89	22.67	67.53	68.11	68.40	68.01	0.58	112.5	40	3450	54.9	460	30
236.1	234	234.7	234.9	65.2	73.4	72.6	70.4	211.2	15.39	17.18	17.04	16.54	49.86	49.42	49.57	49.62	0.58		30	3450	79	230	22
243	245	245.2	244.4	58	51.7	59.1	56.27	168.8	14.09	12.67	14.49	13.75	41.02	41.36	41.39	41.25	0.58	112.5	30	3450	79	230	22
229	228	231	229.3	15.88	15.9	15.88	15.88	47.64	3.64	3.62	3.67	3.64	10.91	10.86	11.00	10.93	0.58	30	5	3450	15.9	230	3.7
227	227	229	227.7	22.1	21.9	22	22	66	5.02	4.97	5.04	5.01	14.98	14.98	15.11	15.03	0.58	30	5	3450	15.9	230	3.7
233.7	233.9	236.7	234.8	15	16.1	15	15.37	46.1	3.51	3.77	3.55	3.61	10.77	10.78	10.91	10.82	0.58	15	5	3450	15.9	230	3.7
248.8	248.5	249.3	248.9	21.2	22.6	21.31	21.70	65.11	5.27	5.62	5.31	5.40	16.20	16.18	16.23	1.41	0.58	30	5	3450	15.9	230	3.7
230	231.5	229.3	230.3	63.8	63	68	64.93	194.8	14.67	14.58	15.59	14.95	44.80	45.10	44.67	12.65	0.58		30	3450	79	230	22

El proyecto se desarrolló con base en una recopilación de datos de campo y análisis de información obtenida a través de ella.

Se hizo un recorrido de las instalaciones de los pozos, anotando las características antes mencionadas (hidráulicas y eléctricas), de localización y otras necesarias, como se muestra en las imágenes siguientes.



Figura 4.1. Recolección de datos de campo.



Figura 4.2. Características de los equipos de bombeo.



Figura 4.3. Medición de las variables hidráulicas.



Figura 4.4. Características de las instalaciones eléctricas.



Figura 4.5. Levantamiento de datos eléctricos.

Enseguida se continuó con los cálculos de las eficiencias electromecánicas por cada equipo de bombeo de pozo profundo.

4.1 Cálculo de las Eficiencias Electromecánicas

Pozo Gallinero

Cálculo de la Potencia de Salida de la Bomba

$$P_s = \frac{H_b * Q * \rho * g}{1000}$$

P_s = Potencia de salida de la bomba (KW)

H_b = Carca Dinámica Total (m)

Q = gasto (m^3/s)

ρ = Densidad del agua bombeada (kg/m^3)

g = aceleración de la gravedad (m/S^2)

1000 = conversión a Kilowatts

$$P_s = \frac{79.6 * 0.007 * 1000 * 9.81}{1000}$$

$$P_s = 5.46 \text{ KW}$$

Cálculo de la Potencia de Entrada al Motor

$$P_e = \frac{\sqrt{3} * V * I * fp}{1000}$$

V = Tensión eléctrica, (V)

I = Corriente eléctrica, (A)

fp = Factor de Potencia, adimensional

$$P_e = \frac{1.732 * 470.3 * 48.2 * 0.58}{1000}$$

$$P_e = 22.77 \text{ KW}$$

Eficiencia electromecánica

$$em = \frac{Ps}{Pe} * 100$$

nem = es el cociente de la potencia medida a la salida de la bomba entre la potencia de entrada al motor eléctrico, expresado en %.

Ps = Potencia de salida de la bomba; (KW).

Pe = Potencia de entrada al motor, (KW).

