



Universidad Autónoma Chapingo

DEPARTAMENTO DE IRRIGACIÓN E INGENIERÍA MECÁNICA AGRÍCOLA

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**METODOLOGÍA TÉCNICO-ECONÓMICA PARA EL EQUIPAMIENTO
ELECTROMECAÁNICO ÓPTIMO EN POZOS DE RIEGO PARA ACUÍFEROS
SOBRE-EXPLOTADOS: CASO ACUÍFERO TEXCOCO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

YESSICA ALEJANDRA GÓMEZ PÉREZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE: SALVADOR VALLE GUADARRAMA, DR

Chapingo, Estado de México, Noviembre de 2016.



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES



**METODOLOGÍA TÉCNICO-ECONÓMICA PARA EL EQUIPAMIENTO
ELECTROMECAÁNICO ÓPTIMO EN POZOS DE RIEGO PARA ACUÍFEROS
SOBRE-EXPLOTADOS: CASO AGUÍFERO TEXCOCO**

Tesis realizada por **Yessica Alejandra Gómez Pérez** bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



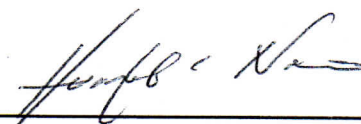
Dr. Salvador Valle Guadarrama

ASESOR:



Ph. D. Mauricio Carrillo García

ASESOR:



Dr. Humberto Iván Navarro Gómez

CONTENIDO

CONTENIDO	iii
LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vii
DEDICATORIAS	ix
AGRADECIMIENTOS	x
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xi
RESUMEN GENERAL	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN	14
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	18
2.1. Problemática de pozos sobre-explotados	18
2.2. Zona de estudio	24
2.3. Método de selección del equipo de bombeo para un acuífero sustentable.....	33
2.4. Selección de bomba turbina sumergible (BTS)	51
2.5. Costos	56
3. SELECCIÓN ÓPTIMA DE EQUIPO DE BOMBEO EN POZO PROFUNDO DE RIEGO	59
3.1. Resumen.....	60
3.2. Abstract	61
3.3. Introducción	62
3.4. Materiales y métodos	64
3.5. Resultados y discusión	77
3.6. Conclusiones	91
4. CONCLUSIONES GENERALES	93
5. LITERATURA CITADA.....	96
6. APÉNDICES	101
Apéndice 1. Valores de la Carga Dinámica Total del 2016 al 2031	101

Apéndice 2. Carga Dinámica Total del 2016 al 2031	105
---	-----

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Corriente utilizada (AMP) en voltajes 220/440 para diferentes potencias en HP. Fuente: (Montes, 1980).	45
Cuadro 2. Tabla de calibres de conductor y tubo Conduit a 440 Volts. Fuente: (Montes, 1980).	46
Cuadro 3. Características típicas de cable submarino. Fuente: (Montes, 1980).	55
Cuadro 4. Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Fuente: (Secretaría de Energía, 1995).	56
Cuadro 5. Coeficientes de resistencia de accesorios típicamente identificados en la instalación de una bomba de pozo profundo para riego.	69
Cuadro 6. Tendencias de abatimientos por zona del acuífero Texcoco.	79
Cuadro 7. Parámetros hidráulicos medidos en la zona norte y centro del acuífero, en términos de gasto (Q), nivel estático (NE), profundidad al nivel dinámico (PND) y carga dinámica total (CDT).	81
Cuadro 8. Parámetros eléctricos obtenidos en la zona norte y centro del acuífero, en términos de tensión, corriente y factor de potencia.	82
Cuadro 9. Profundidad del nivel dinámico (m) para cada gasto propuesto en cada una de las zonas.	82
Cuadro 10. Profundidad del nivel dinámico (m) a $0.045 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (45 L s^{-1}) en el área de estudio.	83
Cuadro 11. Carga dinámica total del 2016 al 2031 de la zona norte del acuífero Texcoco.	84
Cuadro 12. Constantes de regresión para el modelo de CDT vs. Q (Ecuación 23).	85
Cuadro 13. Constantes de regresión de las curvas características de las bombas BA 10-050 y BA 10-070 (Bombas Centrífugas Alemanas S.A. de C.V.; Neumann, México).	87
Cuadro 14. Valores de gasto a máxima eficiencia.	88
Cuadro 15. Valores de operación real de las bombas seleccionadas.	89
Cuadro 16. Valores de los parámetros del modelo empleados en la simulación.	90
Cuadro 17. Valores de los parámetros empleados en el modelo de costo.	91
Cuadro 18. Carga dinámica total del 2016 al 2031 de la zona sur del acuífero Texcoco.	101
Cuadro 19. Carga dinámica total del 2016 al 2031 de la zona este del acuífero Texcoco.	102

Cuadro 20. Carga dinámica total del 2016 al 2031 de la zona oeste del acuífero
Texcoco.103

Cuadro 21. Carga dinámica total del 2016 al 2031 de la zona centro del acuífero
Texcoco.104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del acuífero Texcoco. Fuente: (Adaptado de Escobar, 2012-2013).	25
Figura 2. Municipios pertenecientes al acuífero. Fuente (Adaptado de Escobar, 2012-2013).	26
Figura 3. Climas de la zona de estudio. Fuente (Adaptado de Escobar, 2012-2013).	28
Figura 4. Cuencas pertenecientes al área de estudio. Fuente (Adaptado de Escobar, 2012-2013).	29
Figura 5. Geología en el acuífero Texcoco. Fuente (Adaptado de Escobar, 2012-2013).	29
Figura 6. Localización de los 552 aprovechamientos activos del acuífero Texcoco. Fuente: (Adaptado de Escobar, 2012-2013).	32
Figura 7. Curva de aforo típica en la zona de estudio.	35
Figura 8. Bomba turbina vertical de flechas con lubricación de aceite y de agua. Fuente: (Carrillo, 2009).	37
Figura 9. Curva característica de una bomba turbina vertical de flechas. Fuente: (Carrillo, 2009).	39
Figura 10. Curva de la bomba y curva del sistema precisando el punto (gasto y carga) de operación a máxima eficiencia por tazón. Fuente: (Carrillo, 2009).	42
Figura 11. Alambre y cable conductor corriente eléctrica para instalación de subestación CONDUMEX.	47
Figura 12 Arrancador tipo para pozo de riego.	47
Figura 13. Interruptor tipo para pozo de riego.	49
Figura 14. Transformador trifásico tipo poste.	49
Figura 15. Diagrama de instalación eléctrica. Fuente: (Romo & Rivas, 2016).	51
Figura 16. Subestación eléctrica.	52
Figura 17. Bomba turbina sumergible. Fuente: (Carrillo, 2009).	53
Figura 18. Curva del sistema y curva característica de la bomba turbina sumergible. Fuente: (Carrillo, 2009).	54
Figura 19. Sonda de nivel para pozo Equipozo modelo SEP150 ®.	65
Figura 20. Medidor Ultrasónico TRANSPORT PT878 Portable Ultrasonic Liquid Flow Meter ®.	65
Figura 21. FLUKE Power Quality Analyzer 435 ®.	66
Figura 22. Curvas características de la bomba BA 10-050 (Bombas Centrífugas Alemanas S.A. de C.V.; Neumann, México).	71

Figura 23. Curvas características de la bomba BA 10-070 (Bombas Centrífugas Alemanas S.A. de C.V.; Neumann, México).....	72
Figura 24. Curvas características de la bomba BA 10-075 (Bombas Centrífugas Alemanas S.A. de C.V.; Neumann, México).....	73
Figura 25. Hidrográfo del Pozo E-866, ubicado en el Municipio de Chiconcuac, México (zona norte del acuífero Texcoco).	78
Figura 26. Hidrográfo del Pozo F-107, ubicado en el Municipio de Chicoloapan, México (zona sur del acuífero Texcoco).	79
Figura 27. Hidrográfo del Pozo E-133, ubicado en el Municipio de Texcoco, México (zona este del acuífero Texcoco).	80
Figura 28. Hidrográfo del Pozo EW-55, ubicado en el Municipio de Texcoco, México (zona oeste del acuífero Texcoco).	80
Figura 29. Hidrográfo del Pozo ER-88, ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, México (zona centro del acuífero Texcoco).	81
Figura 30. Curva de aforo utilizada como representativa del acuífero Texcoco para el cálculo del gasto de diseño.....	83
Figura 31. Carga dinámica total para la zona norte del acuífero Texcoco durante la vida útil del equipo de bombeo.....	85
Figura 32. Carga dinámica total de la zona centro del acuífero a partir del modelo obtenido.....	86
Figura 33. Curva característica de la bomba, construidas a partir de los modelos de regresión.....	88
Figura 34. Intersección de las curvas del sistema (Ecuación 23) con las curvas de la bomba correspondientes a la potencia (Ecuación 24).	89
Figura 35. Carga dinámica total para la zona sur del acuífero Texcoco durante la vida útil del equipo de bombeo.....	105
Figura 36. Carga dinámica total para la zona este del acuífero Texcoco durante la vida útil del equipo de bombeo.....	105
Figura 37. Carga dinámica total para la zona oeste del acuífero Texcoco durante la vida útil del equipo de bombeo.....	106
Figura 38. Carga dinámica total para la zona centro del acuífero Texcoco durante la vida útil del equipo de bombeo.....	106

DEDICATORIAS

A Dios

A Havel

A mi Familia

A Maja

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico brindado durante los estudios de maestría y estancia de investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por la formación académica e integral brindada durante todos estos años.

Al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, por la formación académica y de investigación brindada.

Al comité asesor: Dr. Salvador Valle Guadarrama, Ph.D. Mauricio Carrillo García, Dr. Humberto Iván Navarro Gómez y a la Dra. Carmen Julia Navarro Gómez, por la guía, apoyo y disposición durante la realización de este proyecto.

Al Ph.D. Mark Riley, Ph.D. Francisco Muñoz Arreola y al Ph.D. Daran Rudnick, por el apoyo brindado durante la estancia de investigación realizada en el West Central Research and Extension Center de Biological Systems Engineering Department de University of Nebraska-Lincoln.

DATOS BIOGRÁFICOS

Yessica Alejandra Gómez Pérez nació el 07 de marzo de 1988 en Villaflores, Chiapas, México. Sus estudios básicos los realizó en su lugar de origen.

En el año 2003 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo para realizar sus estudios de nivel medio superior y en el 2006 inicia sus estudios de nivel superior, en el Departamento de Irrigación de la misma institución. En 2011 obtiene el Título de Ingeniera en Irrigación bajo la modalidad de tesis con el proyecto *“Evapotranspiración de referencia calculada con diferentes expresiones para estimar radiación global y déficit de presión”*.

En agosto de 2014 ingresó a la Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, en la orientación Uso Integral del Agua.

RESUMEN GENERAL

El aumento de la demanda de agua subterránea ha ocasionado agotamiento de los acuíferos, lo cual altera la eficiencia de operación de los equipos de bombeo durante el tiempo. En este trabajo se desarrolló una metodología para la selección de un equipo de bombeo para riego, considerando el ritmo de abatimiento del nivel estático (NE) en distintos escenarios de eficiencia máxima programada a lo largo de la vida útil. Para distintos años, se modeló la curva del sistema en cinco pozos de la región del Acuífero de Texcoco, con base en la modificación de la curva de aforo y la carga dinámica total, afectadas ambas por el abatimiento de NE . A partir de curvas características de sistemas de bombeo propuestos, expresadas por medio de modelos matemáticos, se resolvieron las ecuaciones y se determinó la potencia de la bomba para maximizar la eficiencia en un punto determinado en el tiempo. Los resultados para los distintos escenarios se compararon en términos de la variación de la eficiencia, del gasto proporcionado y de los costos de operación a lo largo de la vida útil. Se encontró que el costo del recurso hidráulico bombeado puede variar en función del punto programado para tener eficiencia máxima en el equipo de bombeo.

Palabras clave: Bombas de pozo profundo, bombas centrífugas, carga dinámica total, curva del sistema, selección óptima.

¹ Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Yessica Alejandra Gómez Pérez

Director: Dr. Salvador Valle Guadarrama

ABSTRACT

The increment in groundwater demand has led to deplete aquifers, which affects the operation efficiency of pumping plant equipment along the time. This work presents a methodology developed for the selection of pumping equipment for irrigation wells, which considered the rate of depletion of the static level (*NE*) in different scenarios of maximum efficiency programmed over the useful life. For different years, the curve of the pumping system was modeled in five wells of Texcoco Aquifer area, based on the of well capacity curve and Total Dynamic Head, both affected by the *NE* abatement. From the characteristic curves of proposed pumping systems, expressed by means of mathematical models, the equations were solved and the power of each pump was determined considering a criterion of maximum efficiency at a determined point in time. The results for different scenarios were compared in terms of the variation in efficiency, volumetric flow, and the operating costs over the useful life. It was found that the cost of the pumped hydraulic resource can vary depending on the point programmed to have maximum efficiency in the pumping equipment.

Key words: Centrifugal pumps, deep well pumps, pump system curve, total dynamic load, optimum selection.

² Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Yessica Alejandra Gómez Pérez

Director: Dr. Salvador Valle Guadarrama

1. INTRODUCCIÓN

En México, el agua dulce disponible para la agricultura es del 77 %, del cual el 35 % es de origen subterráneo. Nuestro país cuenta con 6.4 millones de hectáreas de superficie con infraestructura de riego, de las cuales 3.4 millones corresponden a 86 distritos de riego y el restante (3 millones) a más de 39 000 unidades de riego (Comisión Nacional del Agua, 2015c).

En 2014, de cada 100 L utilizados en México, 77 fueron empleados en actividades agropecuarias, 50 provenían de aguas superficiales y 27 del subsuelo; mientras que, de cada 100 L de agua utilizados en los distritos de riego, 86 provenían de aguas superficiales y 14 de aguas subterráneas. En nuestro país el 38.7 % del volumen total concesionado para usos consuntivos (32 906 millones de m³ por año en 2014), procede de agua subterránea (CONAGUA, 2015b; CONAGUA, 2015c).

Para fines de administración del agua subterránea el país se ha dividido en 653 acuíferos, cuyos nombres oficiales fueron publicados en el DOF el 5 de diciembre de 2001. De los 653 acuíferos, para el 2014, 106 se encontraban en condiciones de sobre-explotación (es decir, su extracción sobrepasó al 10 % de la recarga del acuífero) y proporcionaron el 55.2 % del agua subterránea empleada (CONAGUA, 2015b). Algunos de los efectos negativos de un acuífero sobre-explotado son: asentamientos de los terrenos, incremento de las profundidades de los niveles dinámicos de bombeo, abatimientos locales y regionales que requieren más potencia de bombeo para la extracción de agua, incremento en los costos de bombeo, baja eficiencia electromecánica y baja o nula disponibilidad del agua; dando como resultado el agotamiento de los

acuíferos, el alto grado de desperdicio de la energía eléctrica o de los hidrocarburos, y en el caso de la agricultura, costos altos del agua para riego. En cuanto a la reducción de costos por metro cúbico de agua bombeada, la forma de evitar los aumentos por consumo de energía eléctrica, es mediante: (a) la reducción de la cantidad de agua bombeada, que es inviable para satisfacer la demanda de riego porque se aumentan las horas de bombeo, (b) reduciendo la carga o presión de operación de la bomba, que es imposible en un acuífero sobre-explotado y (c) mejorando la eficiencia electromecánica de la bomba.

La sobre-explotación de los acuíferos por exceso de bombeo produce el incremento de la profundidad de los niveles dinámicos que ocasiona que las bombas trabajen con cargas dinámicas de bombeo fuera de sus puntos óptimos de eficiencia, consumiendo una mayor cantidad de energía para la misma cantidad de agua, aun cuando la bomba fue seleccionada correctamente en las condiciones iniciales.

Es por ello, que en este trabajo se plantea una metodología de selección óptima del equipo de bombeo en pozos para riego en acuíferos sobre-explotados, con eficiencia electromecánica alta, durante su vida útil. Con este concepto se reducirá el consumo de energía y por consiguiente el costo por metro cúbico de agua bombeada.

El estrés del agua en México varía en los estados. Hay zonas en donde es bajo, moderado y extremo. La región hidrológica del Valle de México está en condiciones extremas, ya que en ella vive casi el 20 % de la población total del país. La región hidrológico-administrativa número XIII "Agua del Valle de México", es la región con menor superficie en km² del país (18 229 km²), la que tiene la menor cantidad de agua renovable (3 458 hm³/año al 2014), la de mayor cantidad de habitantes (23.01 millones de habitantes a mediados del

2014), la de menor cantidad de agua renovable *per cápita* (150 m³/habitante/año al 2014) y es la que más contribuye al PIB nacional (24.81 % al 2013), pero también es la que tiene el mayor grado de presión para el recurso hídrico (del 138 %, el cual es considerado como muy alto en el país) (CONAGUA, 2015b). En esta región, se conforman 14 acuíferos y el presente trabajo se ha enfocado al Acuífero Texcoco (No. 507).

Según CONAGUA (2015a), el Acuífero Texcoco tiene registrado un total de 1 009 aprovechamientos, de los cuales 552 se consideran activos y 457 inactivos. De los aprovechamientos activos 528 son pozos, cinco son norias y 19 manantiales. Entre ellos, 256 se destinan al uso agrícola, 193 para uso público-urbano, 30 para actividades pecuarias, 24 para uso industrial y 49 para uso múltiple y servicios.

En total, el volumen de extracción del acuífero asciende a 183.1 hm³ anuales, con la siguiente distribución por usos: 128.4 hm³ (70.1 %) para uso público-urbano, 48.6 hm³ (26.6 %) para uso agrícola, 3.7 hm³ (2.0 %) para uso industrial, 1.6 hm³ (0.9 %) para uso múltiple y servicios y 0.8 hm³ (0.4 %) para uso pecuario. Adicionalmente, de los 19 manantiales se descarga un volumen de 10.4 hm³ anuales, los cuales son destinados a usos agrícolas y pecuarios (CONAGUA, 2015a). El acuífero Texcoco, de acuerdo al balance de agua subterránea (Diario Oficial de la Federación, 2015), cuenta con una recarga media anual de 145.1 hm³/año, una descarga natural comprometida de 10.4 hm³ anuales, un volumen concesionado de agua subterránea de 246.48 millones de m³/año, y, sobre todo, un déficit de 111.78 millones de m³/año.

Cualquier contribución para el uso eficiente del agua y la energía en la agricultura, servirá para que conservemos los recursos indispensables para la vida. Basado en lo anterior, este trabajo propone encontrar una forma de

elección del equipo de bombeo y subestación eléctrica para pozos de riego que funcione con la mayor eficiencia posible durante su vida útil.

La hipótesis planteada consiste en que con un procedimiento de selección de equipos de bombeo basada en la tendencia de la evolución de los niveles estáticos (*NE*), conservando una eficiencia electromecánica promedio máxima, se obtiene un costo mínimo por metro cúbico de agua bombeada (\$/m³) durante la vida útil del equipo de bombeo.

El objetivo de la investigación fue encontrar una metodología de selección de equipo de bombeo de pozos, obteniendo los costos mínimos por metro cúbico de agua bombeada durante su vida útil (VU) para: (a) niveles dinámicos (ND) de bombeo iniciales, (b) ND de bombeo a la mitad de VU, (c) ND de bombeo al final de la VU y (d) optimización de la ecuación de tendencia del ND durante la VU.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Problemática de pozos sobre-explotados

El problema del uso ineficiente del agua y la energía se ha tratado de resolver desde que se presentaron los sistemas de riego por bombeo. Con el aumento en la demanda de agua el problema de la sobre-explotación de los acuíferos ha crecido en importancia. La sobre-explotación extrema de los acuíferos del Valle de México y en especial del acuífero Texcoco, ha ocasionado abatimientos regionales de más de un metro por año en los niveles estáticos y en consecuencia los de bombeo o dinámicos (Escobar & Palacios, 2012).

Shearer Marvin (1989) en Torreón, Coahuila, en “Efficient operation of pumping equipment”, propuso acciones para la mejora de la eficiencia electromecánica de los pozos profundos e indicó que solamente tres acciones pueden reducir el uso de la energía para el bombeo de agua para riego: 1) reducir la cantidad de agua bombeada, 2) reducir la carga (o presión) de operación de la bomba y 3) mejorar la eficiencia de la planta de bombeo. Este autor expuso que las razones por las que existe una ineficiencia en las plantas de bombeo para la irrigación son: la inapropiada selección de la bomba cuando ésta se compra debido a una inadecuada prueba de aforo del pozo (o desconocimiento de los niveles de bombeo), cambios de profundidad de los niveles después de la instalación (acuífero pobre o sobre-explotado), incorrecta selección de la bomba, incorrecto ajuste de la tuerca de la flecha, desgaste de la bomba por cavitación e inadecuado o mal mantenimiento. Asimismo, expresó que en general las plantas de bombeo trabajan con una eficiencia del 50 a 55 % (basado en más de 550 estudios que realizó en E.U.). Las acciones que propuso para mejorar la

eficiencia electromecánica fueron medir los niveles del acuífero, conocer la sumergencia a la cual la bomba se encuentra, operar la bomba a máxima eficiencia para ahorrar energía y seguir las recomendaciones de mantenimiento del equipo realizadas por el fabricante.

