

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN ELECTROMECAÁNICA E HIDRÁULICA Y
OBTENCIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS EN POZOS PROFUNDOS**

P O R

MANUEL EDUARDO PÉREZ MARROQUÍN

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN ELECTROMECÁNICA E HIDRÁULICA Y OBTENCIÓN
DE CURVAS CARACTERÍSTICAS EN POZOS PROFUNDOS

P O R

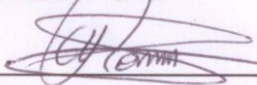
MANUEL EDUARDO PÉREZ MARROQUÍN

TESIS

QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ DE ASESORES, COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

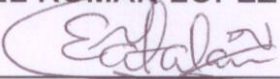
APROBADA POR:

ASESOR PRINCIPAL:



M.C. ABEL ROMÁN LÓPEZ

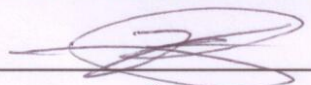
ASESOR PRINCIPAL:



EXTERNO

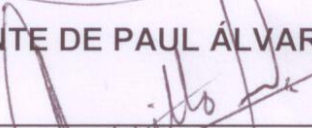
Ph.D. ERNESTO ALONSO CATALÁN VALENCIA

ASESOR:



Ph.D VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA

ASESOR:



M.C. JOSÉ SIMÓN CARRILLO AMAYA

DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS

COORDINADOR DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA. MÉXICO.

DICIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN ELECTROMECÁNICA E HIDRÁULICA Y OBTENCIÓN
DE CURVAS CARACTERÍSTICAS EN POZOS PROFUNDOS

P O R

MANUEL EDUARDO PÉREZ MARROQUÍN

TESIS

QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN AL H. JURADO EXAMINADOR, COMO

REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR:

PRESIDENTE:

M.C. JOSÉ SIMÓN CARRILLO AMAYA

VOCAL:

M.C. ABEL ROMÁN LÓPEZ

VOCAL:

Ph.D. ERNESTO ALONSO CATALÁN VALENCIA

VOCAL:

SUPLENTE

Ph.D. VICENTE DE PAUL ALVAREZ REYNA

DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS

COORDINADOR DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA. MÉXICO.

DICIEMBRE DE 2012

DEDICATORIA

A DIOS

Por brindarme sus dones: sabiduría, inteligencia, consejo, fortaleza, ciencia, piedad y temor. Porque a través de ti he aprendido que los sueños se trazan como un camino a seguir, con esfuerzo y dedicación se logra llegar a la meta ya que con tu guía y misericordia tú hiciste posible todo esto.

Por permitirme alcanzar este logro, que empezara como un sueño y que hoy se hace realidad y darme una gran familia a la que amo.

A MIS PADRES

“Sr. Elodio Pérez Díaz

Y

Sra. Valentina Marroquín Santizo”

Por traerme al mundo, brindarme su amor, cuidado y cariño, enseñarme a enfrentar los problemas que se presentan día a día, apoyarme en el camino de la vida, estar en mis logros, tropiezos sin pedir nada a cambio, darme la oportunidad de ser un profesionalista, que en cada etapa siempre estuvieron cuando más los necesité.

Por los sacrificios que hicieron para ser posible uno de mis grandes sueños, y no importa cuántas veces caemos lo importante son las veces que nos levantamos y siempre hay que mirar hacia adelante. **Gracias los amo y que dios los bendiga** son excelentes padres.

A MIS HERMANOS

Guillermo, Mely, Saúl Pedro, David, Rubí, Blanca Flor, Ember.

Por el cariño, amor apoyo moral y económico que en todo momento me brindaron, y qué sé que siempre estarán conmigo como siempre lo han demostrado gracias los quiero mucho.

A MI NOVIA

Cielo Pérez Morales por estar siempre conmigo durante mi estancia profesional porque es una impulsora de mis emociones para seguir adelante te amo chaparra.

A MIS SOBRINOS

Valentina, Ángeles, Esmeralda, Isabel, Emiliano, Reyli, Jordi, Carlos.

Los quiero mucho por ustedes y para ustedes todo el esfuerzo y tiempo necesario en la realización de este trabajo.

A MIS COMPAÑEROS DE LA CARRERA PROFESIONAL GENERACIÓN (2008-2012)

Omar Moreno Reyes	Juan Luis mayen Giménez
Ulises Cora Carreón	Marco Antonio Omaña Pliego
Néstor García Flores	Joel Cantú Guerrero
Laura Garcilazo Zaragoza	Miguel Ángel Alcántara Delgado
Bernardo Salas Martínez	Adán Adame Gallardo
Eduardo Cruz Mota	Paola Mendoza Reyna
Rafaela Pérez Pérez	Guadalupe García Herrera

Gracias compañeros ya que con ustedes aprendí lo valioso que es compartir, a que siempre se necesita de la ayuda de alguien más, que dios los bendiga siempre en su camino profesional.

A MIS AMIGOS

Juan Luis, Ulises, Miguel Alcántara, Omar, Gabriel, Marco Antonio, Miguel Becerril, Joel, Néstor, Lupe, Hugo, Norberto, Mongis, Amílcar, Calvo, Paulino, Bambucha, Fredy, Labios, Morro, Trak.

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas a quienes debo agradecerle el apoyo incondicional que recibí durante mi estancia en la universidad y en mi formación profesional.

AGRADECIMIENTO ESPECIAL

El presente trabajo de investigación se realizó en su totalidad en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmosfera. (CENID-RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Gómez Palacio, Durango bajo la dirección y asesoría del ***Ph. D. Ernesto Alonso. Catalán Valencia.***

A Mi ALMA MATER

Por brindarme un gran apoyo ya que fue pieza fundamental de mi supervivencia en el periodo de mi formación profesional porque fue mi hogar durante toda mi carrera y qué decir de la formación académica y enseñarme el cuidado de nuestra madre tierra.

A MI ASESOR PRINCIPAL

M.C. Abel Román López, por haber sido mi principal guía para la realización de este proyecto de tesis, por la dedicación, apoyo moral y confianza que me brindo día a día hasta llegar a culminar satisfactoriamente mi trabajo final de mi carrera profesional y sobre todo por fijarse en mí para desarrollarme como ingeniero en el ámbito laboral en el CENID-RASPA.

AL Ph. D. VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA

Por el apoyo tan valioso, dedicación que recibí de él para la realización de este presente trabajo y llegar a una culminación satisfactoria.

AL M.C. JOSÉ SIMÓN CARRILLO AMAYA

Por compartir y brindar sus conocimientos y asesoría para poder realizar este trabajo, y su tiempo y dedicación brindado.

AL M.C. GUILLERMO JESUITA PÉREZ MARROQUÍN

Por apoyarme en todo momento en la realización de este proyecto en el ámbito profesional y un gran hermano a la vez.

A MIS PROFESORES

Por enseñarme a desarrollar habilidades y capacitarme para ser un buen ingeniero agrónomo en irrigación dándome una formación integral de conocimiento y la forma de enfrentarme a la vida profesional en cualquier trabajo gracias por brindarme sus conocimientos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE CUADROS.....	IX
RESUMEN.....	X
I INTRODUCCIÓN	1
II JUSTIFICACIÓN.....	3
III OBJETIVOS	4
IV META.....	4
V HIPÓTESIS	4
VI REVISIÓN DE LITERATURA	5
6.1. Eficiencia electromecánica.....	5
6.1.1. Potencia de entrada.....	5
6.1.2. Potencia de salida	7
6.1.3. Valores mínimos de Eficiencia Electromecánica (η_{em}) para el conjunto motor-bomba.....	11
6.1.4. Curvas de operación del equipamiento.....	12
6.2. Factores generadores de baja Eficiencia Electromecánica	13
6.3. HIDRÁULICA DEL POZO.....	14
6.3.1 Obtención de la ecuación de abatimiento de pozo profundo.....	17
6.3.2. Ecuación de Abatimiento del Pozo	18
6.3.3. Eficiencia Hidráulica.....	20
6.3.4. Determinación de la eficiencia hidráulica.....	21
6.3.5. Eficiencia del sistema de bombeo	22
6.3.6. Perdidas de eficiencia debidas a las características del acuífero	22
6.3.8. Determinación de las curvas características.....	23
6.4. Método del error cuadrático mínimo	25
VII MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
7.1. Área de estudio.....	26

7.2. Localización de pozos evaluados.....	26
7.3. Ensayos de bombeo	27
7.4. Material de campo	27
7.5. Obtención de la Eficiencia electromecánica (η_{em}).....	29
7.6. El procedimiento correspondiente para prueba de bombeo.	29
7.8. Hidráulica de pozos	30
7.9. Ecuación de Kasenow	31
7.10. Ecuación de abatimiento mediante paquete estadístico SAS.....	33
VIII RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
8.1. Obtención de factor de potencia	34
8.2. Calculo de perdidas por fricción en la columna.	35
8.3. Calculo de Área del Flujo Radial	36
8.4. Eficiencia electromecánica de pozos evaluados	38
8.5. Curva característica electromecánica del equipamiento.....	39
8.6. Modelos de abatimiento	41
8.7. Selección del mejor modelo por el método del error cuadrático mínimo.	42
8.8. Curva característica hidráulica de pozos.....	44
8.9. Pozo muestreado contado como referencia metodológica por contar con pozo piloto.....	45
8.10. Análisis de tendencia simple de las ecuaciones de abatimiento obtenidas en SAS.	46
8.11. Eficiencia hidráulica de pozos evaluados	47
IX CONCLUSIÓN	49
X BIBLIOGRAFÍA.	50
XI APENDICE.....	53
11.1. Formato de cálculo de eficiencia electromecánica del pozo 3320 en rehabilitación (bomba con motor sumergible).	53
12.2. Formato de cálculo eficiencia electromecánica pozo 2050 bomba con motor externo.....	54
11.3. Calculo de las variables b y c de la ecuación de kasenow del pozo 3320.	55
11.4. Calculo de las variables b y c obtenidos de regresión polinomial de segundo grado con ordenada al origen realizada en el software SAS.	56
11.5. Fotos de conjunto de pozos muestreados	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bomba de pozo profundo con motor externo donde se pueden observar las variables para evaluar la eficiencia electromecánica del equipamiento e hidráulica del pozo.	15
Figura 2. Motor y bomba sumergible donde se pueden observar las variables para evaluar la eficiencia electromecánica del equipamiento e hidráulica del pozo.	16
Figura 3. Representación gráfica de la eficiencia hidráulica en pozos profundos.	20
Figura 4. Tipos de curvas características de pozos: a) En acuífero sin pérdidas en el pozo; b) En acuífero libre sin pérdidas en el pozo; c) En acuífero con pérdidas no lineales en el pozo; d) Con datos mal tomados debido a ensayo defectuoso o acuífero con cara.	24
Figura 5. Curva característica electromecánica del pozo 363	39
Figura 6. Curva característica electromecánica del pozo 2050	39
Figura 7. Curva característica electromecánica del pozo 3320-operación.....	40
Figura 8. Curva característica electromecánica del pozo 3320-rehabilitación.....	40
Figura 9. Curva característica hidráulica del pozo 2050	44
Figura 10. Curva característica hidráulica del pozo 363.....	44
Figura 11. Curva característica hidráulica del pozo 3320 construcción 2003	45
Figura 12. Curva característica hidráulica del pozo 3320 Operación 2005-2012.....	45
Figura 13. Curva característica hidráulica del pozo 3320 Rehabilitación 2012 a la fecha.....	45
Figura 14. Curva comparativa de simple tendencia pozo 3320 2012.	46
Figura 15. Curva comparativa de simple tendencia pozo 2050.....	46
Figura 16. Materiales y equipo de trabajo pozo 3320.....	57
Figura 17. Equipo de trabajo y materiales utilizados en la evaluación del pozo 2050.....	58

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Pérdidas por fricción en la columna. Pérdidas de carga por fricción en la columna de bombas tipo turbina con motor externo eléctrico vertical. En metros por cada 100 metros o en pie por cada 100 pies. Para gastos de 3,15 a 47,31 lps (50 a 750)	8
Cuadro 2. Pérdidas de carga por fricción en la columna de bombas tipo turbina con motor externo eléctrico vertical.	9
Cuadro 3. Pérdidas de carga por fricción en la columna en metros por cada 100 m.....	10
Cuadro 4. Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo con motor externo para pozo profundo en operación. (Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-006-ENER-1995).....	11
Cuadro 5. Valores de referencia para la eficiencia de la bomba y Valores de referencia para la eficiencia del motor sumergible (Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-010-ENER-2004)	11
Cuadro 6. Indica Valores del coeficiente (C) de pérdidas de carga hidráulica de pozos profundos Según Chávez 2006, Adaptados de Custodio (1976) y Kasenow (2001).....	19
Cuadro 7. Causas de ineficiencias de los pozos de agua. Fuente: CNA 1994.....	23
Cuadro 8. Diámetros interiores de tubos usados como columna de bombas relacionados al diámetro nominal.	37
Cuadro 9. Diámetros exteriores de tubos usados como funda o cubierta de flechas de bombas relacionados al diámetro nominal.	37
Cuadro 10. Factor de uso para tuberías de columnas de bombeo (Fe)	37
Cuadro 11. Modelos de abatimiento a nivel de bombeo	41
Cuadro 12. Selección del Mejor modelo pozo 363.....	42
Cuadro 13. Selección del mejor modelo pozo 2050.....	42
Cuadro 14. Construcción pozo 3320.....	42
Cuadro 15. Operación pozo 3320.....	43
Cuadro 16. Rehabilitación del pozo 3320.....	43

RESUMEN

La curva característica electromecánica es una relación entre los caudales de extracción con su energía eléctrica requerida, su carga hidráulica necesaria (carga total dinámica, CTD) y su eficiencia global integrando al motor y bomba del pozo (eficiencia electromecánica). Por otro lado, la curva característica hidráulica del pozo relaciona a los caudales extraídos con el descenso del nivel de bombeo en el pozo (abatimiento) y un índice de eficiencia de la productividad del pozo que es la relación del caudal extraído y abatimiento (gasto específico). El conocimiento de las curvas características electromecánica e hidráulica de los pozos profundos constituye una herramienta ideal para la planeación y estimación de la estabilidad del acuífero donde se realiza la extracción del agua. Además se pueden tomar decisiones adecuadas para la rehabilitación o reposición del equipamiento electromecánico o el pozo. Con el objetivo de mostrar y aplicar la metodología para la obtención de dichas curvas, mediante estudios de campo consistentes un ensayo de bombeo en un pozo con pruebas a diferentes caudales, su correspondiente energía eléctrica requerida, su carga hidráulica necesaria y su abatimiento del nivel piezométrico del pozo. Para la obtención de la curva característica hidráulica del pozo los datos de campo fueron ajustados en forma satisfactoria al modelo propuesto por la Polinomial de segundo grado y la curva característica electromecánica fue obtenida mediante representación gráfica de la información obtenida de los ensayos realizados. Los pozos en estudio se ubican en el acuífero principal de la región lagunera obteniendo eficiencias que se encuentran por debajo de las mínimas recomendadas por la norma oficial mexicana, con una (E_{em}) de 36%).

