

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIAS
ELECTROMECAÁNICA E HIDRÁULICA EN LA EXTRACCIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS.**

POR

JOSÉ CARLOS CHÁVEZ ORTIZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

FEBRERO DE 2006.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIAS
ELECTROMECAÁNICA E HIDRÁULICA EN LA EXTRACCIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS.

POR
JOSÉ CARLOS CHÁVEZ ORTIZ

TESIS, que se somete a consideración del comité asesor, como requisito parcial
para obtener el título de

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

ASESOR PRINCIPAL:



MC. ABEL ROMÁN LÓPEZ

ASESOR PRINCIPAL:



Ph D. MARCO ANTONIO INZUNZA IBARRA

ASESOR:



Ph D. VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA

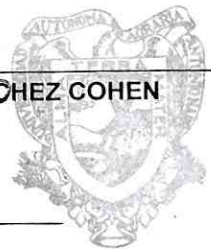
ASESOR:



Ph D. IGNACIO SÁNCHEZ COHEN

MC. JOSÉ JAIME LOZANO GARCÍA

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

Continuación de la División
de Carreras Agronómicas
FEBRERO DE 2006.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TESIS QUE PRESENTA EL C. JOSÉ CARLOS CHÁVEZ ORTIZ Y QUE SE SOMETE
A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR, COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR

PRESIDENTE DEL JURADO:



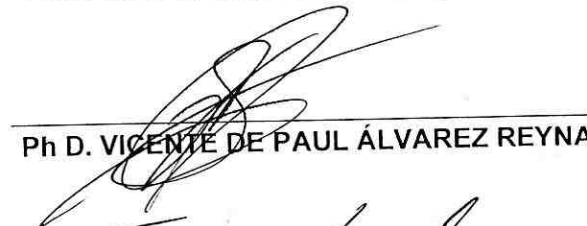
MC. ABEL ROMÁN LÓPEZ

VOCAL:



Ph D. MARCO ANTONIO INZUNZA IBARRA

VOCAL:



Ph D. VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA

VOCAL SUPLENTE:



MC. FEDERICO VEGA SOTELO



MC. JOSÉ JAIME LOZANO GARCÍA

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas
FEBRERO 2006.

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DEDICATORIAS

A DIOS

Por permitirme vivir y llegar a este momento, por ser mi refugio y mi fuerza ante los problemas, y porque a través de él he aprendido que los sueños de ayer, son las esperanzas de hoy que pueden convertirse en realidad mañana.

A MIS PADRES

Rosavelia Ortiz Ibarra

y

Luciano Chávez Franco

Porque ahora estoy finalizando una etapa más de mi vida, agradezco la confianza que han depositado en mi, el apoyo al compartir logros y tropiezos sin pedir nada a cambio, y el esfuerzo que han realizado durante toda mi vida, para que por fin llegara este momento.

AGRADECIMIENTOS

Han sido muchas las personas a quienes debo agradecerles el apoyo que recibí durante mi formación profesional.

AI COECYT.-

Por el apoyo económico que me brindaron para la realización de esta tesis como trabajo final de mi carrera profesional.

AI CENID-RASPA.-

Porque con la ayuda de su personal, equipo e instalaciones se me facilitó en gran parte el trabajo teórico y práctico para concluir mi tesis con éxito.

Al mi asesor principal.-

MC. Abel Román López, por haber sido mi principal guía durante la realización de la tesis y por el tiempo e interés que le dedicó a este trabajo para lograr que terminara satisfactoriamente.

Al Ph. D. Marco Antonio Inzunza Ibarra

Por su apoyo e importante ayuda que recibí de él en la realización del presente trabajo.

Al Ph. D. Vicente de Paul Álvarez Reyna

Por el apoyo tan valioso que recibí de él, durante la realización de este trabajo y le agradezco su importante ayuda durante toda mi carrera profesional.

Al MC. Federico Vega Sotelo

Por haber sido mi maestro y por el gran apoyo que recibí de él durante mi carrera profesional.

Al Ph. D. Ignacio Sánchez Cohen

Por pertenecer al grupo de asesores que contribuyeron y aportaron parte de sus conocimientos para que esta tesis sea una investigación útil.

A mi ALMA MATER.-

Porque con su sistema de trabajo, aprendí que en la UAAAN, la mente y la fuerza unidas tienen un solo fin: el amor a la madre tierra.

A mis profesores.-

No solo por ayudarme a desarrollar habilidades y capacitarme como Ingeniero Agrónomo en Irrigación, sino también, por la amistad que me brindaron durante mi carrera profesional.

Al departamento de Riego y Drenaje.-

Porque fue una parte importante durante mi etapa de estudiante. A todas y cada una de las personas que forman parte de este departamento; gracias.

A mis compañeros universitarios.-

Aimer Alain, Amín Oscar, Domitilo, Genaro, Héctor Armando, Jesús Antonio, Martini, Oscar Manuel y Sergio Alberto. Por el compañerismo y la amistad que recibí de ellos incondicionalmente, y por sus consejos para encontrar la forma de enfrentar los retos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA
Dedicatorias.....	i
Agradecimientos.....	ii
Índice de contenido.....	iv
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Cuadros.....	viii
Resumen.....	ix
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.....	10
6.1.4. Curvas de operación.....	12
6.2. Hidráulica del pozo.....	12
6.2.1. Ecuación de Abatimiento del Pozo.....	14
6.2.2. Eficiencia Hidráulica.....	16
6.2.3. Curvas características del pozo profundo.....	19

6.2.3.1. Curvas características en ausencia de pérdidas en el pozo.-----	19
6.2.3.2. Curvas características en pozos profundos.-----	20
VII. MATERIALES Y MÉTODOS.-----	22
7.1. La Comarca Lagunera como área de estudio.-----	22
7.2. Localización geográfica.-----	22
7.3. Características climáticas.-----	23
7.4. Fuentes de abastecimiento de Agua en la Comarca Lagunera.-----	24
7.5. Acuíferos de la Región Lagunera.-----	25
7.6. Pruebas de bombeo.-----	27
7.7. Eficiencia electromecánica.-----	27
7.8. Curvas características electromecánicas del equipamiento.-----	28
7.9. Hidráulica de pozos.-----	28
7.10. Ecuación de Kasenow.-----	29
7.11. Ecuación de Jacob-Kasenow.-----	30
7.12. Método de Bierschenk usando análisis de la regresión.-----	30
7.13. Curvas características del pozo.-----	31
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.-----	32
8.1. Análisis simple de tendencias.-----	33
8.2. Análisis de curvas características.-----	39
IX. CONCLUSIONES.-----	46
X. BIBLIOGRAFÍA.-----	47
XI. APÉNDICE.-----	49

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Bomba de pozo profundo con motor externo donde se pueden observar las variables para evaluar las eficiencias electromecánica del equipamiento e hidráulica del pozo.--	13
Figura 2 Tipos de curvas características de pozos. -----	21
Figura 3 Localización de la Comarca Lagunera dentro de un contexto nacional.-----	22
Figura 4 Localización de la Comarca Lagunera.-----	23
Figura 5 Localización de los acuíferos de la Región Lagunera (CNA, 1994).-----	25
Figura 6 Tendencia de la sub y sobreestimación de las ecuaciones de abatimiento en el pozo 3320.-----	37
Figura 7 Tendencia de la sub y sobreestimación de las ecuaciones de abatimiento en el pozo 3320.-----	38
Figura 8 Tendencia de la sub y sobreestimación de las ecuaciones de abatimiento en el pozo 343.-----	38
Figura 9 Curva característica electromecánica del equipamiento del pozo 1942.-----	39
Figura 10 Curva característica electromecánica del equipamiento del pozo 2993.-----	40
Figura 11 Curva característica electromecánica del equipamiento del pozo 3320.-----	40
Figura 12 Curva característica hidráulica del pozo #2993, con comportamiento de acuífero libre sin pérdidas en el pozo.-	41
Figura 13 Curva característica hidráulica del pozo #3320, con comportamiento de un acuífero cautivo con características cambiantes durante los ensayos.-----	42

Figura 14	Curva característica hidráulica del pozo #1463, con comportamiento de un acuífero cautivo con pérdidas no lineales en el pozo.-----	42
Figura 15	Curva característica hidráulica del pozo #1942, con comportamiento de un acuífero cautivo con características cambiantes durante los ensayos.-----	43
Figura 16	Curva característica electromecánica del equipamiento al arranque del pozo 3320.-----	44
Figura 17	Curva característica hidráulica del pozo al arranque en el pozo 3320.-----	45

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1a Pérdidas por fricción en la columna. Pérdidas de carga por fricción en la columna de bombas tipo turbina con motor externo eléctrico vertical.-----	8
Cuadro 1b Pérdidas de carga por fricción en la columna de bombas tipo turbina con motor externo eléctrico vertical.-----	9
Cuadro 2 Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo con motor externo para pozo profundo en operación.-----	10
Cuadro 3 Valores de referencia para la eficiencia de la bomba sumergible-----	11
Cuadro 4 Valores de referencia para la eficiencia del motor sumergible.-----	11
Cuadro 5 Valores del coeficiente (C) de perdidas de carga hidráulica de pozos profundos-----	16
Cuadro 6 Características de los acuíferos de Región Lagunera en 1994.-----	26
Cuadro 7 Resumen general de la información obtenida del estudio en los pozos profundos evaluados.-----	32
Cuadro 8 Expresiones de abatimiento del nivel de bombeo, obtenidas de los pozos profundos muestreados.-----	34
Cuadro 9 Análisis de los porcentajes de desviación del abatimiento teórico de los pozos: 3320, 343, 2993, 1942 y 1463 de las diferentes ecuaciones con el abatimiento real.-----	35

RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito principal integrar una metodología que permita hacer estudios completos que proporcionen datos lo mas confiablemente posible de los sistemas de extracción de aguas subterráneas, tanto del equipamiento como del pozo profundo; para el primero, el parámetro a determinar fue la eficiencia electromecánica (η_{em}) y para el segundo la eficiencia hidráulica del pozo (η_{hp}).

Los sujetos principales de estudio fueron los pozos que se encuentran dentro del acuífero principal de la Comarca Lagunera, donde existe una (η_{em}) en promedio del 40 por ciento la cual se encuentra por debajo de las mínimas recomendadas por la Normas Oficiales Mexicanas. Lo anterior es debido al abatimiento que sufren año con año los niveles de bombeo causado a su vez por la sobre explotación que existe en dicho acuífero. Se genero una "curva característica de eficiencia electromecánica del equipamiento del pozo" las cuales proporcionan información útil y práctica sobre la variación de la eficiencia electromecánica y potencia eléctrica requerida a distintos caudales de extracción

En cuanto a la (η_{hp}) de los pozos muestreados en el acuífero ya antes mencionado, primeramente se obtuvieron las ecuaciones de abatimiento del pozo profundo con tres métodos, propuestas que son: Kasenow, Jacob-Kasenow y Bierschenk. Siendo este último en el que se encontró mediante un análisis simple de tendencias mayor poder de predicción además de ser práctica, sencilla y sus resultados lo mas próximo a lo real. Contando ya con la ecuación de abatimiento de cada uno de los pozos, se estimó su eficiencia encontrando una media general del 88.5%, la cual se considera aceptable de acuerdo al 90% que se sugiere como idónea. Con la misma ecuación aceptable, se realizaron las curvas características de los pozos obteniendo resultados como; tipo de acuífero en el que se encuentran los pozos, capacidad de extracción de más caudal, además de ofrecer un diagnóstico general del funcionamiento del pozo.

I. INTRODUCCIÓN

El bombeo del agua Subterránea necesaria para el riego de los cultivos se efectúa con una bomba centrífuga vertical o de turbina ya sea de motor interno o externo. El agua debe ser elevada, transportada o presurizada, para lo cual se requiere de energía para llevar a cabo dicho trabajo. Muchas fuentes de agua para riego tienen suficiente energía potencial debido a su posición con respecto al punto donde se utiliza. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de riego deben utilizar agua de fuentes subterráneas mediante pozos de bombeo los cuales tienen cero ó energía potencial negativa. Así, donde esto ocurre, es necesario el uso de bombas como fuentes de energía. El pozo construido para fines de riego, es la vía de acceso hasta el agua subterránea y la bomba el instrumento o medio para llevarla hasta la superficie del suelo o hasta el área de cultivo según sea el sistema de riego establecido.

El abatimiento de los niveles de bombeo en algunos acuíferos del país está en continuo aumento, 80 de los 188 acuíferos mas importantes, que abastecen el 66 por ciento del agua que se utiliza en el país, y en los que se capta el 79 por ciento de la recarga de agua subterránea, se encuentran sobreexplotados. Tan solo en la Región Hidrológica VII Cuencas Centrales del Norte (CNA) que abarca parte de los estados de Coahuila, Durango, Nuevo León, Tamaulipas, Zacatecas y San Luis Potosí, donde se encuentra la Comarca Lagunera existen 26 acuíferos sobreexplotados de un total de 64, representando un 40 por ciento los sobreexplotados en dicha región. Estudios realizados desde los años 90's han obtenido eficiencias electromecánicas de los equipos de bombeo muy por debajo de los valores mínimos recomendados por las Normas Oficiales Mexicanas. Además, aunado al problema del abatimiento inminente antes mencionado, la infraestructura instalada en casi un 80% requiere de acciones de rehabilitación, todo esto pone de manifiesto que se requiere de la evaluación de la eficiencia hidráulica en las obras de toma subterráneas para proporcionar un diagnóstico integral del proceso de extracción del agua subterránea; el 20% del equipo restante requiere de reposición.