Shearer (1989) en Torreón, Coahuila, en “Cost analysis of electric energy for irrigation”, describió que el incremento de eficiencia electromecánica tiene no sólo ventajas de ahorro de energía, sino que es rentable con las acciones de mejora. Indicó que la energía anual utilizada es el producto de la energía requerida y las horas anuales de operación, de acuerdo con las Ecuaciones (1) y (2), donde Q es gasto o caudal (m^3/s), H es carga de la bomba (m) y η_e es la eficiencia electromecánica (%).

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{anual} \\ \text{utilizada} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{requerida} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Horas anuales} \\ \text{de operación} \\ \text{de la bomba} \end{array} \right) \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{requerida} \end{array} \right) = \frac{Q H}{\eta_e} \quad (2)$$

Si la carga se incrementa el gasto decrece por diseño de la bomba y la energía requerida puede incrementar o decrecer dependiendo del cambio en la eficiencia de la bomba. Como se sabe, si el gasto decrece es necesario operar la bomba con una mayor cantidad de horas anuales para satisfacer las necesidades de bombeo y, en consecuencia, más consumo de energía incrementa el costo por metro cúbico de agua.

Algunos de los factores que afectan la cantidad de agua bombeada y los cambios de carga en el bombeo son los siguientes:

- Un incorrecto programa de riego.
- Incorrecto diseño del sistema de riego.
- Fugas en los sistemas de conducción.

- Desgaste de los aspersores.
- Incorrecta selección de la bomba.
- Cambio del número de aspersores operando al mismo tiempo.
- Malos accesorios de la bomba.
- Subdimensionamiento del tubo de conducción con grandes pérdidas por fricción (velocidades del agua grandes).
- Tuberías viejas con grandes coeficientes de fricción.
- Acuíferos sobre-explotados.
- Desgaste de la bomba.

Carrillo, Torres, Valentín y Gómez (2013) y Carrillo, Gaona y Gómez (2014) presentaron un diagnóstico de la eficiencia electromecánica de 52 pozos en el acuífero Texcoco y observaron un valor muy bajo de la misma (una variación del 23 al 56 %). Carrillo (2008) presentó una metodología para rehabilitar pozos que se encuentran en condiciones de baja eficiencia. Por su parte, Chávez, Reich, Loftis y Miles (2011) indicaron que los costos de bombeo son altos debido a que se bombea más agua de la necesaria y a que las plantas de bombeo operan ineficientemente. En los estudios que realizaron en los estados de Colorado, Nebraska, Wyoming, Texas y Louisiana, E.U., encontraron que las eficiencias electromecánicas de los sistemas de bombeo variaban de 45 a 55 %, lo que implicaba que el 25 % de la energía utilizada para el bombeo se desperdiciara debido a la baja eficiencia de las plantas de bombeo por sí solas. Por ello, expusieron que el problema de la mejora de la eficiencia se debe a: impulsores fuera de ajuste, tazones de la bomba diseñados para un mayor gasto de bombeo, impulsores dañados, incorrecta selección del motor, mantenimiento requerido no realizado, diferentes condiciones de operación y tuberías deficientes. Asimismo, Kranz (2010) indicó que, en el Estado de Nebraska, E.U., durante la década de 1970, la mayoría de las plantas de bombeo operaban al 77 % del NPPPC (Nebraska Pumping Plant Criteria). Entre todas, algunas fueron muy eficientes y el 15 % de los sistemas evaluados

excedían el NPPPC. Sin embargo, en estudios recientes se demostró que los sistemas se encuentran por debajo del NPPPC. El autor indicó que una eficiente planta de bombeo para riego debería ahorrar en promedio del 25 al 30 % de la energía utilizada para bombear el agua de riego mediante el correcto ajuste de la bomba y motor a las condiciones de funcionamiento actual. También mencionó que algunas de las causas de la baja eficiencia de las plantas de bombeo se relacionan con (1) la válvula que tiene la tubería para satisfacer los requisitos de presión, (2) el aumento de la carga dinámica total (*CDT*) por la profundización de los niveles dinámicos dentro del ademe, debido a la incrustación y bacterias del área ranurada, (3) al desgaste de los impulsores, (4) al inadecuado ajuste de los impulsores, (5) a las alteraciones en la aplicación del sistema de riego sin un rediseño del sistema de bombeo, (6) una potencia del motor muy grande, (7) que el motor no trabaja a la velocidad especificada (rpm) para una máxima eficiencia, (8) un motor desafinado y (9) el incorrecto diámetro de la columna de descarga. Durante los estudios que realizó por tres años encontró que la mayoría de los sistemas de bombeo tenían una eficiencia cercana al 80 % del NPPPC y que los sistemas nuevos, instalados en el 2009, variaban del 82 % para motores diésel al 92 % para motores eléctricos de eficiencia. Algunas acciones del Estado de California, E.U., para el ahorro y uso eficiente de energía a través de la Comisión de Servicios Públicos de California, principalmente a través del Center for Irrigation Technology (CIT) California State University, Fresno, a través de diversas publicaciones, en conjunto con empresas privadas como Rain Bird Corporation (2008) y Pacific Gas and Electric Company (E.U.), se manifiestan en el Programa de Eficiencia del Bombeo (APEP) donde tienen diversas actividades para los productores que les ayude a mejorar la eficiencia electromecánica de sus equipos de bombeos para tener un ahorro de recursos y hacer uso eficiente de los mismos. En este programa se considera que las eficiencias deben de variar del 55 al 69 % o más dependiendo de la potencia del motor.

Henggeler (2012) presentó un estudio de la problemática del uso eficiente del sistema electromecánico en acuíferos aluviales en el sur del Estado de Mississippi, E.U., donde encontró que para motores de combustión interna (utilizando diésel) a 1 350 rpm se tiene la mayor eficiencia, pero también el menor costo del agua; en cuanto a la utilización de motores eléctricos cuando los acuíferos se van abatiendo. El autor dijo que al incrementarse el nivel de la profundidad dinámica los productores pagan más por el agua, y que es por ello que el aspecto más importante dentro de los costos de agua ha sido **la profundidad del nivel dinámico**. De igual forma indicó que el método de instalación de un pozo profundo para riego es muy importante en la profundidad al nivel dinámico (*PND*) y por ende en el futuro costo del agua. Señaló que el gasto de descarga influencia los niveles dinámicos y costos de agua bombeada que se tendrán, que es necesario realizar los estudios correspondientes antes de realizar la instalación, que se debe de realizar una selección de la bomba con base en los resultados de los estudios realizados con anterioridad y que también se debe de considerar el cultivo que se va a plantar.

En México, como es sabido, los acuíferos prácticamente están sobre-explotados, porque las descargas son mayores a las recargas y algunos estados como Guanajuato y Coahuila y diversos sistemas en el Valle de México, se encuentran en condiciones críticas (CONAGUA, 2015b).

Cabe mencionar que se ha ya tomado acción gubernamental y se han elaborado varias normas por parte de la Secretaría de Economía, como la NOM-010-ENER-2004 “Eficiencia energética del conjunto motor-bomba sumergible”, NOM-002-SEDE-1999 “Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución”, NOM-001-ENER-200 “Eficiencia energéticas de bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical. Límites y métodos de prueba”. Sin embargo, la de mayor importancia en el trabajo es la NOM-006-ENER-1995 “Eficiencia energética

electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y método de prueba”.

Para el proceso de equipamiento de bomba para pozo de riego, Carrillo (2009) presentó para CONAGUA una metodología óptima de selección de equipos de bombeo para pozo, tanto para bombas verticales de flecha como sumergibles. También el FIDE y la CFE han presentado procedimientos del uso eficiente del agua y la energía, relacionados, sobre todo, con metodologías para reducir los costos del uso de energía en la agricultura.

Burt, Piao, Gaudi, Busch y Toufik (2008) hicieron un análisis relacionado con el uso de motores eléctricos de carga y velocidad variable con los que se mejora la eficiencia. Sánchez *et al.* (2008), presentaron el funcionamiento de una estación de bombeo compuesta por tres bombas en paralelo al aplicarle velocidad variable al motor, con lo cual mostraron que se minimiza el consumo de energía, e indicaron que el ahorro potencial de energía no siempre es mayor en una impulsión con varias bombas de velocidad variable que en otra con una bomba con velocidad variable, debido a la disipación de energía que tiene lugar en sus convertidores de frecuencia. Danfoss, citado por Sánchez *et al.* (2008), indicó que la altura de elevación depende del caudal demandado, motivo por el que los convertidores de frecuencia pueden trabajar con dos valores de consigna de presión, uno para caudal nulo y otro para caudal máximo cuando trabajan todas las bombas de la instalación. De igual forma, presentaron que el rendimiento medio de la instalación eléctrica de una bomba con convertidor de frecuencia puede ser un 8 % menor que sin dicho convertidor. De esta manera, concluyeron que el convertidor de frecuencia contribuye a hacer más uniforme el consumo de energía respecto al caudal y que el ahorro medio de la energía depende del rendimiento del convertido.

Benedicts, Haley, Woo y Cutter (2013) presentaron el mejoramiento de la eficiencia energética del bombeo en agua municipal en el Estado de California, E.U. al utilizar motores de velocidad variable. Mora, Vera, Rocamora y Abadia (2013) en “*Energy efficiency and maintenance cost of pumping systems for groundwater extraction*” expusieron que la sustentabilidad y la ganancia en irrigación depende grandemente de la eficiencia energética del sistema de bombeo, con base en la reducción de costos por bombeo.

2.2. Zona de estudio

2.2.1. Localización

El acuífero Texcoco se encuentra localizado en la zona centro-oriente del Estado de México, entre los paralelos 19°18' y 19°38' de latitud norte y los meridianos 98°39' y 99°03' de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 934 km² (Figura 1). Limita al norte con el acuífero Pantitlán-Pachuca, perteneciente al Estado de México; al este con el acuífero Soltepec, perteneciente al Estado de Tlaxcala; al sur y sureste con el acuífero Chalco-Amecameca, perteneciente al Estado de México y al oeste con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (CONAGUA, 2015a).

Geopolíticamente, la superficie del acuífero comprende 14 municipios (cinco de forma total y ocho en forma parcial; Figura 2): Texcoco (100 %), Chicoloapan (100 %), Chimalhuacán (100 %), Chiconcuac (100 %), Papalotla (100 %), Atenco (85 %), Chiautla (70 %), Ixtapaluca (60 %), La Paz (75 %), Nezahualcóyotl (35 %), Tepetlaoxtoc (60 %); así como pequeñas porciones de los municipios de Ecatepec de Morelos y Tezoyuca (10 %) (CONAGUA, 2015a; Escobar, 2010).

2.2.2. Fisiografía

La superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico (Raisz, 1994). De acuerdo a la clasificación fisiográfica del

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1997), el área que cubre el acuífero se encuentra localizada al este de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, en la porción central de la Sub-provincia Fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac (CONAGUA, 2015a).

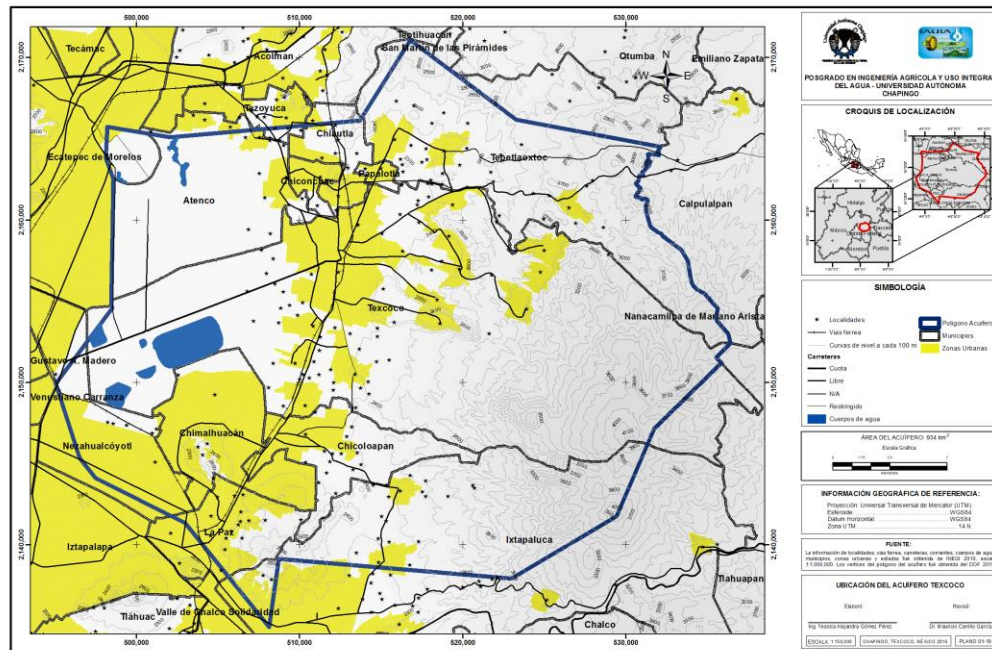


Figura 1. Localización del acuífero Texcoco. Fuente: (Adaptado de Escobar, 2012-2013).

La Sub-provincia Lagos y Volcanes de Anáhuac se caracteriza por estar conformada de montañas plegadas con orientación casi norte-sur, construidas a partir de secuencias marinas detríticas y calcáreas, separadas por valles aluviales y llanuras formadas en antiguas cuencas lacustres, donde aparecen elevaciones aisladas. Antiguamente el Valle de México drenaba hacia el sur. Las corrientes superficiales que circulaban en dicha dirección fueron interrumpidas por la emisión de productos volcánicos a través de conos que dieron origen a la Sierra de Chichinautzin, erupción que ocurrió hace aproximadamente 600 000 años. Esto causó el cierre definitivo del drenaje hacia el sur y de la cuenca, que se convirtió en endorreica, lo que favoreció la

acumulación de agua en la región central del valle, condiciones que dieron origen a la formación de los lagos de Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac. Las montañas que circundan la Cuenca del Valle de México son de origen volcánico, entre las que destacan la Sierra Nevada que se localiza al este, la Sierra de Las Cruces al oeste y la Sierra Chichinautzin hacia el sur.

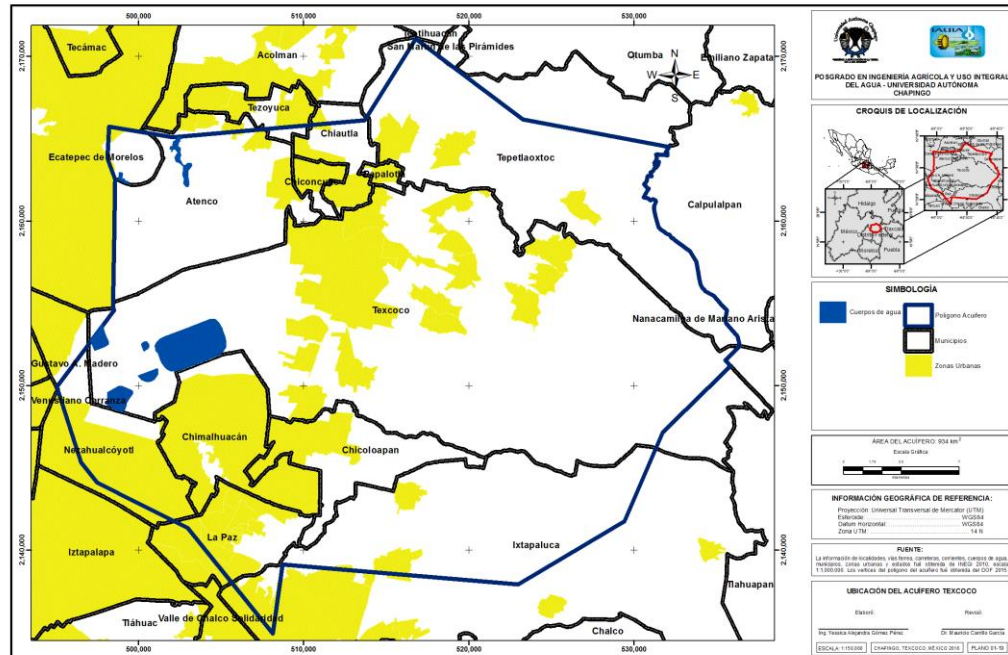


Figura 2. Municipios pertenecientes al acuífero. Fuente (Adaptado de Escobar, 2012-2013).

2.2.3. Clima

De acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen, modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, se observa que en la superficie cubierta por el acuífero predomina el clima BS1 kw(w) (i') seco templado o árido templado con verano cálido, con régimen de lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal menor de 5 % anual, con poca oscilación anual entre las temperaturas medias mensuales, entre 5 y 7 °C. En las estribaciones de las sierras de mayor altitud se presenta el clima semifrío sub-húmedo, con lluvias en verano, temperatura media anual entre 5 y 12 °C,

porcentaje de lluvias invernales menor de 5 %. En la parte más alta del monte Tláloc el clima es frío, con temperatura media anual entre -2 y 5 °C e invierno muy marcado (CONAGUA, 2015a).

Según Escobar (2010), el estiaje se presenta de noviembre a abril, mientras que la temporada de lluvias se observa de mayo a octubre, con una mayor incidencia de junio a septiembre, con máximos en el mes de julio, con más de 100 mm; determinándose una precipitación media anual de 750 mm. La temperatura media anual predominante es de 25 °C, para las zonas altas de las sierras la temperatura media anual es de 10 °C.

2.2.4. Hidrografía

Se encuentra ubicado en la cuenca del Río Moctezuma, Subregión Hidrológica Valle de México, Región Hidrológica No. 26, Pánuco. Cuenta con nueve cuencas, cuyos cauces corresponden a los Ríos Papalotla, Xalapango, Coxcacoco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec y San Francisco, los cuales descienden de la Sierra Nevada y confluyen en el Ex-Lago de Texcoco. Se trata, principalmente, de escurrimientos efímeros e intermitentes de carácter torrencial, con avenidas de corta duración y arroyos secos durante el estiaje.

2.2.5. Geomorfología

En el acuífero se presentan estructuras volcánicas como conos cineríticos, volcanes compuestos y volcanes escudos, además de extensos derrames basálticos, donde se han originado algunos lagos. En general, es posible identificar en la superficie del acuífero dos elementos geomorfológicos principales: las zonas altas que bordean al valle, que están constituidas por sierras, cerros, laderas y lomeríos, en la porción oriental, y las zonas planas que corresponden a una altiplanicie que consta de depresiones lacustres en proceso

de desecación y pequeñas elevaciones topográficas aisladas (CONAGUA, 2015a).

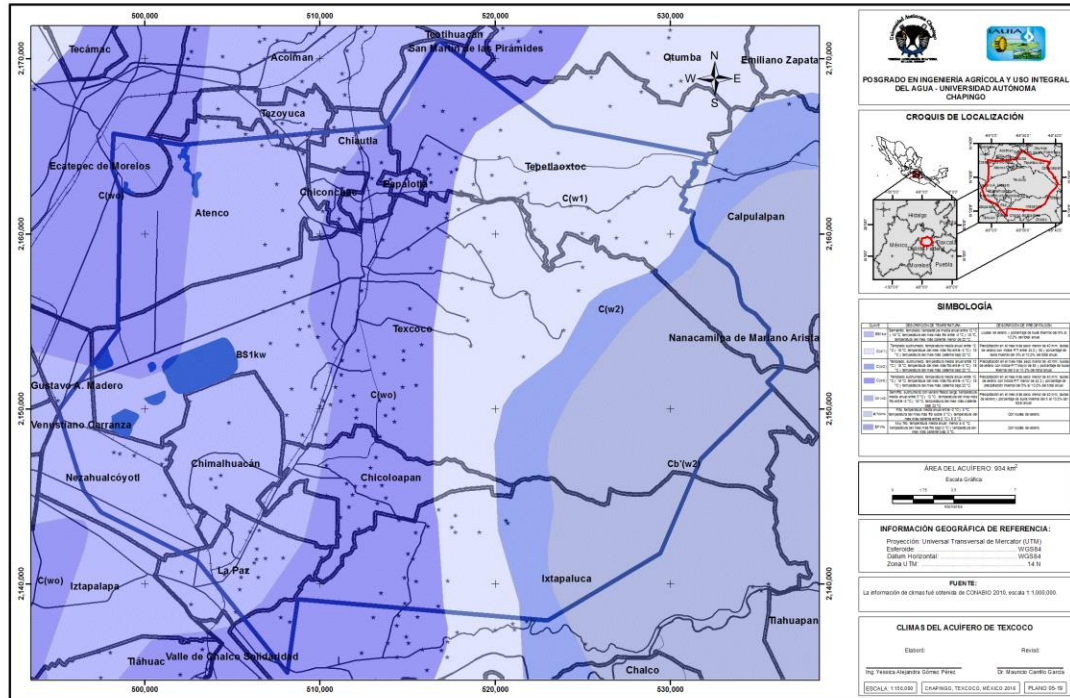


Figura 3. Climas de la zona de estudio. Fuente (Adaptado de Escobar, 2012-2013).

2.2.6. Geología

Geológicamente, el acuífero Texcoco se encuentra dentro del Eje Neovolcánico Transversal, siendo una formación del terciario tardío que cruza la República Mexicana del Océano Pacífico al Atlántico, con una dirección este-oeste con varias geoformas presentes (Mosser, 1987, citado por CONAGUA, n.d.).

2.2.7. Estratigrafía

La geología superficial y del subsuelo de la Cuenca del Valle de México, y por lo tanto del acuífero Texcoco, está constituida por rocas sedimentarias, volcánicas y en menor proporción intrusivas, cuyo registro estratigráfico comprende del Cretácico hasta el Reciente (CONAGUA, 2015a).