Palabras clave: Ecuación de abatimiento del acuífero, Curva características electromecánica e hidráulica.

I INTRODUCCIÓN

El bombeo del agua Subterránea necesaria para el riego de los cultivos se efectúa con un conjunto de bomba centrífuga vertical en serie o denominada “de turbina” ya sea accionada con motor interno (sumergible) o externo. El abatimiento de los niveles piezométrico de bombeo del 51 % de los acuíferos del país está en continuo aumento: 104 de los 202 acuíferos activos se encuentran sobreexplotados. Se estima la existencia de 653 acuíferos en la nación (CNA, 2005): En La Comarca Lagunera (Coahuila y Durango) de los ocho acuíferos detectados, tres se encuentran sobreexplotados, en los dos más importantes, se extrae el 80 por ciento del agua utilizada (Cruz y Levine, 1998). Estudios realizados en los sistemas de bombeo de los referidos acuíferos, desde los años 90's han reportado eficiencias electromecánicas de los equipos de bombeo del 30 al 40 %, significativamente inferiores a los valores mínimos recomendados por las Normas Oficiales Mexicanas (Román, 2000; CFE, 1997; Chávez, 2006). Estudio reciente encontró que la eficiencia electromecánica, aumentó de un valor promedio del 51% de un total de 58 equipos de bombeo evaluados (Delgado et, al., 2012). Esto se debe al abatimiento que sufren año con año los niveles piezométrico de bombeo, a causa de la sobre explotación que se realiza en dicho acuífero. Adicionalmente al problema del abatimiento referido, se tiene el mal funcionamiento de la infraestructura de bombeo instalada, se estima que alrededor de un 80 %, requiere rehabilitación y 20 % del equipo restante, su reposición (Román. 2000). Lo anterior pone de manifiesto la importancia de incluir en los estudios de los pozos profundos, la evaluación integral de eficiencia electromecánica e hidráulica y caracterizarla en curvas características como una práctica común y necesaria principalmente en acuíferos sobre

explotados. El conocimiento de las curvas características electromecánica e hidráulica de los pozos profundos constituye una herramienta ideal para la planeación de diversos puntos de bombeo o escenarios con la mejor eficiencia electromecánica e hidráulica del pozo profundo y la estimación de la estabilidad del acuífero donde se realiza la extracción del agua. Además se pueden tomar decisiones estratégicas adecuadas para la rehabilitación o reposición del equipamiento electromecánico o el pozo.

II JUSTIFICACIÓN

Durante más de cuatro décadas, la eficiencia electromecánica en los pozos profundos de las zonas de riego por bombeo, en acuíferos sobreexplotados no ha superado su valor, a los niveles mínimos requeridos por las normas oficiales mexicanas. Problema que se estima es una de las causas principales de la baja eficiencia electromecánica por los abatimientos de los niveles de bombeo (, desde hace mucho se ha venido incrementando año con año en consecuencia estudios realizado desde los 90's s reportan eficiencias electromecánicas entre 30% y 40% (CFE 1997, Román, 2000). Estudio reciente encontró que la eficiencia electromecánica, aumento de un valor promedio del 51% de un total de 58 equipos de bombeo evaluados (Delgado et, al., 2012). Algunos esfuerzos han sido realizados para diagnosticar y mejorar el desempeño de los equipos (Peña y Arreguín, 1989; García, 1997).Las Normas Oficiales Mexicanas, NOM-006-ENER-1995 y NOM-010-ENER-2004, determinan los valores mínimos requeridos de estas eficiencias para bombas con motor externo y sumergible respectivamente. Sin embargo, además de la eficiencia electromecánica, debe cuantificarse a la par la eficiencia hidráulica del pozo, variable que indica la facilidad con que el caudal de agua requerido por la bomba fluye del medio poroso al pozo a través del forro del mismo (ademe y filtro). Las eficiencias de extracción mencionadas deben determinarse, y analizarse a través de curvas características que constituyen una herramienta ideal para la planeación de los costos de la operación y estimación de la estabilidad del acuífero donde se realiza la extracción del agua. Además se pueden tomar decisiones adecuadas para la rehabilitación o reposición del equipamiento electromecánico o el pozo.

III OBJETIVOS

Desarrollar y sistematizar una metodología para la evaluación, diagnóstico y mejoramiento integral que permita una determinación de las eficiencias electromecánica e hidráulica que pronostique condiciones operativas de las instalaciones tanto del equipamiento como de las características constructivas del pozo.

IV META

Integrar una metodología para determinar la eficiencia electromecánica e hidráulica y diagnosticar las acciones a realizar para corregir tanto el equipamiento como al pozo profundo.

V HIPÓTESIS

La metodología propuesta es práctica, sencilla y adecuada para la evaluación y diagnóstico de pozos profundos y permite deducir las acciones requeridas para el mejoramiento de operación y rehabilitación del equipamiento electromecánico e hidráulico del pozo profundo.

VI REVISIÓN DE LITERATURA

6.1. Eficiencia electromecánica

La eficiencia electromecánica se define como la proporción de la potencia de salida de la bomba entre la potencia suministrada a la entrada del motor de la bomba, se expresa en porcentaje. Según la Norma Oficial Mexicana NOM-006-ENER-1995. Se presenta en la ecuación 1.

$$\eta_{em} = \frac{p_s}{p_e} \times 100$$

(1)

Donde:

η_{em} = Eficiencia electromecánica (%)

p_s = potencia de salida de la bomba (kw)

p_e = potencia de entrada del motor (kw)

6.1.1. Potencia de entrada

La potencia de entrada al motor (P_e) es la potencia en kw, que requiere el motor eléctrico acoplado a la bomba. Para motores trifásicos la cual se define como sigue:

$$P_e = \sqrt{3} V I F_p \quad (2)$$

Donde:

P_e = potencia de entrada del motor en (kw)

V = tensión eléctrica (volt)

I = corriente eléctrica (amper)

F_p o $\cos \Phi$ = Factor de potencia (adimensional)

En su determinación, se hace uso de expresiones que requieren de la medición en campo de la tensión (V) e intensidad (I) mediante un Multímetro y la inferencia del factor de potencia (PF) del motor, se puede obtener de su placa. Otra forma es por medio del Watthorimetro que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) instala. Ambos métodos de estimación son ampliamente explicados por Herrera et al., (1998).

Existen varios instrumentos eléctricos de medición, uno de ellos conocido como “Medidor de potencia TRMS usado en la obtención de estos parámetros en tiempo real (Chávez, 2006). Otros es el potenciómetro que proporciona datos como, V, I, P_e en Kw, Potencia aparente (Kva.), Potencia reactiva (Kvar), factor de potencia (PF) y la frecuencia eléctrica (Hz). El parámetro (PF) que también es abreviado como (FP) por varios autores, es importante para verificar si el motor eléctrico está funcionando conforme al valor mínimo recomendado por la CFE que es 0.9. Si está demasiado bajo, puede ser motivo de una sanción, si un motor trabaja a menos de su capacidad él (FP) disminuye y consecuentemente provoca un baja eficiencia electromecánica. Una relación entre ambos es proporcionada de manera grafica por Montes (s/f), y se resume en la ecuación potencial (3) obtenida con el análisis de regresión por (Chávez., 2006).

$$FP = 0.9127 (FCM)^{0.3612} \quad R^2 = 0.9127 \quad (3)$$

Donde; (FCM) es la fracción de carga del motor, haciendo uso de la ecuación (3), se estima que para conservar el (FP) mínimo recomendado de 0.9, se requiere que el motor funcione a un 96 por ciento de su carga. Por otro lado, cuando trabaja al 50 por ciento de su capacidad, se tendrá un factor de potencia de 71 por ciento, en algunos casos para atenuar

el bajo (FP) su corrección es instalar capacitores en el transformador para evitar que el desfasamiento de la corriente alterna pueda causar daños a las subestaciones de la CFE pero esto no mejora o corrige el problema de baja eficiencia electromecánica.

Con las mediciones del dispositivo indicado, se puede verificar el factor de potencia dividiendo la potencia activa en (Kw) entre la potencia aparente (Kva) que es lo que procesa internamente dicho aparato según su manual, así mismo la potencia aparente indica si la capacidad del transformador es la adecuada, al respecto la conversión de 1.0731 hp = 1 Kva, debe observarse o bien considerar lo mencionado por Montes (s/f) de que para fines prácticos se considera que un hp es igual a un Kva.

6.1.2. Potencia de salida

La potencia de salida de la bomba (P_s) es la potencia en kilowatts, transferida al agua por la bomba, medida lo más cerca posible del cabezal de descarga. Como se expresa matemáticamente:

$$P_s = \frac{Q \times CTD}{102} \quad (4)$$

Donde:

Q = Caudal (LPS),

CTD = Carga Total Dinámica = nivel dinámico de bombeo + pérdidas de carga por fricción en las tuberías + perdidas de carga en las conexiones de tuberías desde la entrada del agua en el sub-suelo hasta la salida. Para la estimación de las pérdidas en la columna de bombeo en equipamientos con motor externo se recurre al Cuadro 1.

Cuadro 1. Pérdidas por fricción en la columna. Pérdidas de carga por fricción en la columna de bombas tipo turbina con motor externo eléctrico vertical. En metros por cada 100 metros o en pie por cada 100 pies. Para gastos de 3,15 a 47,31 lps (50 a 750)

Diámetro de columna		4"		6"				8"				10"	
Diámetro de flecha (pulgada)		1	1 ¼	1	1 ¼	1 11/16	1 15/16	1	1 1/4	1 11/16	1 15/16	2 3/16	2 11/16
gpm	l/s												
50	3,15	0,90	1,60										
60	3,78	1,20	2,20										
70	4,42	1,50	2,90										
80	5,05	1,90	3,60										
90	5,68	2,40	4,40										
100	6,31	2,80	5,30										
125	7,89	4,20	7,70				0,90						
150	9,46	5,70	10,50			0,90	1,30						
175	11,04	7,50	13,50			1,10	1,70						
200	12,62	9,50			1,00	1,40	2,20						
225	14,19	11,50		0,90	1,20	1,70	2,70						
250	15,77	14,00		1,10	1,40	2,00	3,30						
275	17,35			1,30	1,70	2,40	3,90						
300	18,92			1,50	2,00	2,80	4,50						
325	20,50			1,70	2,30	3,20	5,20						
350	22,08			2,00	2,60	3,60	6,00						
375	23,66			2,20	2,90	4,10	6,70				0,90	1,30	
400	25,23			2,50	3,30	4,60	7,50				1,00	1,50	
450	28,39			3,10	4,10	5,70	9,30				1,20	1,80	
500	31,54			3,70	4,90	6,90	11,50		0,90	0,90	1,50	2,20	
550	34,69			4,40	5,80	8,10			1,10	1,30	1,80	2,60	
600	37,85			5,20	6,80	9,50		1,00	1,30	1,50	2,10	3,00	
650	41,00			6,00	7,80	11,00		1,20	1,50	1,80	2,40	3,50	
700	44,16			6,80	9,00			1,40	1,70	2,00	2,80	4,10	1,00
750	47,31			7,70	10,10			1,70	1,90	2,30	3,20	4,60	1,10

Cuadro 2. Pérdidas de carga por fricción en la columna de bombas tipo turbina con motor externo eléctrico vertical.

Columna		6"					8"					10"					12"				
Flecha (pulgada)		1	1	1 ¼	1 1/2 1 11/16	1 15/16	2 3/16 2 7/16	1	1 1/4	1 1/2 1 11/16	1 15/16	2 3/16 2 7/16	2 11/16	1 1 1/4	1 1/2 1 11/16	1 15/16	2 3/16 2 7/16	2 11/16			
gpm	l/s																				
800	50,46	8,60	2,00	2,20	2,60	3,60	5,20														
900	56,77	10,70	2,50	2,70	3,20	4,50	6,40														
1000	63,08		3,00	3,20	3,90	5,40	7,80			1,00	1,00	1,20	1,40	1,90							
1100	69,39		3,50	3,80	4,60	6,40	9,40			1,20	1,40	1,70	2,20								
1200	75,70		4,20	4,50	5,40	7,50		1,10	1,20	1,40	1,60	2,00	2,60								
1300	82,00		4,80	5,20	6,20	8,80		1,20	1,40	1,60	1,90	2,30	3,00								
1400	88,31		5,50	6,00	7,20	10,00		1,40	1,60	1,80	2,20	2,70	3,50								
1500	94,62		6,20	6,80				1,60	1,80	2,00	2,50	3,00	3,90			0,90	1,10	1,30			
1600	100,93		6,90	7,60				1,80	2,00	2,30	2,80	3,40	4,50		0,90	1,00	1,20	1,40			
1800	113,54		8,60	9,40				2,20	2,50	2,80	3,40	4,30	5,50	1,00	1,10	1,30	1,50	1,80			
2000	126,16		10,50	11,40				2,70	3,00	3,50	4,20	5,20	6,70	1,20	1,40	1,60	1,80	2,10			
2200	138,78							3,20	3,60	4,10	5,00	6,10	7,90	1,40	1,60	1,90	2,10	2,50			
2400	151,39							3,70	4,20	4,80	5,80	7,20	9,30	1,70	1,90	2,20	2,50	3,00			
2600	164,01							4,30	4,90	5,60	6,80	8,20		1,90	2,20	2,50	2,90	3,50			
2800	176,62							5,00	5,60	6,40	7,80	9,40		2,20	2,50	2,90	3,30	4,00			
3000	189,24							5,60	6,40	7,20	8,90			2,50	2,90	3,30	3,80	4,50			
3200	201,86							6,30	7,10	8,20	10,00			2,80	3,20	3,70	4,30	5,10			
3400	214,47							7,00	8,00	9,10				3,10	3,60	4,10	4,80	5,70			
3600	227,09							7,80	8,90					3,50	4,00	4,60	5,40	6,40			
3800	239,70							8,70	9,80					3,90	4,40	5,10	5,90	7,10			
4000	252,32							9,60						4,20	4,80	5,60	6,50	7,80			
4250	268,09													4,80	5,30	6,30	7,20	8,80			
4500	283,86													5,30	6,00	7,00	8,00	9,90			
4750	299,63													5,80	6,60	7,80	8,80				
5000	315,40													6,40	7,30	8,50	9,70				