Por lo anterior, en la región lagunera se tienen acciones o programas de apoyo gubernamentales para la rehabilitación y/o reposición de pozos ineficientes o caducos. En el primero de los casos, la eficiencia electromecánica es el parámetro indicador de dicha acción, la que en la mayoría de los casos mejora al equipamiento pero no la fuente de extracción de agua, por tal motivo, se requiere de una metodología integral, que permita diagnosticar las acciones para corregir tanto el equipamiento como al pozo profundo.

II. JUSTIFICACIÓN

La evaluación de la eficiencia electromecánica es una acción común y necesaria principalmente en acuíferos sobre explotados. Generalmente la eficiencia hidráulica del pozo es ignorada por los técnicos que proporcionan este servicio, sin embargo debe ser evaluada simultáneamente con la electromecánica, reforzando el estudio. Además debe completar el estudio con información sobre las condiciones constructivas y operativas del pozo, así como del abatimiento del acuífero.

En 1996 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) mediante un estudio de eficiencias electromecánicas en pozos de la Región Lagunera concluyó que debe reducirse el consumo de energía eléctrica general de 809 GWH/año, de los 2313 pozos en operación al 50 por ciento, y que las eficiencias electromecánicas de los pozos deben incrementarse al menos al 60 por ciento. Esto significa incrementar dicha eficiencia al doble del promedio a la cual operan en forma general.

Por otra parte, las Normas Oficiales Mexicanas, NOM-006-ENER-1995 y NOM-010-ENER-1996, determinan los valores mínimos requeridos de estas eficiencias para bombas con motor externo y sumergible respectivamente. Además establecen los requerimientos e instrumentación recomendada para una buena evaluación.

Las eficiencias de extracción mencionadas deben determinarse, y compaginarse con las eficiencias de riego, para que de manera integral proporcionen un mejor diagnóstico para el mejoramiento de los sistemas de producción agrícola. Con este enfoque y dentro del marco del proyecto "Incremento en la eficiencia del uso de agua de riego en regiones agrícolas con incertidumbre climática" del INIFAP, CENID-RASPA se incluye este trabajo titulado "Metodologías para la evaluación de eficiencias electromecánica e hidráulica en la extracción de aguas subterráneas".

III. OBJETIVOS

1. Demostrar que las metodologías utilizadas en la determinación de las eficiencias electromecánica e hidráulica indican las condiciones operativas del pozo y de la bomba.
2. Demostrar al productor cómo debe trabajar su bomba conforme a normas y procedimientos reglamentarios para optimizar el funcionamiento de su equipo, y de la fuente de abastecimiento de agua.
3. Definir las condiciones constructivas e hidráulicas del pozo en base a su eficiencia hidráulica.

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 de pozos profundos, y permite deducir las acciones requeridas para el mejoramiento de operación y rehabilitación del equipo electromecánico y del pozo.

VI. REVISIÓN DE LITERATURA

6.1. Eficiencia electromecánica

La eficiencia electromecánica la Norma Oficial Mexicana NOM-006-ENER-1995, la expresa como eficiencia total (η_{em}) y la 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. Su expresión de cálculo es análoga a las indicadas por Peña y Arrequín (1989) y Herrera et al (1998).

$$\eta_{em} = \frac{P_s}{P_e} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

η_{em} = Eficiencia electromecánica (%),

P_s = Potencia de salida de la bomba (kw),

P_e = Potencia de entrada al motor (kw).

6.1.1. Potencia de entrada

La potencia de entrada al motor (P_e) es la potencia en watt (1000 watts = 1 kw), que requiere el motor eléctrico acoplado a la bomba. Para motores trifásicos se define como:

$$P_e = \sqrt{3} VI PF \quad (2)$$

Donde:

V = Tensión eléctrica (volt),

I = Corriente eléctrica (Amper),

PF o $\cos \varphi$ = Factor de potencia, (adimensional).

La potencia de entrada al motor (P_e), es la potencia, en Kilowatt (Kw), que requiere el motor eléctrico acoplado a la bomba en operación normal. Para 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 Watthorímetro que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) instala. Ambos métodos de estimación son ampliamente explicados por Herrera *et al.* (1998). Es recomendable usar un instrumento de mediciones eléctricas, existen varios uno de ellos conocido como "Medidor de potencia TRMS", proporciona los parámetros que realmente están ocurriendo al momento de la evaluación 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 el (FP) disminuye y por consecuencia provoca un bajo valor de eficiencia electromecánica. Una relación entre ambos es proporcionada de manera gráfica por Montes (s/f), y se resume en la ecuación potencial (3) obtenida con el análisis de regresión

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

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 desfaseamiento 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. Su expresión matemática se expresa en la ecuación (4).

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

Donde:

Q = Caudal (LPS),

CTD = Carga Total Dinámica = nivel dinámico de bombeo + pérdidas de carga por fricción en las tuberías + pérdidas de carga en las conexiones de tuberías desde la entrada del agua en el sub-suelo hasta la salida. En metros de columna de agua (m),

102 = Valor de conversión para obtener unidades de (kw).

Para la estimación de las pérdidas en la columna de bombeo en equipamientos con motor externo se recurre al Cuadro (1a y 1b).

Cuadro 1a. 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 gpm).

Diámetro de columna		4"		6"				8"				10"	
Diámetro de flecha (pulgada)		1	1 1/4	1	1 1/4	1 1/2 1 11/16	1 15/16	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												
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			0,90	1,20	1,80	
500	31,54			3,70	4,90	6,90	11,50		0,90	1,10	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	11,0		1,20	1,50	1,80	2,40	3,50	
700	44,16			6,80	9,00	0		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 1b. Pérdidas de carga por fricción en la columna de bombas tipo turbina con motor externo eléctrico vertical.

En metro por cada 100 metros o en pie por cada 100 pies. Para gastos de 50,46 a 315,40 lps (800 a 5000 gpm).

Columna		6"		8"				10"					12"							
Flecha (pulgada)		1	1 1/4	1 1/2	1 15/16	2 3/16	2 7/16	1	1 1/4	1 1/2	1 15/16	2 3/16	2 7/16	2 11/16	1	1 1/2	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					0,90	1,30							
900	56,77	10,70	2,50	2,70	3,20	4,50	6,40				1,00	1,20	1,60							
1000	63,08		3,00	3,20	3,90	5,40	7,80			1,00	1,20	1,40	1,90							
1100	69,39		3,50	3,80	4,60	6,40	9,40		1,00	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	1,40	
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			

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 Cuadros 2, 3 y 4.

Cuadro 2. Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo con motor externo para pozo profundo en operación. (Fuente: Norma Oficial Mexicana 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 - 360	64

Cuadro 3. Valores de referencia para la eficiencia de la bomba sumergible (Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-010-ENER-1996)

Capacidad de la bomba (LPS)	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 4. Valores de referencia para la eficiencia del motor sumergible (Fuente: Norma Oficial Mexicana 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

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.

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. HIDRÁULICA DEL POZO

Otro parámetro que se debiera 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.

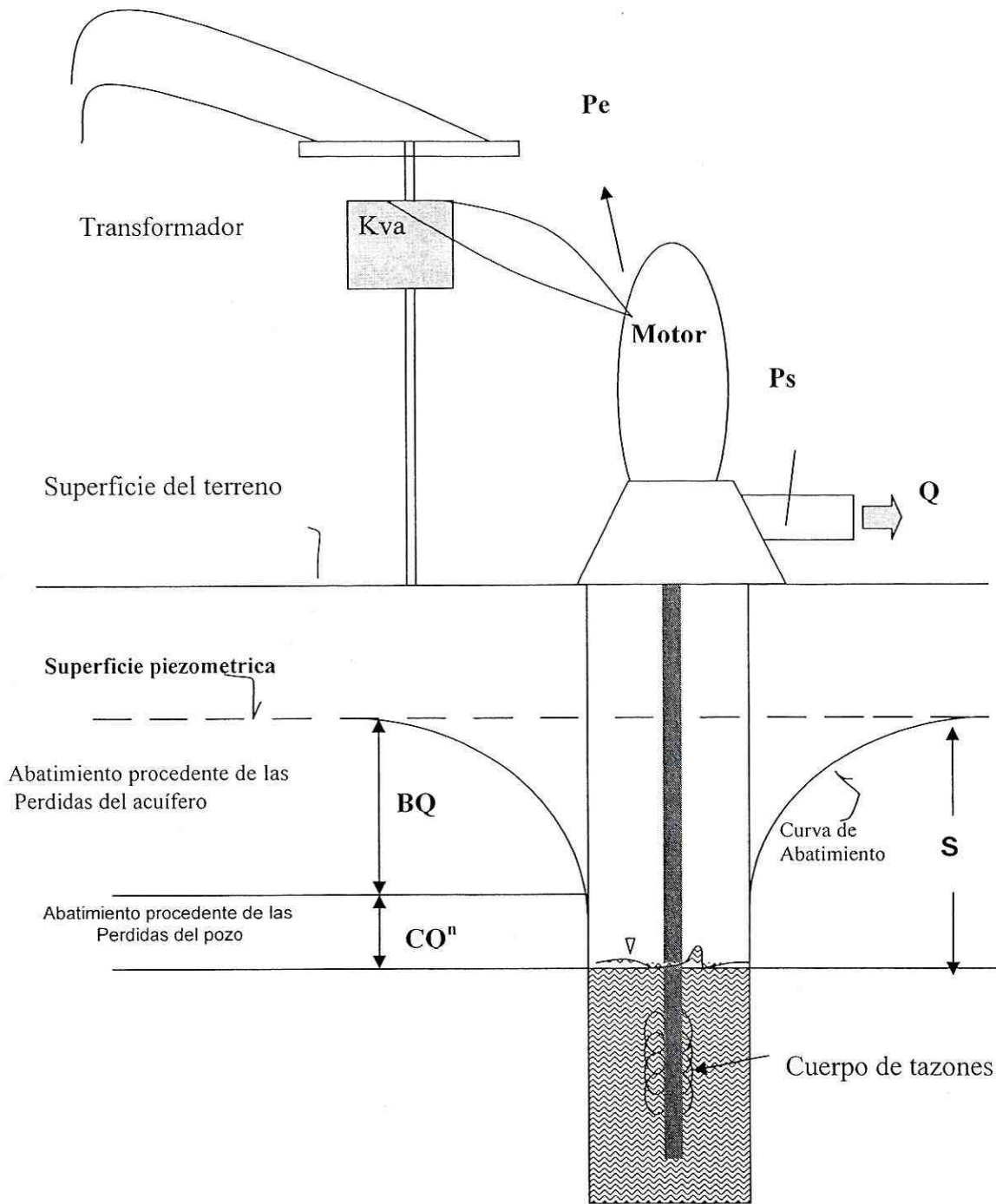


Figura 1. Bomba de pozo profundo con motor externo donde se pueden observar las variables para evaluar las eficiencias electromecánica del equipamiento e hidráulica del pozo.

6.2.1. Ecuación de Abatimiento del Pozo

Según Jacob (1947) citado por Peña y Arrequín (1989), la pérdida de carga debida al acuífero se puede calcular de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$a_t = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (5)$$

Donde:

a_t = abatimiento teórico ocurrido en el acuífero (m),

T = transmisividad ($m^2 \text{ día}^{-1}$),

t = tiempo a partir de iniciado el bombeo (hr),

r = radio del pozo (m),

S = coeficiente de almacenamiento (adimensional).

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 Arrequín (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:

$$S_t = BQ + CQ^n \quad (6)$$

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 ($m \text{ LPS}^{-1}$),

C = Coeficiente de pérdidas en el pozo ($m \text{ LPS}^{-2}$),

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 así 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 ($m^3 \text{dia}^{-1}$) 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 ultimo 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 5 se proporcionan valores para C que indican como regla operativa las condiciones hidráulicas del pozo y la decisión de rehabilitación, se presenta el criterio de Walton reportado por Custodio (1976) con valor de C en ($\text{dia}^2 \text{m}^{-5}$), también puede obtenerse en (ft gpm^{-2}) reportado por Kasenow (2001). En el mismo Cuadro 5 las unidades (m LPS^{-2}) fueron utilizadas por un algoritmo propuesto en su obtención en el los Apéndices A3, A4 y A5, con los cuales se construyeron las curvas características hidráulicas del pozo, tal situación es por facilitar durante el proceso unidades comunes (m y LPS).

00108

Cuadro 5. Valores del coeficiente (C) de perdidas de carga hidráulica de pozos profundos Según Walton reportados por Custodio (1976) y Kasenow (2001).