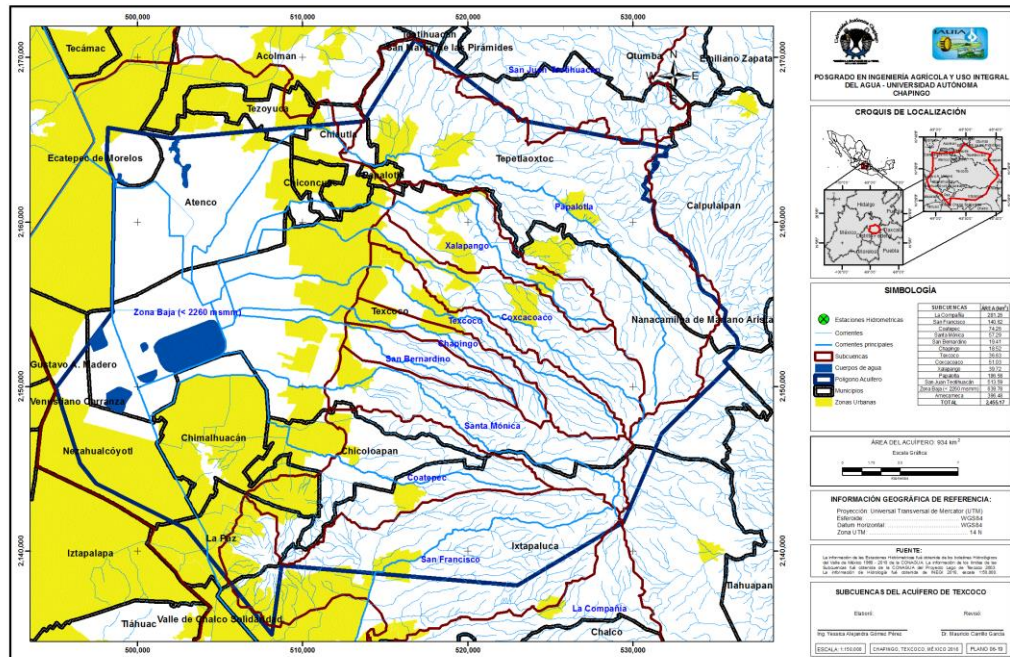


Figura 4. Cuencas pertenecientes al área de estudio. Fuente (Adaptado de Escobar, 2012-2013).

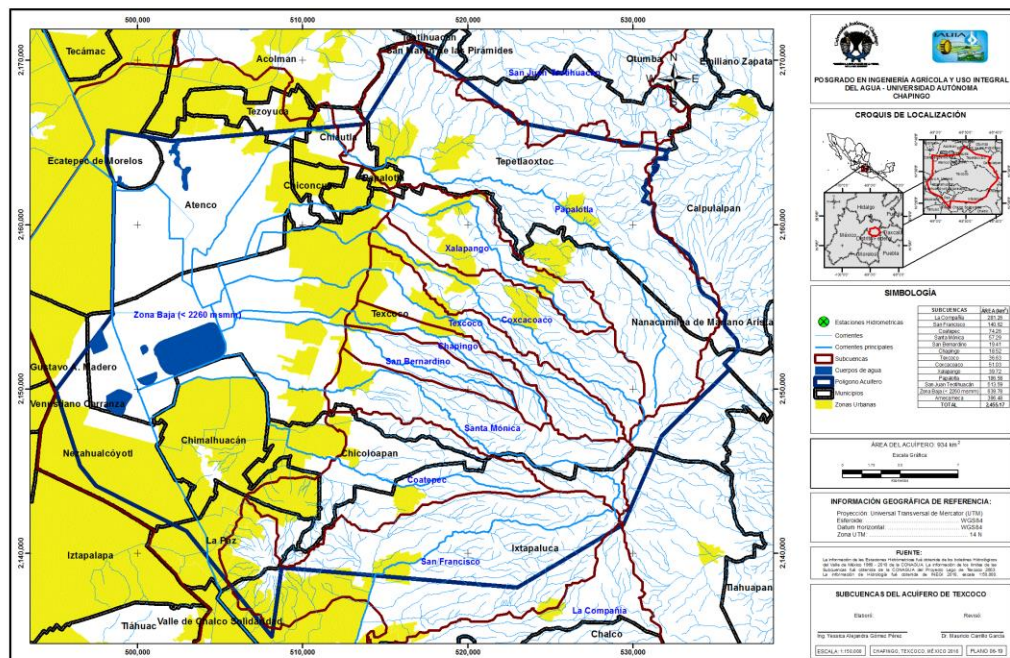


Figura 5. Geología en el acuífero Texcoco. Fuente (Adaptado de Escobar, 2012-2013).

La unidad litológica del Cretácico está constituida por las formaciones Xochicalco, Morelos, El Doctor, Cuautla y Mezcala; mientras que el Terciario está formado por granito Colotepec, grupo Balsas, rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano, grupo Pachuca, rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío, depósitos volcánicos del Plioceno Temprano, formación Otomí, rocas volcánicas Máficas del Plioceno Tardío, por las formaciones Las Cruces y Zempoala, riolita Navajas, depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno y formación Tarango. Finalmente, el Cuaternario se encuentra integrado por las formaciones Llano Grande, Tláloc, El Pino, Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Chichinautzin y por los depósitos aluviales y lacustres.

2.2.8. Geología estructural

La región ha estado sometida a la acción de un régimen tectónico distensivo, es por ello que las estructuras geológicas más importantes en la subcuenca de Texcoco son los aparatos volcánicos del Terciario y del Cuaternario, entre los cuales existen algunas diferencias, que se pueden agrupar por edades y tipo de estructuras. El lago de Texcoco está formado en una depresión tectónica afectada por fallas de al menos dos periodos distintos, lo que explica la diferencia en el espesor de los depósitos clásticos del Cuaternario.

2.2.9. Geología del subsuelo

Según CONAGUA (2015a), el subsuelo de la región está conformado en su porción más somera por una capa de arcillas cuyo espesor promedio es de 50 m, subyacidos por un potente paquete de sedimentos aluviales, constituido por arcillas, gravas, areniscas, conglomerados de origen volcánico y rocas volcánicas, principalmente tobas, cuyo espesor alcanza los 1 500 m. El acuífero está constituido, en su porción superior, por un paquete arcilloso de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad en su constitución, que forma un acuitardo de espesor variable que actúa como confinante o

semiconfinante en el centro de la cuenca. Bajo este paquete se encuentra el acuífero actualmente en explotación, formado principalmente por material granular más grueso que el del acuitado, depósitos vulcanoclásticos y conglomerados de origen volcánico, también de espesor y propiedades hidráulicas variables, generalmente mayor de 200 m. Le subyacen rocas volcánicas fracturadas, cuya base se localiza hasta 2 000 m en el centro del valle, disminuyendo hacia los márgenes de la cuenca (CONAGUA, 2015a).

2.2.10. Hidrogeología

El acuífero Texcoco es un acuífero libre a semiconfinado heterogéneo y anisótropo, constituido por un estrato de arcillas lacustres en la porción superior del valle, de materiales granulares aluviales, rocas y depósitos volcánicos (tobas, brechas, andesitas y cenizas), con intercalaciones de sedimentos arcillosos, que en conjunto presentan permeabilidad media y espesor promedio de 1 500 m, permitiendo la infiltración, circulación y almacenamiento de agua subterránea; mientras que la porción inferior está alojada en rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo y al basamento geohidrológico están representados por los sedimentos arcillosos y las mismas rocas volcánicas cuando a profundidad desaparece su fracturamiento, y a mayor profundidad por los conglomerados compactos de la Formación Balsas.

Existe un acuífero confinado por sedimentos lacustres y rocas arcillosas alojado en rocas calizas cretácicas, cuya presencia y potencial ha sido demostrado en las perforaciones profundas realizadas en la cuenca del Valle de México.

2.2.11. Parámetros hidráulicos

Según CONAGUA (2015a) los valores de transmisividad, obtenidos a partir de información de pruebas de bombeo de larga duración, realizadas en etapas de abatimiento y recuperación, en el acuífero y en la Cuenca del Valle de México y

de la interpretación de métodos analíticos y del modelo numérico de dos capas de Rathod y Rushton (1991), varían de 2.2×10^{-4} a $40.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; mientras que para la conductividad eléctrica los valores varían de 2.3×10^{-6} a $7.6 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ (de 0.2 a 65.0 m d^{-1}). Los valores de rendimiento específico S_y y del coeficiente de almacenamiento, se han obtenido mediante el modelo numérico de dos capas de Rathod y Rushton (1991), variando de 0.08 a 0.2 y de 0.01 a 0.00001 respectivamente.

2.2.12. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con información de los niveles estáticos y concesión de los pozos ubicados en el acuífero Texcoco. Esta información ha sido desarrollada por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México; consistente en una base de datos que comprende los años desde 1968 a 2014.

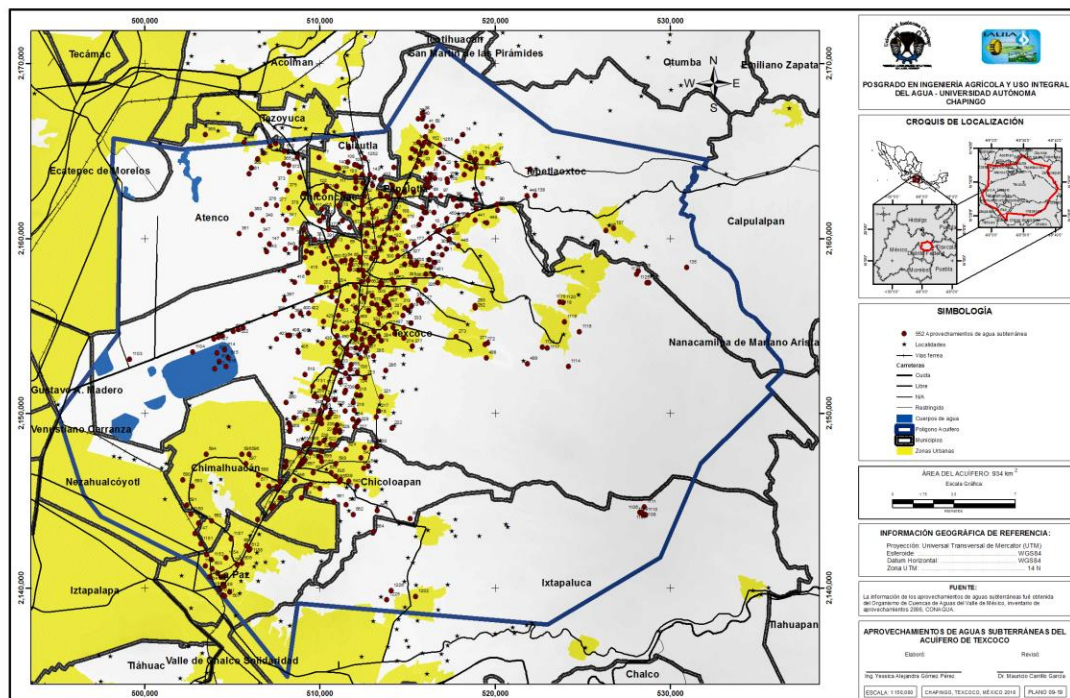


Figura 6. Localización de los 552 aprovechamientos activos del acuífero Texcoco. Fuente: (Adaptado de Escobar, 2012-2013).

2.2.13. Disponibilidad del agua subterránea

Según CONAGUA (2015a), el acuífero Texcoco tiene registrado un total de 1 009 aprovechamientos, de los cuales 552 se consideran activos y 457 inactivos. De los aprovechamientos activos 528 son pozos, cinco son norias y 19 manantiales. Entre todos, 256 se destinan al uso agrícola, 193 para uso público-urbano, 30 para actividades pecuarias, 24 para uso industrial y 49 para uso múltiple y servicios.

En total, el volumen de extracción del acuífero asciende a 183.1 hm³ anuales, con la siguiente distribución por usos: 128.4 hm³ (70.1 %) para uso público-urbano, 48.6 hm³ (26.6 %) para uso agrícola, 3.7 hm³ (2.0 %) para uso industrial, 1.6 hm³ (0.9 %) para uso múltiple y servicios y 0.8 hm³ (0.4 %) para uso pecuario. Adicionalmente, de los 19 manantiales se descarga un volumen de 10.4 hm³ anuales, los cuales son destinados a usos agrícolas y pecuarios (CONAGUA, 2015a).

El acuífero Texcoco, de acuerdo al balance de agua subterránea (DOF, 2015), cuenta con una recarga media anual de 145.1 hm³/año (de los cuales 139.8 hm³ corresponden a la recarga natural y 5.3 hm³ a la recarga inducida (CONAGUA, 2015a), una descarga natural comprometida de 10.4 hm³ anuales, un volumen concesionado de agua subterránea de 246.48 millones de m³/año, un volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos de 183.1 hm³ anuales y, sobre todo, un déficit de 111.78 millones de m³/año.

2.3. Método de selección del equipo de bombeo para un acuífero sustentable

Para seleccionar un equipo de bombeo en un pozo profundo, existen metodologías reportadas por Cafaggi, Rodal y Sánchez (2011), Herrera, Martínez y Carrillo (2007), Martínez y Gutiérrez (2003), Sulzer Brother Ltd (1989) y Viejo (1975). Estas metodologías se basan en que los Niveles

Estáticos (*NE*), y, por ende, los Niveles Dinámicos (*ND*) de los pozos, y el gasto (*Q*) del acuífero se mantienen constantes a través del tiempo y durante toda la vida útil (*VU*) del equipo electromecánico. A partir de esta hipótesis, se efectúa la selección del equipo para la Carga Dinámica Total (*CDT*) y gasto o caudal (*Q*) constantes, para puntos de máxima eficiencia electromecánica de todo el sistema de bombeo. Con base en lo anterior, existen dos equipos factibles que satisfacen las condiciones óptimas de eficiencia electromecánica para obtener el mínimo costo por metro cúbico de agua bombeada en pozos para riego. Estas dos opciones de equipo de bombeo son: equipo de bombeo de Bomba Turbina Vertical de flechas (*BTV*) y Bomba Tipo Sumergible (*BTS*), que se seleccionan dependiendo de las condiciones del suministro de energía, profundidad, operación del pozo, cámara de bombeo y condiciones de instalación.

2.3.1. Selección de bomba turbina vertical

Curva de aforo

Para conocer el caudal óptimo (productividad del pozo) de aprovechamiento del acuífero a través del pozo, se realiza una prueba de aforo, que se obtiene mediante la medición con una sonda eléctrica o neumática de la *PND* y con placa y orificio (piezómetros) o medidores los gastos propuestos. Mediante esta prueba se obtiene la Curva de Aforo (*PND* vs *Q*), la cual también se encuentra relacionada con la prueba escalonada del acuífero (Chávez, 1987). A partir de aquí se obtiene el punto óptimo de explotación, para lo cual existen dos criterios. Usualmente se obtiene del cambio de pendiente o punto de inflexión de la curva cuando la concavidad de la misma cambia, o exista. En caso de no existir dicho punto, se utiliza como criterio práctico, el 90 % de la capacidad máxima medida de la prueba de aforo.

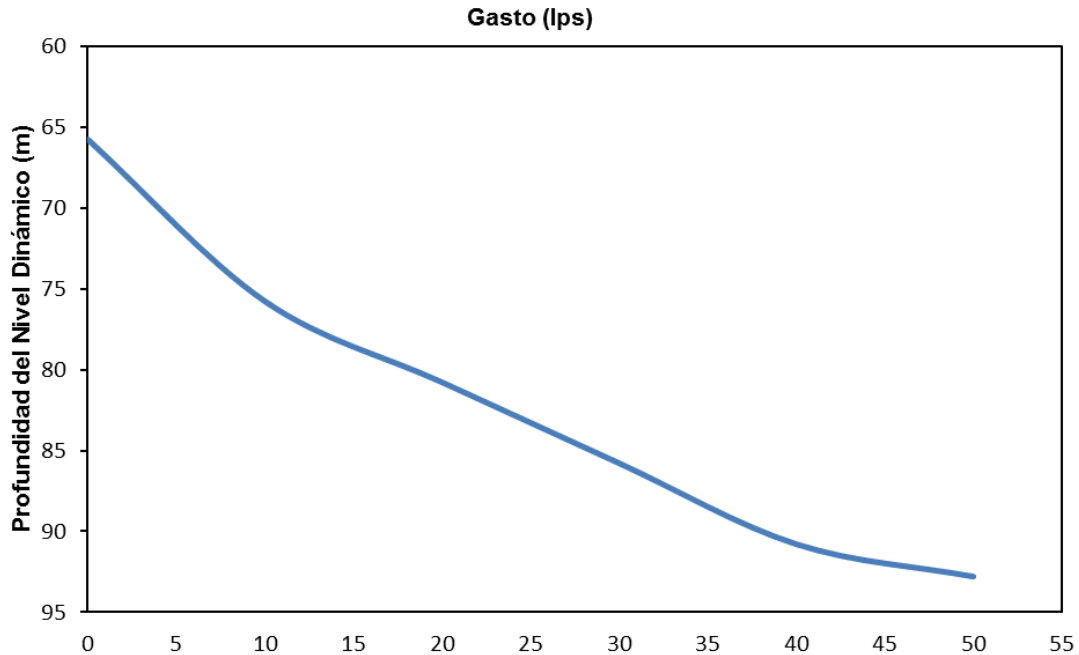


Figura 7. Curva de aforo típica en la zona de estudio.

Curva característica del sistema

La curva característica del sistema describe el comportamiento de la carga dinámica total (*CDT*) o carga de bombeo con respecto a la variación del gasto (*CDT* vs *Q*), considerando todas las pérdidas de energía que se producen en la columna y por los accesorios necesarios para que funcione correctamente la instalación del sistema de bombeo y la curva de aforo del pozo, las cuales se suman. Para determinar la curva del sistema se grafica en las abscisas los valores del gasto y en las ordenadas los valores de la *CDT*, con una variación superior al gasto de producción del pozo analizado. La ecuación general para obtener los valores de *CDT* a partir del gasto se expresa con la Ecuación (3), basada en el principio de conservación de energía (ecuación de Bernoulli), donde *CDT* es carga dinámica total (m), *PND* es la profundidad del Nivel Dinámico (m), *hf* representa las pérdidas de carga por fricción (m), *hx* las pérdidas de carga localizadas (m), *Pm* es la presión adicional por tanque

elevado o presión necesaria para riego presurizado (m) y $(v^2/(2g))$ es la carga de velocidad (m).

$$CDT = PND + h_f + h_x + Pm + \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Para aplicar la Ecuación (3) es necesario efectuar una selección preliminar de una bomba (primer intento o iteración), para encontrar la geometría de la tubería, los accesorios y así poder calcular las pérdidas de fricción en el sistema, determinando el número aproximado de tazonos (pasos) y potencia que llevará la bomba definitiva, siempre observando que la bomba seleccionada trabaje a máxima eficiencia, aunque sea sólo la base de la selección definitiva para realizar la selección es necesario determinar el diámetro del tazón, el cual depende directamente del diámetro del ademe del pozo.

Durante la construcción del pozo, después de terminada la perforación exploratoria y haber realizado el registro eléctrico, se diseña la terminación del pozo que considera el diámetro definitivo de la tubería del ademe y la longitud de la cámara de bombeo. El diámetro de la tubería de ademe donde se instalará la columna de la bomba considerará el diámetro de los tazonos factibles a utilizar. Su tamaño dependerá de la potencia y la velocidad de rotación de la bomba. Usualmente para la selección real de la bomba, el dato del diámetro del ademe del pozo es fijo y restrictivo.

Selección de la bomba preliminar

La información necesaria para iniciar la selección es: gastos de operación y profundidad del nivel dinámico, diámetro del pozo y curvas características y equipo eléctrico factible a usar. Con el gasto de diseño (Q) se selecciona la bomba candidata utilizando su curva característica de la bomba, empleando Q a

máxima eficiencia y con ello se encuentra la carga que produce el impulsor (HB).

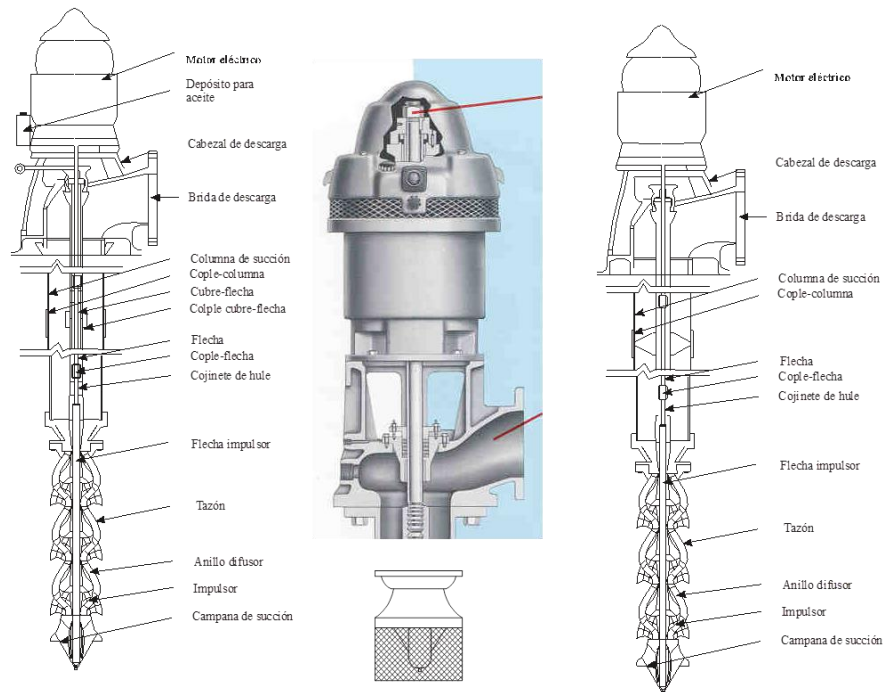


Figura 8. Bomba turbina vertical de flechas con lubricación de aceite y de agua. Fuente: (Carrillo, 2009).