Cuadro 3. Pérdidas de carga por fricción en la columna en metros por cada 100 m

Diam. Columna	2 1/2	3	4				6				8				10				12			
Diam Cubierta		1 1/4	1 1/4	1 1/2	2 1/2	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	2	2 1/2	3	3 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	
Diam. Flecha	3/4	3/4	3/4	1	1 3/16	3/4	1	1 3/16	1 11/16	1	1 3/16	1 11/16	1 15/16	1 3/16	1 11/16	1 15/16	2 3/16	1 3/16	1 11/16	1 11/16	2 3/16	
Gasto		PERDIDAS DE CARGA EN PIES POR CADA 100 PIES O MTS. POR CADA 100 MTS. DE COLUMNA																				
Lps.	Gpm.																					
0.63	10	1.2																				
0.94	15	2.0																				
1.26	20	2.8	1.0																			
1.57	25	3.5	1.4																			
1.9	30	4.2	1.9																			
2.52	40	5.4	3.1		0.6	1.2																
3.15	50	6.6	4.5	0.7	0.9	1.7																
3.78	60	9.0	6.1	0.9	1.2	2.3																
4.4	70		8.5	1.2	1.8	2.9																
5.05	80		9.9	1.5	1.9	3.7																
5.68	90		12.0	1.8	2.4	4.4																
6.3	100		14.0	2.2	2.8																	
7.9	125			3.2	4.2	7.8																
9.4	150			4.4	5.8																	
11	175			5.8	7.5																	
12.6	200			7.3			0.7	1.0	1.4													
14.1	225						0.7	0.9	1.2	1.7												
15.7	250						0.8	1.1	1.4	2.0												
17.3	275						1.0	1.3	1.7	2.4												
18.9	300						1.2	1.5	2.0	2.8												
20.4	325						1.4	1.7	2.3	3.2												
22.0	350						1.6	2	2.6	3.6												
23.6	375						1.8	2.2	2.9	4.1												
25.2	400						2.0	2.5	3.3	4.6	0.6	0.7	1									
28.3	450						2.5	3.1	4.1	5.7	0.8	0.9	1.3									
31.5	500						3.0	3.7	5.0	6.9	0.9	1.1	1.5									
34.6	550						3.6	4.4	5.8		0.6	1.1	1.3	1.8								
37.8	600						4.2	5.2	6.8		0.8	1.3	1.5	2.1								
40.9	650						4.8	6.0			0.9	1.5	1.8	2.5								
44.1	700						5.5				1.0	1.7	2	2.8								
47.2	750						6.2				1.1	1.9	2.3	3.2								
50.4	800										1.3	2.2	2.6	3.6	0.6	0.7	0.8	1.0				
53.5	850										1.4	2.4	2.9	4	0.6	0.7	0.9	1.1				
56.7	900										1.6	2.7	3.2	4.5	0.7	0.8	1.0	1.2				
59.9	950										1.8	2.9	3.5	4.9	0.8	0.9	1.1	1.3				
63.0	1000										1.9	3.2	3.9	5.4	0.9	1.0	1.2	1.4	0.34	0.38	0.44	0.5
75.6	1200										2.6	4.5	5.4	7.6	1.2	1.4	1.6	2.0	0.47	0.54	0.62	0.71
88.2	1400										3.5	6.0	7.2	10	1.6	1.8	2.2	2.7	0.62	0.71	0.82	0.94
100.8	1600										4.5	7.6	9.1		2	2.3	2.8	3.4	0.8	0.9	1.1	1.2
113.4	1800										5.5	9.4	11		2.5	2.8	3.4	4.3	0.99	1.1	1.3	1.5
126.0	2000										6.7				3	3.5	4.2	5.2	1.2	1.4	1.6	1.8
138.6	2200										7.9				3.6	4.1	5.0	6.1	1.4	1.6	1.9	2.1
151.2	2400														4.2	4.9	5.8	7.2	1.7	1.9	2.2	2.5
163.8	2600														4.9	5.6	6.8	8.2	1.9	2.2	2.5	2.9
176.4	2800														5.6	6.4	7.8	9.6	2.2	2.5	2.8	3.3
189	3000														6.4	7.4	8.8	10.0	2.5	2.9	3.3	3.8
201.6	3200																		2.8	3.2	3.7	4.3
214.2	3400																		3.2	3.6	4.2	4.8
226.8	3600																		3.5	4	4.7	5.3
239.4	3800																		3.9	4.4	5.1	5.9
252.0	4000																		4.3	4.9	5.6	6.4
264.6	4200																		4.7	5.3	6.2	7.1
277.2	4400																		5.1	5.8	6.7	7.7
289.8	4600																		5.6	6.3	7.4	8.4
302.4	4800																		6.0	6.8	7.9	9

6.1.3. Valores mínimos de Eficiencia Electromecánica (η_{em}) para el conjunto motor-bomba.

Todo conjunto motor-bomba de este tipo, debe cumplir al menos con el valor mínimo de eficiencia global que se obtenga como producto de la multiplicación de la eficiencia de la bomba por la eficiencia del motor que tenga acoplado. Estos valores están indicados en los

Cuadro 4 y Cuadro 5.

Cuadro 4. Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo con motor externo para pozo profundo en operación. (Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-006-ENER-1995).

Intervalos 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

Cuadro 5. Valores de referencia para la eficiencia de la bomba y Valores de referencia para la eficiencia del motor sumergible (Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-010-ENER-2004)

Q (l/s)	η_B (%)		Hp	η_m (%)		Eem
Hasta	2	48	Hasta	2	68	32.64
> 2	5	61	> 2	3	72	43.92
> 5	15	71	> 3	5	73	51.83
> 15	25	72	> 5	7.5	75	54.00
> 25	30	74	> 7.5	10	77	56.98
> 30	60	77	> 10	15	79	60.83
> 60		78	> 15	20	80	62.40
> 60		78	> 20	30	81	63.18
> 60		78	> 30	40	83	64.74
> 60		78	> 40	60	86	67.08
> 60		78	> 60		87	67.86

En el Cuadro 5 se presentan los valores de eficiencia electromecánica (η_{em}) de las bombas sumergibles, es el producto de la eficiencia del cuerpo de tazones o bomba sumergible (η_B) por la eficiencia del motor eléctrico (η_m), estas a su vez, están definidas por el rango o nivel de caudal (Q) y potencia eléctrica del Motor (Pot m) requeridas para dicho suministro de gasto.

Durante el funcionamiento normal de una bomba hay desgastes de sus componentes móviles, por lo que la eficiencia disminuye a través de su tiempo de operación, (Peña y Arrequín 1989). En condiciones anormales, tales como producción de arena en los pozos durante su funcionamiento o problemas de verticalidad en los mismos, por mencionar los más frecuentes, el desgaste de los impulsores ocurre en menos tiempo, lo que provoca que la eficiencia de la bomba disminuya con rapidez.

6.1.4. Curvas de operación del equipamiento

A un equipo electromecánico se le puede diagnosticar su funcionamiento mediante la obtención de las “curvas de operación” del equipo, (Herrera P. J. C. 1998). Esta evaluación consiste en obtener las curvas de operación gasto-carga y gasto-eficiencia. Ya que la mayoría de los fabricantes de bombas caracterizan sus equipos, mediante la obtención en laboratorio de las curvas características de cada impulsor. Sin embargo, con el paso del tiempo el impulsor sufre desgaste, por lo que estas curvas dejan de ser confiables para predecir el comportamiento de la bomba. Por otra parte, el equipo electromecánico en el caso de las bombas centrífugas verticales está integrado por la columna de succión y el motor eléctrico; mientras que las “curvas características” del fabricante corresponden únicamente al impulsor.

6.2. Factores generadores de baja Eficiencia Electromecánica

Las causas a las que se atribuyen las bajas eficiencias del Sistema con las que operan en general el aprovechamiento del acuífero se atribuyen a:

- Abatimiento del Nivel Dinámico.
- Selección del equipo de bombeo (eficiencia de los impulsores y número adecuado de tazonos).
- Selección de la potencia del motor.
- Mantenimiento preventivo a bombas y motores.
- Calidad de la información.

Asimismo, uno de los parámetros más importantes, que condiciona las eficiencias electromecánicas de los equipos, es el gasto o caudal de operación. En muchos casos, las eficiencias de los equipos se ven determinadas por los bajos gastos de producción. Se justifica un bajo rendimiento en los equipos, si tomamos en cuenta que los acuíferos sufren abatimientos y que esto conlleva a que las cámaras de bombeo se reduzcan paulatinamente, provocando con esto bajos caudales de extracción. Además, el bajo rendimiento de los aprovechamientos puede estar relacionado a la falta de mantenimiento de los equipos, ya que al paso del tiempo, se van generando irregularidades, tales como: incrustaciones en la tubería ranurada, que obstruye la circulación libre del acuífero, reduciendo consecuentemente los gastos de extracción.

6.3. HIDRÁULICA DEL POZO

Otro parámetro que se debe evaluar a la par es la Eficiencia Hidráulica del pozo (η_{hp}), variable que indica la facilidad con que el flujo de agua requerido por la bomba turbina, pasa del medio poroso al pozo y a través del forro del mismo (ademe y filtro), la calidad del medio poroso del ademe es diagnosticada por la ecuación de abatimiento del nivel de bombeo del pozo, básica para determinar la (η_{hp}). Ambos parámetros deben evaluarse en la recepción de la construcción del pozo e instalación del equipamiento y mediante la operación ambos parámetros deben supervisarse periódicamente.

Posterior a todo lo anterior, es necesario obtener la curva característica del pozo la cual infiere el probable tipo de acuífero así como condiciones estables y probable incremento de extracción de agua bajo dichas condiciones.

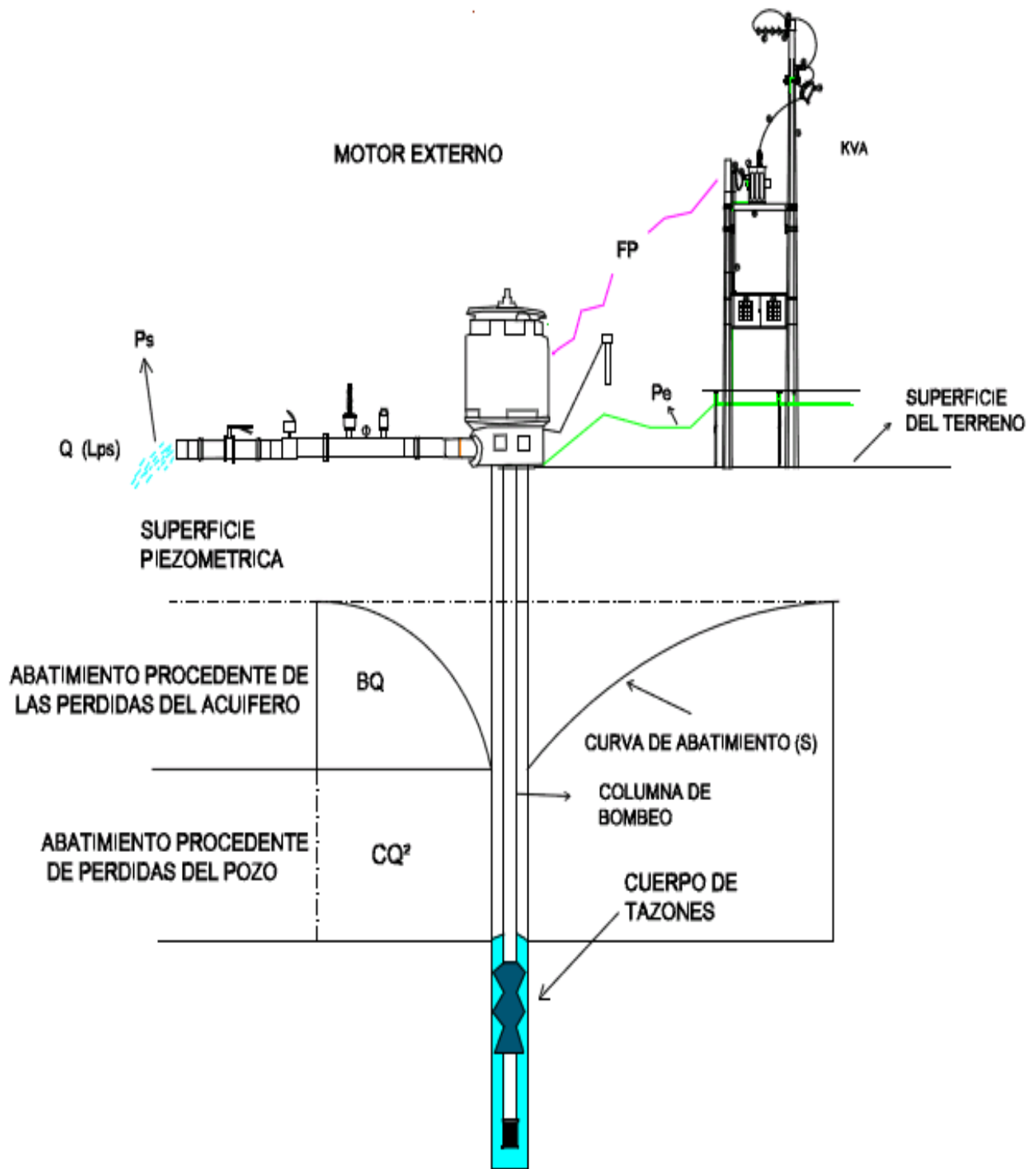


Figura 1. Bomba de pozo profundo con motor externo donde se pueden observar las variables para evaluar la eficiencia electromecánica del equipamiento e hidráulica del pozo.