$$em = \frac{5.47}{22.67} * 100$$

$$em = 24.12 \%$$

Pozo Pistache

Potencia de salida de la bomba

$$Ps = \frac{Hb * Q * \rho * g}{1000}$$

$$Ps = \frac{87 * 0.009 * 1000 * 9.81}{1000}$$

$$Ps = 7.68 \text{ KW}$$

Potencia de Entrada al Motor

$$Pe = \frac{\sqrt{3} * V * I * fp}{1000}$$

$$Pe = \frac{1.732 * 234.9 * 70.4 * 0.58}{1000}$$

$$Pe = 16.54 \text{ KW}$$

Eficiencia electromecánica

$$em = \frac{Ps}{Pe} * 100$$

$$em = \frac{7.68}{16.54} * 100$$

$$em = 46.45 \%$$

Pozo Viejo

Potencia de salida de la bomba

$$Ps = \frac{Hb * Q * \rho * g}{1000}$$

$$Ps = \frac{65.5 * 0.004 * 1000 * 9.81}{1000}$$

$$Ps = 2.57 \text{ KW}$$

Potencia de Entrada al Motor

$$Pe = \frac{\sqrt{3} * V * I * fp}{1000}$$

$$Pe = \frac{1.732 * 244.4 * 56.26 * 0.58}{1000}$$

$$Pe = 13.75 \text{ KW}$$

Eficiencia electromecánica

$$em = \frac{Ps}{Pe} * 100$$

$$em = \frac{2.57}{13.81} * 100$$

$$em = 18.69 \%$$

Pozo Deportivo

Potencia de salida de la bomba

$$P_s = \frac{Hb * Q * \rho * g}{1000}$$

$$P_s = \frac{79 * 0.003 * 1000 * 9.81}{1000}$$

$$P_s = 2.32 \text{ KW}$$

Potencia de entrada al motor

$$P_e = \frac{\sqrt{3} * V * I * fp}{1000}$$

$$P_e = \frac{1.732 * 229.3 * 15.88 * 0.58}{1000}$$

$$P_e = 3.64 \text{ KW}$$

Eficiencia electromecánica

$$em = \frac{P_s}{P_e} * 100$$

$$em = \frac{2.32}{3.64} * 100$$

$$em = 63.84 \%$$

Pozo Investigación

Potencia de salida de la bomba

$$P_s = \frac{Hb * Q * \rho * g}{1000}$$

$$P_s = \frac{91 * 0.003 * 1000 * 9.81}{1000}$$

$$P_s = 2.68 \text{ KW}$$

Potencia de entrada al motor

$$Pe = \frac{\sqrt{3} * V * I * fp}{1000}$$

$$Pe = \frac{1.732 * 227.7 * 22 * 0.58}{1000}$$

$$Pe = 5.01 \text{ KW}$$

Eficiencia electromecánica

$$em = \frac{Ps}{Pe} * 100$$

$$em = \frac{2.68}{5.01} * 100$$

$$em = 53.47 \%$$

Pozo Los Pinos P-7

Potencia de salida de la bomba

$$Ps = \frac{Hb * Q * \rho * g}{1000}$$

$$Ps = \frac{128.5 * 0.002 * 1000 * 9.81}{1000}$$

$$Ps = 2.52 \text{ KW}$$

Potencia de entrada al motor

$$Pe = \frac{\sqrt{3} * V * I * fp}{1000}$$

$$Pe = \frac{1.732 * 234.8 * 15.36 * 0.58}{1000}$$

$$Pe = 3.61 \text{ KW}$$

Eficiencia electromecánica

$$em = \frac{Ps}{Pe} * 100$$

$$em = \frac{2.52}{3.61} * 100$$

$$em = 69.89 \%$$

Pozo Los Pinos L-210

Potencia de salida de la bomba

$$Ps = \frac{Hb * Q * \rho * g}{1000}$$

$$Ps = \frac{104 * 0.002 * 1000 * 9.81}{1000}$$

$$Ps = 2.04 \text{ KW}$$

Potencia de entrada al motor

$$Pe = \frac{\sqrt{3} * V * I * fp}{1000}$$

$$Pe = \frac{1.732 * 248.9 * 21.703 * 0.58}{1000}$$

$$Pe = 5.42 \text{ KW}$$

Eficiencia electromecánica

$$em = \frac{Ps}{Pe} * 100$$

$$em = \frac{2.04}{5.42} * 100$$

$$em = 37.78 \%$$

Pozo Pemex

Potencia de salida de la bomba

$$P_s = \frac{Hb * Q * \rho * g}{1000}$$

$$P_s = \frac{139 * 0.009 * 1000 * 9.81}{1000}$$

$$P_s = 12.27 \text{ KW}$$

Potencia de entrada al motor

$$P_e = \frac{\sqrt{3} * V * I * fp}{1000}$$

$$P_e = \frac{1.732 * 230.3 * 63.633 * 0.58}{1000}$$

$$P_e = 14.95 \text{ KW}$$

Eficiencia electromecánica

$$em = \frac{P_s}{P_e} * 100$$

$$em = \frac{12.27}{14.95} * 100$$

$$em = 82.09 \%$$

Se propone el cambio de tres motores que son de gran consumo de energía, debido a que son los que operan menos eficiente, en el cual también podemos lograr los ahorros económicos más importantes al ser sustituidos.

A continuación se presentan los cálculos necesarios que se deben de realizar para poder comparar los consumos de energía, tanto del motor estándar, como el de alta eficiencia.

Así mismo, los cálculos de ahorros económicos que podemos lograr al implementar estas acciones.

Ajuste del motor pozo “El Gallinero”.

1). Cálculo de la variación de Volt (%):

$$\text{Variacion de Vol} = \left(\left(\frac{V_{prom}}{V_{placa}} \right) - 1 \right) * 100$$

$$\text{Variacion de Vol} = \left(\left(\frac{470.3}{460} \right) - 1 \right) * 100 = 2.25\%$$

El ajuste por variación de voltaje se determina de acuerdo a la Figura 2.4:

Por lo tanto, el factor de ajuste será de 0.5333

2). Cálculo de desbalance de voltaje (%):

$$\text{Max Dif al Prom} = (V_{Max} - V_{Prom} \text{ ó } V_{Prom} - V_{min}) * 100$$

$$\text{Max Dif al Prom} = 470.3 - 467 = 3.33$$

$$\% \text{ Desvalance} = \left(\frac{\text{Max Dif al Prom}}{V_{prom}} \right) * 100$$

$$\% \text{ Desvalance} = \left(\frac{3.33}{470.3} \right) * 100 = 0.71\%$$

La eficiencia del motor disminuye conforme se incrementa el desbalance de voltaje, de acuerdo al factor de ajuste mostrado en la Figura 2.5.