El tazón de la bomba seleccionada debe de ser menor o igual al diámetro máximo calculado (d_{max} , plg) por la Ecuación (4), donde da es el diámetro del ademe (plg).

$$d_{max} = da - 2 \quad (4)$$

Las curvas características de la bomba se obtienen a partir de la información que proporciona el fabricante, para una geometría y velocidad de operación específica, y consisten en Gasto-Carga ($Q-H$), Gasto-Eficiencia ($Q-\eta$), Gasto-Potencia ($Q-Pot$), y Gasto-carga de succión positiva neta requerida ($Q-NPSH$).

Además, la información presentada por el fabricante incluye el modelo del tazón, paso de esfera mínima, la velocidad de rotación (N), la reducción de eficiencia por el número de pasos, la temperatura máxima del agua a la que trabaja, diámetro de flecha de bomba, diámetro del impulsor, salida del impulsor, fecha, modelo y nombre del fabricante (Figura 9).

El diámetro de la columna de bomba se puede seleccionar de las características del tazón, sin embargo, se recomienda que la velocidad en la tubería se encuentre entre 1.5 y 2.0 m s^{-1} para evitar pérdidas excesivas por fricción y, de esta manera, reducir los costos de operación, aunque la inversión inicial sea un poco más alta. Además, se puede emplear la Ecuación (5) para cuantificar el gasto (Q) y el área de flujo (A), considerando, como recomendación general una velocidad (v) de 1.5 m s^{-1} , donde d es diámetro interno de la columna (m), que se ajusta al diámetro comercial inmediatamente superior.

$$A = \frac{\pi d^2}{4}; \quad Q = A v \quad (5)$$

Pocas veces un solo impulsor satisface la CDT , por lo cual se debe determinar el número de tazones o pasos acoplados en serie que satisfagan la CDT para el Q y PND considerados, con la Ecuación (6) se puede calcular el número de tazones, donde H_b es la altura por tazón.

$$\text{Número de tazones} = \frac{CDT}{H_b \text{ de tazón}} \quad (6)$$

Sumergencia mínima calculada (K)

La sumergencia mínima evita que se presente cavitación. Con los datos obtenidos de la curva de la bomba y de las especificaciones por el fabricante se obtiene el $NPSH_r$ (Carga Neta de Succión Positiva Requerido) y, con ella, se

calcula la sumergencia mínima (K) con la Ecuación (7), donde P_a es presión atmosférica (m.c.a) y P_v es presión de vapor (m.c.a).

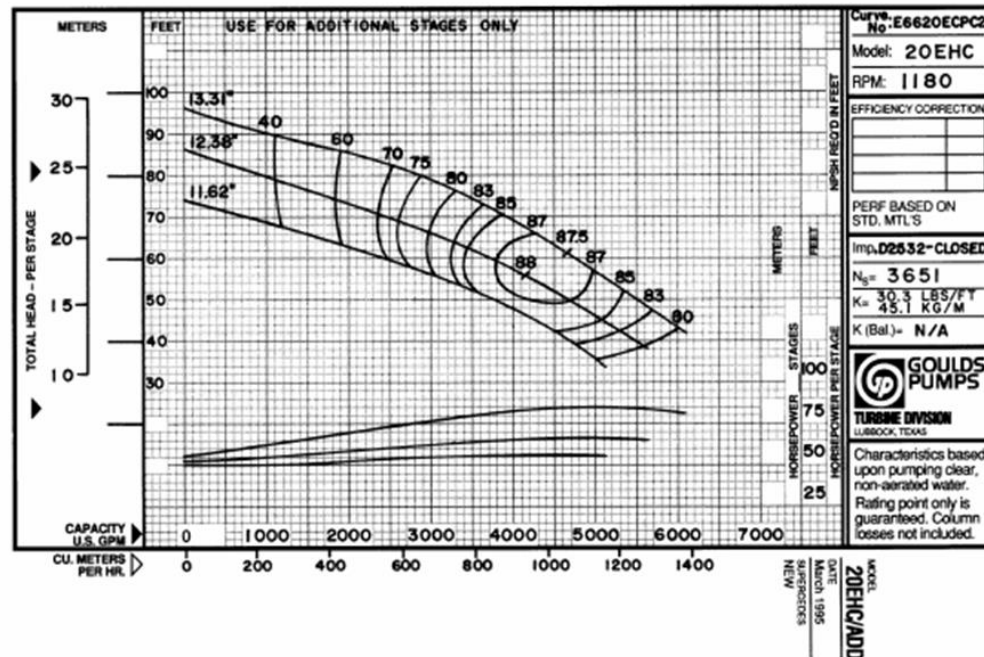


Figura 9. Curva característica de una bomba turbina vertical de flechas. Fuente: (Carrillo, 2009).

$$K = \text{NPSHr} - P_a + P_v \quad (7)$$

La presión atmosférica (P_a) y la presión de vapor (P_v) van a depender del lugar en donde se instalará el sistema de bombeo. Sus valores se obtienen a partir de los datos de elevación sobre el nivel del mar y la temperatura del lugar de instalación, que con un barómetro y un termómetro se miden, o caso contrario se obtienen mediante prontuarios técnicos del lugar.

Pérdidas de carga por fricción (h_f)

Con las características de los tazonos, tuberías y bomba preliminar seleccionada, considerando el gasto de diseño (Q) se calcula la CDT de acuerdo a la Ecuación (3), en la cual las pérdidas h_f se calculan en un área

anular causada por bombas con flecha de lubricación de aceite (cubre flecha) y lubricación de agua (flecha). El cálculo de hf se hace mediante el uso de tablas técnicas de laboratorios hidráulicos referidas por los fabricantes, debido a que no existe una ecuación práctica general para su cálculo. Para poder utilizar las tablas es necesario conocer el diámetro de la flecha con los datos de velocidad de la bomba (N), la potencia de trabajo. La longitud de la columna ($L_{columna}$), se calcula mediante la Ecuación (8).

$$L_{columna} = PND + k \quad (8)$$

Pérdidas de cargas localizadas (h_x)

Las pérdidas de carga localizadas surgen a partir de la energía empleada por el flujo para superar cualquier tipo de obstáculo, y se expresa como una parte de la carga de la velocidad en la forma mostrada por la Ecuación (9), donde h_x representa las pérdidas de carga localizadas (m), K_x es un coeficiente de resistencia asociado a cada accesorio y g es aceleración de la gravedad ($m\ s^{-2}$).

$$h_x = K_x \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

Las pérdidas localizadas serán variables debido a los diferentes accesorios y modificaciones del flujo, como codos, válvulas, medidores, etc, para iniciar el cálculo, si no se cuenta con los valores se puede suponer un 5 % de las pérdidas por fricción hf .

Presión adicional por tanque elevado o presión necesaria para riego presurizado (P_m)

La presión adicional (P_m) por tanque elevado o presión necesaria para riego presurizado debe de estar definida por las características específicas del diseño del sistema de riego. Sin embargo, en la zona de riego del acuífero Texcoco

usualmente los pozos descargan libremente, a una pileta o depósito para riego superficial y en muchas ocasiones se realiza un re-bombeo cuando existe riego presurizado, es por ello que se considera un valor de $P_m = 1$. Si la carga de velocidad es menor a 2 m s^{-1} las pérdidas menores pueden llegar a ser despreciables en comparación con hf , que serán muy pequeñas si la longitud de la columna es profunda y no existe longitud de tubería de descarga de grandes proporciones.

Selección de la bomba definitiva o afine de la selección

Con la tubería y bomba preliminar seleccionada, se calcula la Curva del Sistema para todos los gastos, desde cero hasta el máximo probable. En la curva del sistema (CDT), se sobreponen las curvas características de las bombas candidatas, incluyendo la preliminar y donde se intersecten dichas curvas se obtiene el punto óptimo de operación (Q_o, CDT_o), que deberá coincidir con la máxima eficiencia de la bomba. Si la bomba propuesta no da el punto óptimo de eficiencia, se buscará en diferentes marcas y modelos hasta que se encuentre la mejor opción de bomba.

Curva del sistema y gastos de operación real con curvas características que publican los fabricantes

En los pozos profundos se consideran varios tazones o cuerpo de tazones, sin embargo, las curvas características que presentan los fabricantes reportan datos por tazón. Por ello, para obtener la curva del sistema real por cada impulsor es necesario dividir la CDT del sistema para cada gasto entre el número de tazones a utilizar y sobreponerla en las curvas de las bombas comerciales candidatas para encontrar el Q y CDT de operación óptimos. Otra forma de cálculo es multiplicando la carga de la curva característica de la bomba candidata para cada gasto, por el número de tazones y sobreponerla a la curva del sistema.

Selección del motor

En bombas turbina verticales de flecha (BTV) para pozo profundo, la flecha de transmisión de potencia del motor a la bomba pasa por el eje del motor y se enrosca con una tuerca en la parte superior de éste. Para calibrar la altura que deberá tener el cuerpo de tazones y el grado de libertad para que no rocen los impulsores en el fondo o en la parte superior del propio tazón, se debe enroscar la tuerca con mucho cuidado y experiencia. Con base en lo anterior, los motores que más se utilizan son los motores eléctricos de flecha hueca de inducción y tipo jaula de ardilla.

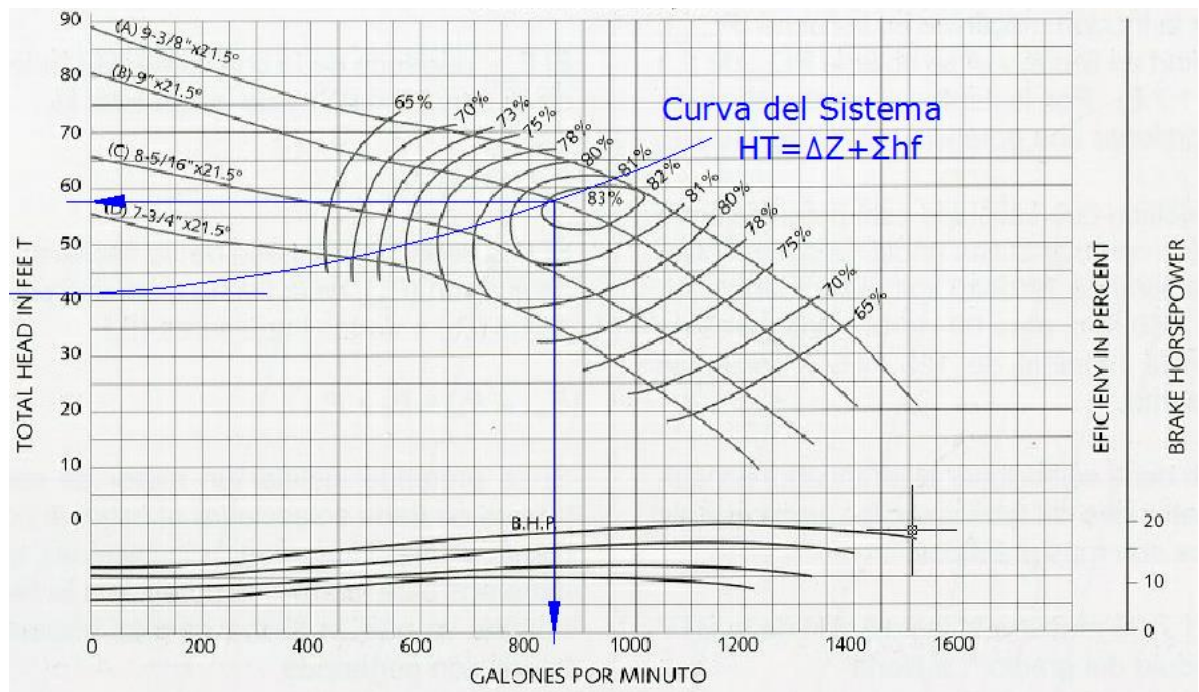


Figura 10. Curva de la bomba y curva del sistema precisando el punto (gasto y carga) de operación a máxima eficiencia por tazón. Fuente: (Carrillo, 2009).

Para seleccionar el motor se debe conocer la potencia total requerida por la bomba, la cual se obtiene con la curva característica de la bomba y la Ecuación (10).

$$Pot_{bomba} = (No.de\ tazones)(HP_{tazón}) \quad (10)$$

Los motores empleados en este tipo de bombas son de inducción trifásicos de 220/440 Voltios con 60 ciclos s^{-1} (CPS) (Hertz), con velocidades (N) de 1 160 a 1 760 rpm. N es baja para evitar el desgaste mecánico de la chumacera y flechas en los centradores por las altas velocidades de rotación. También, estos motores son del tipo National Electric Manufactures Association (NEMA) Clase B, arranque normal y baja corriente de arranque. Conociendo la potencia total requerida en la flecha de la bomba y la eficiencia de transmisión, se puede conocer la potencia necesaria del motor mediante la Ecuación (11).

$$Pot_{motor} = \frac{Pot_{bomba}}{(\eta_{flecha})(\eta_{motor})} \quad (11)$$

De los catálogos de los fabricantes de motores de flecha hueca existentes en el mercado se selecciona el motor candidato con todos sus aditamentos, en forma tal que satisfaga los requerimientos de potencia y velocidad. Cuando las rpm del motor seleccionado o en existencia, sean mayores que las rpm de la bomba, es necesario realizar un ajuste en la curva característica de la bomba seleccionada mediante las Leyes de Similitud y Semejanza.

Curva característica o de operación ajustada para diámetro constante del impulsor variando la velocidad de rotación (N)

Para realizar el ajuste de operación se aplican las cuatro Leyes de Similitud (Sulzer, 1989) para diámetro constante (Ecuaciones 12 a 15).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (12)$$

$$\frac{H_{M1}}{H_{M2}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (13)$$

$$\frac{Pot_1}{Pot_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (14)$$

$$\frac{NPSH_1}{NPSH_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (15)$$

De los catálogos de fabricantes de bombas, se seleccionan cabezal de la bomba, columna, flechas, colador, centradores y la tubería de descarga. Esto generalmente lo suministra el distribuidor de equipos de bombeo seleccionado.

Subestación eléctrica

Conociendo el equipo de bombeo completo (motor, bomba, columna, flecha cuerpo de tazones y cabezal de descarga), se procede a seleccionar la subestación con el equipo eléctrico e instalaciones necesarias. Los motores normalmente empleados en la zona del acuífero utilizan una tensión de 220/440 V. Para estas tensiones, la corriente que se utiliza para las diferentes potencias en HP se presenta en la Cuadro 1.

Cable conductor de corriente

Para la selección del cable conductor de corriente es necesario conocer la potencia nominal del motor seleccionado, y la intensidad (I) en Voltios de trabajo. Con esta información y los catálogos de los fabricantes de equipo electromecánico se seleccionan los conductores y demás dispositivos cumpliendo con las especificaciones y normas nacionales e internacionales para que funcionen adecuadamente. El primer paso es cuando ya es conocida la potencia en KW o HP y tensión de corriente de trabajo (Voltios), se selecciona el calibre del cable que satisfaga la carga de la corriente en los catálogos de los fabricantes. Cabe mencionar que entre más alta sea la tensión menor será el calibre del cable conductor como se observa en el Cuadro 1 y con ello se reducirá el costo de los conductores sin menospreciar calidad. Con el calibre conductor AWG seleccionado y el número de cables para la conexión del motor al arrancador, se seleccionan los diámetros de los conductos. Las longitudes dependerán de la geometría de la instalación y casetas de control si

existen. En esta selección deberá incluirse el cable y conducto del interruptor al transformador. El Cuadro 2 especifica los diámetros necesarios para diferentes potencias.

Cuadro 1. Corriente utilizada (AMP) en voltajes 220/440 para diferentes potencias en HP. Fuente: (Montes, 1980).

HP	220 V	440 V
	AMP	AMP
20	100	50
25	100	50
30	125	70
40	200	100
50	200	100
60	250	125
75	300	150
100	400	200
125	500	250
150	-	300
200	-	400
250	-	500
300	-	600
400	-	800

Arrancador

Un motor eléctrico en el momento de arranque consume un valor, que en ocasiones es, hasta cinco veces la corriente de trabajo, debido a que debe vencer la inercia que tiene la bomba para que inicie su movimiento. Los motores NEMA clase B, de arranque normal y baja corriente de arranque, también experimentan un pico de consumo de corriente cuando se arranca. Es por ello que para proteger la instalación y satisfacer la demanda pico se utilizan los arrancadores de baja tensión y a tensión reducida. Los primeros son para

cuando se tiene prácticamente uno o dos arranques al día, y los segundos cuando se tienen varios arranques durante el día. En sistemas de riego, usualmente se arrancan una vez, y se apagan hasta el final del riego y se utilizan los de plena tensión. Aunque los de tensión reducida son mejores, su costo es sustancialmente mayor a los de baja tensión. Para seleccionar el arrancador, sólo se requiere la potencia del equipo (KW o HP) de bombeo y la tensión de trabajo (voltios). A partir de ello, se selecciona la mejor oferta que satisfaga calidad y requerimientos en los catálogos de los fabricantes.

Cuadro 2. Tabla de calibres de conductor y tubo Conduit a 440 Volts. Fuente: (Montes, 1980).

Potencia Motor Hp	Calibre y Tipo de Conductor en tubo Conduit			
	T W		T H W	
	Calibre conductor	3 Cond. En tubo	Calibre conductor	3 Cond. En tubo
	AWG	D en mm	AWG o MCM	D en mm
20	8	19	10	19
25	8	19	10	19
30	6	25	8	19
40	4	25	6	25
50	2	32	4	25
60	2	32	2	32
75	1/0	38	2	32
100	3/0	52	1/0	38
125	4/0	52	3/0	52
150			4/0	52
200			300	64
250			500	76
300			600	76

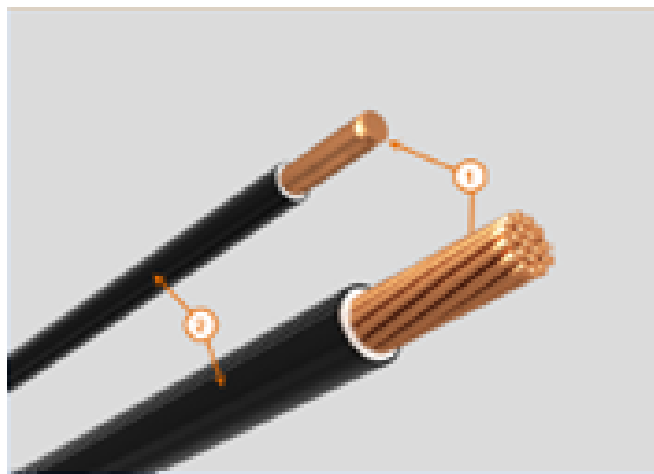


Figura 11. Alambre y cable conductor corriente eléctrica para instalación de subestación CONDUMEX.



Figura 12 Arrancador tipo para pozo de riego.

Interruptor

Siempre se requiere de un interruptor de corriente entre el transformador y el arrancador para protección y servicio al equipo de bombeo, este arrancador puede ser por un sistema de fusibles o electromagnético, su selección

dependerá sólo de la potencia (KW o HP) en intensidad (Voltios), y se seleccionarán de los catálogos de los fabricantes.

Transformador

La llegada de corriente de las plantas generadoras a los postes de distribución en baja tensión de la compañía de electricidad, es generalmente de 13 KV o 23 KV (se consulta con la compañía de electricidad suministradora) y ésta se deberá reducir a 220, 440 ó 600 V, dependiendo de la potencia de las bombas. Para ello se utiliza un transformador con cierta capacidad en kilovoltios aparentes (KVA). En la zona del acuífero de Texcoco y específicamente para las zonas de riego actualmente se tiene 13 KV y se reduce a 440V, debido a que los niveles de bombeo y gastos requieren potencias que oscilan de 20 a 150 HP. Para seleccionar un transformador existe una regla de dedo que consiste en revisar que el valor de su capacidad en KVA sea igual al de consumo del motor de la bomba en HP. Sin embargo, deberá emplearse el procedimiento siguiente porque debe cuidarse que el equipo de bombeo trabaje con valores del factor de potencia (F_p) superiores al 85 %. De otra forma, serán penalizados económicamente por la compañía suministradora de electricidad (CFE) por bajo F_p .

Para la selección del transformador es necesario obtener los KVA mediante la Ecuación (16), donde KVA indica kilovoltio aparente, F_s es factor de seguridad y η es eficiencia del motor.

$$KVA = \frac{(HP)(0.746)(F_s)}{(\eta\eta(F_p))} \quad (16)$$

Con este valor de KVA necesario y la corriente de llegada en la acometida que llega al poste, se busca en los catálogos de los fabricantes y se realiza la selección del transformador correcto.



Figura 13. Interruptor tipo para pozo de riego.



Figura 14. Transformador trifásico tipo poste.

Equipo complementario y de protección del equipo de bombeo

El equipo de protección de la subestación comprende la conexión a tierra y el pararrayo. En el sistema de arranque, los equipos de protección comprenden los sistemas automáticos de sobrecalentamiento y de corto circuito. Este equipo lo selecciona y suministra directamente el fabricante de los equipos de la subestación.