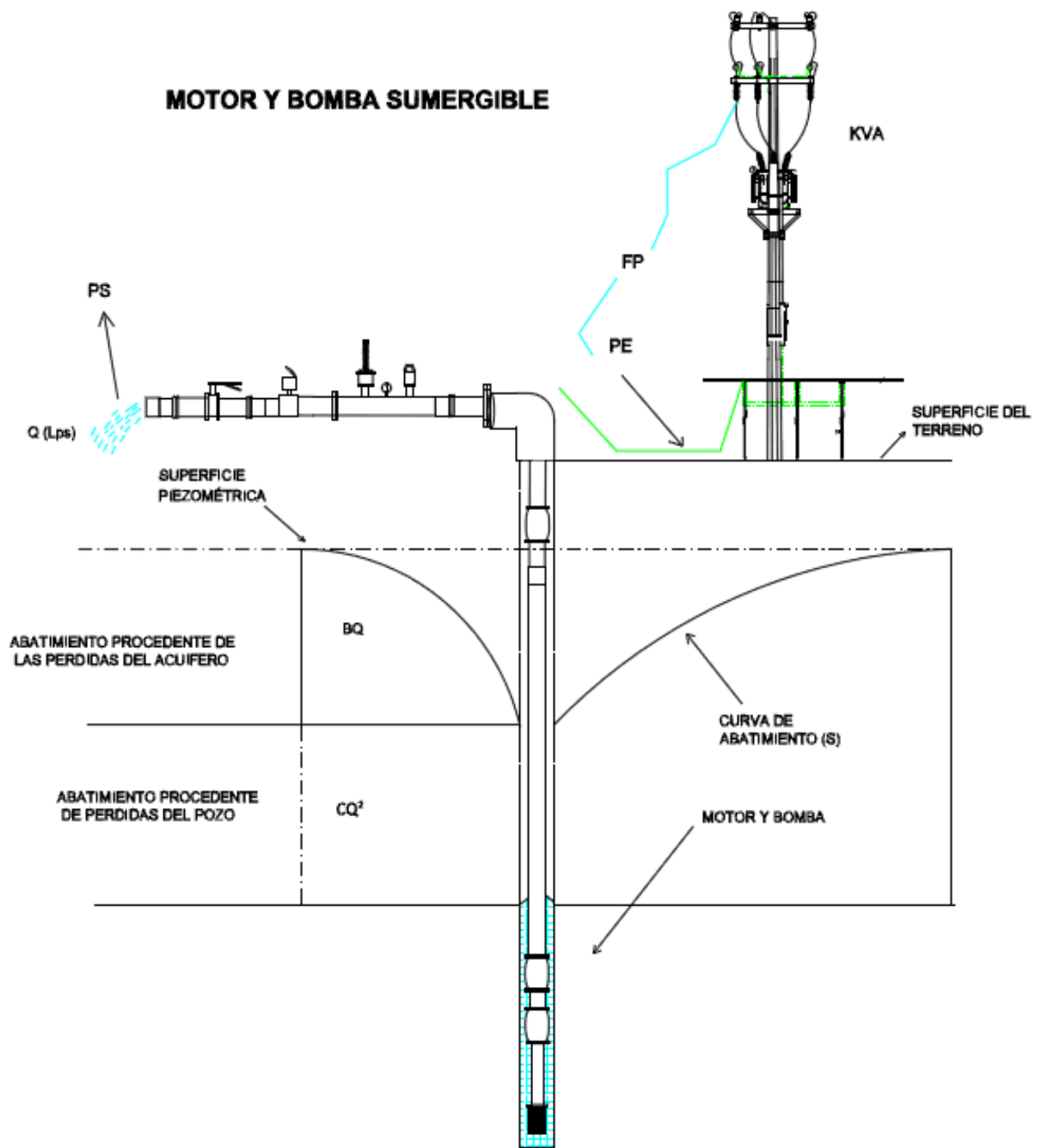


Figura 2. Motor y bomba sumergible donde se pueden observar las variables para evaluar la eficiencia electromecánica del equipamiento e hidráulica del pozo.

6.3.1 Obtención de la ecuación de abatimiento de pozo profundo

En la actualidad existen programas para la obtención de la ecuación de abatimiento de pozo profundo como el programa Basic de Helweg dado por Helweg en 1992 y el Programa de algoritmos genéticos de Indu creado por Madan y Manoj en 2004.

Chávez en 2004 usando las metodologías para la evaluación de eficiencias electromecánicas e hidráulica realizó unas adecuaciones empíricas obteniendo una compatibilidad con el modelo $s = BQ + CQ^n$ de Helweg e Indu.

Román et al. 2011, para la obtención de la ecuación de abatimiento empleo metodologías empíricas propuestas por Kasenow, Jacob-Kasenow y Bierschenk; además mediante el análisis de regresión se ajustó a modelos polinomiales de segundo grado ($n = 2$, Jacob) y modelos no lineales (n , Rorabaugh) utilizando el programa estadístico SAS (2001). Estos modelos tienen la ventaja adicional con respecto a los anteriores, de conocer el grado de ajuste de la ecuación de abatimiento del pozo, mediante la significancia de los coeficientes de regresión, el coeficiente de determinación, así como el coeficiente de variación.

Con relación a la curva característica del pozo unas conclusiones de su construcción muestran que los modelos de Bierschenk y las ecuaciones polinomiales, obtenidas directamente por regresión lineal y no lineal, tuvieron los mayores coeficientes de determinación por lo que pueden considerarse como las mejores (Román et al., 2006).

En consideración de toda la gama posible de ecuaciones de abatimiento presentadas, en el análisis se obtiene que los modelos que se adecuan a todo lo presentado al respecto

son: el modelo polinomial de segundo grado y la de kasenow siendo los más confiables para continuar con la construcción de la curva características del pozo, así como con la obtención de la eficiencia hidráulica, condiciones constructivas y prevalecientes del pozo profundo (Román et al., 2011).

6.3.2. Ecuación de Abatimiento del Pozo

La aplicación de una metodología muy práctica, propuesta por Rorabaugh desde 1953 citada por Custodio y Llamas (1976), ha sido empleada también por Helweg (1992), y Kasenow (2001) y señalada por Peña y Arreguín (1989), para el diagnóstico del abatimiento de los niveles de bombeo en pozos (Ecuación 6). A partir de esta expresión la eficiencia hidráulica mostrada en la ecuación (7), (Custodio 1976) puede emplearse. A continuación se expone la expresión de abatimientos por Rorabaugh:

$$S_t = BQ + CQ^n \quad (5)$$

Donde:

S_t = Abatimiento teórico total en el pozo (m),

BQ = Abatimiento teórico del acuífero (m),

CQ^n = Abatimiento del pozo (m).

B = Coeficiente de pérdidas en el acuífero (m LPS-1),

C = Coeficiente de pérdidas en el pozo (m LPS-2),

n = Indica el régimen de flujo en la obra de toma o pozo profundo (adimensional),

Q = Caudal extraído (LPS).

El valor B, es el coeficiente de pérdidas de circulación en el acuífero y sus pérdidas son proporcionales al caudal extraído. Con el parámetro C es posible detectar problemas como falta de desarrollo al pozo, incrustaciones en el ademe, etc., las cuales indican qué tipo de acciones hay que realizar para mejorar el pozo y disminuir las pérdidas de flujo en el pozo. El parámetro (n) nos indica el régimen de flujo en el medio poroso en contacto con el pozo, en el momento en que existe el cambio de régimen laminar a turbulento por la obra de captación perforada. Los coeficientes B y C se obtienen de diversas maneras; por resolución grafica de S/Q en función de Q, con Q en (m³dia⁻¹) y S en (m). En un diagrama de dispersión de datos se traza una recta que pase por esos puntos y la pendiente nos da el valor de C y la ordenada en el origen es B (Custodio 1976). Investigadores tales como Jacob, Kasenow y Bierschenk han encontrado soluciones para estos parámetros, este último con uso de análisis de regresión lineal. Estos cuatro métodos asumen que $n = 2$ y son explicados por Kasenow (2001). Por otro lado Helweg (1992) presenta un algoritmo en Basic para determinar los parámetros B, C, n. En el cuadro 7 se presentan los valores del coeficiente (C) de pérdidas de carga hidráulica de pozos profundos Según Chávez 2006, adaptados de Custodio (1976) y Kasenow (2001).

Cuadro 6. Indica Valores del coeficiente (C) de pérdidas de carga hidráulica de pozos profundos Según Chávez 2006, Adaptados de Custodio (1976) y Kasenow (2001).

C (m LPS-2)	Condiciones constructivas del pozo
<1.87E-03	Pozo bien construido y bien desarrollado
1.87E-03 a 0.03732	Principios de Incrustaciones en rejillas. Pozo con incrustaciones o taponamientos en las rejillas, requiere
0.03732 a 0.149299	Rehabilitación.
>0.149299	Incrustaciones fuertes, pozos de difícil o imposible rehabilitación.

6.3.3. Eficiencia Hidráulica

La eficiencia hidráulica en un pozo profundo, está dada por la relación del descenso del nivel freático en la cara exterior de la rejilla de captación o filtro de grava entre el descenso de dicho nivel en la cara interior de la rejilla de captación o dentro del ademe ranurado. En la Figura 3A, se indica la existencia de la pérdida de carga hidráulica del pozo como la del acuífero y su estimación es realizada por la ecuación de abatimiento, en este caso, la eficiencia hidráulica del pozo es cuantificada por la expresión 6 en la que la ecuación de abatimiento es fundamental para su estimación, para el siguiente caso presentado en la Figura 3B, se observa que BQ es negativo lo que indica que ahí hay pérdida de carga hidráulica exclusivamente en el pozo profundo y en la Figura 3C, se aprecia que la pérdida es inapreciable en el pozo profundo; para ambos casos (Figs. B,C) la cuantificación de la eficiencia hidráulica es mediante las expresiones 7.

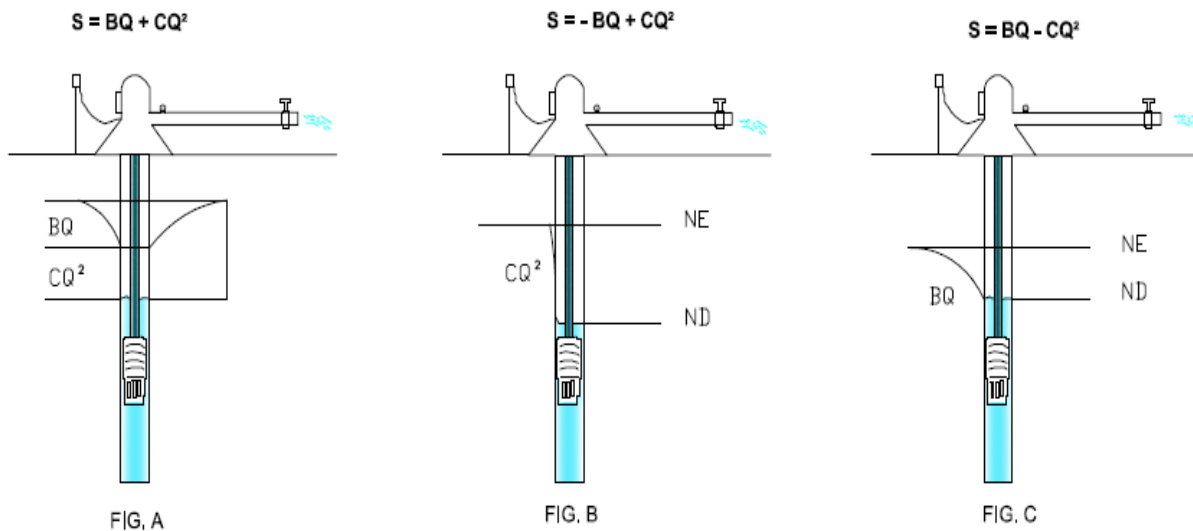


Figura3. Representación grafica de la eficiencia hidráulica en pozos profundos.

6.3.4. Determinación de la eficiencia hidráulica

Una vez obtenida la ecuación de abatimiento, se puede determinar la eficiencia hidráulica mediante la expresión (6):

$$\eta_h = \frac{BQ}{BQ + CQ^p} \quad (6)$$

En pozos con condiciones muy cambiantes o inestables o sea aquellos en la que sus parámetros (B, C) presenten valores negativos, la expresión (6) se recomienda a la expresión 7. (Custodio y Llamas 1976).

$$\eta_h = \frac{S_t}{S_r} = \frac{Q_{er}}{Q_{et}} \quad (7)$$

Donde:

η_h = Eficiencia hidráulica (%),

S_t = Abatimiento teórico estimado mediante la ecuación de abatimiento (m),

S_r = Abatimiento real medido con la sonda en el momento de la evaluación (m),

Q_{er} = Caudal específico real (LPS m^{-1})

Q_{et} = Caudal específico teórico (LPS m^{-1})

6.3.5. Eficiencia del sistema de bombeo

Dentro del sistema “pozo de agua” se tienen dos áreas principales de eficiencia: la eficiencia del sistema de bombeo y eficiencia del pozo. La eficiencia en el bombeo es el producto de la eficiencia de la bomba (eb) por la eficiencia del motor (em). La eficiencia de un pozo en su efectividad para captar agua del acuífero; como un pozo no necesita una potencia de entrada para que fluya el agua dentro de él, esta eficiencia no se puede medir con la división de potencia de salida entre la potencia de entrada, por lo que es necesario desarrollar otros métodos para medirla.

6.3.6. Pérdidas de eficiencia debidas a las características del acuífero

Las características del acuífero rigen la capacidad de entrada de agua al pozo como son: el tamaño y grado de consolidación del acuífero, sus límites, uniformidad, arreglo granulométrico, permeabilidad, transmisibilidad, composición química de los materiales y agua que determinan el grado de corrosión e incrustación. Estas características son incontrolables pues reflejan condiciones naturales, a las que se tienen que adaptar el proyecto del pozo en la mejor forma posible. Las pérdidas de carga originada en el acuífero se reflejan en el descenso del nivel dinámico necesario para que el agua fluya al pozo en régimen laminar y depende, además de las características antes mencionada del caudal bombeado y en medida al diámetro de pozo.

Cuadro 7. Causas de ineficiencias de los pozos de agua. Fuente: CNA 1994.

Defectos De Diseño	Defectos Constructivos	Defectos Operacionales	Problemas Regionales
pozos incompletos	Fluidos de perforación	Falta de perforación	Aguas corrosionadas
cedazo en el exceso	Falta de desarrollo del	inadecuados	Aguas incrustante
falta de cedazo	pozo	falta de desarrollo del	Bacterias ferruginosas
Información litológico	Filtro granular mal	pozo	Abatimientos
inadecuada	colocado	filtro granular mal	regionales de los
Filtro granular o cedazo	Defectos en la	colocado	niveles freáticos
mal diseñado	colocación del ademe	defectos en la	
Moro Mal realizado o	Falta de verticalidad	colocación del ademe	
interpretado	del pozo	falta de verticalidad del	
Selección inadecuada	Materiales defectuosos	pozo	
de bomba	o inadecuados	materiales defectuosos	
Defectuoso protección		o inestabilidad	
sanitaria o química			

6.3.8. Determinación de las curvas características

Las curvas características de un pozo relacionan el caudal extraído con el descenso en la captación al cabo de un cierto bombeo además también se relacionan simultáneamente el caudal específico del pozo en dicho descenso, (Figura 4) son de gran valor para apreciar la eficiencia de un pozo y sus variaciones. (Chávez., 2006)

En la Figura 4. Se muestran los diferentes tipos de curvas características que pueden presentarse, adicionalmente se incluye una curva atípica, la cual puede indicar dos escenarios distintos: 1 que las mediciones de los gastos y los niveles estático y dinámico del pozo se realizaron de manera errónea, y 2 que el estudio se realizó en un acuífero con características cambiantes o inestable, causado por bombeo de un pozo próximo; o su coeficiente de almacenamiento por asentamiento, falta de desarrollo o colmatación (derrumbe) del pozo, etc., las cuales pueden deformar notablemente la expresión gráfica de la curva característica siendo errónea su interpretación. Se recomienda realizar repeticiones

para el caso del último escenario, sobre todo en el área superior de la curva característica, con el fin de diferenciar entre el comportamiento erróneo y cambiante. No es conveniente obtener datos en épocas distintas para obtener la curva del pozo, ya que las condiciones del acuífero pueden cambiar con el tiempo (Custodio y Llamas, 1976, Román *et al.*, 2007)

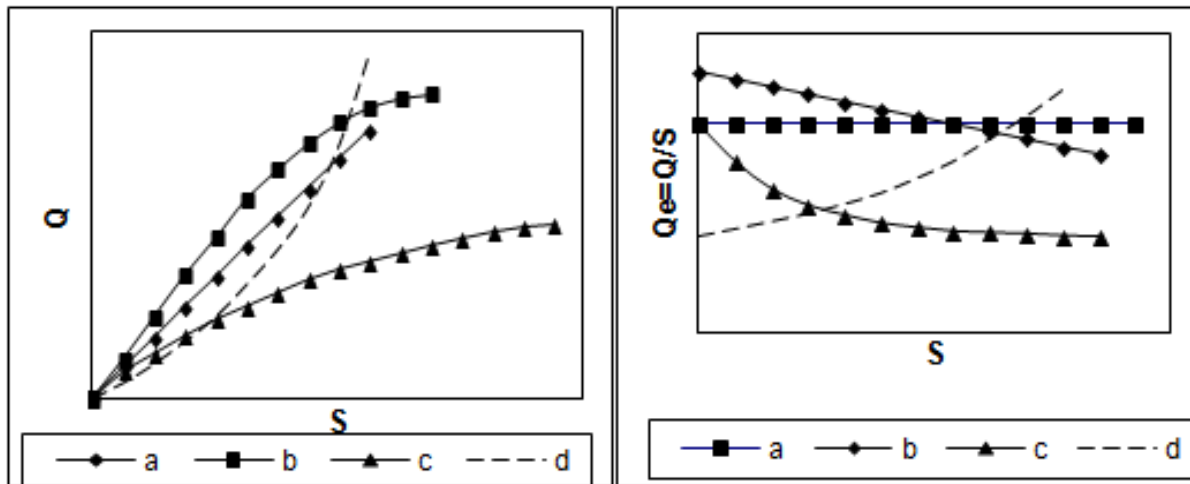


Figura 4. Tipos de curvas características de pozos: a) En acuífero sin pérdidas en el pozo; b) En acuífero libre sin pérdidas en el pozo; c) En acuífero con pérdidas no lineales en el pozo; d) Con datos mal tomados debido a ensayo defectuoso o acuífero con cara.