C (m LPS ⁻²)	C (ft gpm ⁻²)	C (dia ² m ⁻⁵)	Condiciones constructivas del pozo
<1.87E-03	<2.44E-05	<2.5E-07	Pozo bien construido y bien desarrollado.
1.87E-03 a 0.03732	2.45E-05 a 4.87E-04	2.5E-07 a 50E-7	Principios de incrustaciones en rejillas.
0.03732 a 0.149299	4.87E-04 a 1.95E-03	50E-07 a 200E-07	Pozo con incrustaciones o taponamientos en las rejillas, requiere rehabilitación.
>0.149299	>1.95E-03	>200E-07	Incrustaciones fuertes, pozos de difícil o imposible rehabilitación.

6.2.2. Eficiencia Hidráulica.

Una vez teniendo la ecuación de abatimiento se puede determinar la eficiencia hidráulica del pozo mediante la ecuación (7):

$$\eta_h = \frac{BQ}{BQ + CQ^n} \quad (7)$$

Debido a que esta expresión falla en pozos bajo condiciones muy cambiantes, por lo que se recurre a las expresiones dadas por Custodio (1976), la cual se citan en la ecuación (8).

$$\eta_h = \frac{S_t}{S_r} = \frac{Q_{er}}{Q_{et}} \quad (8)$$

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}).

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. Por el contrario, en acuíferos muy permeables, la eficiencia puede ser baja si el pozo no ha sido construido muy cuidadosamente y/o no ha sido bien desarrollado. No deben compararse eficiencias de pozos en acuíferos diferentes.

La comprobación sistemática de la eficiencia hidráulica de un pozo puede mostrar efectos de incrustación y corrosión, señalando la necesidad de un mantenimiento preventivo.

Un pozo que en el ensayo escalonado muestra una reducción de caudal específico no superior al 10% puede considerarse bien calculado y desarrollado (Custodio 1976), bajo la siguiente premisa se puede concluir que un valor de 90 % de eficiencia hidráulica puede ser idóneo.

Si hay un intensivo desarrollo o un macizo de grava, puede suceder a veces que el descenso observado sea menor que el descenso calculado, originando que la eficiencia sea algo mayor que 1.

Cruickshank (1976) citado por Peña y Arrequín (1989), menciona que la eficiencia hidráulica del pozo determinada en esta forma es función tanto de las características constructivas del pozo como de las propiedades físicas y condiciones hidráulicas del acuífero. Además es afectada por la relación de permeabilidades entre el acuífero y el filtro de grava. De tal manera Peña y Arrequín (1989) en base a lo citado por este autor mencionan que es posible obtener mayores eficiencias hidráulicas en pozos localizados en acuíferos con permeabilidades altas. Por esta razón no se puede hablar de eficiencias hidráulicas en forma general, ya que éstas dependen de las características propias de cada zona o acuífero.

Si el caudal específico disminuye, significa que han aumentado las pérdidas en el pozo y, por lo tanto, requiere de mantenimiento. Este consiste básicamente de una limpieza de su área de admisión. Este método considera que en condiciones iniciales el pozo tiene el mas alto rendimiento, consideración que no siempre es cierta, debido a limpiezas o desarrollo deficiente. En su aplicación conviene realizar las mediciones de caudal y abatimiento a un tiempo igual de iniciado el bombeo, con el fin de tomar en cuenta los efectos del tiempo en régimen transitorio.

6.2.3.2. Curvas características en pozos profundos.

En los pozos profundos deben contemplarse también las pérdidas en el pozo tal y como han sido citadas anteriormente por la ecuación (6).

Si el pozo está en un acuífero cautivo ya se ha expuesto el significado de B y C. Si el acuífero es libre también es posible ajustar una ecuación similar, pero en este caso C incluye pérdidas en el pozo y pérdidas por circulación en la formación, y el valor de B es más difícil de interpretar.

La estimación de los términos anteriores se hace mediante una prueba escalonada a caudales variables y en un mínimo de tres etapas, ya que hay tres incógnitas: B, C y, n. En el parámetro C se detectan problemas como: falta de desarrollo al pozo e incrustaciones en el ademe. Este diagnóstico indica el tipo de adecuaciones que hay que realizar para disminuir pérdidas de flujo. En este caso, el valor de (n) indica el régimen de flujo en el medio poroso en contacto con el pozo donde pasa de laminar a turbulento y se asume que en esta transición su valor tiende a 2 (Kasenow 2001).

En la Figura 2 se reúnen esquemáticamente los diferentes tipos de curvas características que pueden presentarse. Se incluye una curva errónea. Los errores de determinación de niveles o caudales, la medida de niveles ficticios o el cambio de las características del acuífero durante los ensayos (cambio del nivel inicial, bombeo de un pozo próximo, cambio del coeficiente de almacenamiento por asentamiento, desarrollo del pozo o colmatación, etc.) pueden deformar notablemente las características, haciendo falsa su interpretación. Conviene repetir alguno de los datos tomados en primer lugar al final de los ensayos para asegurar que se reproduce. No conviene tomar datos de épocas diferentes para trazar la curva ya que pueden haber cambiado las condiciones del pozo o del acuífero. (Custodio 1976).

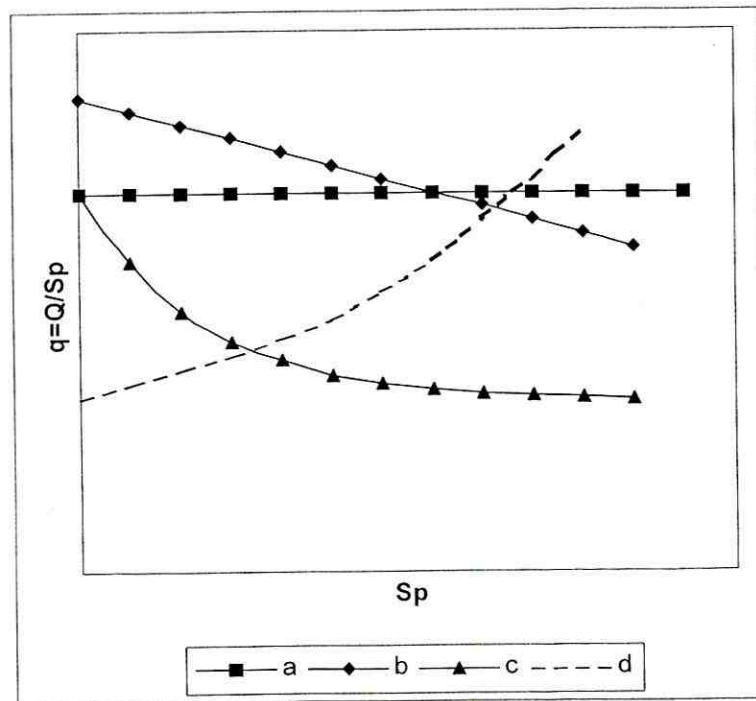
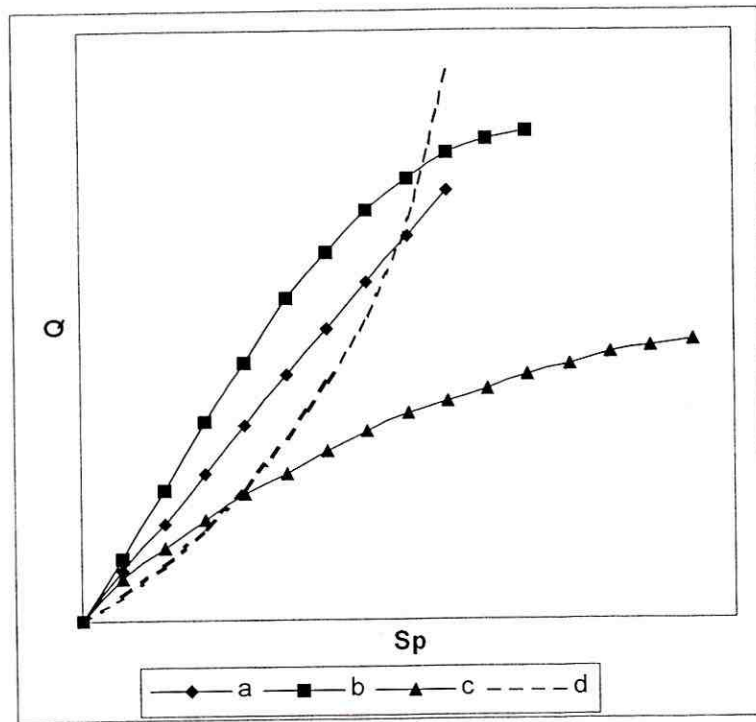


Figura 2. Tipos de curvas características de pozos. a) en acuífero sin pérdida en el pozo; b) en acuífero libre sin pérdidas en el pozo; c) con pérdidas no lineales en el pozo; d) datos mal tomados debido a ensayo defectuoso o acuífero con características cambiantes durante los ensayos.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. La Comarca Lagunera como 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 msnm, al este por la sierra madre Oriental, cuya altitud varía de 1,800 a 2,500 msnm. Estas barreras orográficas determinan el clima árido y semiárido que predominan en la Comarca Lagunera, por lo cual es de especial importancia el buen uso y manejo del agua de riego en la producción agrícola.

7.2. Localización geográfica.

La Comarca Lagunera se localiza en el altiplano central de coordenadas geográficas; entre los meridianos $102^{\circ}30'$ y $104^{\circ}48'$ de longitud oeste y los paralelos $24^{\circ}25'$ y $26^{\circ}55'$ de latitud norte.



Figura 3. Localización de la Comarca Lagunera dentro de un contexto nacional.

Adaptado de: <http://www.comarcalagunera.com/portal/laguna/comarca.php>

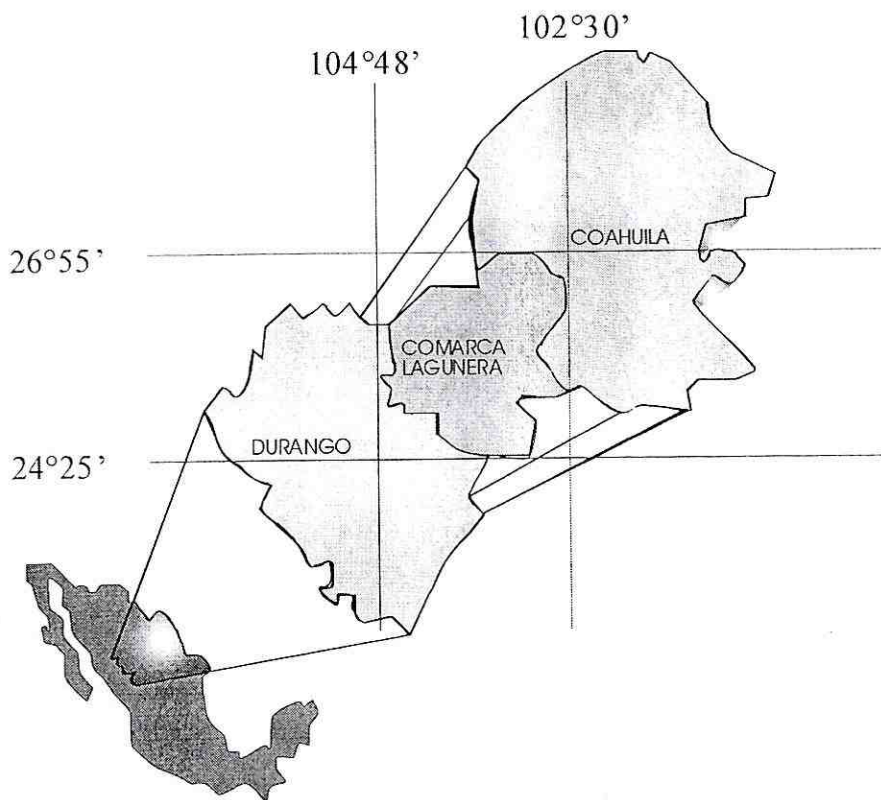


Figura 4. Localización de la Comarca Lagunera. (Modificado de Román y Sánchez, 2004).

7.3. Características climáticas

El clima, según la clasificación de Thornthwaite, es: (Edb'a) provincia de humedad (E) árida vegetación desértica, humedad deficiente en todas las estaciones, provincia de temperatura (b'') mesotérmica. Su provincia de temperatura (a) concentración en el verano entre 25 y 34 por ciento de humedad relativa. La precipitación media anual en la región oscila de los 200 a 300 mm, la cual se concentra en gran parte en los meses de agosto y septiembre.

La temperatura media anual de 20 a 22°C, existiendo temperaturas arriba de los 25°C durante los meses de mayo, junio, julio y agosto, que aunado con las máximas velocidades de viento que se presentan durante marzo y abril (mayor de 10 km hr⁻¹) provocan fuerte evaporación durante abril y mayo. En los meses de junio a octubre, la velocidad media anual del viento oscila entre 6 a 10 km hr⁻¹.