Caseta de control y malla de protección

Aunque no todos los equipos de bombeo en zonas de riego lo consideran, se construye una caseta de control para proteger los sistemas de arranque contra los cambios climáticos y del ambiente, así como también para protegerlos del vandalismo y posibles accidentes. Existen diversos diseños de casetas de control, pero una de las más comunes es el uso de una malla de tela de alambre o barda. Esta obra civil se hace de acuerdo a las especificaciones de construcción, requerimiento y limitaciones de espacios, y deberá estar a una distancia considerable del pozo para que se le pueda dar mantenimiento a éste y a la bomba cuando sea requerido.

Para la adquisición de todo el equipo electromecánico en la zona del acuífero, se solicita a una compañía (de venta de equipos de bombeo) que suministre todos los materiales y otorgue una garantía efectiva en conjunto, para que no justifique la falta de calidad, especificando que los componentes del equipo se compraron en distribuidoras diferentes.

En el acuífero Texcoco, existen casos muy aislados donde utilizan motores diésel o gasolina para bombear el agua de riego en lugar de motores eléctricos. Para seleccionar un equipo con motor de combustión interna, se realiza un pequeño cambio en el procedimiento de selección de BTV, el cual consiste en utilizar un cabezal de engranes para trasladar la potencia de la flecha horizontal del motor de combustión interna a la flecha vertical de la bomba con relaciones

de engranes 1:1, 1:2, 2:3 etc., dependiendo de la marca del fabricante. Este tipo de equipos de bombeo en el acuífero sólo se emplean para realizar aforos de pozos por su capacidad de variar la velocidad y potencia, por lo que en la zona de estudio son casi inexistentes para bombas de riego y agua potable.

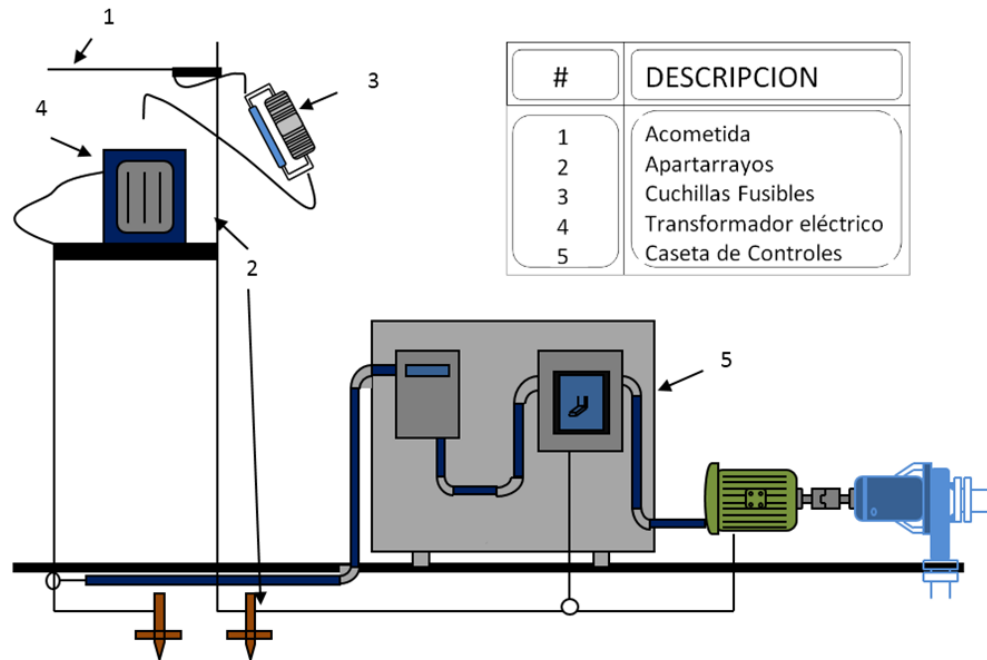


Figura 15. Diagrama de instalación eléctrica. Fuente: (Romo & Rivas, 2016).

2.4. Selección de bomba turbina sumergible (BTS)

A diferencia de la BTV que tiene el motor en el brocal del pozo y que la transmisión a la bomba es por flechas; la bomba sumergible tiene su motor eléctrico sumergido y acoplado al cuerpo de tazones dentro del agua y la potencia le llega a través de un cable submarino (Figura 17).

En caso del equipamiento de una bomba sumergible para pozo profundo, los fabricantes presentan las curvas de las bombas en módulos completos porque no existe flecha de trasmisión de potencia desde el brocal del pozo hasta el cuerpo de tazones y presentan las curvas características incluyendo los tipos y capacidades de los motores, otra característica relevante es que los motores

usualmente trabajan a velocidades (N) de 3 550 rpm con motores trifásicos de inducción de dos polos. Por lo tanto, los tazones de estas bombas son de menor tamaño (diámetro), lo que las hace ver más esbeltas, con mayor versatilidad y pueden instalarse inclusive en pozos desviados. Sin embargo, en pozos areneros su duración es muy corta debido a su alta velocidad de rotación. Actualmente se construyen bombas sumergibles del orden de 1 000 HP (INDAR) y con motores de velocidades bajas, pero que comparadas con las de velocidades altas son notablemente más caras.



Figura 16. Subestación eléctrica.

Para seleccionar una bomba sumergible, al igual que la de flechas, se requiere el gasto de diseño o de producción del pozo (Q), la PND , la tensión de corriente disponible (Voltios) y la geometría de la instalación. En tal sentido se recomienda el uso del siguiente procedimiento.

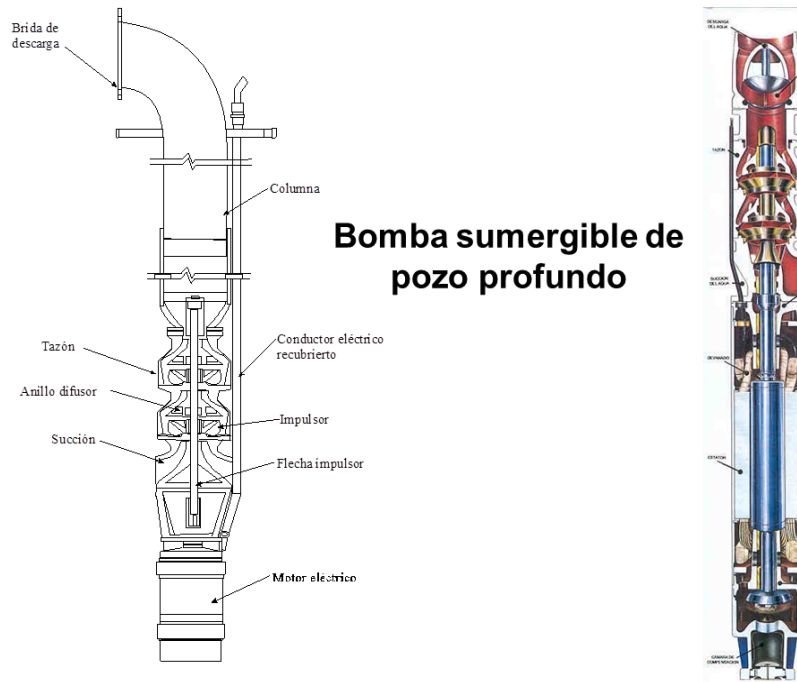


Figura 17. Bomba turbina sumergible. Fuente: (Carrillo, 2009).

Con el gasto de diseño, se seleccionan las bombas candidatas que cumplan con el diámetro, el gasto de operación y la PND más la sumergencia (k) para máxima eficiencia. El diámetro comercial de la columna de la bomba debe de considerar una velocidad menor de 2 m s^{-1} . Después se calcula la curva del sistema para gastos desde cero hasta el valor máximo de aforo (mayor que el gasto de diseño), incluyendo todas las pérdidas. En este caso al no existir flecha no hay área anular de paso del flujo. Por lo tanto, las pérdidas por fricción se pueden calcular con una fórmula de pérdidas de fricción a tubo lleno como la de ecuación de Darcy-Weisbach, expresada en la forma de la Ecuación (17), donde h_f representa las pérdidas de carga por fricción (m), f es un factor de fricción (adimensional) y L y D son la longitud (m) y el diámetro de la tubería (m).

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

Para el caso de las pérdidas localizadas o de accesorios, se hace de igual manera que para la BTV de flechas y si no se conocen al inicio de la selección, se pueden considerar como el 5 % de las h_f .

A las bombas candidatas seleccionadas se le sobrepone la curva del sistema y se elige la que tenga un valor en la intersección de las curvas igual al gasto de diseño y máxima eficiencia (Figura 17).

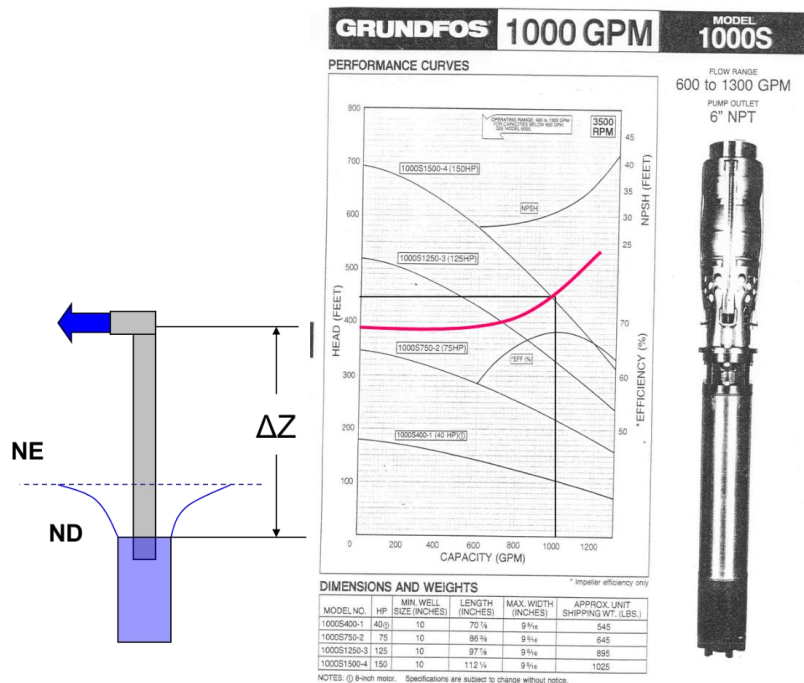


Figura 18. Curva del sistema y curva característica de la bomba turbina sumergible. Fuente: (Carrillo, 2009).

Con el modelo y curva característica de la bomba sumergible seleccionada, se obtiene la potencia requerida por el motor y se determina el calibre del cable submarino plano de los catálogos de los fabricantes, para una longitud que va desde el arrancador hasta el motor submarino.

La selección del cable normal del arrancador al transformador, interruptor y conductos del cable es similar al de la BTV de flechas ya mencionado

anteriormente. Adicionalmente, y de la misma manera que la BTV de flechas, se selecciona el transformador, la subestación eléctrica, la caseta y malla de protección de la subestación del equipo de bombeo.

Cuadro 3. Características típicas de cable submarino. Fuente: (Montes, 1980).

Calibre 3	Φ Nominal	Área mm ²	Dimensiones	Peso	Amperaje
AWG	cobre mm ²	cobre	en mm	kg/m	AMP a 30 °C
10	3.1	7.5	9 * 20	0.295	30
8	3.9	11.9	11 * 25	0.480	45
6	4.9	18.8	12 * 28	0.650	65
4	6.3	31.1	14 * 32	0.950	85
2	7.8	47.7	15 * 37	1.370	115
1/0	9.8	75.4	19 * 45	2.150	156
2/0	11.8	109.3	21 * 51	2.700	185
3/0	13.2	135.8	23 * 56	3.240	215
4/0	14.9	174.3	24 * 61	3.990	245

La carga permitida de cable reduce o aumenta según esta tabla

Temperatura								
del ambiente	20	25	30	35	40	45	50	55
en °C								
Máxima								
carga Amps.								
Permitidas	110	105	100	94	88	82	75	67
en %								

Como los motores que se fabrican para las bombas sumergibles son de uso específico, se obtienen potencias más bajas con mayor eficiencia, reduciendo los costos de inversión y mantenimiento. Sin embargo, la vida útil es mayor en las BTV de flechas, aunque su precio es mayor al de las BTS por su baja velocidad de rotación.

2.5. Costos

2.5.1. Costos de inversión o fijos (C1)

Los costos de inversión del equipo o costos fijos, consideran la amortización, interés y los impuestos y seguros, durante su vida útil (VU).

2.5.2. Costos de operación (C2)

Para obtener el costo de operación del metro cúbico de agua bombeada por hora, se considera principalmente el consumo de energía eléctrica, para lo cual es necesario conocer la eficiencia electromecánica del pozo (*EEP*, η ; Ecuación 17), que es con la que trabaja la bomba y la parte medular en la obtención del costo por metro cúbico de agua.

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} \quad (17)$$

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-006-ENER-1995, *Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. - Límites y método de prueba*, los valores que se consideran recomendables se presentan en la Cuadro 4.

Cuadro 4. Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Fuente: (Secretaría de Energía, 1995).

Intervalos de potencia		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

Cuando la *EEP* es menor al 40 %, se deberán tomar acciones para mejorarla, que pueden consistir en una rehabilitación o la sustitución del equipo electromecánico.

El costo de kilowatt-hora se obtiene de las tarifas eléctricas de acuerdo al uso de ésta, lo cual es proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Para uso agrícola la tarifa establecida es la 9; y su cuota depende del mes. En tal sentido, el costo de la energía se evalúa en la forma mostrada por la Ecuación (18).

$$\left(\begin{array}{c} \text{Costo de} \\ \text{la energía} \\ \text{por hora} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Potencia consumida} \\ \text{en una hora} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Costo del} \\ \text{KW-h} \end{array} \right) \quad (17)$$

A partir de la Ecuación (17) se obtiene el costo por m³ de agua bombeada por hora (Cm³h) en la forma mostrada por la Ecuación (18).

$$C_{m^3 h} = \frac{\text{Costo de la energía/ho ra}}{\text{Gasto por hora}} \quad (18)$$

2.5.3. Costos de mantenimiento (C3)

Los costos de mantenimiento están constituidos por el mantenimiento y repuestos del motor, mantenimiento y repuestos de la bomba y por el mantenimiento de instalaciones y equipo.

2.5.4. Costos totales (CT)

El costo total por metro cúbico de agua bombeada por hora (C_T; pesos) se toma como igual a la suma de costos por metro cúbico en la forma mostrada por la Ecuación (19), donde C₁ corresponden a los costos de inversión (pesos), C₂ a los costos de operación (pesos) y C₃ a los costos de mantenimiento (pesos):

$$C_T = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{m^3} \quad (19)$$

Las bombas en pozos para riego trabajan de 2 000 a 3 000 h/año, dependiendo del tipo de cultivo, de las características climatológicas y edafológicas del lugar de instalación.

3. SELECCIÓN ÓPTIMA DE EQUIPO DE BOMBEO EN POZO PROFUNDO DE RIEGO

3.1. Resumen

La sobre-explotación de acuíferos causa disminución del nivel estático (NE) y afecta la eficiencia de los equipos de bombeo, el gasto proporcionado (Q) y los costos de operación. Se desarrolló una metodología para la selección de un equipo de bombeo para riego, considerando el ritmo de abatimiento de NE . Se eligieron cinco pozos localizados en las zonas norte, sur, este, oeste y centro del Acuífero Texcoco. A partir de información de hidrógrafos para los años 1968-2014 se modeló la variación del NE y se proyectó la modificación para el periodo de vida útil (VU) 2016-2031. Se analizó la selección de equipos de bombeo para su instalación en 2016, pero para operar en máxima eficiencia en tres escenarios: 2016, 2024 y 2031. Para cada caso y en cada año de VU se modeló la curva del sistema considerando la modificación de la curva de aforo y la carga dinámica total, afectadas ambas por NE . A partir de varias alternativas de equipos de bombeo propuestos por fabricantes, se modelaron las curvas características correspondientes a la potencia (Pot), eficiencia (η) y $NPSHr$ en función de Q . A partir de la curva η - Q y mediante derivación, se obtuvo el flujo correspondiente a la máxima eficiencia de operación. Las curvas Pot - Q se resolvieron con la intersección de la curva del sistema y se realizó un proceso de búsqueda de la potencia de la bomba para tener máxima eficiencia en cada uno de los escenarios y valores de $NPSH$ disponible mayores a $NPSH$ requerida. En cada escenario se determinó la variación de η , Q y de los costos de operación a lo largo de VU. Se encontró que el costo del recurso hidráulico bombeado puede variar en función del punto programado para tener eficiencia máxima en el equipo de bombeo.

Palabras clave: Bombas de pozo profundo, bombas centrífugas, carga dinámica total, curva del sistema, selección óptima.

3.2. Abstract

The depletion of aquifers causes a decrease in the static level (NE) and affects the efficiency of pumping equipment, the volumetric flow obtained (Q) and operating costs. A methodology was developed to carry out the selection of pumping equipment considering the abatement rate of NE . Five wells located at the north, south, east, west, and center of the Aquifer Texcoco were selected. Based on information of hydrographers that corresponded to the period 1968-2014, the variation of NE was modeled and its modification was projected for the period 2016-2031, considered a shelf life (SL) period of the equipment. The selection process of pumping equipment to be installed in 2016 was analyzed to have maximum efficiency in three sceneries: 2016, 2024, and 2031. The system curve was modeled for each scenario and for each year during SL, considering the modification of the capacity curve and the total dynamic head, both affected by NE . Based on several alternatives of pumping equipment that were proposed by fabricants, the characteristic curves corresponding to power (Pot), efficiency (η), and $NPSHr$ as a function of Q , were modeled. The curve η - Q was handled through derivation to obtain the flow that corresponded to the operation maximum efficiency. Curves of Pot - Q were solved with the system curve and a searching process was conducted for each scenario to obtain the power of the pump to have maximum efficiency and with $NPSH$ available with higher value than $NPSH$ required. The variation of η , Q , and that of operating costs was determined along of SL. It was found that the cost of the pumped hydraulic resource can vary depending on the point programmed to have maximum efficiency in the pumping equipment.

Key words: Centrifugal pumps, deep well pumps, pump system curve, total dynamic load, optimum selection.

3.3. Introducción

El problema del uso ineficiente del agua y la energía se ha tratado de resolver desde que se presentaron los sistemas de riego por bombeo. Con el aumento en la demanda de agua el problema de sobre-explotación de los acuíferos ha crecido en importancia. La sobre-explotación extrema de los acuíferos del Valle de México y en especial del acuífero Texcoco, en México, conducen a abatimientos regionales de más de un metro por año en los niveles estáticos y en consecuencia los de bombeo o dinámicos (Escobar & Palacios, 2012). El incremento de la profundidad de los niveles dinámicos ocasiona que las bombas trabajen con cargas fuera de sus puntos óptimos de eficiencia, consumiendo una mayor cantidad de energía para la misma cantidad de agua, aun cuando la bomba fue seleccionada correctamente en las condiciones iniciales.

El Acuífero Texcoco tiene registrado un total de 1 009 aprovechamientos, de los cuales 552 se consideran activos y 457 inactivos. De los aprovechamientos activos 528 son pozos, cinco son norias y 19 manantiales. Entre ellos, 256 se destinan al uso agrícola, 193 para uso público-urbano, 30 para actividades pecuarias, 24 para uso industrial y 49 para uso múltiple y servicios (CONAGUA, 2015a). Carrillo, Torres, Valentín y Gómez (2013) y Carrillo, Gaona y Gómez (2014) presentaron un diagnóstico de la eficiencia electromecánica de 52 pozos en el acuífero Texcoco y observaron un valor muy bajo de la misma, con variación entre 23 y 56 %.

Chávez, Reich, Loftis y Miles (2011) indicaron que los costos de bombeo son altos debido a que se bombea más agua de la necesaria y a que las plantas de bombeo operan ineficientemente. Kranz (2010) indicó que una eficiente planta de bombeo para riego debería ahorrar en promedio del 25 al 30 % de la energía utilizada para bombear el agua de riego, mediante el correcto ajuste de la bomba y motor a las condiciones de funcionamiento actual.

Henggeler (2012) indicó que en el método de instalación de un pozo profundo para riego es muy importante en la profundidad al nivel dinámico (*PND*) y por ende en el futuro costo del agua. Señaló que el gasto de descarga influencia los niveles dinámicos y costos de agua bombeada que se tendrán, que es necesario realizar los estudios correspondientes antes de realizar la instalación, que se debe de hacer una selección de la bomba con base en los resultados de los estudios realizados con anterioridad y que también se debe de considerar el cultivo que se va a plantar.

Para seleccionar un equipo de bombeo en un pozo profundo, existen metodologías reportadas por Cafaggi, Rodal y Sánchez (2011), Herrera, Martínez y Carrillo (2007), Martínez y Gutiérrez (2003), Sulzer Brother Ltd (1989) y Viejo (1975). Estas metodologías se basan en el criterio de mantener los Niveles Estáticos (*NE*), y, por ende, los Niveles Dinámicos (*ND*) de los pozos, y el gasto (*Q*) del acuífero, constantes a través del tiempo y durante toda la vida útil (*VU*) del equipo electromecánico. A partir de esta hipótesis, se efectúa la selección del equipo para la Carga Dinámica Total (*CDT*) y gasto o caudal (*Q*) constantes, para puntos de máxima eficiencia electromecánica de todo el sistema de bombeo.