En acuíferos cautivos poco permeables, la eficiencia de los pozos suele ser alta ya que la mayor parte de la pérdida de carga es imputable a la formación rocosa del acuífero. En cambio, en acuíferos muy permeables, la eficiencia puede ser baja si el pozo no ha sido construido y/o desarrollado de manera adecuada. En consecuencia, no deben compararse eficiencias en pozos de acuíferos distintos (Chávez., 2006).

6.4. Método del error cuadrático mínimo

La existencias de funciones matemáticas que modelan un proceso físico tantas como se quiera, y obviamente no es posible probarlas todas para un problema en particular. Por lo tanto es necesario escoger, de esas funciones, la que se adapten mejor al problema bajo análisis, existen métodos como, máxima verosimilitud, prueba de bondad de ajuste y del error cuadrático mínimo, (Aparicio., 1992) en este caso particular se optó por este último para la selección de la mejor ecuación de abatimiento dicho método se explica a continuación:

El método consiste en calcular, para cada ecuación de abatimiento obtenida, el error cuadrático descrito en la ecuación (8) que a continuación se presenta.

$$C = [\sum_{i=1}^n (x_{ei} - x_{oi})^2]^{1/2} \quad (8)$$

Donde x_{ei} es el i -ésimo dato observado y x_{oi} es el i -ésimo dato obtenido de la ecuación de abatimiento.

El valor de c mínimo encontrado en cada ecuación de abatimiento de las confrontadas, será la seleccionada como la mejor para enseguida proceder a la construcción de la curva característica hidráulica del pozo profundo.

VII MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Área de estudio.

La Comarca Lagunera se localiza en el altiplano central del norte de México cuya altitud es de 1,100 msnm y está limitado al oeste por la sierra madre Occidental, donde la altitud varía de 2,000 a 3,200 m.s.n.m, al este por la sierra madre Oriental, cuya latitud varía de 1,800 a 2,500 m.s.n.m. Sus coordenadas geográficas son; 102°30' y 104°48' de longitud oeste y los paralelos 24°25' y 26°55' de latitud norte.

7.2. Localización de pozos evaluados

Se optó por evaluar pozos profundos del acuífero principal de la región lagunera las cuales presentan problemas de sobreexplotación con una relación extracción de carga de 2 a 1, con estos antecedentes se prevé una mejoría en las eficiencias electromecánicas de los equipos de los pozos profundos, las características de los pozos muestreados se presentan a continuación:

- Pozo 3320 se localiza entre las coordenadas 25° 35'23.6 Latitud Norte, 103° 27'13.1" longitud Oeste a altitud de 1137 m.s.n.m. en el municipio de Gómez Palacio Durango, abastece los campos experimentales del centro de investigación CENID-RASPA INIFAP.
- Pozo 363 se localiza entre las coordenadas 25° 38'16.66" Latitud Norte 103° 23.11'59" longitud oeste con una altitud de 1122 m.s.n.m. del municipio de la concha Coahuila.

- Pozo 2050 se localiza entre las coordenadas 25° 28'41.8" Latitud Norte y 103° 04'00.5" Longitud Oeste con una altitud de 1115 m.s.n.m. ubicada en el municipio de matamoros en el poblado de Gavino Vázquez Torreón Coahuila.

7.3. Ensayos de bombeo

Para la estimación de la eficiencia electromecánica e hidráulica se diseñaron tres hojas de cálculo electrónicas. La primera fue una hoja de registro de los datos del equipamiento y toma de datos de campo, la segunda consistió de la determinación de la eficiencia electromecánica, con la tercera se estimó la eficiencia hidráulica de los pozos. Para cuestiones prácticas y de espacio se presentan en el anexo.

7.4. Material de campo

- **Sonda Eléctrica:** de la marca solinst wáter level meter modelo 102 de 300m de longitud, es un instrumento de medición del nivel estático (NE) y nivel dinámico (ND), fácil de leer y brinda lecturas consistentemente exactas de nivel en pozos. La cinta es un cable coaxial permanentemente marcada con laser cada milímetro, tiene conductores de acero inoxidable entrelazados de larga vida y es fácil de reparar. El diseño tipo hueso reduce la adherencia a las paredes húmedas de los pozos, tienen los sensores protegidos para minimizar señales falsas. El carrete está bien balanceado y posee manija para movimiento giratorio tiene fácil acceso para la batería y además tiene freno. Utiliza una batería de 9V que suministra energía para las alarmas luminosa y sonora las cuales se activan al momento del contacto con el agua.

- **Sono-Trak:** Es un medidor de flujo que se instala en la tubería y utiliza la tecnología de ultrasonidos avanzado para la medición de mayor precisión. Basándose en los principios del efecto Doppler, calcula la velocidad del flujo mediante la detección y la medición de la variación de frecuencia en movimiento a partir de materiales reflectantes dentro de un líquido. Este sistema de medición de flujo se utilizan dos transductores montados en el tubo que dependen del diámetro para su configuración y posición, estas operan como transmisores de señales de ultrasonidos y el receptor tiene una caratula con botones, es de forma rectangular presentando de forma digital el caudal que pasa por dicha tubería en el instante en lps.
- **Cinta Métrica:** Se utilizó para medir la separación de transductores del Sono-Trak esto es para la configuración adecuada del funcionamiento del mismo.
- **Multímetro:** Para la obtención de la tensión eléctrica (V), corriente eléctrica (I).
- **Pilas:** Se utilizaron dos tipos de pilas una de 9 volt utilizada para el funcionamiento del Sono-Trak y otra de triple A para el funcionamiento de sonda eléctrica.
- **GPS:** Se utilizó para la obtención de coordenadas geográficas de cada pozo evaluado.
- **Kit Sono-Trak:** Conjunto de herramientas utilizadas como son: Desarmadores, abrazaderas sin fin, etc.
- **Cuaderno de notas:** para anotar los valores obtenidos.
- **Cronómetro:** Medición del tiempo en el levantamiento de datos.
- **Lija:** se utiliza para limpiar la zona de donde se colocan los transductores del Sono-Trak.
- **Vernier:** para la obtención del diámetro de funda y de columna

- **Manómetro:** Para medir la presión del flujo de agua.

7.5. Obtención de la Eficiencia electromecánica (η_{em}).

En la estimación de la eficiencia electromecánica (η_{em}) se diseñó un formato en hoja de cálculo en donde se abastece con datos obtenidos durante la prueba. Con los datos del Multímetro obtenidos se realizaron cálculos para la obtención de factor de potencia (Fp) y la potencia de entrada del motor (kw).

7.6. El procedimiento correspondiente para prueba de bombeo.

1. Realizar un croquis de toda la instalación conforme a las mostradas en las figuras 1,2., también se tomaron fotos para realizar una foto de conjunto del equipamiento y materiales utilizado, la foto de conjunto se reporta como resultado de las evaluaciones respectivas.
2. Medir la profundidad del agua en el pozo cuando el equipamiento se encuentra fuera de operación (NE). Este es un dato primordial en el inicio del estudio del pozo para la obtención de los niveles de abatimientos.
3. Encender el motor eléctrico para que funcione la bomba y esperar a que el gasto (Q) se estabilice para que alcance el funcionamiento normal de la bomba, Después de un cierto lapso de funcionamiento de la bomba (aproximadamente 2 horas) Tomar los datos de gasto (Q) con el uso Sono-Trak.
4. Determinar ND que es el nivel del agua cuando la bomba se encuentra operando.
5. Medir presión de flujo de agua.
6. Medir V, I en las instalaciones eléctricas con el uso del Multímetro.

7. Calcular potencia de entrada del motor (P_e), el factor de potencia (F_p), la potencia de salida de la bomba (P_s) y la carga total dinámica (CTD).
8. Obtención de curvas características electromecánicas
9. En La estimación de la CTD se utilizan los datos de presión del manómetro, ND y la ecuación generada de un modelo matemático de regresión potencial múltiple para calcular pérdidas por fricción en la columna. En Bombas sumergibles se empleó la expresión de Manning en una hoja de cálculo para mayor comodidad. Finalmente el cálculo del parámetro η_m . Los procedimientos necesarios para la obtención de las curvas características electromecánicas del equipamiento se realizaron un ensayo elemental de bombeo. Los parámetros obtenidos fueron el producto de las relaciones que existen entre el gasto-carga, gasto-eficiencia; y relación gasto-potencia de entrada al motor, para así tener una mejor respuesta a distintos escenarios de operación del equipamiento. Dichas pruebas se iniciaron con tres cuartos de cerrado de la válvula y se terminó con la válvula completamente abierta. El grado de cierre dependió de la capacidad del equipo o de la tubería de descarga. Para cada abertura de las válvulas se realizaron cada una de las mediciones descritas anteriormente con fin de obtener los puntos de la curva.

7.8. Hidráulica de pozos

En la determinación de las condiciones hidráulicas de los pozos se realizaron ensayos a caudal creciente de bombeo. Para lo cual, teniendo como dato de inicio el NE del pozo, se efectuaron varias pruebas de bombeo a diferentes caudales. Se tomó nota de las diferencias de los niveles dinámicos entre las pruebas realizadas. Para la realización del ensayo se

hicieron de 3 a 4 pruebas, en cada una de ellas se tomaron los datos de Q y ND y calculando ahí mismo los abatimientos reales (Sr), incrementos del gasto (ΔQ) e incremento en abatimiento (ΔS).

En la determinación de la ecuación de abatimiento se emplearon las metodologías propuestas por Kasenow y el método cuadrático procesado en el paquete computacional SAS, se obtiene un Polinomial de segundo grado con ordenada al origen y su respectivo coeficiente de determinación.

7.9. Ecuación de Kasenow

Kasenow (2001), desarrolló una serie de ecuaciones para el análisis de las pruebas de abatimiento que permiten determinar los coeficientes B y C independientemente de conocer T y S, como lo había propuesto Jacob en 1946. Las ecuaciones propuestas por Kasenow para la determinación de estos coeficientes son mostradas en las ecuaciones 9 y 10.

$$B = \frac{S_n Q_{n+1}^2 - S_{n+1} Q_n^2}{Q_n Q_{n+1}^2 - Q_{n+1} Q_n^2} \quad (9)$$

$$C = \frac{S_{n+1} Q_n - S_n Q_{n+1}}{Q_n Q_{n+1}^2 - Q_{n+1} Q_n^2} \quad (10)$$

Se realizaron, ajustes de los resultados de B y C obtenidos con las ecuaciones 9 y 10 los ajustes fueron los siguientes:

$$B = \frac{S_n - C_P Q_n^2}{Q_n} \quad (11)$$

$$C = \frac{S_n - B_P Q_n}{Q_n^2} \quad (12)$$

Donde:

Q_n = Caudal en la etapa n (LPS),

S_n = Abatimiento en la etapa n (m),

Q_{n+1} = Caudal en la etapa n+1 (LPS),

S_{n+1} = Abatimiento en la etapa n+1 (m).

C = coeficiente de pérdidas de carga hidráulica en el pozo (m/lps²)

B = coeficiente de pérdidas de carga hidráulica en el acuífero (m/lps)

Curvas características hidráulicas del pozo profundo

La manera de validar la ecuación de abatimiento y eficiencia hidráulica del pozo es mediante la curva característica, que es un análisis gráfico entre la producción del pozo o caudal y su capacidad específica o caudal específico puestos en la ordenada contra el abatimiento del pozo en el eje de las abscisas. Mediante esta técnica y utilizando las Figura3Figura 4, se obtienen conclusiones sobre el tipo de acuífero, pérdidas hidráulicas y construcción del mismo. También se deduce si es un sistema de acuífero es estable o inestable con condiciones cambiantes en su recarga o en su caso de datos mal realizado el ensayo a caudal creciente, que permitió establecer la ecuación de abatimiento.

7.10. Ecuación de abatimiento mediante paquete estadístico SAS.

En la obtención de la ecuación de abatimiento mediante ajuste Polinomial de segundo grado con ordenada al origen, se procesaron los datos de los pozos muestreados en el paquete estadístico SAS 2001.

En la realización de curvas características se utilizó el software graficador sigma plot versión 7.0.

VIII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente trabajo de investigación se enfocó en estudiar a detalle, los sistemas de extracción de agua de las fuentes de abastecimiento subterráneo tanto de los equipos como de los pozos profundos. Dentro de los valores obtenidos en campo existen parámetros necesarios de obtener y se realizó a través de cálculo con el objeto de obtener la eficiencia electromecánica para ello se realizaron las siguientes ecuaciones.