En cuanto a la evaporación anual, se estima que ocurren 2350 mm de los cuales únicamente el 9 por ciento es sustituido en forma de lluvia. Debido al efecto de las altas temperaturas, fuerte velocidad de viento y baja presencia de lluvias, se presentan los mas bajos valores (entre 35 y 40 por ciento) de humedad relativa (HR) en los meses de marzo, abril y mayo.

La Comarca Lagunera en su conjunto presenta una precipitación media anual de 215.3 mm anuales, apenas el 28 por ciento de precipitación media nacional (777 mm) y una temperatura máxima en los últimos 26 años de 28.6°C, una mínima de 12.3°C y una temperatura media de 20.4°C, con una evaporación de 2488 mm anuales, lo que se clasifica su clima como seco templado.

7.4. Fuentes de abastecimiento de Agua en la Comarca Lagunera.

Las fuentes de abastecimiento de agua en la Comarca Lagunera, son los siguientes:

1. Río Nazas, con una cuenca que tiene una superficie de 36,323 km²; una longitud de 220 km, un escurrimiento medio anual de 1,090 millones de m³ y que nace en el centro del estado de Durango. Sobre este río se localizan las presas Lázaro Cárdenas (almacenadora) y la presa Francisco Zarco (reguladora).

- Presa Lázaro Cárdenas:
Capacidad total: 4,437'578,000 m³
Volumen útil: 2,777'578,000 m³
- Presa Francisco Zarco:
Capacidad total: 438'000,000 m³
Volumen útil: 358'000,000 m³

2. El acuífero subterráneo, que representa una fuente importante para los cultivos que se establecen en invierno y parte de los de primavera-verano. La Comarca Lagunera hasta 1994, contaba con 3,007 pozos profundos, siendo la mayoría de estos operados por agricultores particulares.

- El Río Aguanaval, que tiene una cuenca con una superficie de 25,532 km², una longitud de 305 km, un escurrimiento medio de 160 millones de m³ y que nace en la sierra de Lobatos, en el municipio de Fresnillo, Zacatecas.

7.5. Acuíferos de la Región Lagunera.

La localización de los acuíferos de la región se muestran en la Figura 5. El acuífero principal abarca la mayor superficie de la comarca. Este acuífero es el más importante, ya que en el se encuentran aproximadamente 2000 pozos de uso agrícola. Es la principal fuente de abastecimiento de uso del agua doméstica para las ciudades de Torreón, Francisco I. Madero y Matamoros en el Estado de Coahuila; y de Gómez Palacio y Lerdo en el Estado de Durango.

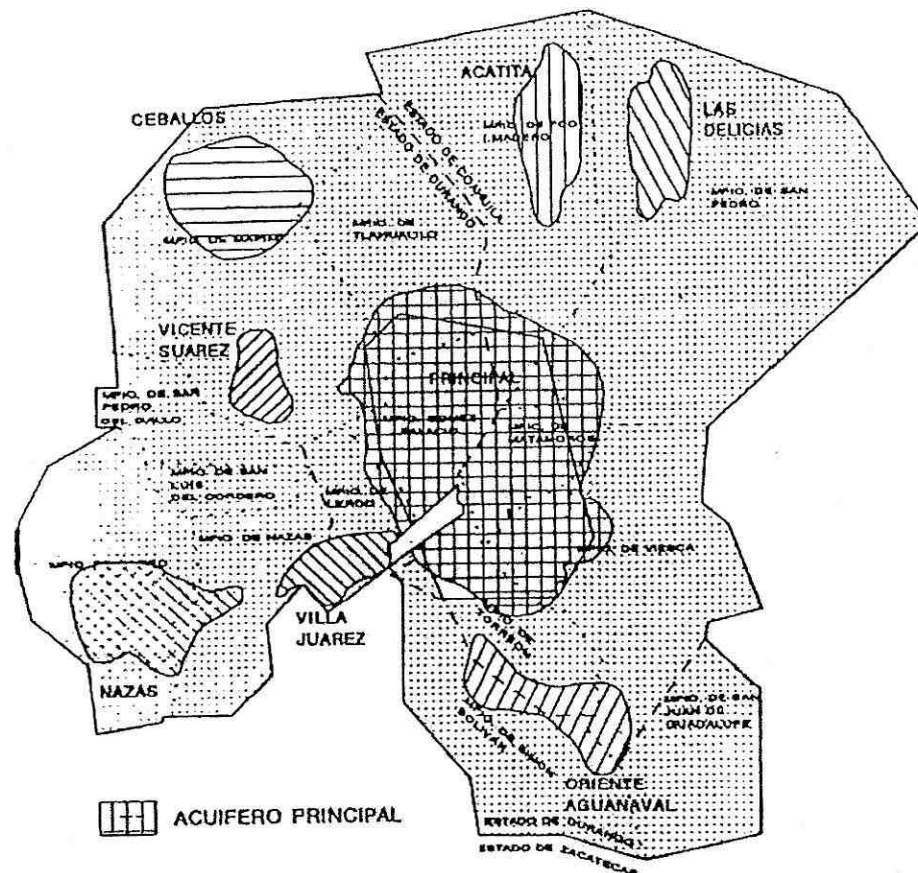


Figura 5. Localización de los acuíferos de la Región Lagunera (CNA, 1994). Fuente: Cruz y Levine 1998.

En resumen, como se presenta en el Cuadro 6, el agua subterránea está distribuida en ocho acuíferos dentro de la Región Lagunera, de los cuales cuatro están localizados en el Estado de Durango, dos en el Estado de Coahuila y dos que son comunes en ambos estados.

Cuadro 6. Características de los acuíferos de Región Lagunera en 1994. Fuente Cruz y Levine 1998.

Acuífero	Volumen extracción (Mm ³)	Volumen recarga (Mm ³)	Promedio de lluvia (mm)	Área (km ²)	Recarga como % de lluvia	Número de pozos
Principal	746	350	160	14000	16	1958
Villa Juárez	111	110	251	600	73	360
Ceballos	103	48	174	1826	6	246
Aguanaval	36	50	262	4000	5	124
Nazas	33	50	196	600	64	208
V. Suárez	13	10	130	500	15	54
Acatita	6	20	254	648	12	28
Delicias	11	30	198	1800	8	29
Suma	1057	668	215.6 (prom.)	23974	11.6	3007

7.6. Pruebas 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. Por cuestiones prácticas y de espacio se presentan en el anexo, la información de dos casos de los equipamientos estudiados (un acuífero cautivo y un libre),

7.7. Eficiencia electromecánica.

En la estimación de la eficiencia electromecánica se diseñó también un formato en hoja de cálculo en donde se abastece con datos obtenidos durante la prueba. Para dicha prueba se requirió del uso de sonda eléctrica de 300 m, cinta métrica, potenciómetro TRMS, medidor de caudal electrónico que se tienen instalados en los equipamientos. A falta de estos, se utilizó uno de molinete portátil, manómetro y el equipo de seguridad necesario para la obtención de los parámetros eléctricos.

El procedimiento utilizado en cada prueba de bombeo fue: 1). realizar un croquis de toda la instalación, 2). tomar el nivel estático (NE) del pozo que es la profundidad del agua en el pozo cuando este no se encuentra operando, 3). encender el motor eléctrico para que funcione la bomba y esperar a que el gasto (Q) se estabilice a como normalmente opera la bomba, 4). tomar los datos de Q, nivel dinámico (ND) que es el nivel del agua cuando la bomba se encuentra operando, presión en el manómetro y los parámetros eléctricos con el potenciómetro TRMS que son V, A, kw, FP, kva y kvr.

Con los datos completos de campo se procedió a estimar la P_s de la bomba mediante la ecuación 4.

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

Para la estimación de la CTD (Carga Total Dinámica) fue necesario recurrir a los datos tomados en campo de la presión del manómetro, ND y a la consulta de pérdidas en la tubería de la columna usando el Cuadro 1. Para Bombas sumergibles se empleó la expresión de Manning para la columna y en una hoja de calculo se preparó para su cálculo rápida. La Pe se obtuvo directamente con el potenciómetro en el campo. Finalmente el cálculo del parámetro η_{em} se determinó de acuerdo a la ecuación 1.

7.8. Curvas características electromecánicas del equipamiento.

Los procedimientos necesarios para la obtención de las curvas características electromecánicas del equipamiento fue la de realizar pruebas a diferentes caudales. Los parámetros obtenidos fueron el producto de las relaciones que existen entre el gasto-carga, el gasto-eficiencia (Herrera, 1998); y también se tuvo la necesidad de agregar la relación gasto-potencia activa, para así tener una mejor respuesta a distintos escenarios de operación del equipamiento. Dichas pruebas se iniciaron con la válvula totalmente abierta y se terminó con la válvula parcialmente cerrada. Este grado 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 curvas.

7.9. Hidráulica de pozos

En la determinación de las condiciones hidráulicas de los pozos se realizaron ensayos escalonados 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 4 pruebas, en cada una de ellas se tomaron los datos de Q y ND y calculando ahí mismo los abatimientos reales (S_r), los incrementos del gasto (ΔQ) e incremento en abatimiento (ΔS).

Para la determinación de la ecuación de abatimiento se emplearon las metodologías propuestas por Kasenow, Jacob-Kasenow y Bierschenk citadas por Kasenow (2001).

7.10. 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:

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

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

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).

7.11. Ecuación de Jacob-Kasenow

En la solución que propuso Jacob en 1946 (ecuación 5) no es fácil el cálculo del coeficiente B o también llamada pérdida de carga en el acuífero. La transmisividad y el coeficiente de almacenamiento deben ser conocidos para el desarrollo de esta ecuación.

Sin embargo Jacob propone una ecuación donde obtiene el valor del coeficiente C. La ecuación es la siguiente:

$$C = \frac{\frac{\Delta S_{n+1}}{\Delta Q_{n+1}} - \frac{\Delta S_n}{\Delta Q_n}}{\Delta Q_n + \Delta Q_{n+1}} \quad (13)$$

La aportación de Kasenow a esta metodología es que después que el coeficiente C ha sido bien determinado se puede obtener el coeficiente B mediante la ecuación (12).

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

7.12. Método de Bierschenk usando análisis de la regresión

El análisis de regresión puede ser aplicado al método de abatimiento por etapas de Bierschenk, este método aumenta la precisión, ya que elimina el error subjetivo en la pendiente de la recta y en la intercepción con el eje "y". La pendiente (C) y la intercepción con el eje de la "y" (B) son definidos por las ecuaciones 14, 15 y 16.

$$C = \frac{Nxy - (\sum x)(\sum y)}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (14)$$

$$B = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (15)$$

$$R = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{([N \sum x^2] - [\sum x]^2)([N \sum y^2] - [\sum y]^2)}} \quad (16)$$

Donde:

N= Etapas;

x = Velocidad de bombeo en cada etapa;

y = s/Q;

xy = s;

R = Coeficiente de correlación.

R² = Coeficiente de determinación (se obtiene elevando al cuadrado R).

7.13. Curvas características del pozo

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 la Figura 2, se obtienen conclusiones sobre el tipo de acuífero, las pérdidas hidráulicas y de la construcción del mismo. También se deduce si es un sistema de acuífero muy cambiante o estuvo mal realizado el ensayo escalonado, que permitió establecer la ecuación de abatimiento.

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 subterráneas, tanto de los equipos como de los pozos profundos. Se diagnosticó las condiciones constructivas y operativas del sistema para de esta manera poder hacer recomendaciones pertinentes a los usuarios sobre sus equipos.

El Cuadro 7 presenta un resumen general de todos los parámetros encontrados en cada uno de los diferentes pozos evaluados. También se muestran en el mismo cuadro los parámetros de eficiencia electromecánica y factor de potencia recomendados por las Normas Oficiales Mexicanas y CFE respectivamente.

Cuadro 7. Resumen general de la información obtenida del estudio en los pozos profundos evaluados.

Pozo No.	Q (l/s)	η_{em} (%)	η_{hp} (%)	FP	η_{em}	FP	Prof.	ND (m)	Long.
					RE (%)		RE		Pozo (m)
343	11	56.5	99	0.58	62	0.9	360	109.92	161.5
2993	54	52	99	0.91	60	0.9	280	95.2	106.7
347	16.24	37.82	S/D	0.87	60	0.9	S/D	74	138.6
348	8.02	15	S/D	0.8	64	0.9	360	180	195
1942	18.07	60.84	88.6	0.81	62	0.9	S/D	135	167.64
3320	5.12	34	83.4	0.67	52	0.9	300	220	252
1463	25.6	35	72.6	0.76	64	0.9	183	65.25	138

Donde:

S/D = Sin dato, η_{em} = Eficiencia electromecánica, η_{hp} = Eficiencia Hidráulica, η_{em} RE = Eficiencia electromecánica recomendada según las normas oficiales mexicanas, FP RE = Factor de potencia mínimo recomendado.

Todas las estimaciones de las η_{hp} se realizaron con la ecuación 8 propuesta por Custodio (1976).

Cuadro 8. Expresiones de abatimiento del nivel de bombeo, obtenidas de los pozos profundos muestreados.