Sin embargo, con base en información sobre el comportamiento de los niveles del agua subterránea del Organismo de Cuencas de Aguas del Valle de México (2006), el nivel estático en todos los aprovechamientos del Acuífero de Texcoco se reduce en forma lineal con el tiempo, lo cual sugiere que la selección de un equipo de bombeo para esta zona no puede hacerse bajo la consideración de *CDT* constante y debe desarrollarse una metodología que maximice la eficiencia del sistema a lo largo de su vida útil. En tal contexto, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar una metodología de selección de equipo de bombeo de pozos para riego, obteniendo los costos mínimos por metro cúbico de agua bombeada durante su vida útil (*VU*) para: (a) niveles dinámicos (*PND*) de

bombeo iniciales, (b) *PND* de bombeo a la mitad de VU, (c) *PND* de bombeo al final de la VU y (d) optimización de la ecuación de tendencia del *PND* durante la VU.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Objeto de estudio

El presente trabajo tuvo como objeto de estudio una parte del sistema de bombeo en el Acuífero Texcoco, particularmente los pozos E-866, F-107, E-133, EW-55 y ER-88, ubicados en los municipios de Chiconcuac, Chicoloapan, Texcoco, Estado de México y en la Universidad Autónoma Chapingo, que representan la parte Norte, Sur, Este, Oeste y Centro del acuífero.

3.4.2. Abatimiento regional

Se hizo una regionalización del acuífero Texcoco a partir de la información piezométrica histórica desde 1968 al 2014 proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Los datos de los pozos seleccionados se sometieron a rutinas de regresión lineal para obtener los niveles estáticos (*NE*) y la tendencia de abatimiento en cada caso, a lo largo de 16 años en el futuro, desde 2016 y hasta 2031.

3.4.3. Evaluación experimental del sistema de bombeo

Para cada sistema de bombeo seleccionado se realizó una evaluación de los parámetros hidráulicos y eléctricos consistentes en la medición del gasto (*Q*), intensidad (*u*), corriente (*I*) y factor de potencia (*fp*). Para la medición de la profundidad del nivel estático (*NE*, m) y dinámico (*PND*, m) se utilizó una sonda de nivel para pozo profundo (Equipozo modelo SEP150, México ®; Figura 19), con una longitud de 150 m, que consiste en un carrete electrodo, que puede retraerse rápidamente, sobre una base plástica ligera y de alta resistencia, con un cable coaxial que le permite emitir una alarma sonora al contacto con el

espejo del agua. El gasto se determinó con un medidor de flujo ultrasónico (Transport PT878 Portable Ultrasonic Liquid Flow Meter, General Electric, USA ®; Figura 20), expresándose en $L\ s^{-1}$. Para la medición de los parámetros eléctricos se utilizó un equipo FLUKE Power Quality Analyzer 435 (Fluke Inc., USA ®; Figura 21) obteniéndose los datos de intensidad en volts, la corriente en amperes y el factor de potencia (adimensional).



Figura 19. Sonda de nivel para pozo Equipozo modelo SEP150 ®.



Figura 20. Medidor Ultrasónico TRANSPORT PT878 Portable Ultrasonic Liquid Flow Meter ®.

3.4.4. Curva de aforo

Se propusieron curvas de aforo en cada uno de los pozos seleccionados. Se fijaron varios niveles de gasto (Q) que se midieron mediante un dispositivo de orificio (piezómetro) y para cada uno se midió la profundidad al nivel dinámico (PND). Los datos PND vs Q se graficaron, con lo que se obtuvo la Curva de Aforo. A partir de esta curva se obtuvo el gasto óptimo de explotación (Q_{OPT} ; $L\ s^{-1}$), que correspondió al 90 % de la capacidad máxima aforada. Con base en el comportamiento de cada pozo y los datos estimados de nivel estático (NE) para los años 2016-2031 (ver sección 3.4.1) se determinó la tendencia de variación de la PND al Q_{OPT} .



Figura 21. FLUKE Power Quality Analyzer 435 ®.

3.4.5. Carga dinámica total

La carga dinámica total (CDT) se calculó con la Ecuación (3), donde h_f representa las pérdidas de carga por fricción (m), h_x las pérdidas de carga localizadas (m), P_m es la presión adicional por tanque elevado o presión necesaria para riego presurizado (m) y $(v^2/(2g))$ es la carga de velocidad (m).

$$CDT = PND + h_f + h_x + Pm + \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Las pérdidas de carga por fricción h_f se determinaron con el modelo de Darcy-Weisbach (Ecuación 16).

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

La aceleración de la gravedad (g) se consideró igual a 9.807 m s^{-1} . Se consideró diámetro interno de columna (d) de 8 plg (0.2032 m). La velocidad (v) se determinó con base en el gasto (Q) y el área de flujo (A), en la forma mostrada por la Ecuación (5). Tras el cálculo de v se verificó que ésta tuviera un valor en el rango de 1.5 a 2.0 m s^{-1} y, de no ser así, se propuso un nuevo valor para d .

$$Q = A v; \quad A = \frac{\pi d^2}{4}; \quad v = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (5)$$

Para determinar la longitud (L) de la columna se determinó la sumergencia mínima (k) mediante la Ecuación (7), donde la $NPSH_r$ se determinó con base en curvas características proporcionadas por un fabricante de bombas (ver sección 3.4.7). La presión atmosférica (Pa) se tomó igual a 7.98 m considerando a Texcoco de Mora, México, como el lugar del estudio y P_v se determinó a la temperatura promedio de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ utilizando una tabla de vapor de agua, de donde se obtuvo el valor de 0.24 m.

$$k = NPSH_r - Pa + P_v \quad (7)$$

De esta manera, la longitud de columna se determinó con la Ecuación (8), donde el valor considerado para PND fue el correspondiente al pronóstico obtenido para el año 2031 en cada uno de los pozos seleccionados.

$$L = PND + k \quad (8)$$

En adición, el factor de fricción (f) se determinó mediante la Ecuación de Colebrook-White (Ecuación 20), utilizando una rutina de Newton-Raphson, donde ε es rugosidad absoluta, considerada con valor de 0.26 mm, aceptando que el material del tubo de descarga es de hierro fundido. Por otro lado, Re es el Número de Reynolds, definido mediante la Ecuación (21), siendo ρ y μ densidad y viscosidad del agua, determinados a 20 °C como 998.2 kg m⁻³ y 1.009×10⁻³ Pa s, respectivamente.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (20)$$

$$Re = \frac{d v \rho}{\mu} \quad (21)$$

Las pérdidas de carga localizadas (h_x) se determinaron como función de la energía cinética, por medio de la Ecuación (22), donde i identifica al i -ésimo accesorio, n es el número de accesorios instalados, K_i es un coeficiente de resistencia (adimensional) asociado al i -ésimo accesorio, v_i es la velocidad lineal del agua (m s⁻¹) al paso por el mismo. Los valores usados para K_i están dados en el Cuadro (5).

$$h_x = \sum_{i=1}^n \left(K_i \frac{v_i}{2g} \right) \quad (22)$$

Cuadro 5. Coeficientes de resistencia de accesorios típicamente identificados en la instalación de una bomba de pozo profundo para riego.

Accesorio	K_i (adimensional)
Codo 90°	0.95
Válvula de compuerta	7.00
Filtro	6.00
$\sum_{i=1}^n K_i$	13.95

El valor de P_m se consideró como la carga adicional de la bomba para un servicio de riego presurizado. Considerando criterios generales, P_m se consideró con valor de 1 m.

3.4.6. Curva del sistema

La curva del sistema se construyó para los años 2016, 2024 y 2031, considerados como puntos de referencia en el tiempo al inicio, mitad y fin del periodo de vida útil de una bomba que se instale en 2016.

Para cada año, (1) se determinó el nivel estático (NE) con base en el análisis referido en la sección 3.4.2. (2) Se aceptó que el comportamiento de la curva de aforo determinada para 2016, tendrá el mismo comportamiento para los años 2024 y 2031, considerando que la formación geológica del acuífero no cambia y que la demanda no sufre cambios abruptos. (3) Se propusieron valores de gasto (Q) que se ubicaron entre cero (0) y el máximo gasto de diseño. (4) Para cada gasto se determinó, con base en el comportamiento de la curva de aforo, la profundidad al nivel dinámico (PND). (5) Para cada gasto se determinó la velocidad con la Ecuación (5) y las pérdidas de carga con las Ecuaciones (16) y (22). (6) Para cada gasto se determinó la carga dinámica total (CDT). (7) Los datos de CDT vs Q se graficaron y se sometieron a rutinas de regresión para obtener un modelo con la forma de la Ecuación (23), donde a_s (m), b_s (m s L^{-1}) y c_s (m s² L⁻²) son constantes de regresión asociadas a la curva del sistema.

$$CDT = a_s + b_s Q + c_s Q^2 \quad (23)$$

3.4.7. Curvas características

Se obtuvieron curvas características para los modelos BA 10-050, BA 10-070 y BA 10-075 de la empresa Bombas Centrífugas Alemanas S.A. de C.V. (Figuras 22 a 24; Neumann, México), las cuales varían de $0.03 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (30 L s^{-1}) a $0.075 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (75 L s^{-1}) en el gasto y de 20 a 400 m para la carga dinámica.

A partir de cada gráfica se obtuvieron datos de potencia (Pot , HP), eficiencia (η , %) y $NPSH_r$ (m) en función del gasto (Q), los cuales se sometieron a rutinas de regresión para expresar las relaciones en la forma de las Ecuaciones (24), (25) y (26), respectivamente, donde [a_p (HP), b_p (HP s L^{-1}) y c_p (HP $\text{s}^2 \text{L}^{-2}$)], [a_n (%), b_n (% s L^{-1}) y c_n (% $\text{s}^2 \text{L}^{-2}$)] y [a_r (m), b_r (m s L^{-1}) y c_r (m $\text{s}^2 \text{L}^{-2}$)] son constantes de regresión.

$$Pot = a_p + b_p Q + c_p Q^2 \quad (24)$$

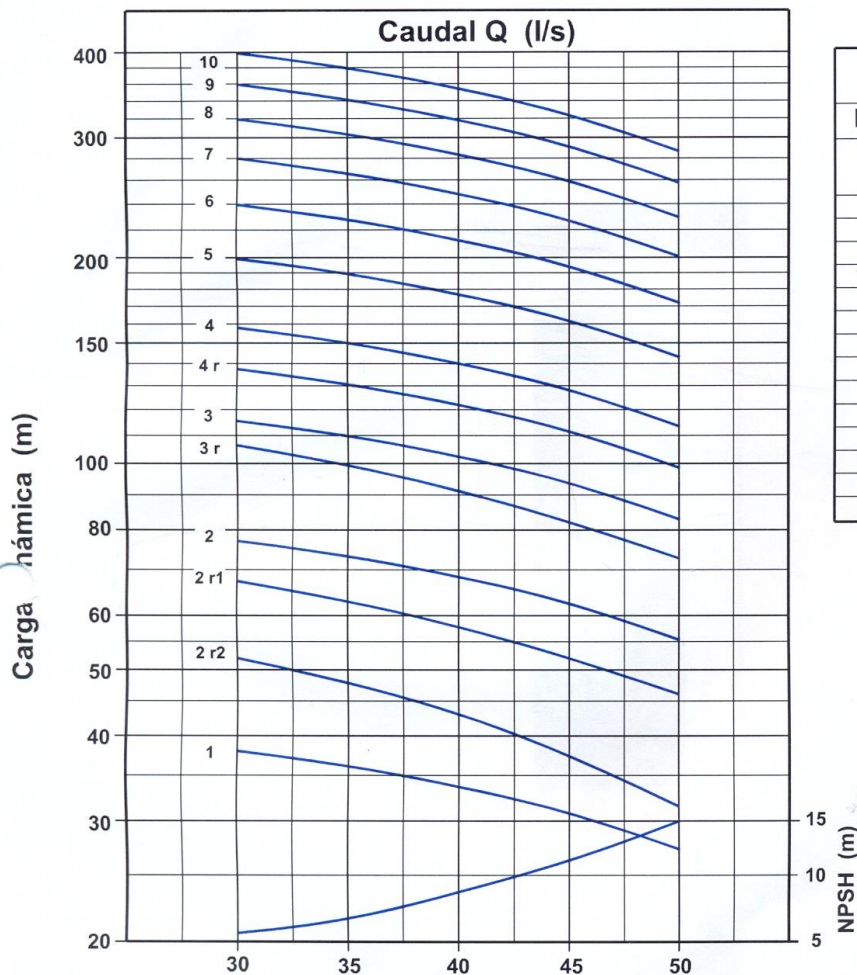
$$\eta = a_n + b_n Q + c_n Q^2 \quad (25)$$

$$NPSH_r = a_r + b_r Q + c_r Q^2 \quad (26)$$

3.4.8. Selección de la bomba

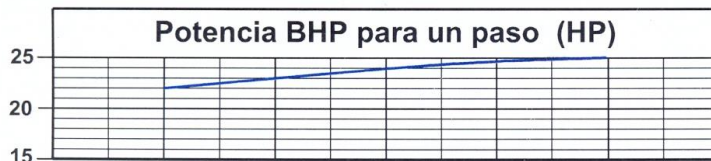
Para cada modelo de bomba propuesta (BA 10-050, BA 10-070 y BA 10-075), la curva eficiencia-gasto (Ecuación 25) se derivó con respecto al gasto. El resultado de la derivación se igualó a cero y del modelo resultante se obtuvo el gasto correspondiente a la máxima eficiencia ($Q_{\eta_{max}}$), en la forma mostrada por la Ecuación (27).

$$\frac{d\eta}{dQ} = b_n + 2 c_n Q = 0; \quad Q_{\eta_{max}} = -\frac{b_n}{2 c_n} \quad (27)$$



Combinaciones	
Bomba	Motor
N° De Pasos	Motor acoplado
	Díametro - HP
1	SUM 06 - 025
2 r2	SUM 06 - 030
2 r1	SUM 06 - 040
2	SUM 08 - 050
3 r	SUM 08 - 060
3	SUM 08 - 075
4 r	SUM 08 - 085
4	SUM 08 (10)- 100
5	SUM 08 (10)- 125
6	SUM 10 - 150
7	SUM 10 - 175
8	SUM 10 (12) - 200
9	SUM 10 (12) - 250
10	SUM 10 (12) - 250

Correcciones de Eficiencia	
Número de Pasos	Cambio de Eficiencia
1	- 4 Puntos
2 r2	- 5 Puntos
2 r1	- 4 Puntos
2	- 3 Puntos
3 r	- 3 Puntos
3	- 2 Puntos
4 r	- 2 Puntos
4	- 1 Punto



Observaciones:

Las bombas pueden operar en cualquier punto de las curvas.

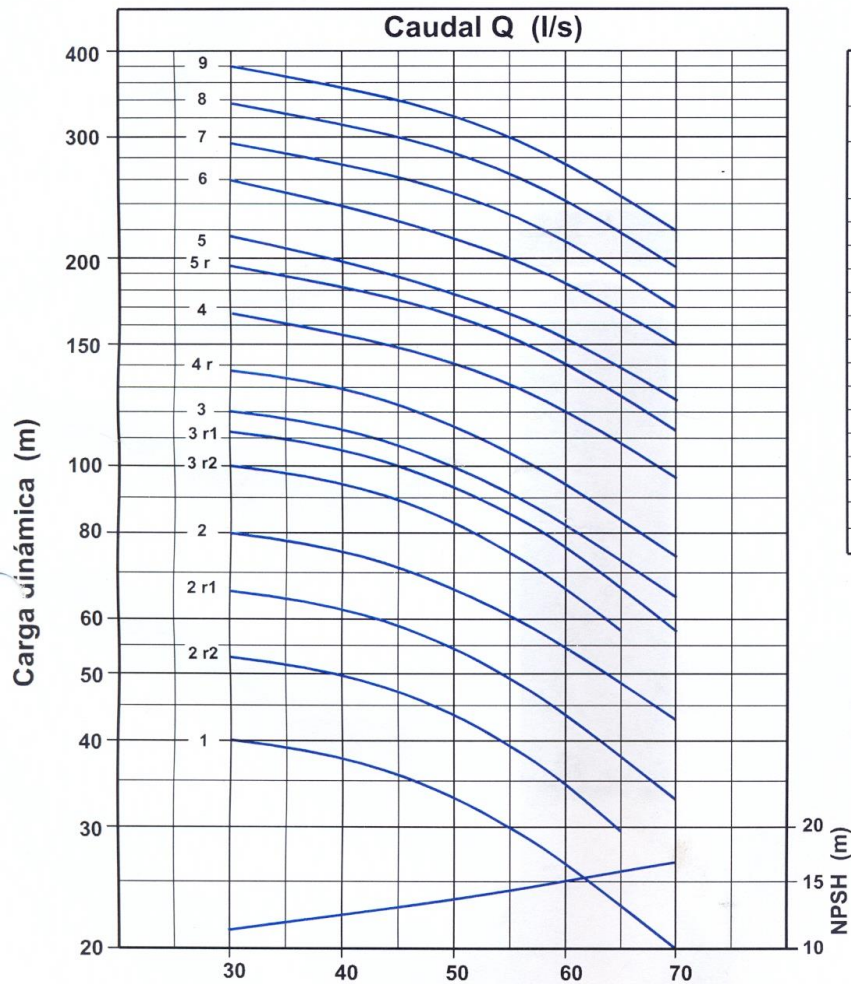
Máxima temperatura del agua 30°C.
De 30°C - 40°C seleccionar motor de mayor potencia.

Modelo: BA 10-050

60 ciclos, 2 polos

01/02/2009

Figura 22. Curvas características de la bomba BA 10-050 (Bombas Centrífugas Alemanas S.A. de C.V.; Neumann, México).

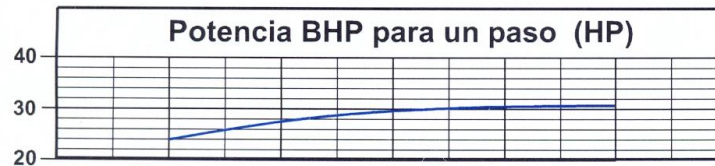
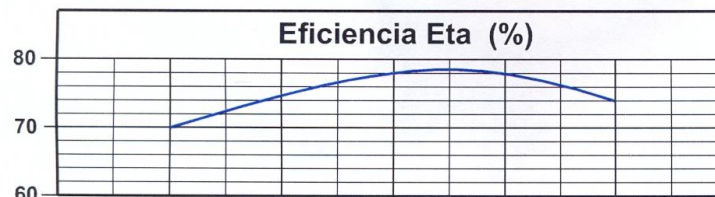


Combinaciones

Bomba	Motor
N° De Pasos	Motor acoplado Diámetro - HP
1	SUM 06 - 040
2 r2	SUM 06 - 040
2 r1	SUM 08 - 050
2	SUM 08 - 060
3 r2	SUM 08 - 075
3 r1	SUM 08 - 085
3	SUM 08 (10) - 100
4 r	SUM 08 (10) - 100
4	SUM 08 (10) - 125
5 r	SUM 10 - 150
5	SUM 10 - 175
6	SUM 10 (12) - 200
7	SUM 10 (12) - 250
8	SUM 10 (12) - 250
9	SUM 12 - 300

Correcciones de Eficiencia

Número de Pasos	Cambio de Eficiencia
1	- 4 Puntos
2 r2	- 5 Puntos
2 r1	- 4 Puntos
2	- 3 Puntos
3 r2	- 4 Puntos
3 r1	- 3 Puntos
3	- 2 Puntos
4 r	- 2 Puntos
4	- 1 Punto
5 r	- 1 Punto



Observaciones:

Las bombas pueden operar en cualquier punto de las curvas.

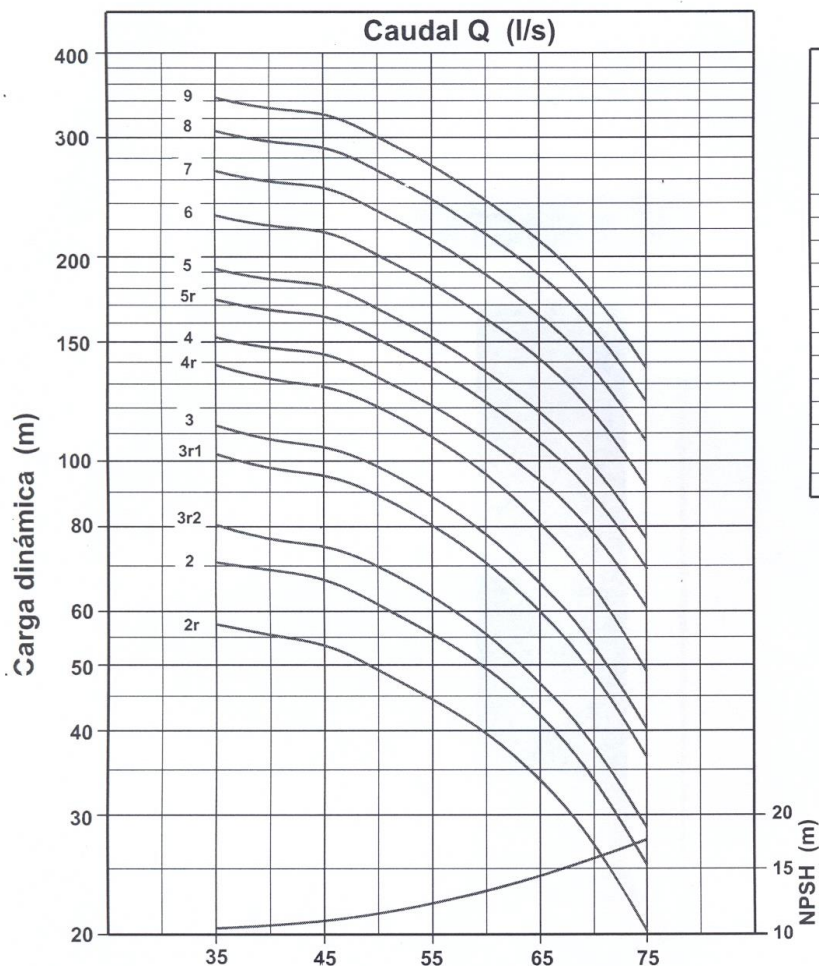
Máxima temperatura del agua 30°C.
De 30°C - 40°C seleccionar motor de mayor potencia.