8.1. Obtención de factor de potencia

Se recurrió al algoritmo (ecuación 3) generado por Chávez (2006). A la ecuación se realizó modificaciones para mejorar la obtención del factor potencia.

$$Fp = 0.9127 \left[\frac{\sqrt{3} V I f p}{potplacamot} \right]^{0.3612} \quad (13)$$

Desarrollando

$$1.0957 Fp = \frac{1.2189 V^{0.3612} I^{0.3612} f p^{0.3612}}{potplacamot^{0.3612}} \quad (14)$$

$$1.0957 potplacamot^{0.3612} = \frac{1.2189 V^{0.3612} I^{0.3612} f p^{0.3612}}{Fp} \quad (15)$$

$$1.0957 potplacamot^{0.3612} = 1.2189 V^{0.3612} I^{0.3612} f p^{0.3612} f p^{-1} \quad (16)$$

$$1.0957 potplacamot^{0.3612} = \frac{1.2189 V^{0.3612} I^{0.3612}}{Fp^{0.6388}} \quad (17)$$

$$Fp = \left[\frac{1.2189 V^{0.3612} I^{0.3612}}{1.0957 (potplacamot)^{0.3612}} \right]^{\frac{1}{0.6388}} \quad (18)$$

Ecuación patrón obtenida y utilizada para la obtención de este parámetro (19):

$$Fp = \left[\frac{1.2189V^{0.3612}I^{0.3612}}{1.0957(\text{potplacamot})^{0.3612}} \right]^{1.5654} \quad (19)$$

Donde:

$Fp = \text{Factor de potencia}$

$V = \text{Tensión eléctrica en volt}$

$I = \text{Corriente eléctrica en amper}$

$\text{pot placa mot} = \text{potencia de placa del motor en watts}$

En la obtención de potencia de entrada se utilizó la ecuación (2):

8.2. Cálculo de pérdidas por fricción en la columna.

En la estimación de las pérdidas en la columna de bombeo en equipamientos con motor externo por lo general se recurre al uso de tablas, considerándose la columna, funda y flecha, sin embargo, dichas tablas, se ajustaron a un modelo matemático de regresión potencial múltiple de la siguiente forma:

$$f_c = k * Q^{x_1} * 0,7854 * (AFR)^{x_2} * \left(\frac{LC}{100}\right) * Fe \quad R^2 = 0.96 \quad (20)$$

$$k = 0.000000245 \quad x_1 = 1.7869 \quad x_2 = -2.5621$$

Donde:

$f_c = \text{Fracción de pérdidas de carga en la columna (m)}$

$Q = \text{Caudal que pasa por la columna (lps)}$

$AFR = \text{Área de flujo radial (m)}$ y se encuentra en función del diámetro de columna interior y diámetro de funda externo.

LC = Longitud de la columna (m)

Fe = Factor de estado de la columna

k = Constante de forma de la geometría del flujo radial

x_1 = Exponente que afecta al caudal en dona

X_2 = Exponente que afecta al área de flujo radial

8.3. Calculo de Área del Flujo Radial

Para el cálculo de (AFR) se calcula como se expresa en la ecuación (21)

$$AFR = \frac{\pi (DC^2 - DF^2)}{4} \quad (21)$$

Donde:

DC = Diámetro de columna interno (m)

DF = Diámetro de funda externo (m)

Todo lo anterior es considerando que la toma de datos sea directamente en el momento en que se lleve a cabo dicha evaluación en casos donde los datos de diámetro de columna y funda sean obtenidos de forma análoga se recomienda ver los datos en los cuadros de calculo que a continuación Se presenta para la obtención de parámetros de DC, DF, Fe De acuerdo las tablas que se presentan a continuación.

Cuadro 8. Diámetros interiores de tubos usados como columna de bombas relacionados al diámetro nominal.

Diámetros interiores de tubos usados como columna de bombas relacionados al diámetro nominal.		
Diámetro Nominal		Diámetro interior real
Pulg	Pulg	M
2½	2,469	0,0627
3	3,068	0,0779
3½	3,39	0,086
4	4,026	0,1023
5	5,047	0,1282
6	6,065	0,154
8	7,981	0,2026
10	10,02	0,2544
12	12	0,305
14	13,124	0,3336
16	15	0,381

Cuadro 9. Diámetros exteriores de tubos usados como funda o cubierta de flechas de bombas relacionados al diámetro nominal.

Diámetros exteriores de tubos usados como funda o cubierta de flechas de bombas relacionados al diámetro nominal.		
Diámetro nominal		Diámetro exterior real
Pulg	pulg	M
1¼	1,66	0,042
1½	1,9	0,0482
2	2,375	0,0603
2½	2,875	0,073
3	3,5	0,0889
3½	3,82	0,097
4	4,5	0,1143
5	5,563	0,141

Cuadro 10. Factor de uso para tuberías de columnas de bombeo (Fe)

Factor según estado de la tubería de columna		
Condiciones de la pared interior del tubo	Edad aproximada del tubo	FACTOR
muy lisa	Nuevo	1
Mas o menos lisa	hasta 5 años	1,4
Áspera	5 ó más años	2,2

8.4. Eficiencia electromecánica de pozos evaluados

Pozo 363		
Q	η_{em}	η_{em} RE (%) 150 hp motor externo NOM 1995
19.29	22	64
17.73	19	64
16.17	16	64

Pozo 2050		
Q	η_{em}	η_{em} (%) RE 120 hp motor externo
22.34	56	60
23.66	60	60
23.8	60	60

pozo 3320		
Q	η_{em}	η_{em} RE (%) 60 hp sumergible motor y bomba
2.54	21	67.86
3.49	40	67.86
4.65	27	67.86
6.71	46	67.86

8.5. Curva característica electromecánica del equipamiento.

En la Se presentan las curvas características que representan las relaciones (Q - η_{em}), (Q-CTD) Y (Q, POT-ACT) que existe en los pozos muestreados.

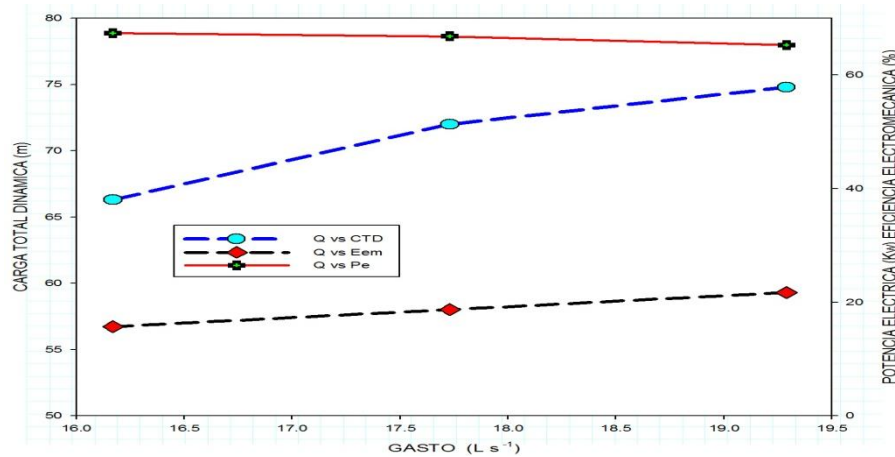


Figura 5. Curva característica electromecánica del pozo 363

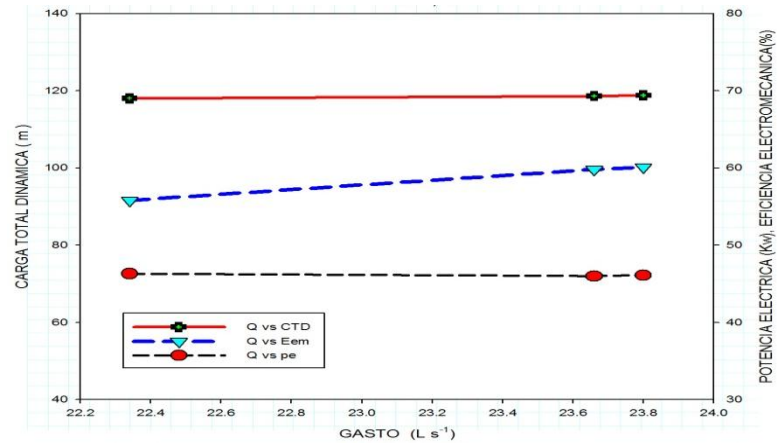


Figura 6. Curva característica electromecánica del pozo 2050

En la Figura 5 la curva característica presenta que el equipamiento tiene su mejor eficiencia con un 22 % y una corriente eléctrica de 65 kw está presente con un caudal de extracción de 19.29 Lps esto representa que el equipamiento se encuentra operando por debajo de las permisibles por la norma oficial cuando esta debiera estar trabajando con una eficiencia de 64 % ya que cuenta con un motor de 150 hp. En la Figura 8 se tiene que el equipamiento del pozo esta presenta una eficiencia promedio de 58 % y un gasto operativo promedio de 23.26 lps con un motor de 120 hp por lo tanto se encuentra por debajo de los valores permisibles por las normas oficiales ya que esta debiera estar trabajando con 60%.

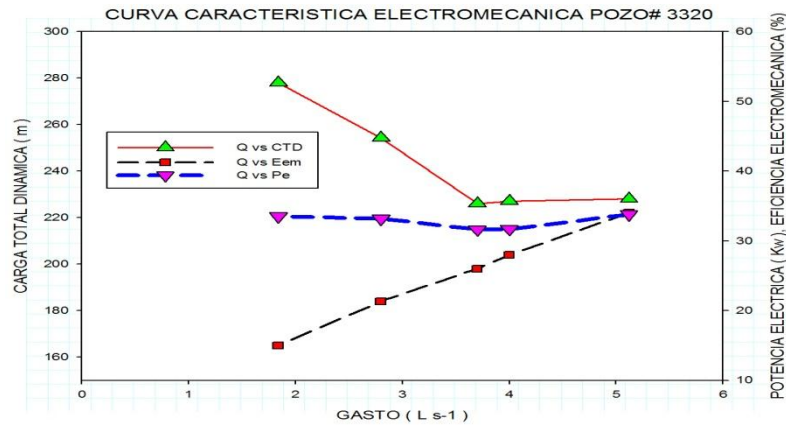


Figura 7. Curva característica electromecánica del pozo 3320- operación

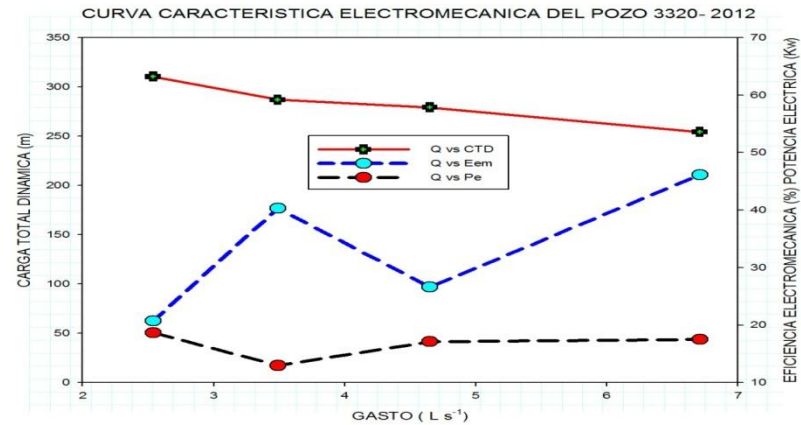


Figura 8. Curva característica electromecánica del pozo 3320- rehabilitación

En la Figura 7 se observa que el pozo 3320 presenta una baja eficiencia a 34% con un gasto operativo de 5.12 con potencia de motor de 60 hp cuando debería ser de 86% según los valores de referencia para la eficiencia de bomba y motor sumergible de las normas oficiales y con una carga total 228 esto es debido al abatimiento y sobre todo de una sobre explotación esta es en una etapa de operación del pozo del 2005 a 2012.

En la Figura 8 se presenta una eficiencia electromecánica promedio de 33.5%, ésta obtenida después de la rehabilitación que se realizó al equipamiento, por lo tanto, esto indica que se tiene una baja eficiencia la con la misma potencia del motor de 60 hp, en la figura se observa que la eficiencia aumenta y disminuye debido a la inestabilidad del pozo y a las pérdidas de carga hidráulica en el acuífero; esto corresponde a la etapa de rehabilitación y no se observan cambios significativos en la eficiencia electromecánica y de acuerdo a las normas oficiales su es valor de eficiencia es bajo.

8.6. Modelos de abatimiento

En EL Cuadro 11. Se presentan los modelos de abatimiento a nivel de bombeo obtenida del pozo profundo con gasto extraído Q (L s-1) y abatimiento total del nivel del agua en el pozo s (m), con los valores arrojados de los métodos Kasenow y Polinomial de segundo grado datos obtenidos de la regresión realizado en el programa de computo SAS.

Cuadro 11. Modelos de abatimiento a nivel de bombeo

Pozo	Metodología	Ecuación de abatimiento	R ²
363	Kasenow	$s_K = -2.03679 Q + 0.12997 Q^2$	0.98
	Polinomial	$s_1 = -2.13883 Q + 0.12756 Q^2$	
2050	Kasenow	$s_K = 0.48782 Q - 0.00427 Q^2$	1
	Polinomial	$s_1 = 0.99899 Q - 0.02602 Q^2$	
POZO PILOTO 3320			
CONSTRUCCIÓN (2003)	Kasenow	$s_K = 11.24730 Q - 0.30042 Q^2$	0.99
	Polinomial	$s_1 = 12.34454 Q - 0.65077 Q^2$	
OPERACIÓN (2003-2012)	Kasenow	$s_K = 37.65675 Q - 4.22173 Q^2$	0.99
	Polinomial	$s_1 = 34.98870 Q - 4.59625 Q^2$	
REHABILITACIÓN (2012 A LA FECHA)	Kasenow	$s_K = 35.39038 Q - 3.36907 Q^2$	0.99
	Polinomial	$s_1 = 33.37027 Q - 3.03585 Q^2$	

8.7. Selección del mejor modelo por el método del error cuadrático mínimo.

En el Cuadro 12,

Cuadro 13 y Cuadro 14 se presenta la comparación de los modelos Polinomial de segundo grado vs la ecuación de kasenow, donde se observa que para el pozo 363, 2050 y 3320 (en sus tres etapas: construcción operación y rehabilitación), los valores más bajos de error cuadrático mínimo fue obtenido por el modelo Polinomial lo que indica que es el mejor.