Por lo tanto y de acuerdo a la figura, el factor de ajuste de 0.9925

3). Factor de carga:

$$FC = \frac{\text{Pot Med}}{\frac{Hp_{placa} * 0.746}{Ef_{Mot placa}}} * 100$$

$$FC = \frac{22.67}{\frac{40 * 0.746}{0.83}} * 100 = 63\%$$

De acuerdo a Figura 2.2., el factor de ajuste será de 0.9937

4). Ajuste por reembobinado

De acuerdo al número de reembobinados que se le ha aplicado el motor, este disminuye la eficiencia.

En la Figura 2.3. se puede observar como disminuye la eficiencia.

En el caso del motor del pozo Gallinero se considera 1 reembobinado, siendo para este un factor de corrección de 0.975

Por lo tanto el factor de ajuste total será igual a la multiplicación de todos los factores anteriores ajustes, tenemos:

$$Fact\ Ajuste\ Tot = 0.9925 * 0.5333 * 0.9937 * 0.975$$

$$Fact\ Ajuste\ Tot = 0.51$$

Por lo tanto la eficiencia del motor ajustado a la que está trabajando será de:

$$Ef\ Mot\ Ajustado = (Fact\ Ajuste\ Tot * Ef\ mot\ placa)$$

$$Ef\ Mot\ Ajustado = (0.51 * 0.83) = 43\%$$

Por lo que la potencia del motor estándar en la flecha es de:

$$22.67KW * 0.43 = 9.65KW$$

Por lo tanto para entregar 9.65 kW, la potencia demandada por el motor estándar es de 22.67 kW

Para el pozo El Gallinero se propone cambiar el motor estándar por uno de alta eficiencia y de menor potencia. Y tenemos:

La eficiencia de un motor de 30 h p. de alta eficiencia de iguales características al que se encuentra actualmente instalado, es de 93.43% a plena carga.

Calculando la eficiencia ajustada tenemos:

$$Ef \text{ ajustada Mot Alt EF} = EF \text{ de placa} * Fact \text{ Ajust Tot sin Reembobinar}$$

$$Ef \text{ ajustada Mot Alt EF} = 93.43 * 0.9995 = 0.9338$$

Por lo que para el caso del motor de alta eficiencia para entregar 9.65 kW requiere demandar:

$$Pot \text{ Demandada del Motor Alta EF (KW)} = \frac{Pot \text{ entregada}}{EF \text{ nueva ajustada}}$$

$$Pot \text{ Dem Mot Alt EF} = \frac{9.65}{0.9338} = 10.33 \text{ KW}$$

Cálculo del ahorro energético

$$Ahorro \text{ en Demanda (KW)} = Pot \text{ Dem del Mot Estandar} - Pot \text{ Dem del Mot Alta EF}$$

$$Ahorro \text{ en Demanda} = 22.67 - 10.33 = 12.34 \text{ KW}$$

Nota: se considera 8 hrs de operación de los equipos siendo 2920 hrs anuales.

Ahorro en Consumo (KWh/año)

$$= \text{Ahorro en Demanda} * \text{Horas de Operaciones anuales}$$

$$Ahorro \text{ en Consumo} = 12.34 * 2920 \text{ hrs} = 36,023.47 \text{ KWh/año}$$

Cálculo del ahorro económico

Considerando la aplicación de la tarifa OM (Noviembre de 2011) en el Noreste de México, entonces el cargo por Kw de demanda máxima medida es de \$146.74 y el cargo por kWh de energía consumida es de \$1.28, del cual se calculó el siguiente ahorro económico (CFE, 2011).

$$\text{Cargo por Kw} = (\$146.74 * 12.34 \text{ kW}) * 12 \text{ meses} = \$21,723.63$$

$$\text{Cargo por Kwh} = (\$1.28 \times 36,023.47 \text{ kWh}) = \$46,110.04$$

$$\text{Ahorro Economico} = \text{Cargo por KW} + \text{Cargo por KWh}$$

$$\text{Ahorro Economico} = 21,723.63 + 46,110.04 = 67,833.67$$

Periodo de amortización o periodo simple de recuperación

El costo de un motor eléctrico de alta eficiencia trifásico Marca WEG de 30 HP, 440 V con una eficiencia de 93.43%, (para ambiente hostil) tiene un costo aproximado de \$20,548.00.

Por lo tanto el tiempo de recuperación de la inversión será:

$$\text{Tasa Simple de Recuperacion TSR (años)} = \frac{\text{Costo Mot Alt EF}}{\text{Ahorro Econom Anual}}$$

$$\text{Tasa Simple de Recuperacion (TSR)} = \frac{\$20,548.00}{\$67,833.67} = 0.30 \text{ años}$$

Por lo tanto como en 0.3 años podemos pagar el equipo de bombeo, en seguida podemos comenzar a ahorrar en los consumos de energía eléctrica y en los ahorros económicos.