Modelo: BA 10-070

60 ciclos, 2 polos

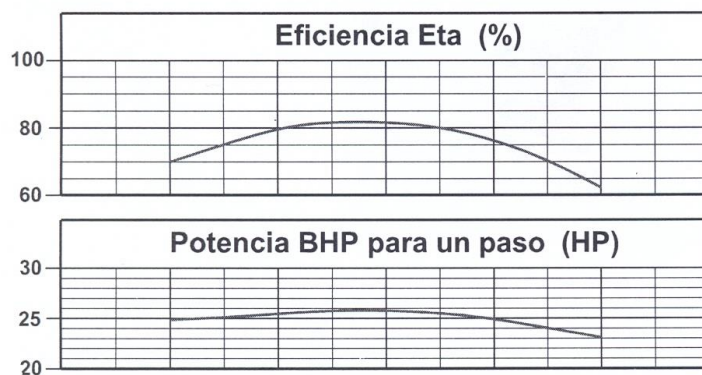
01/02/2009

Figura 23. Curvas características de la bomba BA 10-070 (Bombas Centrífugas Alemanas S.A. de C.V.; Neumann, México).



Combinaciones	
Bomba	Motor
N° De Pasos	Motor acoplado Díametro - HP
2 r	SUM 06 - 040
2	SUM 06 (08) - 050
3 r2	SUM 08 - 060
3 r1	SUM 08 - 075
3	SUM 08 - 085
4 r	SUM 08 (10) - 100
4	SUM 08 (10) - 125
5 r	SUM 08 (10) - 125
5	SUM 10 - 150
6	SUM 10 - 175
7	SUM 10 (12) - 200
8	SUM 10 (12) - 250
9	SUM 10 (12) - 250

Correcciones de Eficiencia	
Número de Pasos	Cambio de Eficiencia
2 r	- 3 Puntos
2	- 2 Puntos
3 r2	- 2 Puntos
3 r1	- 1 Punto



Observaciones:

Las bombas pueden operar en cualquier punto de las curvas.
Máxima temperatura del agua 30°C.
De 30°C - 40°C seleccionar motor de mayor potencia.

Modelo: BA 10-075

60 ciclos, 2 polos

01/11/2014

Figura 24. Curvas características de la bomba BA 10-075 (Bombas Centrífugas Alemanas S.A. de C.V.; Neumann, México).

Las curvas características correspondientes a la potencia (Ecuación 24) se resolvieron simultáneamente con la curva del sistema (Ecuación 23). Así, para cada modelo de bomba se obtuvieron varios gastos de operación sugeridos (Q_{os}), uno para cada potencia disponible en cada modelo ($Q_{os,050,HP150}$; $Q_{os,050,HP100}$; $Q_{os,050,HP50}$; $Q_{os,070,HP150}$; $Q_{os,070,HP100}$; $Q_{os,070,HP50}$; $Q_{os,075,HP150}$; $Q_{os,075,HP100}$; $Q_{os,075,HP50}$).

Con la información disponible, se realizó un proceso de búsqueda para elegir el modelo y potencia de operación de bomba (Pot_{op}) que minimizaran el cuadrado de la diferencia entre el gasto de operación sugerido (Q_{os}) y el gasto correspondiente a la máxima eficiencia ($Q_{\eta max}$), en la forma mostrada por la Ecuación (28).

$$Pot_{op} = Pot \text{ donde } \left[\min(Q_{os} - Q_{\eta max})^2 \right] \quad (28)$$

El proceso de búsqueda se realizó mediante una rutina de programación construida en un archivo .m del software Matlab. El gasto correspondiente a (Pot_{op}) fue considerado gasto óptimo de operación (Q_{op}).

3.4.9. $NPSH_r$ y $NPSH_d$

El gasto óptimo de operación (Q_{op}) se substituyó en la Ecuación (26) y se obtuvo el valor de la carga neta de succión positiva requerida ($NPSH_{requerida}$) de operación ($NPSH_{rop}$). Por otro lado, con base en el mismo Q_{op} se determinó la carga neta de succión positiva ($NPSH_d$) utilizando la Ecuación (28).

$$NPSH_d = Pa - Pv + \frac{v^2}{2g} \left(1 - f \frac{k}{d} \right) + k \quad (28)$$

Los valores de $NPSH_{rop}$ y $NPSH_d$ se compararon y, con objeto de confirmar la ausencia de cavitación, se verificó el cumplimiento del criterio dado en la Ecuación (29).

$$\text{Selección adecuada si y sólo si: } NPSH_d > NPSH_{rop} \quad (29)$$

Si la Ecuación (29) no se cumplía, se elegiría el siguiente valor de potencia de acuerdo con la Ecuación (28).

3.4.10. Simulación de la operación de un equipo de bombeo

Con base en el análisis anterior, se construyeron tres escenarios:

- A. Bomba instalada en 2016 y operando a su máxima eficiencia en 2016.
- B. Bomba instalada en 2016 y operando a su máxima eficiencia en 2024.
- C. Bomba instalada en 2016 y operando a su máxima eficiencia en 2031.

Para analizar cada escenario, se consideró la tasa de abatimiento de nivel estático y se repitió, para cada año en el periodo de vida útil de la bomba (2016-2031), el mismo procedimiento de determinación del gasto de operación (Q_{op}), carga dinámica total (CDT) y la $NPSH_r$. Asimismo, para cada año, se determinó la potencia de salida de la bomba (W_f , HP) por medio de la Ecuación (30), donde Q_{op} se sustituye en $L\ s^{-1}$ y la constante 745 700 realiza la conversión de litros a m^3 y de Watt a HP.

$$W_f = \frac{\rho\ g\ Q_{op}\ CDT}{745700} \quad (30)$$

Para analizar el escenario A, se obtuvo la eficiencia de la bomba para cada año (η_y) por medio de la Ecuación (31), donde $Pot_{op,2016}$ es la potencia del motor de la bomba seleccionada para tener máxima eficiencia en el año 2016.

$$\eta_Y = \frac{W_f}{Pot_{op2016}} \times 100 \quad (31)$$

Los escenarios B y C se analizaron en forma similar, excepto que para determinar la eficiencia en cada año se consideró la potencia del motor de la bomba seleccionada para tener máxima eficiencia en 2024 y en 2031, respectivamente, en la forma mostrada por las Ecuaciones (32) y (33).

$$\eta_Y = \frac{W_f}{Pot_{op2024}} \times 100 \quad (32)$$

$$\eta_Y = \frac{W_f}{Pot_{op2031}} \times 100 \quad (33)$$

Para cada escenario se definió una Eficiencia Global como el promedio de todas las eficiencias anuales (Ecuación 34).

$$\eta_G = \frac{\sum_{i=2016}^{2031} \eta_i}{16} \quad (34)$$

Con base en la información generada para las distintas variables, el análisis se sistematizó a través de la construcción de modelos que relacionaron la carga dinámica total (CDT), el gasto de operación (Q_{op}), la eficiencia (η_Y), la $NPSH_r$ y la potencia de salida (W_f) con el tiempo, en la forma descrita por las Ecuaciones (35), (36), (37), (38) y (39), respectivamente.

$$CDT = a_c + b_c t + c_c t^2 \quad (35)$$

$$Q_{op} = a_{op} + b_{op} t + c_{op} t^2 \quad (36)$$

$$\eta_Y = a_n + b_n t + c_n t^2 \quad (37)$$

$$W_f = a_w + b_w t + c_w t^2 \quad (38)$$

$$NPSH_r = a_h + b_h t + c_h t^2 \quad (39)$$

3.4.11. Análisis de costos

Una vez que se seleccionó la bomba óptima para cada uno de los pozos a máxima eficiencia al 2016, máxima eficiencia al 2024 y máxima eficiencia al 2031, se obtuvieron los datos del motor acoplado (HP, eficiencia), para el transformador se calcularon los KVA y con estos datos se seleccionó el transformador adecuado para cada uno de los sistemas seleccionados. El costo de la energía eléctrica se obtuvo a partir de los precios de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), considerando la tarifa 9 y el rango de 1 a 5 000 kW-h, la cual es la utilizada para los sistemas de riego. Para el año 2016 se consideró el precio del kW-h para diciembre y, con base en los costos históricos (del 2001 al 20016), se pronosticaron los costos por kW-h para los años 2017 a 2031. Con los datos obtenidos se calculó el costo de la energía y el costo del metro cúbico de agua bombeada para cada una de las zonas. Al igual a como se hizo con los parámetros técnicos, se modeló el costo de operación de la bomba, en la forma mostrada por la Ecuación (40).

$$Costo = a_m + b_m t + c_m t^2 \quad (40)$$

La información de variación de eficiencia y costos de bombeo se comparó para los tres escenarios y se eligió la mejor alternativa entre las tres propuestas.

3.5. Resultados y discusión

3.5.1. Abatimiento regional

Las Figuras 25-29 muestran la variación del nivel estático (*NE*) en cada uno de los pozos seleccionados para la evaluación en la región de estudio. En cada representación, la información mostrada hasta el año 2014 corresponde al registro real de los hidrógrafos. En todos los casos, la tendencia de abatimiento

del *NE* ha sido lineal y el ajuste de los datos por regresión mostró que el comportamiento de describe bien por medio de modelos lineales (Cuadro 6). De esta forma, con base en el modelo de cada pozo, se estimaron los *NE* de cada uno de los cinco pozos para el periodo 2015-2031, los cuales están mostrados en las Figuras 25-29.

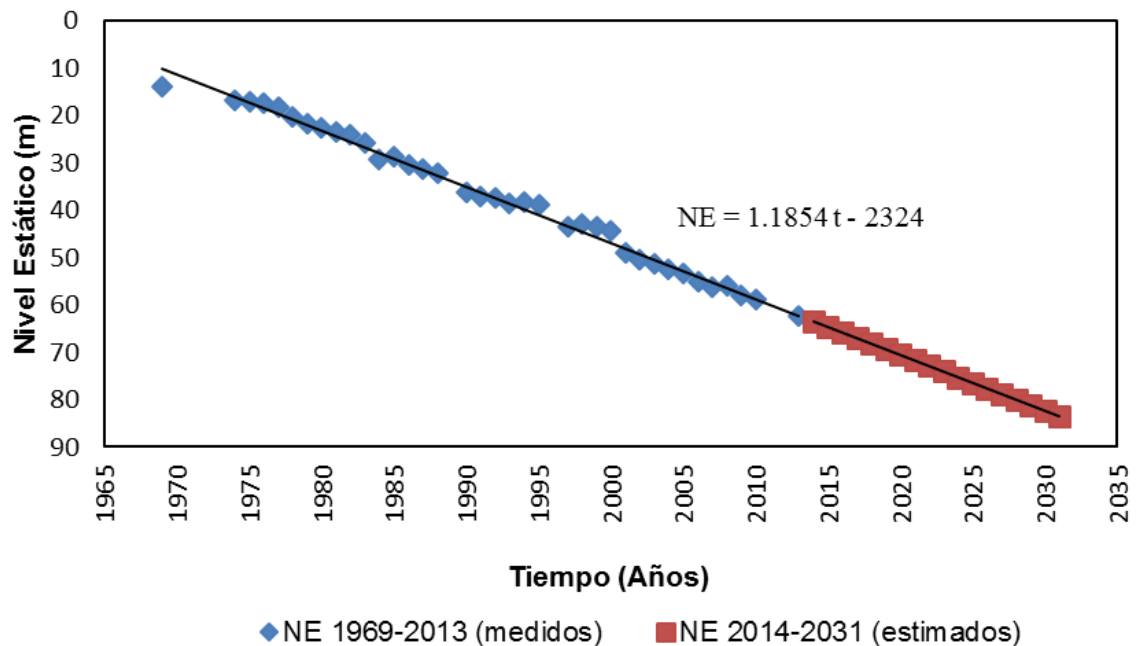


Figura 25. Hidrográfo del Pozo E-866, ubicado en el Municipio de Chiconcuac, México (zona norte del acuífero Texcoco).

De la tendencia de evolución de los acuíferos, se puede observar que en la parte norte del acuífero los abatimientos son de 1.10 m/año, en el sur el abatimiento es de 1.32 m/año, mientras que en la zona este son de 0.73 m/año, en el municipio de Texcoco, en el oeste es de 1.15 m/año y en el centro es 1.37 m/año. Se puede definir que el promedio es de 1.13 m/año debido al fuerte estrés hídrico que sufre el acuífero por la demanda de la población para uso potable, lo cual coincide con lo reportado por Carrillo, Gómez, Valle y Prado, (2016) y Escobar y Palacios (2012).

Cuadro 6. Tendencias de abatimientos por zona del acuífero Texcoco.

ID Pozo	Zona	Municipio	Tendencia	R ²
E-866	Norte	Chiconcuac	NE = 1.1854t-2324	0.9927
F-107	Sur	Chicoloapan	NE = 1.2942t-2538.2	0.9665
E-133	Este	Texcoco	NE = 0.6579t-1214.6	0.8337
EW-55	Oeste	Texcoco	NE = 1.279t-2514.9	0.9824
ER-88	Centro	Chapingo	NE = 1.272t-2477.5	0.9936

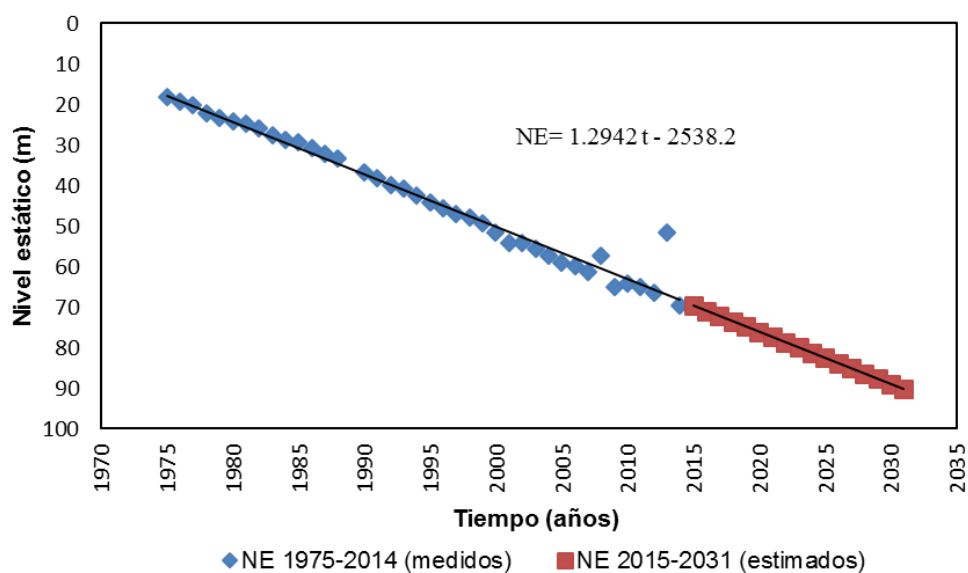


Figura 26. Hidrográfico del Pozo F-107, ubicado en el Municipio de Chicoloapan, México (zona sur del acuífero Texcoco).

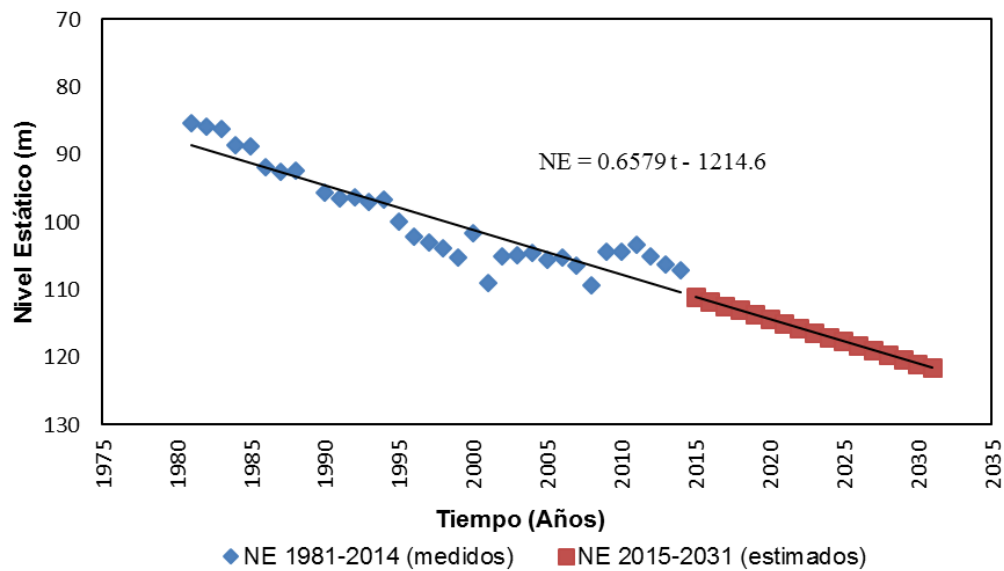


Figura 27. Hidrográfo del Pozo E-133, ubicado en el Municipio de Texcoco, México (zona este del acuífero Texcoco).

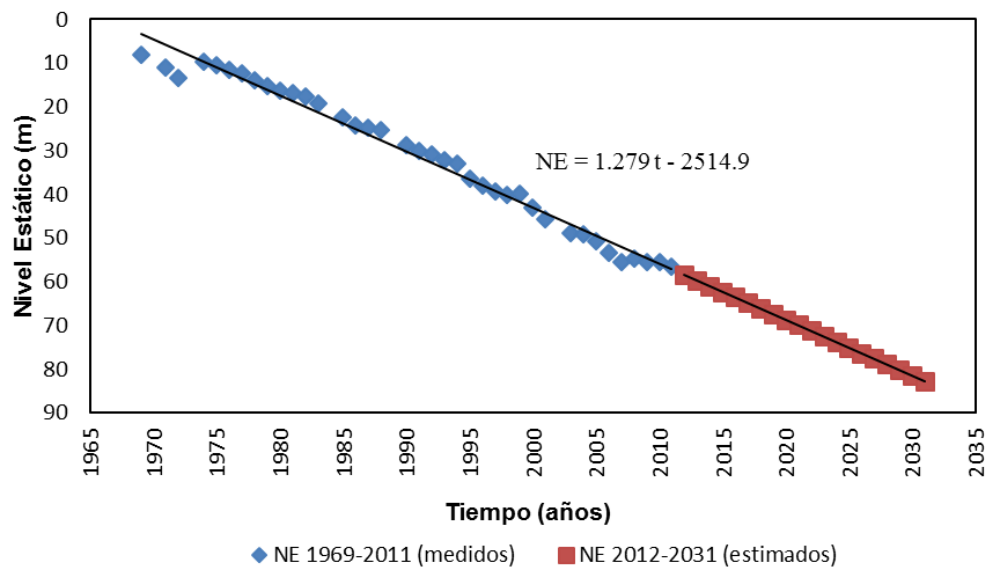


Figura 28. Hidrográfo del Pozo EW-55, ubicado en el Municipio de Texcoco, México (zona oeste del acuífero Texcoco).

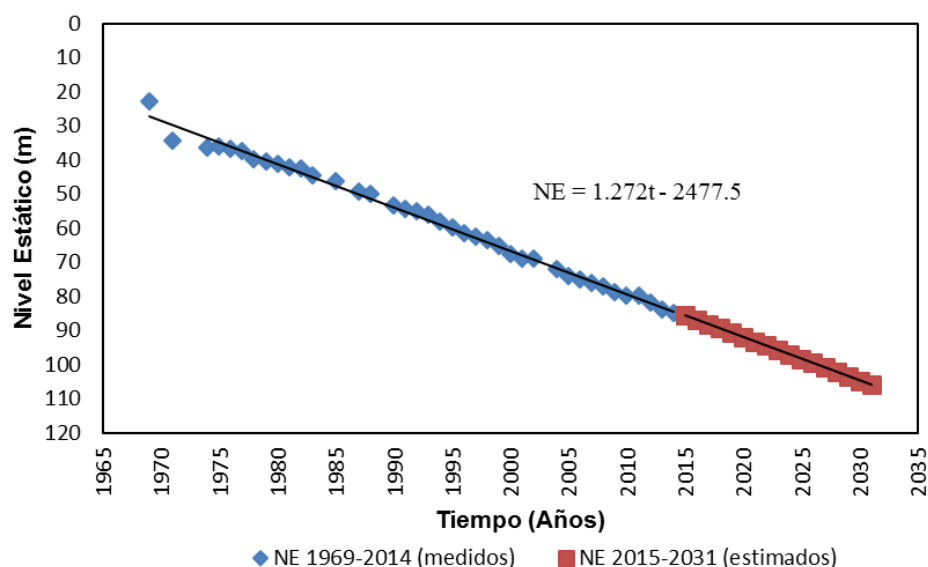


Figura 29. Hidrográfo del Pozo ER-88, ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, México (zona centro del acuífero Texcoco).