Pozo	Metodología	Ecuación de Abatimiento	Observaciones
3320	Kasenow	$St = 0.4358Q - 0.000565Q^2$	$R^2 = 0.91$
	Jacob-Kasenow	$St = 0.2605Q - 0.00027Q^2$	
	Bierschenk	$St = 0.4572Q - 0.000767Q^2$	
343	Kasenow	$St = 0.0457Q - 2.00E-05Q^2$	$R^2 = 0.996$
	Jacob-Kasenow	$St = 0.0288Q - 5.62E-05Q^2$	
	Bierschenk	$St = 0.0478Q - 2.29E-05Q^2$	
2993	Kasenow	$St = -0.00102Q + 3.199E-07Q^2$	$R^2 = 0.04$
	Jacob-Kasenow	$St = -0.0041Q + 9.88E-07Q^2$	
	Bierschenk	$St = 0.0004Q + 9.07E-09Q^2$	
1942	Kasenow	$St = 0.00204Q + 3.759E-06Q^2$	$R^2 = 0.99$
	Jacob-Kasenow	$St = -0.0304Q + 2.433E-05Q^2$	
	Bierschenk	$St = 0.0142Q - 4.366E-05Q^2$	
1463	Kasenow	$St = -0.0079Q + 0.0001034Q^2$	$R^2 = 0.43$
	Jacob-Kasenow	$St = -0.1936Q + 0.0001112Q^2$	
	Bierschenk	$St = -0.0016Q + 1.108E-06Q^2$	

El Cuadro 9 presenta el análisis de porcentajes de desviación para cada muestra. También se muestra el promedio de cada ensayo o número de pozo con las expresiones de Bierschenk (St B), Kasenow (St K) y Jacob-Kasenow (St J-K). Del cuadro se obtiene que, dato por dato y en promedio, el modelo de (St B) es mejor esto se aprecia mas claro en las Figuras 6, 7 y 8 donde se observa su afinidad a lo real para cada ensayo de bombeo para su respectivo punto de bombeo. Esto permite recomendar el uso de tal expresión para usarse en el pronóstico de los abatimientos del nivel de bombeo en pozos profundos con la extracción del agua subterránea por el equipamiento.

Es pertinente aclarar que para los pozos #s 2993 y 1463, la expresión de (St B) presentó un bajo índice de correlación y determinación de los datos de 0.040 y 0.43, respectivamente. Se presentó la incertidumbre de su uso, sin embargo fueron usadas para extender la posibilidad de incrementar el caudal del pozo, obteniéndose buenos pronósticos que pudieron alentar al productor de la posible inversión de otro equipamiento. Estos resultados son mostrados en el diagnostico de las Figuras 12 y 14 del apartado "Curvas características hidráulicas del pozo".

Cuadro 9. Análisis de los porcentajes de desviación del abatimiento teórico de los pozos: 3320, 343, 2993, 1942 y 1463 de las diferentes ecuaciones con el abatimiento real.

POZO 3320

Qr	Sr	St K	St J-K	St B	St K - Sr	St J-K - Sr	St B - Sr
LPS	m	m	m	m	% desv.	% desv.	% desv.
1.84	57.94	45.35	34.58	53.28	-21.728	-40.311	-8.037
2.8	56.64	55.64	47.21	65.68	-1.766	-16.648	15.964
3.7	60.14	56.96	55.67	67.71	-5.291	-7.425	12.594
4	64.94	55.61	57.77	66.33	-14.373	-11.040	2.139
5.12	62.39	42.65	62.39	52.04	-31.642	0.001	-16.582
Promedio					15.0	15.1	11.1

POZO 343

Qr	Sr	St K	St J-K	St B	St K - Sr	St J-K - Sr	St B - Sr
LPS	m	m	m	m	% desv.	% desv.	% desv.
11	25.57	25.39	22.29	25.53	-0.695	-12.835	-0.165
12.84	25.72	26.12	25.03	25.91	1.554	-2.696	0.726
13.49	25.92	26.14	25.93	25.77	0.831	0.023	-0.563
Promedio					1.0	5.2	0.5

POZO 2993

Qr	Sr	St K	St J-K	St B	St K - Sr	St J-K - Sr	St B - Sr
LPS	m	m	m	m	% desv.	% desv.	% desv.
26.18	0.92	-0.73	-4.29	1.02	-179.638	-566.596	10.617
37.5	1.72	-0.07	-3.01	1.49	-104.251	-274.855	-13.578
53.6	2.04	1.88	2.09	2.18	-7.829	2.313	7.013
54	2.24	1.94	2.26	2.20	-13.214	1.009	-1.749
Promedio					76.2	211.2	6.6

POZO 1942

Qr	Sr	St K	St J-K	St B	St K - Sr	St J-K - Sr	St B - Sr
LPS	m	m	m	m	% desv.	% desv.	% desv.
9.1	9.10	3.93	-8.89	8.43	-56.769	-197.643	-7.366
12.94	12.94	6.99	-3.61	10.37	-45.979	-127.870	-19.884
17.89	17.89	12.15	11.10	11.45	-32.069	-37.929	-36.021
18.07	18.07	12.37	11.81	11.45	-31.563	-34.658	-36.608
Promedio					33.3	79.6	20.0

POZO 1463

Qr	Sr	St K	St J-K	St B	St K - Sr	St J-K - Sr	St B - Sr
LPS	m	m	m	m	% desv.	% desv.	% desv.
25.6	2.25	2.27	115.97	1.83	0.944	5054.384	-18.672
24.6	2.00	1.44	91.02	1.55	-28.020	4451.025	-22.289
24.3	0.95	1.20	83.86	1.47	26.513	8727.192	55.239
23.9	0.90	0.89	74.54	1.37	-0.735	8182.359	52.349
22.4	0.80	-0.18	41.97	1.01	-122.176	5146.024	25.776
20.19	0.78	-1.51	0.78	0.54	-293.260	0.531	-31.206
Promedio					78.6081	5260.2524	34.2551

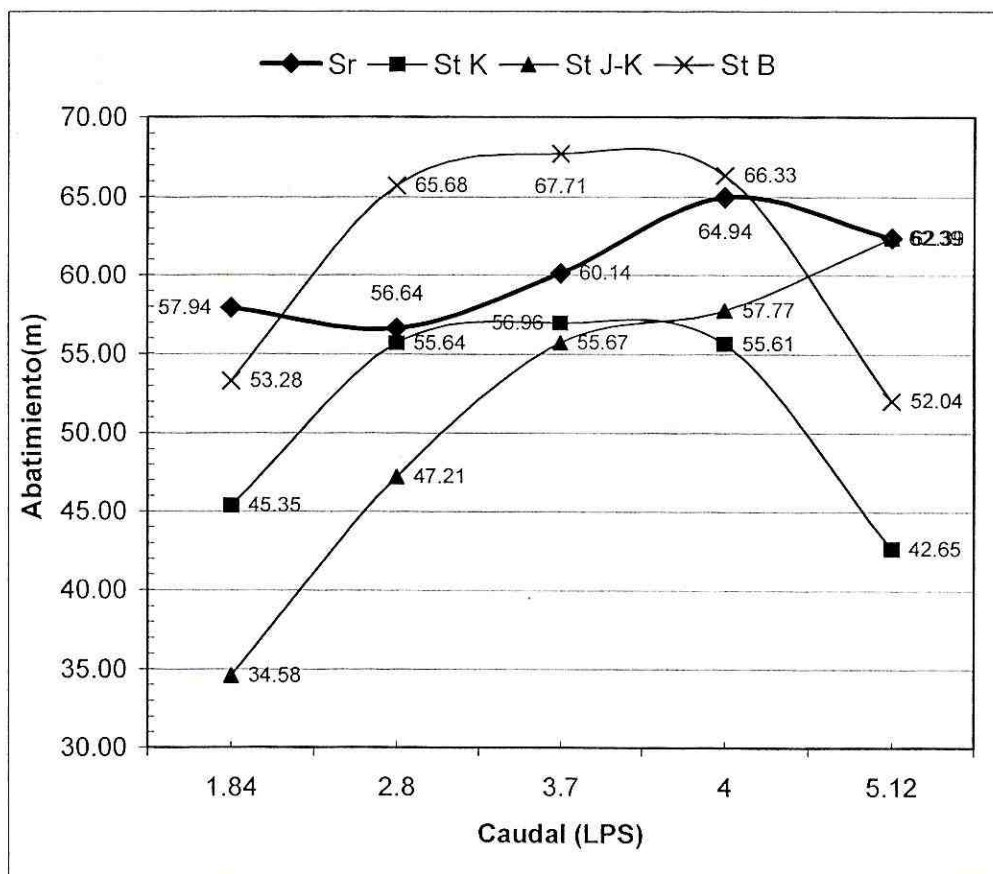


Figura 6. Tendencia de la sub y sobreestimación de las ecuaciones de abatimiento en el pozo 3320.

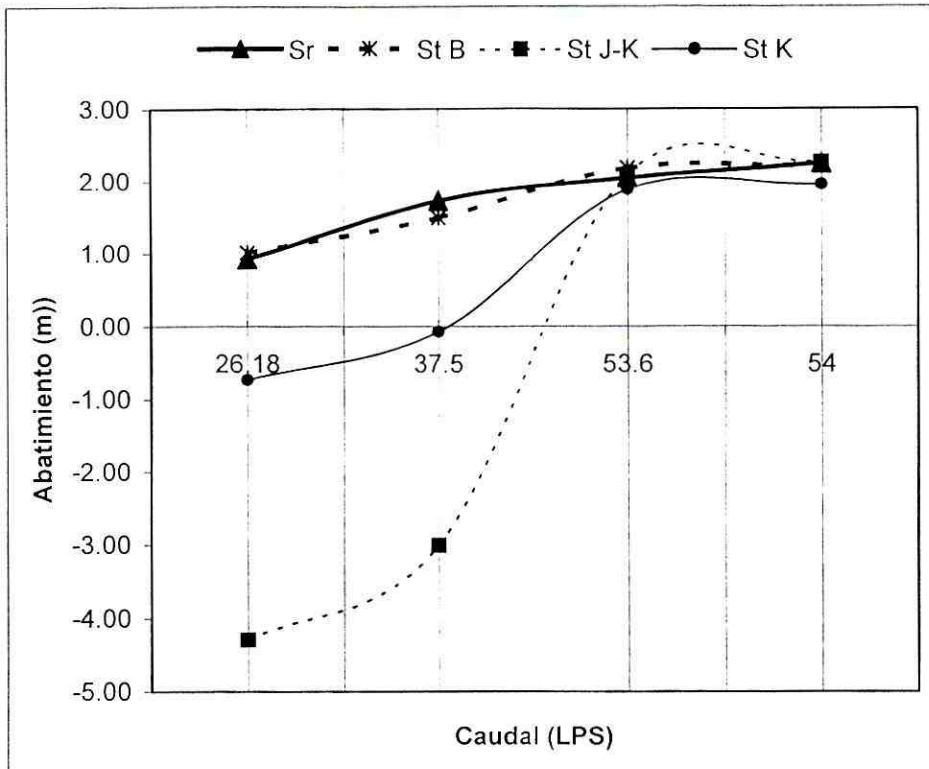


Figura 7. Tendencia de la sub y sobreestimación de las ecuaciones de abatimiento en el pozo 2993.

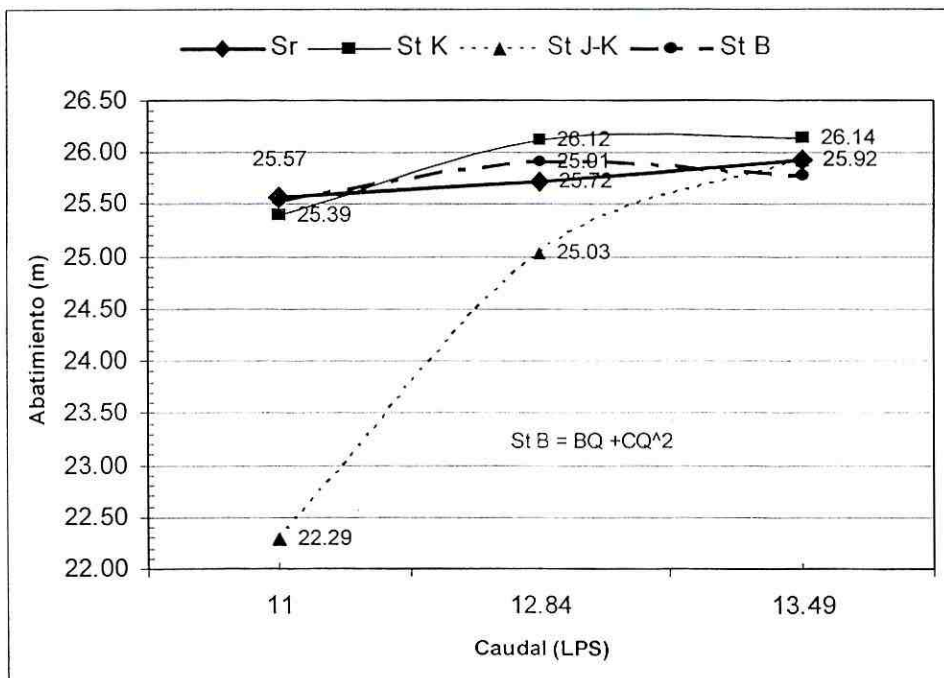


Figura 8. Tendencia de la sub y sobreestimación de las ecuaciones de abatimiento en el pozo 343.