Ajuste del motor pozo "Pistache"

1). Cálculo de la variación de Volt (%):

$$\text{Variacion de Vol} = \left(\left(V \frac{\text{prom}}{V \text{placa}} \right) - 1 \right) * 100$$

$$\text{Variacion de Vol} = \left(\left(\frac{234.93}{230} \right) - 1 \right) * 100 = 2.14\%$$

De acuerdo a la Figura 2.4 (Variación de Voltaje), el factor de ajuste será de 0.51

2). Cálculo de desbalance de voltaje (%):

$$\text{Max Dif al Prom} = (V \text{ Max} - V \text{ Prom} \text{ ó } V \text{ Prom} - V \text{ min}) * 100$$

$$\text{Max Dif al Prom} = 236.1 - 234.93 = 1.17$$

$$\% \text{ Desvalance} = \left(\frac{\text{Max Dif al Prom}}{V \text{ prom}} \right) * 100$$

$$\% \text{ Desvalance} = \left(\frac{1.17}{234.93} \right) * 100 = 0.50\%$$

De acuerdo a la Figura 2.5 (Desbalance de Voltaje) el factor de ajuste sobre la eficiencia del motor en función del desbalanceo de voltaje, le corresponde un factor de ajuste de 0.995

3). Factor de Carga:

$$FC = \frac{\text{Pot Med}}{\frac{\text{Hp placa} * 0.746}{\text{Ef Mot placa}}} * 100$$

$$FC = \frac{16.53}{\frac{30 * 0.746}{0.83}} * 100 = 61\%$$

De acuerdo a la Figura 2.2 (Curva de comportamiento de eficiencia de acuerdo al factor de carga de operación), el factor de ajuste será de 0.9939

4). Ajuste por reembobinado

En el caso del motor del pozo PISTACHE se considera que ya fue reembobinado 1 vez, y tomando en cuenta la Figura 2.3 (Perdida de eficiencia del motor de acuerdo al número de reembobinados) tenemos para este un factor de corrección de 0.975.

Por lo tanto el factor de ajuste total será igual a la multiplicación de cada uno de los anteriores ajustes, tenemos:

$$\text{Fact Ajuste Tot} = 0.995 * 0.51 * 0.9939 * 0.975$$

$$\text{Fact Ajuste Tot} = 0.49$$

Por lo tanto la eficiencia del motor ajustado a la que está trabajando será de:

$$Ef \text{ Mot Ajustado} = Fact \text{ Ajuste Tot} * Ef \text{ mot placa}$$

$$Ef \text{ Mot Ajustado} = 0.49 * 0.83 = 41\%$$

Por lo que la potencia del motor estándar en la flecha es de

$$16.53KW * 0.41 = 6.75KW$$

Por lo que para entregar 6.75 kW, el motor debe de tomar de las líneas 16.53 KW

También se propone para el pozo Pistache, cambiar el motor estándar por uno de alta eficiencia, pero con la misma potencia. Por lo tanto se tiene:

La eficiencia de un motor de 30 hp., de alta eficiencia de iguales características al que se encuentra actualmente instalado, es de 93.43% a plena carga.

Calculando la eficiencia ajustada tenemos:

$$Ef \text{ ajustada Mot Alt EF} = EF \text{ de placa} * Fact \text{ Ajust Tot sin Reembobinar}$$

$$Ef \text{ ajustada Mot Alt EF} = 93.43 * 0.9995 = 0.9338$$

Por lo que para el caso del motor de alta eficiencia para entregar 9.65 kW requiere demandar:

$$Pot \text{ Demandada del Motor Alta EF (KW)} = \frac{Pot \text{ entregada}}{EF \text{ nueva ajustada}}$$

$$Pot \text{ Dem Mot Alt EF} = \frac{6.75}{0.9338} = 7.23 \text{ KW}$$

Cálculo del ahorro energético

$$\text{Ahorro en Demanda (KW)} = \text{Pot Dem del Mot Estandar} - \text{Pot Dem del Mot Alta EF}$$

$$\text{Ahorro en Demanda} = 16.53 - 7.23 = 9.31 \text{ KW}$$

Nota: se considera 8 hrs de operación de los equipos siendo 2920 hrs anuales.

$$\text{Ahorro en Consumo (KWh/año)}$$

$$= \text{Ahorro en Demanda} * \text{Horas de Operaciones anuales}$$

$$\text{Ahorro en Consumo} = 9.31 * 2920 \text{ hrs} = 27,181.2 \text{ KWh/año}$$

Cálculo del ahorro económico

Considerando la aplicación de la tarifa OM (Noviembre de 2011) en el Noreste de México, entonces el cargo por Kw de demanda máxima medida es de \$146.74 y el cargo por kWh de energía consumida es de \$1.28, del cual se calculó el siguiente ahorro económico (CFE, 2011).

$$\text{Cargo por Kw} = (\$146.74 \times 9.31 \text{ kW}) \text{ 12 meses} = \$16,391.57$$

$$\text{Cargo por Kwh} = (\$1.28 \times 27,181.5 \text{ kWh}) = \$34,792.32$$

$$\text{Ahorro Economico (\$)} = \text{Cargo por KW} + \text{Cargo por KWh}$$

$$\text{Ahorro Economico} = 16,391.57 + 34,792.32 = \$ 51,183.90$$

Periodo de amortización o periodo simple de recuperación

El costo de un motor eléctrico de alta eficiencia trifásico Marca WEG de 30 HP, 220 V con una eficiencia de 93.43%, (para ambiente hostil) tiene un costo aproximado de \$22,764.00

Por lo tanto el tiempo de recuperación de la inversión será:

$$\text{Tasa Simple de Recuperacion TSR (años)} = \frac{\text{Costo Mot Alt EF}}{\text{Ahorro Econom Anual}}$$

$$Tasa Simple de Recuperacion (TSR) = \frac{\$22,764.00}{\$51,183.90} = 0.44 \text{ años}$$