Cuadro 12. Selección del Mejor modelo pozo 363

Q	Sr	s ₁	s _K	se ₁	se _K
19.29	8.53	9.073	6.206	0.295	5.401
17.73	5.93	4.744	2.176	1.406	14.092
16.17	0.4	1.048	-1.233	0.420	2.667
			Σ=	2.121	22.160
			√Σ=	1.456	4.707

Cuadro 13. Selección del mejor modelo pozo 2050

Q	Sr	s ₁	s _K	se ₁	se _K
22.34	9.34	9.331	8.767	0.000	0.329
23.66	8.99	9.070	9.151	0.006	0.026
23.8	9.11	9.037	9.191	0.005	0.007
			Σ=	0.012	0.361
			√Σ=	0.109	0.601

Cuadro 14. Construcción pozo 3320

Q	S _r	s ₁	s _K	se ₁	se _K
3.2	36	32.84	32.91	9.99	9.52
5	43	45.45	48.73	6.02	32.79
7.44	53	55.82	67.05	7.96	197.42
8	60	57.11	70.75	8.37	115.59
			Σ=	32.34	355.31
			√Σ=	5.6869	18.85

Cuadro 15. Operación pozo 3320

Q	S_r	s₁	s_k	se₁	se_k
1.84	57.94	48.817	54.995	83.225	8.671
2.8	59.64	61.932	72.341	5.252	161.304
3.7	60.14	66.532	81.535	40.856	457.726
4	64.94	66.410	83.079	2.162	329.037
5.12	62.39	58.647	82.133	14.009	389.767
			$\Sigma=$	145.503	1346.504
			$\sqrt{\Sigma}=$	12.062	36.695

Cuadro 16. Rehabilitación del pozo 3320

Q	S_r	s₁	s_k	se₁	se_k
2.54	56.03	65.174	68.156	83.620	147.032
3.49	87.7	79.485	82.477	67.482	27.282
4.64	89.95	89.477	91.677	0.223	2.981
6.71	86.09	87.228	85.780	1.295	0.096
			$\Sigma=$	152.620	177.391
			$\sqrt{\Sigma}=$	12.354	13.319

Analizando el Cuadro 15 y Cuadro 16 en las que la polinomial de segundo grado es la preferible en todos los casos, es importante indicar que Kasenow está ligeramente diferente en su cuadrado mínimo de error lo que también es recomendable para efectos de pronósticos.

8.8. Curva característica hidráulica de pozos.

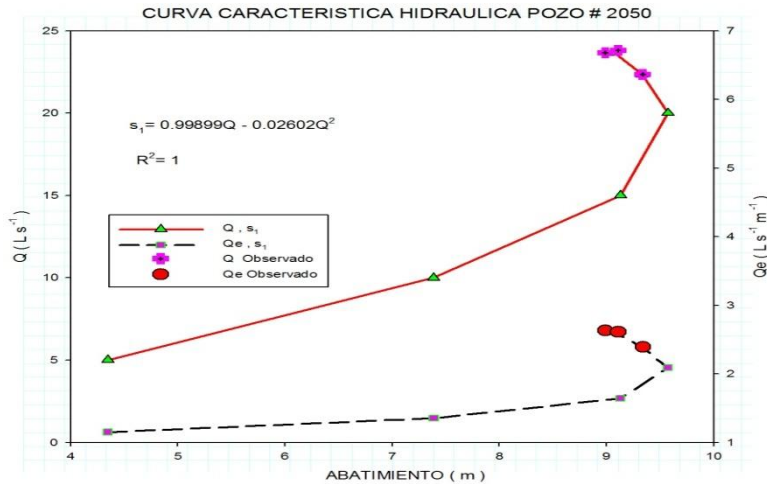


Figura 9. Curva característica hidráulica del pozo 2050

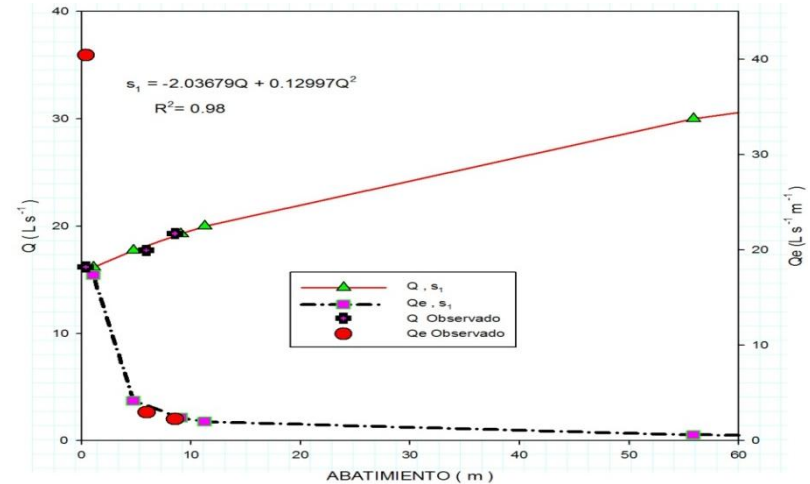


Figura 10. Curva característica hidráulica del pozo 363

De acuerdo a lo presentado en la Figura 9 según el comportamiento y al modelo de curva se dice que el pozo tiene comportamiento inestable, la inestabilidad se debe a la pérdida de carga hidráulica del acuífero por lo tanto no existen pérdidas hidráulicas del pozo o es inapreciable, la bomba está funcionando con la extracción de 23.66 lts por lo que no se recomienda extraer más caudal de lo operativo se recomienda seguir operando como hasta ahora se está realizando hasta ya no poder extraer dicho caudal y Según el parámetro c indica que se tiene principios de incrustaciones en rejillas.

En la Figura 10 según el comportamiento de la grafica indica que es un acuífero que tiene pérdidas hidráulicas no lineales exclusivamente en el pozo por lo que sí se puede extraer más caudal de hasta un 50% pero es incosteable ya que el nivel de bombeo o abatimiento es mayor. Según el parámetro c indica que el pozo tiene incrustaciones o taponamiento en las rejillas y requiere de rehabilitación.

8.9. Pozo muestreado contado como referencia metodológica por contar con pozo piloto

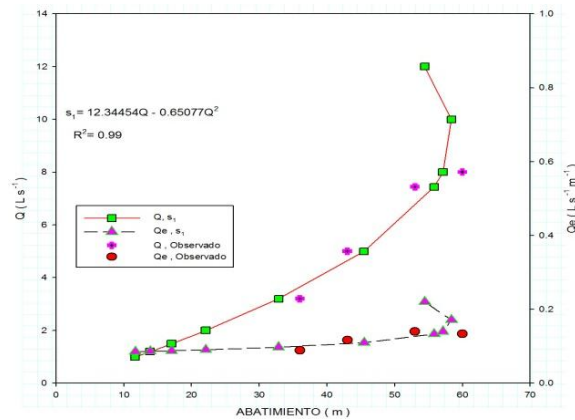


Figura 11. Curva característica hidráulica del pozo 3320 construcción 2003

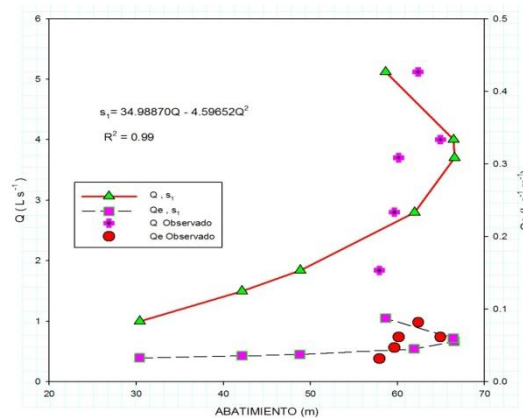


Figura 12. Curva característica hidráulica del pozo 3320 Operación 2005-2012

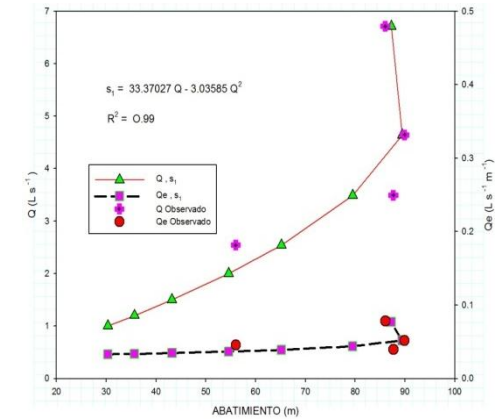


Figura 13. Curva característica hidráulica del pozo 3320 Rehabilitación 2012 a la fecha

El pozo piloto, sirvió para externar opiniones de una extracción de agua subterránea desde su construcción, operación y rehabilitación, en dicho lapso, se observa en más de una década de existencia, que desde sus inicios se puede caracterizar el funcionamiento hidráulico del pozo a su extracción, como se muestra en las Figura 11, Figura 12 Figura 13 que presentan las mismas características consistentes en comportamiento inestable, sin opción a incrementar el caudal de extracción, resulta interesante que dicho comportamiento ha sido igual independientemente del equipamiento instalado, para el caso de la etapa de construcción del mismo (de extracción condición inestable) fue obtenido con un equipamiento de 350 Hp y columna de bombeo con motor externo de 8"; Las siguientes etapas, se conserva el mismo equipamiento, que consiste en columna de bombeo de 4" a 252 m de profundidad y equipamiento sumergible de 60 HP, cabe hacer la aclaración que en la etapa de rehabilitación solo el motor eléctrico se repuso, conservándose el cuerpo de tazones sumergible, observar que debido a esto último, el comportamiento hidráulico del pozo es semejante. En sus parámetros de regresión de sus respectivas ecuación de abatimiento. Los modelos seleccionados, para la construcción de la curva característica hidráulica del pozo para todos los casos fue la Polinomial de segundo grado con ordenada al origen y en donde su aceptación es avalada por su aceptable coeficiente de determinación de los datos observados contra los datos teóricos o simulados; la selección del mejor modelo de abatimiento fue por su menor error mínimo cuadrático contra el modelo de Kasenow.

8.10. Análisis de tendencia simple de las ecuaciones de abatimiento obtenidas en SAS.

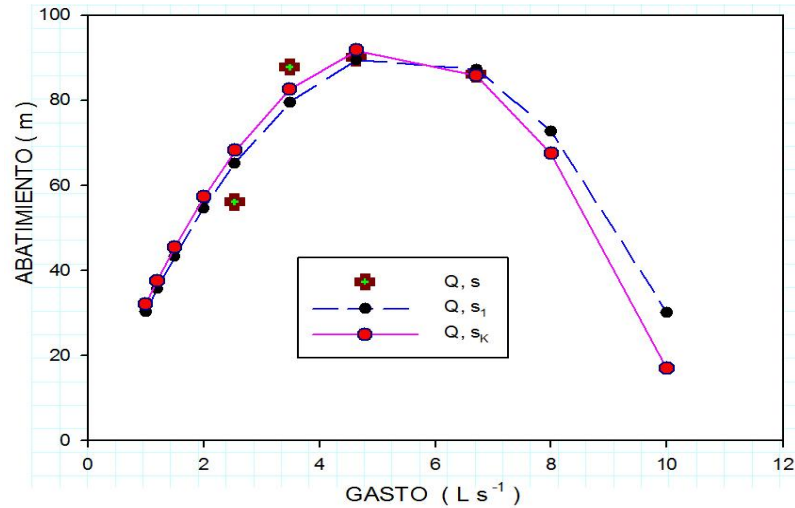


Figura 14. Curva comparativa de simple tendencia pozo 3320 2012.

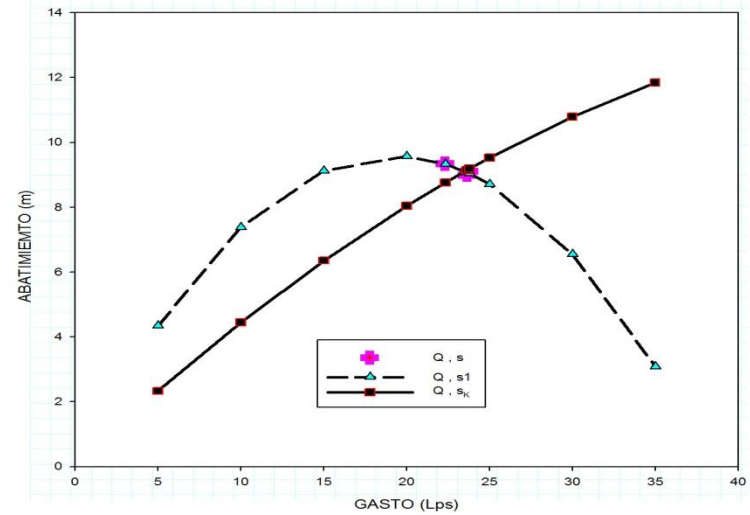


Figura 15. Curva comparativa de simple tendencia pozo 2050

Este apartado fue para corroborar el ajuste de la ecuación de abatimiento obtenida mediante SAS de los pozos observados.

8.11. Eficiencia hidráulica de pozos evaluados

Pozos	Q	S _R	S _I	Q _E	Q _R	H _{hP}
363	19.29	8.53	9.072	2.126	2.261	106.36
	17.73	5.93	4.744	3.737	2.989	80.002
	16.17	0.4	1.048	15.426	40.43	262.05
2050	22.34	9.34	9.331	2.394	2.391	99.909
	23.66	8.99	9.07	2.608	2.631	100.89
	23.8	9.11	9.037	2.633	2.612	99.201
Construcción 2003	3.2	36	32.838	0.097	0.089	91.218
	5	43	45.453	0.11	0.116	105.71
	7.44	53	55.821	0.133	0.141	105.32
	8	60	57.107	0.14	0.133	95.178
3320 operación 3003-2012	1.84	57.94	48.817	0.037	0.032	84.254
	2.8	59.64	61.931	0.045	0.047	103.84
	3.7	60.14	66.531	0.055	0.062	110.63
	4	64.94	66.41	0.06	0.061	102.26
	5.12	62.39	58.647	0.087	0.082	94
3320 rehabilitación 2012-a la fecha	2.54	56.03	65.174	0.038	0.045	116.32
	3.49	87.7	79.485	0.043	0.039	90.633
	4.64	89.95	89.477	0.052	0.051	99.474
	6.71	86.09	87.228	0.077	0.077	101.32

Ningún proceso o fenómeno físico ya sea natural o inducido es posible tener eficiencia mayor o igual al 100% de acuerdo a la primera ley de la termodinámica, sin embargo, en los cuadros presentados anteriormente se colocaron valores que se contraponen a este señalamiento, la razón de poner dichos valores es con la finalidad de identificar que la infraestructura de extracción subterránea (pozo, ademe) fue construida para extracción de caudales superiores y que en la actualidad por la sobreexplotación de los acuíferos está funcionando con extracciones por debajo de su capacidad, lo anterior significa que no se perciben las pérdidas hidráulicas y por lo tanto el modelo o ecuación de abatimiento proporciona un número negativo en alguno de sus componentes (por ejemplo el pozo piloto

3320) que tiene seguimiento técnico desde su construcción hasta una rehabilitación de su motor eléctrico, fue construido para una extracción de 34 lps y además para un caudal de 60 lps por cuestiones de donación de dicha tubería, desde operación y rehabilitación el mismo fue equipado para 12 lps, sin embargo donde su construcción se encontró que es de extracción inestable su caudal operativo oscila entre los 3.5 a 4.5 lps bajo condiciones estables, presenta su inestabilidad entre 4.5 a 6.5 lps.

IX CONCLUSIÓN

El abatimiento de los acuíferos sobre explotados genera una drástica baja eficiencia electromecánica de hasta un 50% de su valor mínimo recomendado por las Normas Oficiales Mexicanas.