8.2. Análisis de curvas características.

En este apartado se hace un análisis de la respuesta del equipamiento (conjunto Bomba-motor) y de la hidráulica del pozo, de cinco equipamientos seleccionados de los estudiados. La finalidad fue proporcionar información integral sobre las condiciones operativas de los mismos. Se ha denominado a la del equipamiento como "Curva característica electromecánica del equipamiento del pozo" y "Curva Característica del pozo ". La primera da información sobre la eficiencia electromecánica a distintas condiciones operativas de extracción del agua y la segunda sobre la respuesta hidráulica del pozo en la que se obtiene información sobre las condiciones del tipo de acuífero ya sea libre o cautivo, así como la estabilidad del mismo.

8.2.1. Curvas características electromecánicas del equipamiento.

En las siguientes Figuras 9, 10 y 11 se presentan las curvas características se representan las relaciones $(Q-\eta_{em})$, $(Q-CTD)$ y $(Q-Pot. Act.)$ que existen en los pozos muestreados.

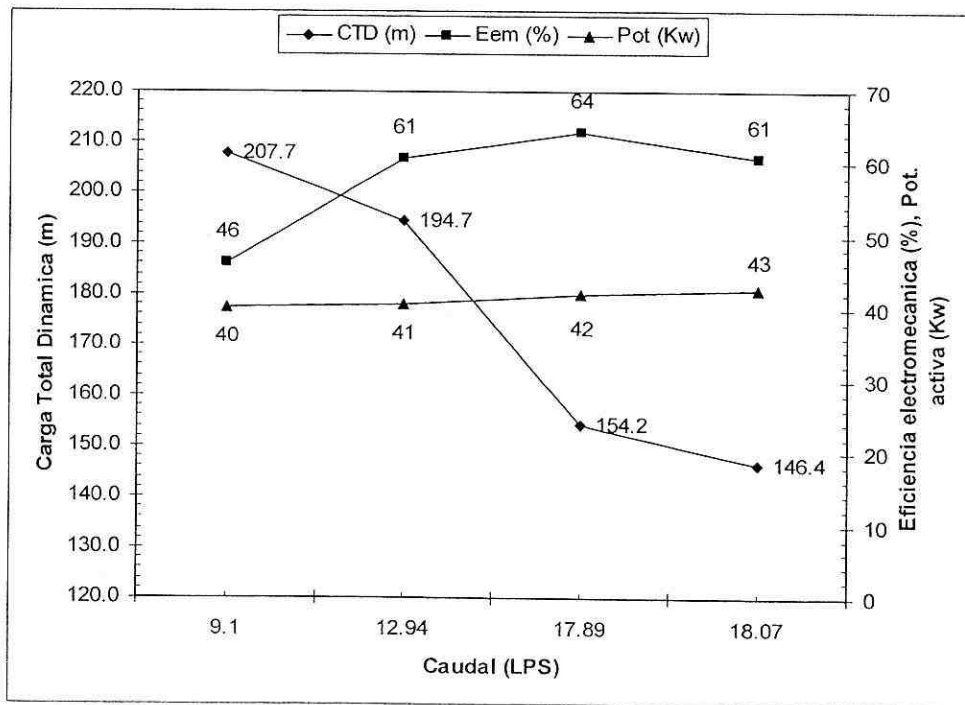


Figura 9. Curva característica electromecánica del equipamiento del pozo 1942.

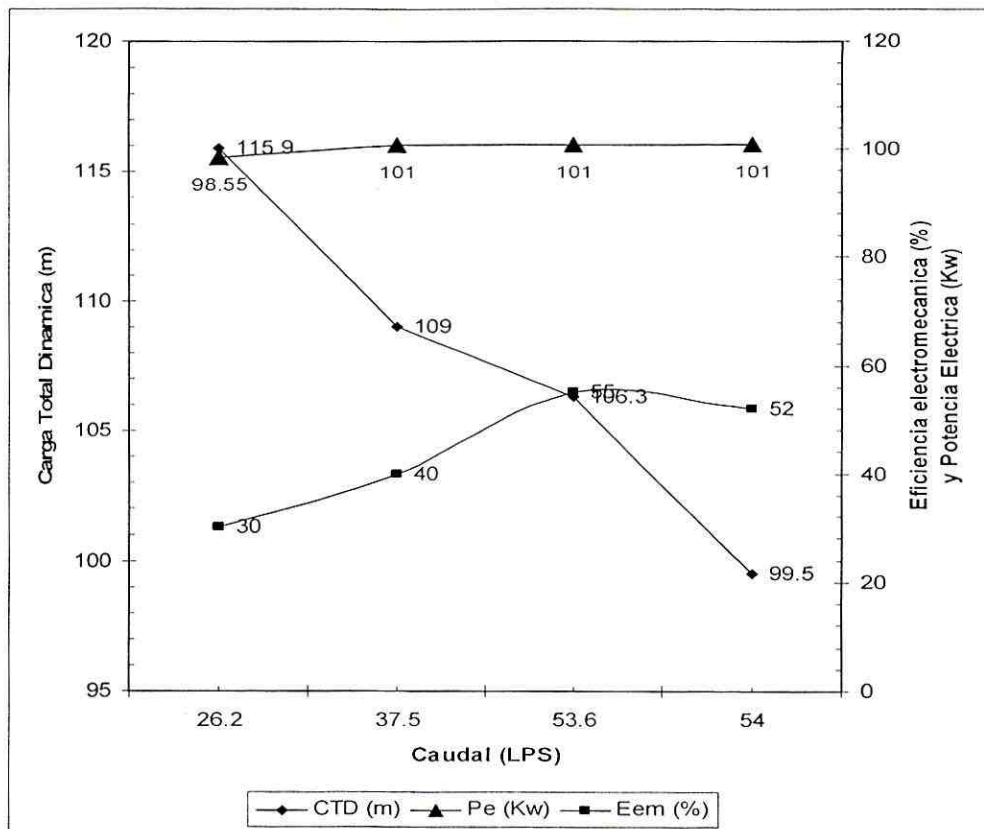


Figura 10. Curva característica electromecánica del equipamiento del pozo 2993.

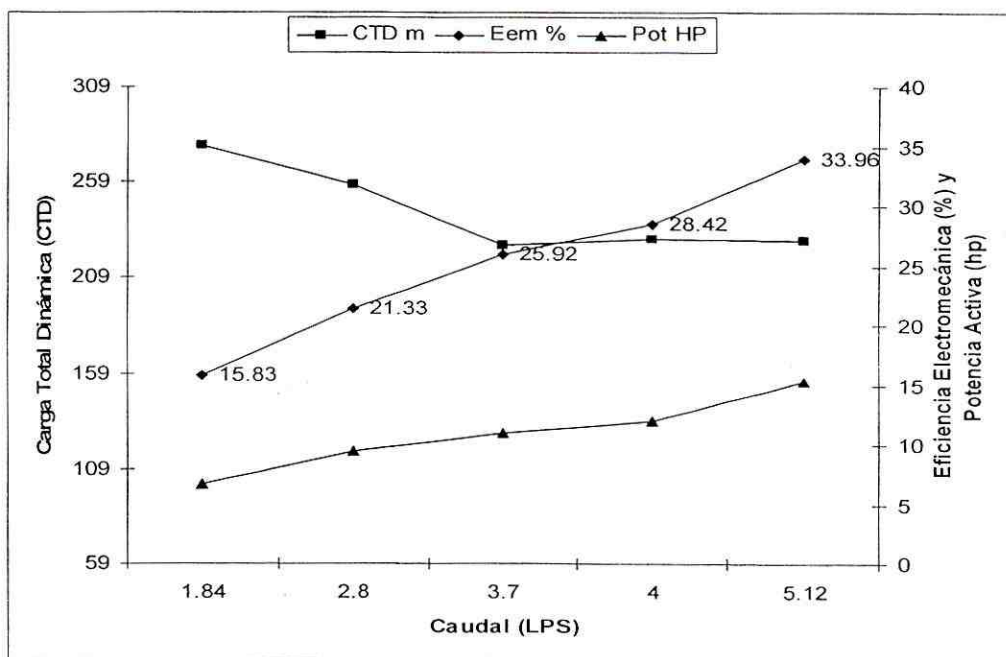


Figura 11. Curva característica electromecánica del equipamiento del pozo 3320.

8.2.3. Curvas Características hidráulicas del pozo.

En las Figuras 12, 13, 14 y 15 se muestran las curvas características hidráulicas de los pozos profundos. En ellas se representan los caudales específicos teórico y real contra los abatimientos teórico y real, de la misma manera, los caudales teórico y real contra los abatimientos teórico y real. En estas figuras se puede deducir como lo cita Custodio (1976), el tipo de acuífero donde se encuentra el pozo profundo, así como, estimar si al pozo se le puede extraer un mayor caudal que con el que está operando.

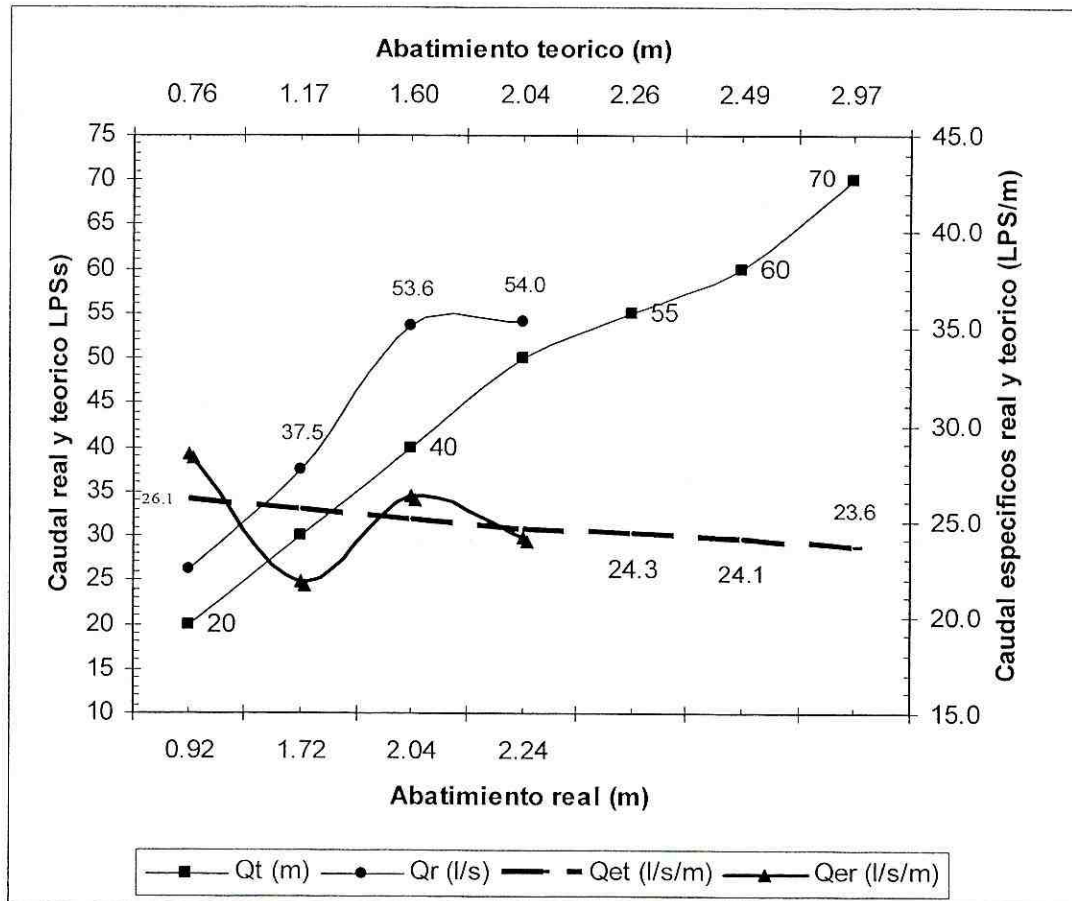


Figura 12. Curva característica hidráulica del pozo #2993, con comportamiento de acuífero libre sin pérdidas en el pozo.