Ajuste del motor pozo "Viejo"

1). Cálculo de la variación de Volt (%):

$$Variacion de Vol = \left(\left(\frac{V_{prom}}{V_{placa}} \right) - 1 \right) * 100$$

$$Variacion de Vol = \left(\left(\frac{244.4}{230} \right) - 1 \right) * 100 = 6.26\%$$

De acuerdo a la Figura 2.4 (Variación de voltaje), el factor de ajuste será de 0.5714

2). Calculo de desbalance de voltaje (%):

$$Max Dif al Prom = (V Max - V Prom \text{ ó } V Prom - V min) * 100$$

$$Max Dif al Prom = 244.4 - 234 = 1.40$$

$$\% Desvalance = \left(\frac{Max Dif al Prom}{V prom} \right) * 100$$

$$\% Desvalance = \left(\frac{1.40}{244.4} \right) * 100 = 0.57\%$$

De acuerdo a la Figura 2.5 (Desbalance de voltaje) el Factor de Ajuste sobre la eficiencia del Motor en función del Desbalanceo de voltaje, le corresponde un factor de ajuste de 0.9953

3). Factor de carga:

$$FC = \frac{Pot Med}{\frac{Hp placa * 0.746}{Ef Mot placa}} * 100$$

$$FC = \frac{13.75}{\frac{30 * 0.746}{0.83}} * 100 = 51\%$$

De acuerdo a la Figura 2.2 (Curva de comportamiento de eficiencia de acuerdo al factor de carga de operación), el factor de ajuste será de 0.9949.

4). Ajuste por reembobinado

En el caso del motor del Pozo Viejo se considera que ya fue reembobinado 1 vez, y tomando en cuenta la Figura 2.3 (Pérdida de eficiencia del motor de acuerdo al número de reembobinados) tenemos para este un factor de corrección de 0.975.

Por lo tanto el factor de ajuste total será igual a la multiplicación de cada uno de los anteriores ajustes, tenemos:

$$Fact\ Ajuste\ Tot = 0.9953 * 0.5714 * 0.9949 * 0.975$$

$$Fact\ Ajuste\ Tot = 0.55$$

Por lo tanto la eficiencia del motor ajustado a la que está trabajando será de:

$$Ef\ Mot\ Ajustado = Fact\ Ajuste\ Tot * Ef\ mot\ placa$$

$$Ef\ Mot\ Ajustado = 0.55 * 0.83 = 46\%$$

Por lo que la potencia del motor estándar en la flecha es de:

$$13.75KW * 0.46 = 6.30KW$$

Por lo que para entregar 6.30 kW, el motor debe de tomar de las líneas 13.75 KW

También se propone para el pozo Viejo, cambiar el motor estándar por uno de alta eficiencia. Y tenemos:

La eficiencia de un motor de 30 hp. de alta eficiencia de iguales características al que se encuentra actualmente instalado, es de 93.43% a plena carga.

Calculando la eficiencia ajustada tenemos:

$$Ef\ ajustada\ Mot\ Alt\ EF = EF\ de\ placa * Fact\ Ajust\ Tot\ sin\ Reembobinar$$

$$Ef \text{ ajustada Mot Alt } EF = 93.43 * 0.9995 = 0.9338$$

Por lo que para el caso del motor de alta eficiencia para entregar 6.30 kW requiere demandar:

$$Pot \text{ Demandada del Motor Alta } EF (KW) = \frac{Pot \text{ entregada}}{EF \text{ nueva ajustada}}$$

$$Pot \text{ Dem Mot Alt } EF = \frac{6.30}{0.9338} = 6.74 \text{ KW}$$

Cálculo del ahorro energético

$$Ahorro \text{ en Demanda } (KW) = Pot \text{ Dem del Mot Estandar} - Pot \text{ Dem del Mot Alta } EF$$

$$Ahorro \text{ en Demanda} = 13.75 - 6.74 = 7.01 \text{ KW}$$

Nota: se considera 8 hrs de operación de los equipos siendo 2920 hrs anuales.

$$Ahorro \text{ en Consumo } (KWh/año)$$

$$= Ahorro \text{ en Demanda} * \text{Horas de Operaciones anuales}$$

$$Ahorro \text{ en Consumo} = 7.01 * 2920 \text{ hrs} = 20,464.21 \text{ KWh/año}$$

Cálculo del ahorro económico

Considerando la aplicación de la tarifa OM (Noviembre de 2011) en el Noreste de México, entonces el cargo por KW de demanda máxima medida es de \$146.74 y el cargo por kWh de energía consumida es de \$1.28, del cual se calculó el siguiente ahorro económico (CFE, 2011).

$$\text{Cargo por KW} = (\$146.74 * 7.01 \text{ kW}) * 12 \text{ meses} = \$12,340.76$$

$$\text{Cargo por Kwh} = (\$1.28 * 20,464.21 \text{ kWh}) = \$26,194.19$$

$$Ahorro \text{ Economico } (\$) = \text{Cargo por KW} + \text{Cargo por KWh}$$

$$Ahorro \text{ Economico} = 12,340.76 + 26,194.19 = \$ 38,534.95$$

Periodo de amortización o periodo simple de recuperación

El costo de un motor eléctrico de alta eficiencia trifásico Marca WEG de 30 HP, 220 V con una eficiencia de 93.43%, (para ambiente hostil) tiene un costo aproximado de \$22,764.00

Por lo tanto el tiempo de recuperación de la inversión será:

$$\text{Tasa Simple de Recuperacion TSR (años)} = \frac{\text{Costo Mot Alt EF}}{\text{Ahorro Econom Anual}}$$

$$\text{Tasa Simple de Recuperacion (TSR)} = \frac{\$22,764.00}{\$38,534.95} = 0.59 \text{ años}$$

A continuación se presentan el Cuadro 4.3, Resultados de las eficiencias electromecánicas de los equipos de bombes. En el Cuadro 4.4, los cálculos realizados para ajustar los motores estándar y en seguida el cuadro 4.5, Ahorros que se puede obtener al implementar las acciones mencionadas.