La ecuación Polinomial de segundo grado con ordenada al origen fue la que tuvo mayor predicción y ajuste a los valores obtenidos en campo además de tener menor error mínimo cuadrado. Por la otra la metodología de Kasenow que es un método empírico que en todas las muestras en la que se compararon esta arrojo datos ajustables a lo real en consecuencia se dice es que buena. Al tomar como referencia que todos los trabajos que se realicen lo hagan con el método Polinomial de segundo grado realizado con el paquete computacional SAS con la ordenada al origen.

La facilidad de contar al menos con un pozo piloto permitió lograr caracterizar los pozos estudiados mediante la construcción de sus respectivas “Curvas Características hidráulica del pozo”, así mismo es posible determinar estos estudios característicos desde la etapa de construcción del pozo profundo, lo cual nos permite puntualizar las condiciones de respuesta hidráulica de la extracción subterránea durante su vida útil.

En base a lo externado anteriormente, en un pozo profundo su modelo hidráulico a la extracción es el mismo, pero lo diferente es en la magnitud de sus parámetros (B, C) los cuales son distintos conforme a la magnitud del equipamiento instalada.

X BIBLIOGRAFÍA.

Aparicio Mijares Francisco J. 1992. Fundamentos de hidrología de superficie. Método de Error cuadrático Mínimo. Editorial Limusa S.A. de C.V. Primera Edición. Pp. 272-275.

Campillo U., R. 2006. Desarrollo de pozos y la depresión específica. <http://www.aprchile/>. (Consulta: noviembre 10, 2012).

Chávez O., J. C. 2006. Metodologías para la evaluación de eficiencias electromecánica e hidráulica en la extracción de aguas subterráneas. Tesis profesional. UAAAN-UL, Torreón Coahuila, México.

Comisión federal de electricidad (CFE). 1997 Propuesta de plan para eficientación de bombeos agrícolas en la Región de la Laguna, estados Coahuila y Durango, Gómez Palacio, Dgo.

Cruz a., y g. Revine 1998. El uso de aguas subterráneas en el distrito de riego 017, Región Lagunera, México. IWMI, Serie Latinoamericana No. 3 México DF. México: Instituto Internacional del Manejo del Agua.

Custodio e., y R. Llamas M. 1976. Hidrología subterránea tomos I, y II, 1a Ed., ediciones Omega S.A. Casa Nova 220 Barcelona 11 p 825 –845 tomo II.

Delgado Ramírez Gerardo; Estrada Avalos Juan; Trucios Cacio Ramón; Rivera González miguel; Catalán Valencia Ernesto A. 2012. Simposio Nacional: los Recursos Agua y Vegetación y sus relaciones con el desarrollo del sector Agropecuaria y Forestal de México. Metodología para la Evaluación de la eficiencia global del riego en sistemas tipos válvulas alfalferas caso región lagunera. Progreso # 20 Barrio Santa Catarina Delegación Coyoacán C.P 04010. México D.F. P 13.

García y G. E. 1997 Diagnostico energético en el bombeo de pozos profundos para riego agrícola, revista informativa del ahorro de energía eléctrica, "Energía Racional". Núm. 6. FIDE – CFE. México.

Helweg O. J. 1992. Recursos hidráulicos, Planeación y Administración. 1° ed. 1992 Editorial Limusa p. 198 – 200, 376 – 387. México.

Herrera P. J.C., I. Rendón P., E. Peña P. y V. Cavazón h. 1998. Diagnóstico del equipo electromecánico. Memorias del VIII congreso nacional de irrigación. Región Lagunera, 2 al 4 de Septiembre de 1998, p 2.11 a 2.15.

Kasenow M. 2001. Applied Ground – Water Hydrology and Well. 2nd Edition. Water Resources Publications, Colorado, USA.

Montes I. I. (S/F). Instalaciones Eléctricas para equipos de bombeo. Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). Plan Nacional de Obras Hidráulicas para el Desarrollo Rural. Talleres Gráficos de la Nación, México.

Norma Oficial Mexicana NOM–006–ENER–1995. Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación.- Límites y método de prueba. Diario Oficial, jueves 9 de noviembre de 1995, sección; sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. <http://www.energia.gob.mx/work/resources/LocalContent/1243/1/images/nom-006-ener-95.pdf>

Norma Oficial Mexicana NOM-010-ENER-2004. Eficiencia energética de bombas sumergibles. Límites y método de prueba., Diario oficial Viernes 18 de Abril de 2005. <http://www.conae.gob.mx/work/secciones/1002/imagenes/nom-001-ener-2000.doc>

Peña D. S. y J. Arrequín m. 1989. Eficiencias Electromecánicas de los equipos de bombeo y de las condiciones hidráulicas en los pozos, Ingeniería Hidráulica en México.

Román L. A. 1985. Selección de una bomba de turbina vertical para pozo profundo. Seminarios técnicos CIAN – PRONAPA, Vol. 2 Núm. 13, Gómez Palacio Dgo. Méx.

Román L. A. 2000 Evaluación y diagnóstico de la eficiencia electromecánica de pozos profundos en la Comarca Lagunera de Durango. Carpeta Técnica del proyecto PRECI 01948, del CENID – RASPA, INIFAP – SAGARPA, Km 6.5, margen derecha canal Sacramento, Gómez Palacio; Dgo.

Román L., A Y Sánchez C. I. 2004 Uso y Manejo de bombas de pozo profundo. Folleto Especial N° 2 CENID-RASPA INIFAP.

Román-López, A., E. A. Catalán-Valencia, Inzunza-Ibarra, M.A. Villa Castorena Mendoza-Moreno. 2007. Modelos de abatimiento del nivel de bombeo y eficiencia hidráulica en un pozo profundo estable. Agrofaz 7. P 39-46.

Román-López, Inzunza-Ibarra M. A; Villa Costareña, magdalena; Catalán Valencia Ernesto Alonzo. 2011. Modelación del Abatimiento de pozo profundo. Sociedad Mexicana de la ciencia del Suelo Vol., 29 núm. 1. P. 1-9.

Román-López; Catalán Valencia Ernesto Alonzo; Inzunza-Ibarra, M.A; Villa Costareña, magdalena; 2012. Curva Característica Electromecánica e Hidráulica en un pozo Profundo. Y Costos de Bombeo. Agrofaz Volumen 12: P 154-156.

SAS Institute. 2001. Release 6. 12 For Windows. SAS Institute. Cary, NC, USA.

XI APENDICE

11.1. Formato de cálculo de eficiencia electromecánica del pozo 3320 en rehabilitación (bomba con motor sumergible).

FORMATOS DE CÁLCULOS DE EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA (CON MULTIMETRO)												
FECHA: 14 DE AGOSTO DE 2012												
DATOS DE LOCALIZACIÓN:												
PROPIEDAD:	CENID-RASPA INIFAP					PROPIETARIO:	CENID-RASPA INIFAP					
DATOS DE CONVERCIÓN												
Gasto:	6.71	lps	106.51	Gpm	0.0067	m3/s	L. colum:	252	m	826.77	ft	
Diámetro Columna:	4	Pulg.	0.1016	m	Nivel Dinámico:		248.9	m	816.6	ft		
Presión del manómetro:		kg/cm2	0	psi	0	m	Área:	0.0081	m2			
DATOS Y PROCESOS HIDRÁULICOS												
1. CARGA SOBRE LA REFERENCIA:								0.03495	m	0.1147	ft	
1.1. Elevación estática:					m	0	ft					
1.2. Carga de fricción y locales:				0	m	0	ft					
$\Sigma(10.29C2LQ2) / D16/3 + \Sigma(KQ2 / 2gA2)$				$\Sigma K=$								
1.3. Carga de velocidad:				0.0349	m	0.1147	ft					
$h_v = Q2 / 2gA2$												
1.4. Presión del manómetro:				0	m	0	ft					
1.5. Pérdidas del cabezal de descarga:					m	0	ft					
2. CARGA BAJO LA REFERENCIA:								254.135	m	833.78	ft	
2.1. Nivel Dinámico (ND):				248.9	m	816.6	ft					
2.2. Pérdidas de fricción en columna:					m	0	ft	Años de uso:				
BOMBA TURBINA CON MOTOR SUMERGIBLE												
2.3. Pérdidas de fricción en la columna:				5.235	m	17.175	ft					
$\Sigma(10.29C2LQ2) / D16/3 + \Sigma(KQ2 / 2gA2)$				$\Sigma K=$	1							
3. CARGA TOTAL DINÁMICA (CTD): 1+2:								254.17	m	833.89	ft	
4. POTENCIA DE SALIDA DE LA BOMBA:								16.7204	KW	22.413	HP	
$Nu = Q*CTD / 102 = KW$					$Nu = KW / 0.746 = HP$							
DATOS Y PROCESOS ELÉCTRICOS												
5. PARÁMETROS DE MEDICIÓN ELÉCTRICA												
		volts	amp	KW	FP							
5.1. De campo:		461.5	53.65	36.25	0.85							
5.2. De placa:												
		* Valor de tabla o gráfica										
6. EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA (%)												
Ef. Electromecánica = Nu / KW(dato de campo)										46.13%		

12.2. Formato de cálculo eficiencia electromecánica pozo 2050 bomba con motor externo.

FORMATOS DE CÁLCULOS DE EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA (CON MULTIMETRO)												
Prueba:							Fecha:	21-sep-12				
DATOS DE LOCALIZACIÓN												
PROPIEDAD:	GAVINO VÁZQUEZ					PROPIETARIO:	JAVINO VÁZQUEZ					
	Descarga de bomba: 24.7 m											
DATOS DE CONVERCIÓN												
Gasto:	23.8	lps	377.778	gpm	0.0238	m3/s	L. colum:	228	m	748.0314961	ft	
Diámetro Columna:	6	Pulg.	0.1524	M		Nivel Estático:	99.76	m		327.2965879	ft	
Presión del manó:	2.1082	kg/cm2	0	psi	0	m	Área:	0.0182322	m2			
DATOS Y PROCESOS HIDRÁULICOS												
1. CARGA SOBRE LA REFERENCIA:									1.48780165	m	4.88123902	ft
1.1. Elevación estática:			0.5	M		ft						
1.2. Carga de fricción y locales:			0.90095	M		ft						
$\Sigma(10.29C2LQ2) / D16/3 + \Sigma(KQ2 / 2gA2)$			$\Sigma K =$	1.88								
1.3. Carga de velocidad:			0.086851	M		ft						
$h_v = Q^2 / 2gA^2$												
1.4. Presión del manómetro:			0	M	0	ft						
1.5. Pérdidas del cabezal de descarga:				M	0	ft						
2. CARGA BAJO LA REFERENCIA:									117.295956	m	384.8292503	ft
2.1. Nivel Dinámico (ND):			108.87	M	357.18504	ft						
2.2. Pérdidas de fricción en columna:			8.43	M	27.644211	ft	Años de uso:		5			
BOMBA TURBINA CON MOTOR EXTERNO (VER TABLAS)												
Diámetro columna:	6	Pulg.	0.1524	M			Diámetro de flecha:		1.5 Pulg.			
Diámetro Externo de funda:	3.346	Pulg.	0.0849884	M								
Factor de estado de columna:	1.4											
$F_c = (2.45EE-07 * Q^{1.7869} * AFR^{-2.5621}) * (long \text{ Colum} / 100) * factor \text{ uso}$							R2 =	0.96			8.43	
3. CARGA TOTAL DINÁMICA (CTD): 1+2:									118.8	m	389.7104894	ft
4. POTENCIA DE SALIDA DE LA BOMBA:									27.71621	KW	37.15309652	HP
$Nu = Q * CTD / 102 = KW$				$Nu = KW / 0.746 = HP$								
DATOS Y PROCESOS ELÉCTRICOS												
5. PARÁMETROS DE MEDICIÓN ELÉCTRICA												
		volts	amp	KW	FP							
5.1. De campo:		443	83.6	46.1	0.72							
5.2. De placa:												
* Valor de tabla o gráfica												
6. EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA (%)												
Ef. Electromecánica = Nu / KW(dato de campo)											60.1	

11.3. Calculo de las variables b y c de la ecuación de kasenow del pozo 3320.

NE= 162.81

Nº	ND (m)	Q (LPS)	S(m)	ΔQ (L/s)	ΔS (M)	S/Q
1	218.84	2.54	56.03	2.54	56.03	22.05905512
2	252.76	4.64	89.95	2.1	33.92	19.38577586
3	250.51	3.49	87.7	-2.25	-2.25	25.12893983
4	248.9	6.71	86.09	3.22	-1.61	12.83010432

FORMULA DE CALCULO DE B

$$B = \frac{S_n Q_{n+1}^2 - S_{n+1} Q_n^2}{Q_n Q_{n+1}^2 - Q_{n+1} Q_n^2}$$

B1= 25.29245003 m/lps²

B2= 42.55819395 m/lps²

B3= 38.4590 m/lps²

PROMEDIO=

B= 35.43656271 m/lps²

FORMULA DE CALCULO DE C

$$C = \frac{S_{n+1} Q_n - S_n Q_{n+1}}{Q_n Q_{2n+1} - Q_{n+1} Q_n^2}$$

C1= -1.272990122 m/lps²

C2= -4.994055623 m/lps²

C3= -3.819514132 m/lps²

PROMEDIO=

C= -3.362186626 m/lps²

PARAMETROS AJUSTADOS

$$B = \frac{S_4 - C Q_4^2}{Q_4}$$

B= 35.39038

$$C = \frac{S_4 - B Q_4}{Q_4^2}$$

C= -3.36907

ECUACIÓN DE KASENOW DE ABATIMIENTO

$$s_K = BQ + CQ^2$$

$$s_K = 35.39038Q - 3.36907Q^2$$

11.4. Calculo de las variables b y c obtenidos de regresión polinomial de segundo grado con ordenada al origen realizada en el software SAS.

The SAS System 12:31 Monday, September 6, 2012 1

obs	y	x	x2
1	56.03	2.54	6.4516
2	89.95	4.64	21.5296
3	87.70	3.49	12.1801
4	86.09	6.71	45.0241

The SAS System 12:31 Monday, September 6, 2012 2

The REG Procedure
 Model: MODEL1
 Dependent Variable: y

NOTE: No intercept in model. R-Square is redefined.

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	26181	13090	171.54	0.0058
Error	2	152.62011	76.31005		
Uncorrected Total	4	26333			

Root MSE	8.73556	R-Square	0.9942
Dependent Mean	79.94250	Adj R-Sq	0.9884
Coeff Var	10.92731		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
x	1	33.37027	3.58450	9.31	0.0113
x2	1	-3.03585	0.63898	-4.75	0.0416

11.5. Fotos de conjunto de pozos muestreados



Figura 16. Materiales y equipo de trabajo pozo 3320

MATERIALES Y EQUIPO DE TRABAJO

VÁLVULA



CAUDAL EN
DESCARGA



INSTALACION SONO-TRAK



USO DE SONDA
ELECTRICA: NE,ND

MULTÍMETRO

OBTENCIÓN DE DATOS
ELÉCTRICOS MULTÍMETRO.

SONO-TRAK



Figura 17. Equipo de trabajo y materiales utilizados en la evaluación del pozo 2050