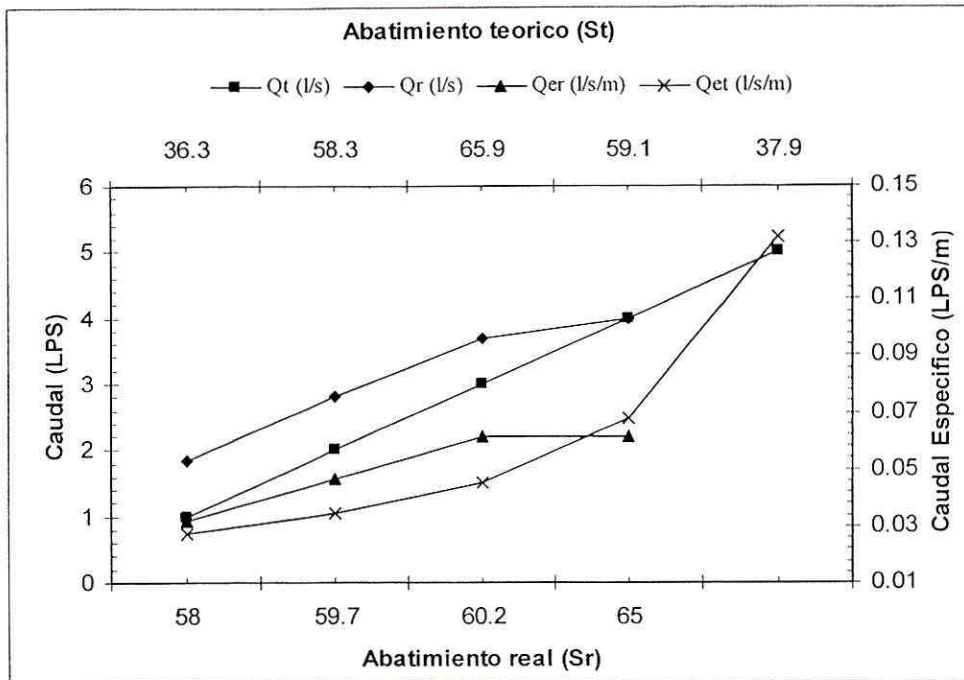


Figura 13. Curva característica hidráulica del pozo #3320, con comportamiento de un acuífero cautivo con características cambiantes durante los ensayos.

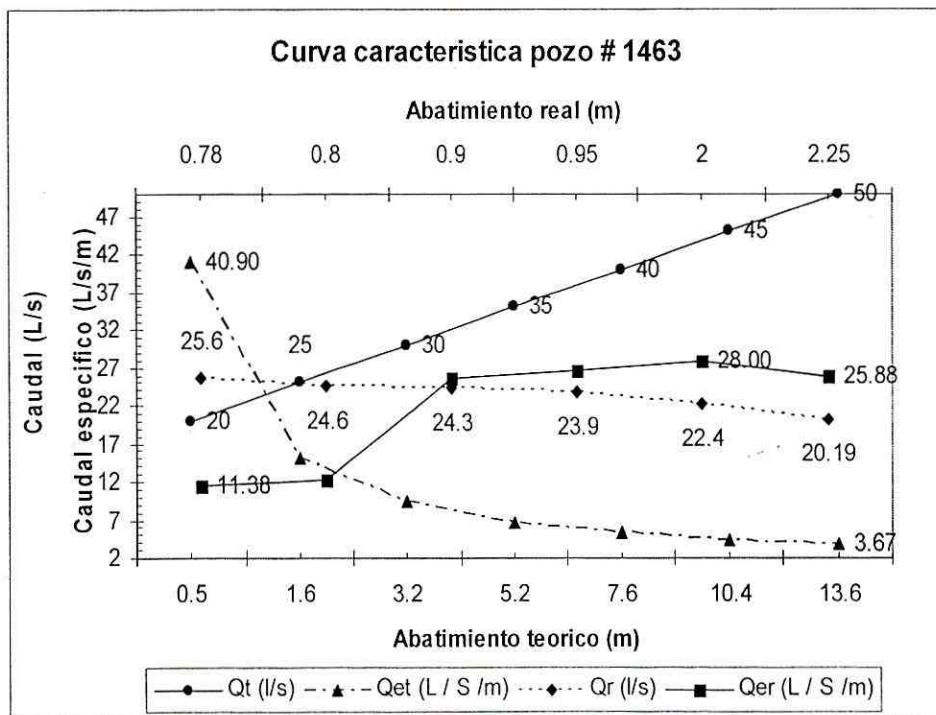


Figura 14. Curva característica hidráulica del pozo #1463, con comportamiento de un acuífero cautivo con pérdidas no lineales en el pozo.

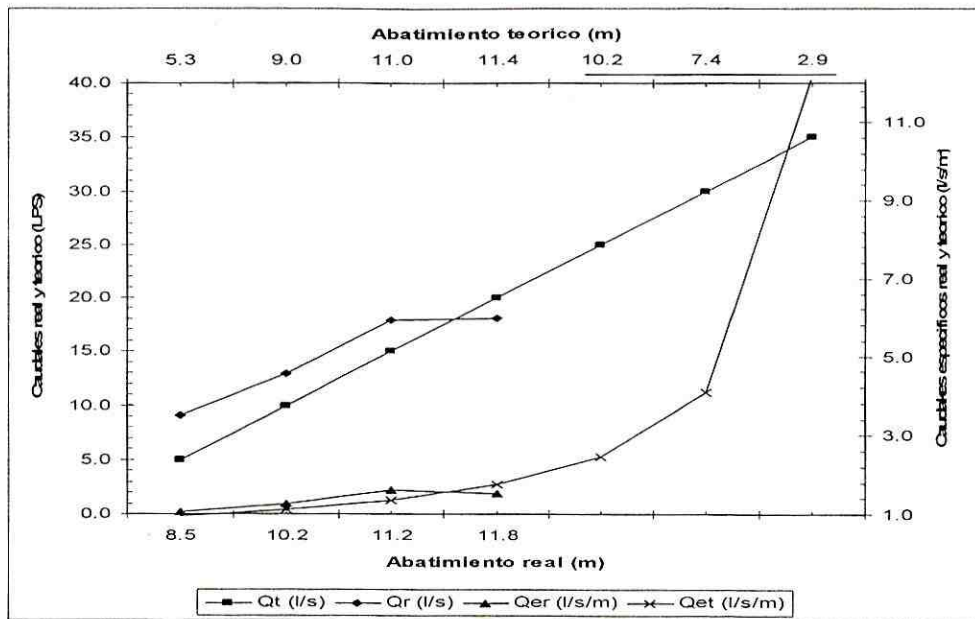


Figura 15. Curva característica hidráulica del pozo #1942, con comportamiento de un acuífero cautivo con características cambiantes durante los ensayos.

8.2.4. Curvas características electromecánica del equipamiento e hidráulica del pozo al arranque.

En este apartado se presentan las curvas características electromecánica del equipamiento e hidráulica del pozo 3320. La finalidad fue analizar sus datos y comprobar que el equipamiento estuvo bien diseñado y proyectado para su mejor eficiencia operativa y conforme a las Normas Oficiales Mexicanas. Asimismo, corroborar la hipótesis de que “la caída drástica de la eficiencia electromecánica en pozos profundos en acuíferos sobreexplotados se debe al abatimiento del nivel de bombeo en el mismo”, y a la par analizar el comportamiento de la eficiencia hidráulica del pozo.

A partir del momento en que se arrancó el equipo, con un gasto de 10.32 LPS hasta que la bomba llegó a su gasto operativo de 5.12 LPS, la η_{em} descendió de un 69.3 por ciento a un 33.8 por ciento como se observa en la Figura 16. La figura muestra que resultó contraria a una curva característica tradicional de una bomba centrífuga de laboratorio, que a mayor Q, menor CTD y viceversa. Esto fue debido a las condiciones inestables “Al Arranque”. Cabe aclarar que este último valor (5.12 LPS) fue el inicial para el estudio real operativo de dicho equipamiento mostrado en la (Figura 11).

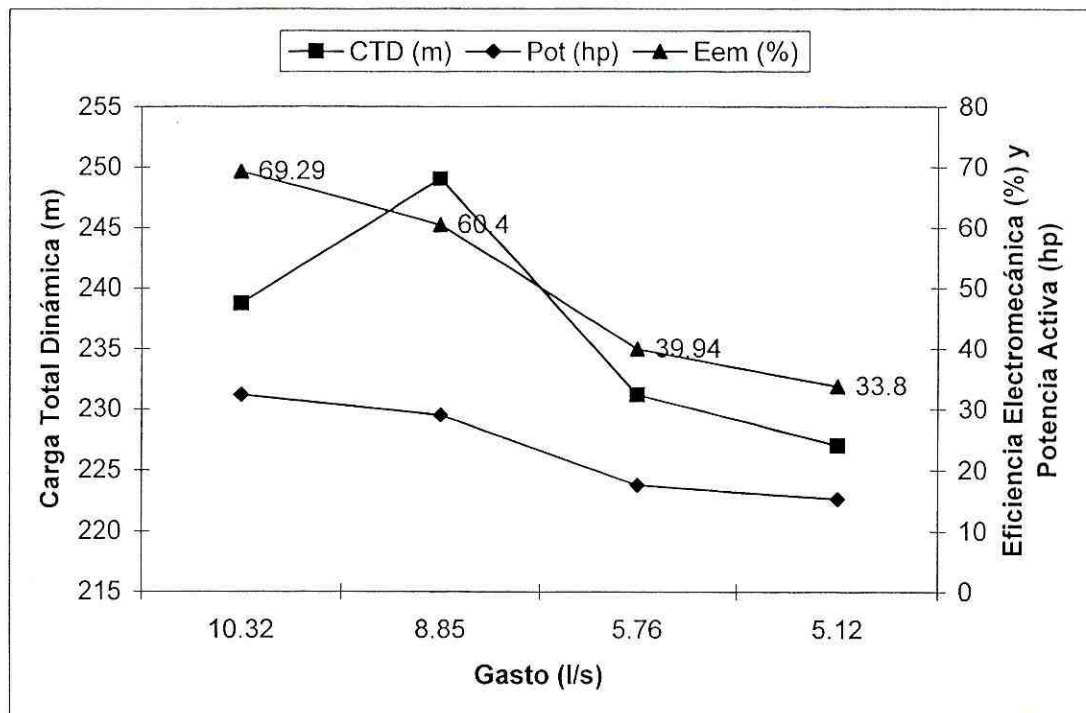


Figura 16. Curva característica electromecánica del equipamiento al arranque del pozo 3320.

Con relación a la Curva Característica hidráulica del pozo mostrada en la Figura 17 también su comportamiento se muestra inestable e incongruente, nótese que sube y baja drásticamente el abatimiento de los caudales probados. Sin embargo, con el caudal esperado de 30 LPS en la etapa constructiva exploratoria y 12 a 13 LPS en la selección del equipamiento basado en su aforo posterior al desarrollo y que finalmente en su operación, su caudal disminuyó hasta 5.12 LPS, de acuerdo a la Figura 17 se logró obtener una eficiencia hidráulica muy próxima al 100 por ciento.

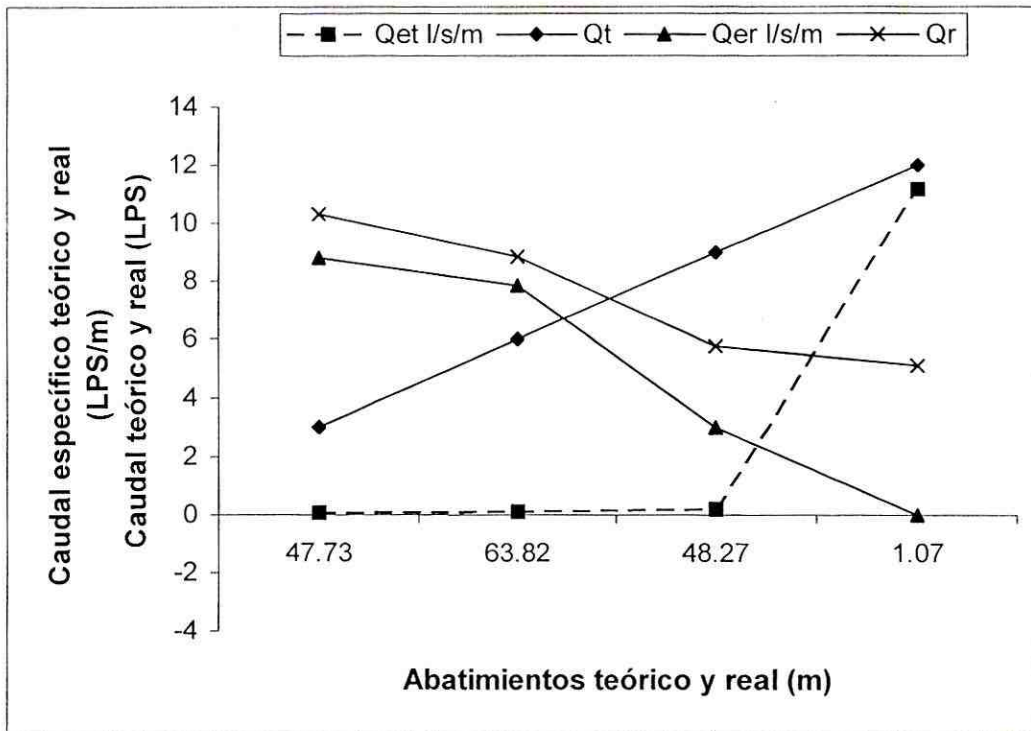


Figura 17. Curva característica hidráulica del pozo al arranque en el pozo 3320.