En el siguiente cuadro se presenta los resultados de las eficiencias electromecánicas de los equipos de bombeo de pozo profundo que actualmente operan en la universidad

Cuadro 4.3. Resultados de las Eficiencias Electromecánicas

EFICIENCIA DEL MOTOR (%)	EFICIENCIA ELECTRO-MECANICA (%)	POTENCIA ENTRADA MOTOR P_e (KW)	POTENCIA ENTRADA A BOMBA	POTENCIA SALIDA DE LA BOMBA (KW)	EFICIENCIA DE LA BOMBA (%)	FACTOR DE CARGA DE OPERACIÓN DEL MOTOR	RECARGOS POR BAJO FP (%)
PLACA	$\eta_{em} = P_{sb}/P_e$	$P_e = (\sqrt{3} * V * I * \text{fp}) / 1000$	$P_{eb} = (\sqrt{3} * V * I * \text{fp} * \text{em}) / 1000$	$P_{sb} = (H_b * Q * \rho * g) / 1000$	$\eta_b = P_{sb} / P_{eb}$	$FC = (Pot\ Med / (Pot\ Plac / Ef\ Pl\ Carg)) * 100$	
0.83	24.11	22.67	9.65	5.47	56.65	0.63	33.10
0.83	46.45	16.54	13.73	7.68	55.97	0.61	33.10
0.83	18.69	13.75	11.41	2.57	22.52	0.51	33.10
0.74	63.84	3.64	2.69	2.32	86.27	0.72	33.10
0.74	53.47	5.01	3.71	2.68	72.26	0.99	33.10
0.74	69.89	3.61	2.67	2.52	94.45	0.72	33.10
0.74	37.78	5.40	4.00	2.04	51.05	1.07	33.10
0.83	82.09	14.95	12.41	12.27	98.90	0.55	33.10

Cuadro 4.4. Cálculo de los ajustes de los motores estándar por el método de la eficiencia ajustada.

1) CALCULO DESVALANCEO DE VOLTAJE (%)		2). CALCULO DE LA VARIACION VOLT (%)		3). FACTOR DE CARGA		4). AJUST REEMBOLNADO		EFICIENCIA MOTOR AJUSTADO (%)	POT DE MOTOR EN LA FLECHA	
MAX DIF AL PROM = (V MAX - V PROM Ó V PROM - V MIN)*100	% DESVALANCE V = (MAX DIF AL PROM / V PROM)*100	AJUSTE DESVALANCE	((V PROM / V PLAC) - 1) *100	AJUSTE POR DIF DE V	FC=Pot Med/(Pot Plac/Ef Pl Carg))*100	AJUSTE POR FACTOR DE CARGA	UNA VES	FACT AJUST TOT	KW	
3.33	0.71	0.9925	2.25	0.5333	0.63	0.9937	0.975	0.51	0.43	9.65
1.17	0.50	0.995	2.14	0.51	0.61	0.9939	0.975	0.49	0.41	6.75
1.40	0.57	0.9953	6.26	0.5714	0.51	0.9949	0.975	0.55	0.46	6.30

Cuadro 4.5. Cálculos de los ahorros económicos a lograr al implementar las acciones mencionadas.

CAMBIO MOTOR STD POR MOTOR ALTA EFF DE 93.43%		AHORRO DEMANDA (KWh)		AHORRO EN CONSUMO	AHORRO ECONOMICO TARIFA OM-NOV-2011		PERIODO DE AMORTIZACION(AÑOS)		
mismas características	FACT AJUST TOT	NECECITA TOMAR DE LAS LINEAS (KW)	P D MOT ESTD - P D MOT EFICIENT	KWh/AÑO	CARGO Kw DEMANDA MAX MEDIDA REGION NE (\$)	CARGO KWh DE ENERGIA CONSUM REGION NE (\$)	COSTO MOT ALTA EFF 30Hp APROX		
EFF = 93.43%	0.9995			8 HRS X 365 DIAS=2920	146.74	1.28	AHORRO TOTAL		
	0.93	10.33	12.34	36,023.47	21,723.63	46,110.04	67,833.67	20,548.00	0.30
	0.93	7.23	9.31	27,181.51	16,391.57	34,792.33	51,183.90	22,764.00	0.44
	0.93	6.74	7.01	20,464.21	12,340.76	26,194.19	38,534.95	22,764.00	0.59

V. CONCLUSIONES

La eficiencia electromecánica, es un concepto de suma importancia, ya que representa la vida útil de los equipos, así como el ahorro de energía. Por ello es necesario dar mantenimiento y cuidado de cada uno de las partes que la conforman.

El diagnóstico de eficiencia energética es la aplicación de un conjunto de técnicas para determinar el grado de eficiencia con la que es utilizada la energía en un sistema de agua potable, además de especificar cuanta de esa energía es desperdiciada.

La eficiencia electromecánica de los equipos de bombeo resulta ser un factor determinante para lograr un ahorro significativo de energía, ya que influye en forma directa en el consumo.

De acuerdo al Cuadro de resultados de eficiencias electromecánicas (4.3) y el cuadro 2.3 (NOM-006), podemos observar que la eficiencia alcanzada en el conjunto motor-bomba, en la mayoría de ellos no se alcanza como lo establece la norma, por lo que es necesario realizar acciones que contribuyan en la reducción de consumo de energía eléctrica en los equipos.

Solo un equipo puede superar este valor; esto debido a que es un equipo nuevo de reciente puesta en marcha.

Otro efecto adicional lo representan las condiciones hidráulicas de los pozos, en donde un buen mantenimiento disminuiría la carga hidráulica a vencer.

- De acuerdo al Cuadro 2.3 y la capacidad de los equipos de bombeo con que se cuenta en los pozos de la universidad, las eficiencias electromecánicas debe de estar alrededor de 52-56 %, aunque como la misma norma lo indica, estos datos son pruebas realizadas en el laboratorio.
- Se presenta un cuadro con cálculos realizados para poder especificar los ahorros económicos que se pueden obtener al implementar las acciones recomendadas.

- A través de estos resultados podemos decir que es importante implementar un programa de mantenimiento preventivo en los equipos electromecánicos.

- De los ocho equipos que actualmente operan en el área de la universidad, uno opera eficientemente, debido a que es un equipo de reciente adquisición.

- También podemos observar que el Factor de Potencia está muy por debajo de lo que la norma indica, el cual debe ser mayor o igual al 90% (DOF, 1991).

- Por lo tanto es necesario realizar acciones que ayuden a reducir el consumo de energía eléctrica en los equipos.

- Se propone el cambio de tres motores que son de gran consumo de energía, debido a que son los que operan menos eficiente, en el cual también podemos lograr los ahorros económicos más importantes al ser sustituidos.

VI. RECOMENDACIONES

A continuación se describen algunas de las acciones recomendables que se pueden realizar para mejorar la eficiencia electromecánica:

- Es importante implementar un programa de mantenimiento preventivo en los equipos electromecánicos.
- Es conveniente instrumentar un programa de verificación de eficiencias, a través del registro de variables eléctricas e hidráulicas, durante la operación de los equipos electromecánicos.
- Es de suma importancia la selección adecuada del equipo de bombeo, de acuerdo a las condiciones hidráulicas y constructivas del pozo. Este hecho puede significar reducciones importantes en los costos de operación.
- Cuando se va a utilizar un motor ya sea nuevo o por substitución, es conveniente contar con especificaciones. Una buena especificación del motor logrará el mejor comportamiento de acuerdo a todas las características que la operación exija.
- También es conveniente determinar desde la compra las características requeridas a los componentes, tal como: armazón, carcasa, diseño del rotor, rodamientos, clase de aislamiento, etc.
- Rehabilitación de fuentes de abastecimiento.

Esta actividad inicia regularmente con la extracción del equipo de bombeo para llevar a cabo la toma de un video al interior del pozo y determinar qué tipo de rehabilitación se ha de aplicar ya sea mecánica, química o combinada, para finalmente concluir con la realización de un aforo para conocer su potencial hidráulico del pozo.

Para tener un mejor resultado se recomienda tener especial cuidado en la ejecución de los trabajos ya que por lo regular los ademes se encuentran muy corroídos y con presencia de colapsos, lo cual si no se toma en cuenta entonces puede ocasionar la pérdida total del pozo. También se debe considerar que las

rehabilitaciones de los pozos solamente son factibles de realizarse en dos o tres ocasiones y después programar la reposición del mismo.

- Rehabilitación de equipos de bombeo.

En cuanto a la rehabilitación de los equipos de bombeo, es importante que ante todo se conozcan datos reales del aforo del pozo, condiciones de gasto y carga normal de operación requeridos por el sector de influencia al cual abastece el pozo, y definir la potencia del equipo de bombeo que optimice el consumo de energía eléctrica.

Se ha considerado que un equipo de bombeo que se ha reparado más de tres ocasiones es factible de análisis ya que no siempre el problema se encuentra en el equipo de bombeo, lo cual requiere realizar un estudio de todo el sistema en conjunto que comprende pozo, equipo de bombeo, línea de conducción, para lograr una buena eficiencia.

Es importante indicar que los equipos técnicamente son seleccionados para operar en un rango de trabajo en cuanto a carga y gasto se refiere para lo cual fueron diseñados, lo que quiere decir que, si por necesidades del sistema se le exigiera al equipo que operara en condiciones para lo cual no fue seleccionado y así solventar un déficit de servicio en ciertas zonas donde se carece de gasto y carga adecuados, entonces los resultados se reflejarán en el incremento del consumo de energía eléctrica además teniendo como consecuencia que el equipo no reeditará el periodo económico de duración y por lo tanto su costo de mantenimiento será mayor.

- Adecuación del tren de válvulas.