IX. CONCLUSIONES.

De acuerdo a las condiciones en que se realizó el presente trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los abatimientos de los acuíferos sobre explotados generan una caída drástica de las η_{em} hasta un 50% de su valor mínimo recomendable por las Normas Oficiales Mexicanas.
- Persiste una baja eficiencia electromecánica en el acuífero principal por debajo de los valores mínimos recomendados por las Normas Oficiales Mexicanas. La causa principal es el abatimiento drástico de los niveles de bombeo debido a su sobreexplotación. Durante este estudio se puede decir de un 40% contra 61% como mínimo recomendado en promedio, se excluye un caso del acuífero Aguanaval.
- La eficiencia hidráulica de los pozos observados bajo las mismas condiciones de abatimientos y sobre explotación se encontró aceptable de 88.5% con respecto al 90% de sugerida. Lo anterior debido a que las condiciones constructivas de los pozos están holgadas por las reducciones de caudal extraído contra el proyectado. Esto resulta que el área de paso por el medio filtrante (filtro y ademe) fue proyectado para un mayor caudal del que se esta actualmente extrayendo.
- De las metodologías evaluadas para la ecuación de abatimiento se recomienda la de Bierschenk, por su simplicidad de obtención y accesibilidad en la obtención de la eficiencia hidráulica y curva característica de los pozos, así mediante esta ultima determinación realizar acciones de rehabilitación donde se pueda incrementar el caudal de extracción según sus estimaciones.

X. BIBLIOGRAFÍA.

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. LEVINE 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.

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. 1º ed. 1992 Editorial Limusa p. 198 – 200, 376 – 387. México.

HERRERA P. J.C., L. RENDÓN P., E. PEÑA P. y V. CABANZON H. 1998. Diagnostico 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 Hidrology and Well. 2nd Edition. Water Resources Publications, Colorado, USA.

MONTES L. L. (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-1996. 1997 Eficiencia energética de bombas sumergibles. Límites y método de prueba., Diario oficial Viernes 7 de Marzo de 1997. <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 – S.A.GARPA, 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 .

VARGAS A. V. 1976 Técnicas y análisis de costos de pozos profundos y aguas subterráneas. 1° Edición 1976 Ediciones Limusa. Arcos de Belén 75 México D.F.

XI. APÉNDICE.

A1. Formato de cálculo de eficiencia electromecánica del pozo: 3320. (Bomba con motor sumergible).

FORMATO DE CÁLCULO DE EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA (con potenciómetro TRMS)

Pozo: 3320

Fecha: _____

DATOS DE LOCALIZACIÓN

PROPIEDAD: _____ PROPIETARIO: _____

DATOS DE CONVERCIÓN

Gasto: 5.12 lps 81.27 gpm 0.0051 m³/s L. colum 252 m 826.77 ft
 Diámetro Columna: 4 Pulg. 0.1016 m Nivel Dinámico: 217.45 m 713.42 ft
 Presión del manó: _____ kg/cm² 10.85 psi 7.6247 m Área: 0.0081 m²

DATOS Y PROCESOS HIDRÁULICOS

1. CARGA SOBRE LA REFERENCIA: _____ m 7.6451 m 25.082 ft

1.1. Elevación estática: _____ m 0 ft

1.2. Carga de fricción y locales: 0 m 0 ft

$\Sigma(10.29C^2LQ^2) / D^{16/3} + \Sigma(KQ^2 / 2gA^2)$ $\Sigma K =$ _____

1.3. Carga de velocidad: 0.0203 m 0.0668 ft

$h_v = Q^2 / 2gA^2$

1.4. Presión del manómetro: 7.6247 m 25.016 ft

1.5. Pérdidas del cabezal de descarga: _____ m 0 ft

2. CARGA BAJO LA REFERENCIA: _____ m 220.5 m 723.42 ft

2.1. Nivel Dinámico (ND): 217.45 m 713.42 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 3.048 m 10 ft

$\Sigma(10.29C^2LQ^2) / D^{16/3} + \Sigma(KQ^2 / 2gA^2)$ $\Sigma K =$ 1

3. CARGA TOTAL DINÁMICA (CTD): 1+2: _____ m 228.14 m 748.5 ft

4. POTENCIA DE SALIDA DE LA BOMBA: _____ KW 11.452 KW 15.351 HP

$Nu = Q \cdot CTD / 102 = KW$ $Nu = KW / 0.746 = HP$

DATOS Y PROCESOS ELÉCTRICOS

5. PARÁMETROS DE MEDICIÓN ELÉCTRICA

	volts	amp	KW	FP	kvar	kva	Hz	FS	Ef. Moto	hr. op/dia
5.1. De campo:	470.5	61.75	33.726	0.671	21.7	29.01	60			
5.2. De placa:				*					*	

* Valor de tabla o gráfica

6. EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA (%)

$Ef. Electromecánica = Nu / KW(\text{dato de campo})$

33.96%

A2. Formato de cálculo de eficiencia electromecánica del pozo: 2993. (Bomba con motor externo).

FORMATO DE CÁLCULO DE EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA (con potenciómetro TRMS)

Pozo: 2993

Fecha: _____

DATOS DE LOCALIZACIÓN

PROPIEDAD: _____ PROPIETARIO: _____

DATOS DE CONVERSIÓN

Gasto: 53.6 lps 850.794 gpm 0.0536 m³/s L. colum: 106.7 m 350.066 ft
 Diámetro Columna: 8 Pulg. 0.2032 m Nivel Dinámico: 95.2 m 312.336 ft
 Presión del manó: _____ kg/cm² _____ psi 0 m Área: 0.03241 m²

DATOS Y PROCESOS HIDRÁULICOS

1. CARGA SOBRE LA REFERENCIA: _____ 1.44503 m 4.74091 ft

1.1. Elevación estática: _____ 0.21 m 0.68898 ft

1.2. Carga de fricción y locales: _____ 0.97565 m 3.20095 ft

$\Sigma(10.29C^2LQ^2) / D^{16/3} + \Sigma(KQ^2 / 2gA^2)$ $\Sigma K =$ 7

1.3. Carga de velocidad: _____ 0.13938 m 0.45728 ft

$h_v = Q^2 / 2gA^2$

1.4. Presión del manómetro: _____ 0 m 0 ft

1.5. Pérdidas del cabezal de descarga: _____ 0.12 m 0.3937 ft

2. CARGA BAJO LA REFERENCIA: _____ 98.34 m 322.638 ft

2.1. Nivel Dinámico (ND): _____ 95.2 m 312.336 ft

2.2. Pérdidas de fricción en columna: _____ 3.14 m 10.3018 ft Años de uso: _____

BOMBA TURBINA CON MOTOR EXTERNO (TABLAS DE FABRICANTE)

Diámetro columna: 8 Pulg. Diámetro de funda: 2.5 Pulg. Diámetro de flecha: 1.6875 Pulg.

Factor de estado de columna: _____

3. CARGA TOTAL DINÁMICA (CTD): 1+2: _____ 99.785 m 327.379 ft

4. POTENCIA DE SALIDA DE LA BOMBA: _____ 52.4361 KW 70.2896 HP

$Nu = Q \cdot CTD / 102 = KW$

$Nu = KW / 0.746 = HP$

DATOS Y PROCESOS ELÉCTRICOS

5. PARÁMETROS DE MEDICIÓN ELÉCTRICA

	volts	amp	KW	FP	kvar	kva	Hz	FS	Ef. Motor	hr. op/día
5.1. De campo:	437	147	101	0.91	46.5	112	60			
5.2. De placa:	440	162	93.25	*				1.15	*	

* Valor de tabla o gráfica

6. EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA (%)

$Ef. Electromecánica = Nu / KW(\text{dato de campo})$

51.92%

A3. Cálculo de las variables B y C por la ecuación de Kasenow en el pozo: 343.

POZO:343

Por Kasenow

NE= 84.2 m

N	ND m	Q l/s	S m	ΔQ l/s	ΔS m
1	109.77	11	25.57	11	25.57
2	109.92	12.84	25.72	1.84	0.15
3	110.12	13.49	25.92	0.65	0.2

Cálculo de B

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

$$B_{1,2} = 4.246139 \text{ m/lps} \quad 0.8788064 \text{ ft/gpm} \quad 0.0491448 \text{ m/m}^3 \text{pd}$$

$$B_{2,3} = 3.6168462 \text{ m/lps} \quad 0.7485642 \text{ ft/gpm} \quad 0.0418614 \text{ m/m}^3 \text{pd}$$

$$B_{\text{principal}} = 3.9314926 \text{ m/lps} \quad 0.8136853 \text{ ft/gpm} \quad 0.0455031 \text{ m/m}^3 \text{pd}$$

Cálculo de C

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

$$C_{1,2} = -0.17469 \text{ m/lps}^2 \quad -0.002281 \text{ ft/gpm}^2 \quad -2.34\text{E-}05 \text{ m}/(\text{m}^3 \text{pd})^2$$

$$C_{2,3} = -0.12568 \text{ m/lps}^2 \quad -0.001641 \text{ ft/gpm}^2 \quad -1.68\text{E-}05 \text{ m}/(\text{m}^3 \text{pd})^2$$

$$C_{\text{principal}} = -0.150185 \text{ m/lps}^2 \quad -0.001961 \text{ ft/gpm}^2 \quad -2.01\text{E-}05 \text{ m}/(\text{m}^3 \text{pd})^2$$

B ajustado

$$B = \frac{S_5 - C Q_5^2}{Q_5}$$

$$B = 3.947421 \text{ m/lps} \quad 0.8169819 \text{ ft/gpm} \quad 0.0456875 \text{ m/m}^3 \text{pd}$$

C ajustado

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

$$C = -0.149004 \text{ m/lps}^2 \quad -0.001945 \text{ ft/gpm}^2 \quad -2\text{E-}05 \text{ m}/(\text{m}^3 \text{pd})^2$$

A4. Cálculo de las variables B y C por la ecuación de Jacob-Kasenow en el pozo: 343.

Por Jacob-Kasenow

NE= 84.2 m

N	ND m	Q l/s	S m	ΔQ l/s	ΔS m
1	109.77	11	25.57	11	25.57
2	109.92	12.84	25.72	1.84	0.15
3	110.12	13.49	25.92	0.65	0.2

Cálculo de C

$$C = \frac{(\Delta S_{n+1}/\Delta Q_{n+1}) - (\Delta S_n/\Delta Q_n)}{\Delta Q_n + Q_{n+1}}$$

$$C_{1,2} = -0.17469 \text{ m/lps}^2 \quad -0.002281 \text{ ft/gpm}^2 \quad -2.34\text{E-}05 \text{ m}/(\text{m}^3\text{pd})^2$$

$$C_{2,3} = 0.0908316 \text{ m/lps}^2 \quad 0.0011859 \text{ ft/gpm}^2 \quad 1.216\text{E-}05 \text{ m}/(\text{m}^3\text{pd})^2$$

$$C_{\text{principal}} = -0.041929 \text{ m/lps}^2 \quad -0.000547 \text{ ft/gpm}^2 \quad -5.62\text{E-}06 \text{ m}/(\text{m}^3\text{pd})^2$$

B ajustado

$$B = \frac{S_5 - CQ_5^2}{Q_5}$$

$$B = 2.4870507 \text{ m/lps} \quad 0.5147349 \text{ ft/gpm} \quad 0.0287851 \text{ m}/\text{m}^3\text{pd}$$

A5. Cálculo de las variables B y C por la ecuación de Bierschenk en el pozo:343.

Por Bierschenk

NE= 84.2 m

N	ND m	Q l/s	S m	ΔQ l/s	ΔS m
1	109.77	11	25.57	11	25.57
2	109.92	12.84	25.72	1.84	0.15
3	110.12	13.49	25.92	0.65	0.2

N	x	x ²	y	xy	y ²
	Q l/s	Q ² (l/s) ²	s/Q m/l/s	s m	(s/Q) ² (m/l/s) ²
1	11.00	121.00	2.32	25.57	5.40
2	12.84	164.87	2.00	25.72	4.01
3	13.49	181.98	1.92	25.92	3.69
3	37.33	467.85	6.25	77.21	13.11

Cálculo de C

$$C = \frac{N\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{N\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$C = -0.164695506 \text{ m/lps}^2 \quad -0.00215026 \text{ ft/gpm}^2 \quad -2.29249\text{E-}05 \text{ m}/(\text{m}^3 \text{pd})^2$$

$$B = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{N\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$B = 4.13238908 \text{ m/lps} \quad 0.85526404 \text{ ft/gpm} \quad 0.047828271 \text{ m}/\text{m}^3 \text{pd}$$

$$R = \frac{N\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\{ [(N\sum x^2) - (\sum x)^2] [(N\sum y^2) - (\sum y)^2] \}^{1/2}}$$

$$R = -0.998108441$$

$$R^2 = 0.996220459$$