La ventaja que se tiene al realizar estos trabajos conforme a normativas de CONAGUA se refleja en el momento de cumplir con el objetivo de control, operación y medición del gasto bombeado, acciones que son indispensables para mantener una buena administración del agua y la energía eléctrica.

- Análisis del cambio de tarifa eléctrica.

Existen diferentes tarifas de suministro de energía eléctrica en función de los tipos de uso y de los horarios de operación de la infraestructura. Para acceder a las cuotas más bajas que son en las tarifas OM (Ordinaria Media) y HM (Horaria

Media) es necesario someterse a una verificación por parte de SEMIP, pagar una fianza o un depósito de garantía, fijar un periodo de bombeo fuera de horas pico establecidos por CFE, corregir su bajo factor de potencia y controlar su demanda máxima, ya que de no respetarse, entonces el organismo se hará acreedor a sobrecargos importantes. En cuanto a la tarifa 06, la situación es que su costo es más elevado que los dos anteriores y que puede usar durante periodos continuos.

Por esta razón, es necesario realizar un estudio tarifario que permita recomendar si las potencias instaladas en los pozos les permite acceder a estas tarifas de servicio o bien, seguir operando con tarifa 06.

- Corrección del bajo factor de potencia.

Es fundamental que se considere como factor de potencia mínimo el 90%, de acuerdo a lo establecido por la Comisión Federal de Electricidad para evitar sanciones a los organismos encargados de los pozos, lo cual se aplica a las tarifas ya sea OM o HM, la 06 queda exenta de éste cargo.

- Como principal recomendación se propone el cambio de los motores de los equipos que se localizan en los pozos: El Gallinero, Pistache, y Viejo, debido a que presentan una eficiencia menor a lo establecido por las normas; el cambio de los motores estándar (actual), por unos de alta eficiencia.

Sabemos que los motores estándar tienen una eficiencia que varía entre el 80 y 90%, mientras que en los motores de alta eficiencia, varían entre 87 y 96%.

VII. LITERATURA CITADA

Banco Interamericano de Desarrollo (BID). 2011. Evaluación para sistemas de bombeo de agua. Manual de eficiencia energética. 1ª edición. Oficina de Relaciones Externas. Págs., 15-19.

Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.). 2011. Tarifa Ordinaria Media (O-M), con demanda menor de 100 KW. Noviembre de 2011

Comisión Nacional de Agua (CONAGUA). 2009. Manual de incremento de eficiencia física, Hidráulica y energética en sistemas de agua Potable. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México. Págs., 92-100.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2008-2009. Agua subterránea. Disponibilidad del agua subterránea en el País. Disponibilidad por acuífero.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2007. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Guía para la evaluación de la eficiencia en equipos electromecánicos en operación para pozo profundo. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México, D.F.

Diario Oficial de la Federación (DOF). 2000. NOM-001-ENER-2000. Eficiencia energética en bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical. Límites y métodos de prueba. Secretaria de Energía. Págs. 45-48.

Diario Oficial de la Federación (DOF). 1994. NOM-006-ENER-1995. Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y métodos de prueba. Secretaria de Energía. Págs., 4-8.

Diario Oficial de la Federación (DOF). 2003. NOM-010-ENER-2004. Eficiencia energética del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo. Límites y métodos de prueba. Secretaría de Energía. Págs., 11-13.

Diario Oficial de la Federación (DOF). 5 de Diciembre de 2001. Acuerdo por el que se establece y da a conocer al público en general la denominación única de los acuíferos reconocidos en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos, por la Comisión Nacional del Agua, y la homologación de los nombres de los acuíferos que fueron utilizados para la emisión de los títulos de concesión, asignación o permisos otorgados por este órgano desconcentrado. Comisión Nacional del Agua. México, D. F., Págs. 13-15.

Diario Oficial de la Federación (DOF). 10 de Noviembre de 1991. Acuerdo que autoriza el ajuste y reestructuración de las tarifas para suministro y venta de energía eléctrica. Secretaría de Hacienda y Crédito Público. México, D.F., Pág., 23.

Instituto Nacional de Ecología (INE). 2011. Dirección General de Investigaciones de Economía y Política Ambiental. Retos Ambientales por Distrito Electoral.

Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS), Parral, Chihuahua. 2007. Proyecto de eficiencia electromecánica, física y de la operación hidráulica de la red de agua potable de Parral, Chihuahua. Departamento de electrificación y ahorro de energía.

Mendoza. H., J. M. 2009. Escenarios climáticos para Coahuila 2020, 2050 y 2080. Secretaría del Medio Ambiente de Coahuila (SEMAC).

Mendoza. H., J. M. 1983. Diagnostico climático para la zona de influencia inmediata de la UAAAN. U.A.A.A.N. Agrometeorología. Buenavista, Saltillo Coahuila, México, pág., 615.

Ochoa, L. 2005. Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial. CONAGUA. México.

Ortega, S., J. 2006. Cuarto taller nacional “promoviendo un sector público energéticamente eficiente: acciones locales que mueven al país”. Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE). Págs., 17-22.

Schiavo. R. y Gallo M. A. 2011. Recomendaciones para el Ahorro de Energía en Motores Eléctricos. Mr Electromecánica. Págs., 2-4.

Téllez. E. 2011. Programa de Ahorro de energía. Motores de Inducción. Automatización, Productividad y Calidad S.A. de C.V. Págs., 17-24.