3.5.2. Evaluación experimental del sistema de bombeo

Los parámetros hidráulicos obtenidos en las zonas de evaluación se presentan en el Cuadro 7, en tanto que los parámetros eléctricos se encuentran descritos en el Cuadro 8.

Cuadro 7. Parámetros hidráulicos medidos en la zona norte y centro del acuífero, en términos de gasto (Q), nivel estático (NE), profundidad al nivel dinámico (PND) y carga dinámica total (CDT).

Parámetro	Zona Norte	Zona Centro
$Q \text{ (L s}^{-1}\text{)}$	11.3	44.8
$NE \text{ (m)}$	67.5	72.1
$PND \text{ (m)}$	73.75	76.2
$CDT \text{ (m)}$	73.76	76.5

A partir de los resultados obtenidos de los parámetros hidráulicos y eléctricos (Cuadros 7 y 8), se obtuvieron las eficiencias electromecánicas correspondientes, las cuales fueron de 54.06 y 39.34 % para la zona centro y

norte, respectivamente. De acuerdo con la NOM-006-ENER-95, los resultados anteriores sugieren que la operación de los pozos correspondientes se considera buena y mala respectivamente; lo que indica que es necesario mejorar la eficiencia electromecánica y de esta forma tener un mejor uso eficiente del agua y la energía.

Cuadro 8. Parámetros eléctricos obtenidos en la zona norte y centro del acuífero, en términos de tensión, corriente y factor de potencia.

Parámetro	Zona Norte	Zona Centro
Tensión (V)	326.4	438.58
Corriente (A)	38.96	98.00
Factor de Potencia	0.96	0.83

3.5.3. Curva de aforo

Para obtener la curva de aforo se fijaron gastos de cero a $0.050 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (cero a 50 L s^{-1}). La profundidad al nivel dinámico (*PND*) varió de acuerdo a la zona de estudio. Debido a que las cinco curvas de aforo tuvieron la misma tendencia, se utilizó la obtenida en la zona norte (Figura 30) como representativa, mientras que en el Cuadro 9 se muestra los valores de *PND* para cada gasto fijado en cada una de las zonas.

Cuadro 9. Profundidad del nivel dinámico (m) para cada gasto propuesto en cada una de las zonas.

Q (L s^{-1})	Profundidad del nivel dinámico (<i>PND</i> , m)				
	Z. Norte	Z. Sur	Z. Este	Z. Oeste	Z. Centro
0	65.77	71.00	111.73	63.56	86.85
10	75.77	81.00	121.73	73.56	96.85
20	80.77	86.00	126.73	78.56	101.85
30	85.77	92.00	131.73	83.56	106.85
40	90.77	96.00	136.73	88.56	111.85
50	92.77	98.00	138.73	90.56	113.85

El gasto óptimo de explotación y de diseño de los sistemas de riego en las cinco zonas fue determinado en $0.045 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (45 L s^{-1}). A partir de aquí se determinaron los valores de *PND* y, en virtud de que dependen del nivel estático, se modificaron de acuerdo a la zona de estudio, en la forma mostrada por el Cuadro 10. De este análisis se desprendió que el pozo E-133 (zona este) es el que presenta una mayor *PND* en comparación de los otros.

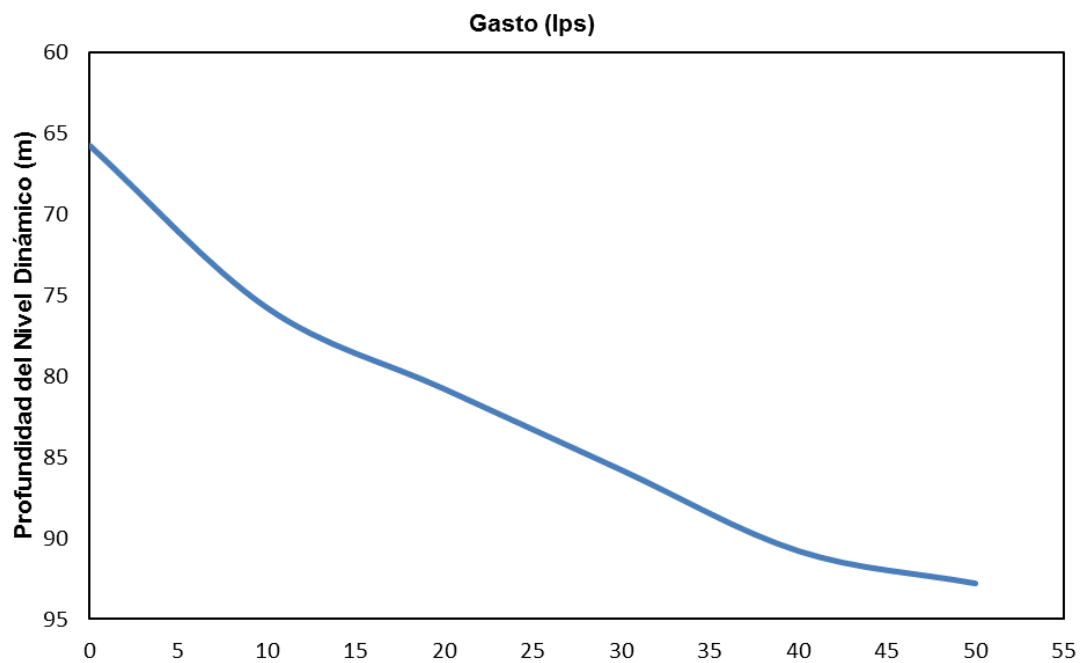


Figura 30. Curva de aforo utilizada como representativa del acuífero Texcoco para el cálculo del gasto de diseño.

Cuadro 10. Profundidad del nivel dinámico (m) a $0.045 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (45 L s^{-1}) en el área de estudio.

Q (L s ⁻¹)	Profundidad del nivel dinámico (m)				
	Z. Norte	Z. Sur	Z. Este	Z. Oeste	Z. Centro
45	91.77	97.00	137.73	89.56	112.85

3.5.4. Carga dinámica total

La carga dinámica total (*CDT*) se pronosticó para cada uno de los años de vida útil del equipo de bombeo (2016 al 2031) en las cinco zonas de estudio (norte,

sur, este, oeste y centro) y los resultados se muestran en el Cuadro 11 para la zona norte, mientras que para las otras zonas se presentan en el Apéndice 1.

Cuadro 11. Carga dinámica total del 2016 al 2031 de la zona norte del acuífero Texcoco.

Q (L s⁻¹)	0	10	20	30	40	45	50
Tiempo (años)	CDT (m)						
2016	66.77	76.77	81.77	86.77	91.78	92.78	93.78
2017	67.95	77.95	82.95	87.96	92.96	93.97	94.97
2018	69.14	79.14	84.14	89.14	94.15	95.16	96.16
2019	70.32	80.32	85.33	90.33	95.33	96.34	97.34
2020	71.51	81.51	86.51	91.51	96.52	97.53	98.53
2021	72.69	82.69	87.70	92.70	97.71	98.71	99.71
2022	73.88	83.88	88.88	93.89	98.89	99.90	100.90
2023	75.06	85.06	90.07	95.07	100.08	101.08	102.08
2024	76.25	86.25	91.25	96.26	101.26	102.27	103.27
2025	77.43	87.44	92.44	97.44	102.45	103.45	104.45
2026	78.62	88.62	93.62	98.63	103.63	104.64	105.64
2027	79.81	89.81	94.81	99.81	104.82	105.82	106.82
2028	80.99	90.99	95.99	101.00	106.00	107.01	108.01
2029	82.18	92.18	97.18	102.18	107.19	108.20	109.20
2030	83.36	93.36	98.36	103.37	108.37	109.38	110.38
2031	84.55	94.55	99.55	104.55	109.56	110.57	111.57

En virtud de que la *CDT* depende de la *PND* (Ecuación 3) y ésta depende del *NE*, resultó que a medida que el año considerado fue posterior, la *CDT* fue mayor (Figura 31). Asimismo, la *CDT* aumentó con el gasto y a través del tiempo en forma proporcional (1.19 m/año) debido a la profundización del *NE* con el tiempo. Una situación similar sucede en las otras zonas, donde la

diferencia se basa en la variación del incremento en los *NE*. Las *CDT* de las otras cuatro zonas de estudio se presentan en el Apéndice 2.

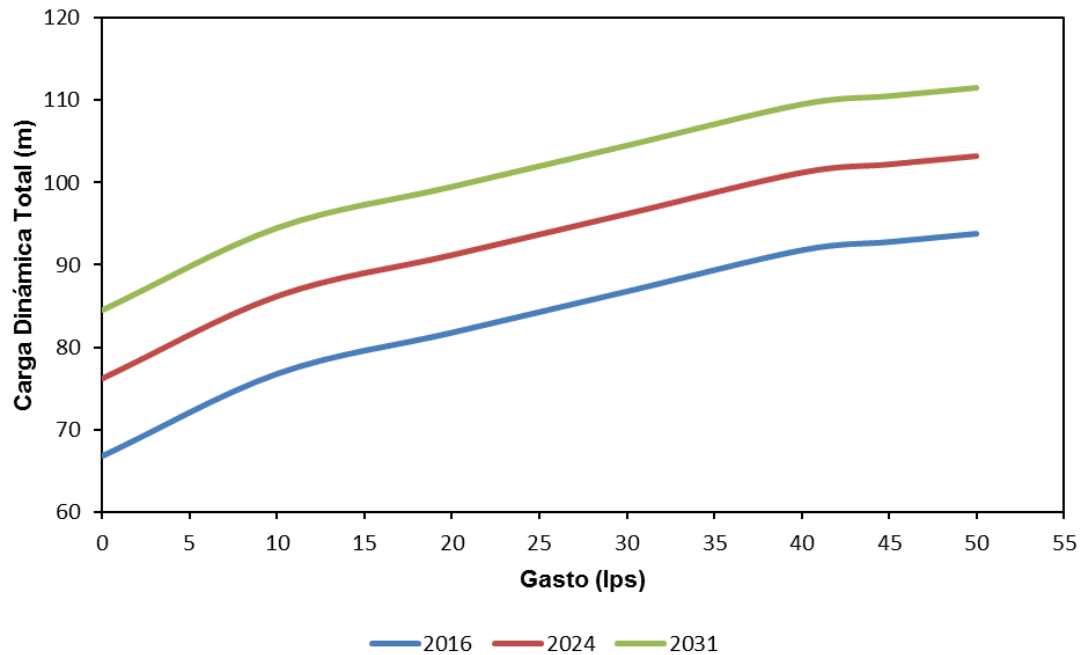


Figura 31. Carga dinámica total para la zona norte del acuífero Texcoco durante la vida útil del equipo de bombeo.

Cuadro 12. Constantes de regresión para el modelo de *CDT* vs. *Q* (Ecuación 23).

Constante de regresión	Valor	R^2
a_s (m)	88.421	
b_s (m s L ⁻¹)	0.8856	1.00
c_s (m s ² L ⁻²)	-0.0071	

3.5.5. Curva del sistema

El procedimiento descrito en la Sección 3.4.6 se aplicó al pozo ER-88, que se ubica en la Universidad Autónoma Chapingo. Con base en el análisis de abatimiento del *NE*, este parámetro se estimó en 86.85 m para el año 2016, que constituyó el punto inicial del análisis de proyección. Se evaluó la relación entre

la CDT y el gasto (Q), de donde se encontraron los valores de las constantes a_s , b_s y c_s de la Ecuación (23), los cuales se muestran en el Cuadro 12.

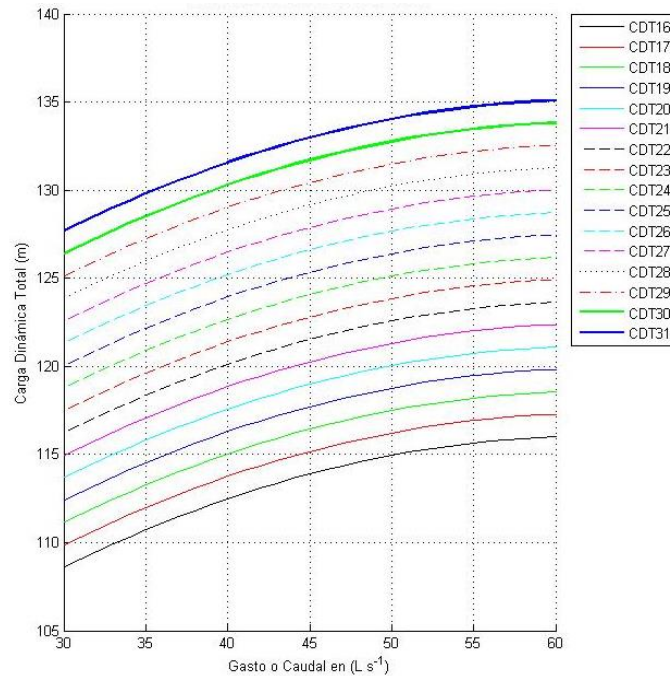


Figura 32. Carga dinámica total de la zona centro del acuífero a partir del modelo obtenido.

A partir del modelo de la Ecuación (23), las curvas del sistema correspondientes a cada año, para el pozo ER-88, muestran en la Figura 32, donde se puede observar que la CDT aumenta con el Q y a también a través del tiempo, debido a la profundización del NE .

La Figura 33 presenta las curvas $H(Q)$, $Pot(Q)$, $\eta(Q)$ y $NPSH(Q)$ modeladas para la bomba BA 10-050.

3.5.6. Curvas características

Para los modelos de bomba BA 10-050 y BA 10-070 (Bombas Centrífugas Alemanas S.A. de C.V.; Neumann, México) se analizaron las curvas

características y ésta se expresaron por medio de las Ecuaciones (24), (25) y (26), cuyas constantes de regresión se presentan en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Constantes de regresión de las curvas características de las bombas BA 10-050 y BA 10-070 (Bombas Centrífugas Alemanas S.A. de C.V.; Neumann, México).

Constante de regresión	Valor		
	Modelo BA 10-050	Modelo BA 10-070	Modelo BA 10-075
<u>CDT vs Q</u>			
a_b (m s L ⁻¹)	136.4	145.92	140.26
b_b (m s L ⁻¹)	1.24	0.389	1.6795
c_b (m s ² L ⁻²)	-0.04	-0.0204	-0.0368
<u>Pot vs Q</u>			
a_p (HP)	11.057	7.6894	13.71
b_p (HP s L ⁻¹)	0.4929	0.7243	0.494
c_p (HP s ² L ⁻²)	-0.0043	-0.0057	-0.0049
<u>Eficiencia vs Q</u>			
a_n (%)	4	30.273	-28.282
b_n (% s L ⁻¹)	3.4	1.7131	4.1986
c_n (% s ² L ⁻²)	-0.04	-0.0159	-0.04
<u>NPSHr vs Q</u>			
a_r (m)	11.794	10.576	13.767
b_r (m s L ⁻¹)	-0.6083	-0.0075	-0.2123
c_r (m s ² L ⁻²)	0.0134	0.0013	0.0035

3.5.7. Selección de la bomba

Los valores de gasto encontrados para máxima eficiencia de las bombas utilizadas en la zona centro del acuífero Texcoco se muestran en el Cuadro 14.

Las bombas seleccionadas para los años de estudio fueron las que se intersectaron con la curva del sistema (Figura 34); a partir de la intersección se obtuvieron los gastos de operación real de la bomba.

El Cuadro 15 presenta las características generales de operación real de las bombas seleccionadas en condición de máxima eficiencia para los años 2016, 2024 y 2031.

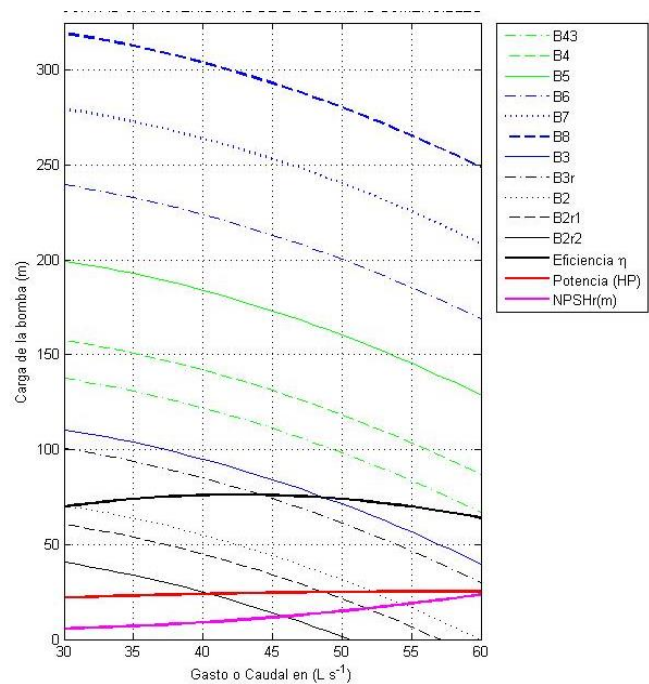


Figura 33. Curva característica de la bomba, construidas a partir de los modelos de regresión.

Cuadro 14. Valores de gasto a máxima eficiencia.

Modelo de la bomba	$Q_{\eta\text{máx}}$ (L s ⁻¹)
BA 10-050	42.5
BA 10-070	53.87

3.5.8. Simulación de un equipo de bombeo

El Cuadro 16 muestra los parámetros del modelo utilizados para simular el funcionamiento del equipo de bombeo seleccionado para cada uno de los escenarios planteados en la sección 3.4.10 en función del tiempo.

Con base en el Cuadro 17, los valores de los parámetros en los escenarios A y C varían en un 60 % aproximadamente, a pesar de que corresponden al mismo

modelo de bomba (BA 10-050), lo que se puede atribuir a la geometría de los impulsores, puesto que aun cuando son el mismo modelo difieren en el sub-modelo.

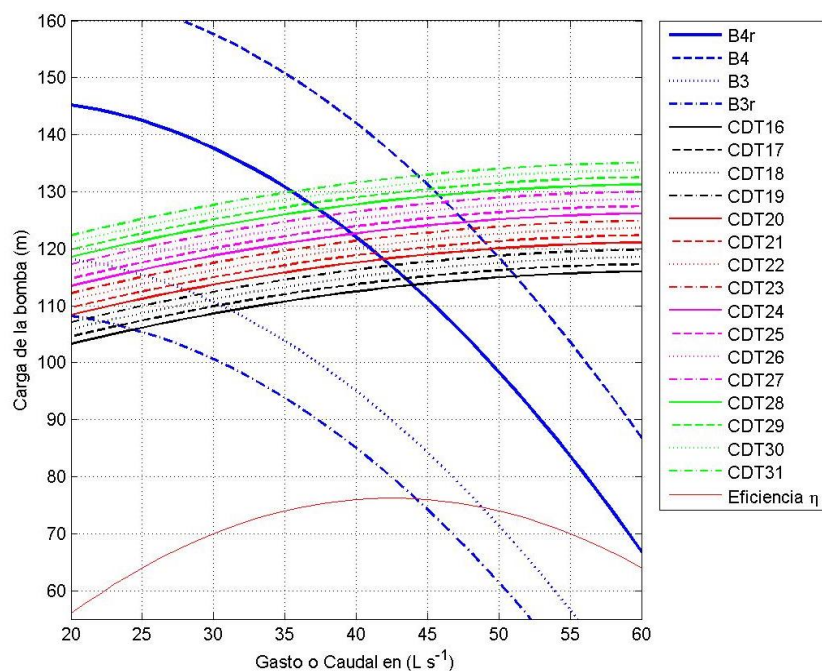


Figura 34. Intersección de las curvas del sistema (Ecuación 23) con las curvas de la bomba correspondientes a la potencia (Ecuación 24).

Cuadro 15. Valores de operación real de las bombas seleccionadas.

Año de máxima eficiencia	Bomba seleccionada	Q (L s ⁻¹)	CDT (m)	η Bomba (%)	η Motor (%)	Pot. Consumida	Pot. Obtenida
2016	BA 10-050 (4r)	44.00	113.66	76.00	88.00	85.00	65.80
2024	BA 10-070 (4r)	45.00	124.00	74.00	88.00	100.00	73.42
2031	BA 10-050 (4)	49.00	133.00	75.00	88.00	100.00	85.75

3.5.9. Análisis de costos

Los valores de los parámetros utilizados en el modelo para calcular el costo por metro cúbico de agua bombeada se presentan en el Cuadro 17.

Al evaluar los elementos para seleccionar la mejor propuesta con el mínimo costo por metro cúbico de agua bombeada, se obtuvieron costos promedio que varían desde los \$6.54 m⁻³ a \$7.30 m⁻³ para la zona centro del acuífero Texcoco (pozo ER-88).

Cuadro 16. Valores de los parámetros del modelo empleados en la simulación.

Parámetro	Valor		
	Tipo de escenario		
	A	B	C
<u>CDT vs tiempo</u>			
a _c	-46194	-10993	-29788
b _c	44.688	9.8969	28.373
c _c	-0.0108	-0.0022	-0.0067
<u>Qop vs tiempo</u>			
a _{op}	-2841.2	-26270	-788.85
b _{op}	3.4076	26.785	1.2631
c _{op}	-0.001	-0.0068	-0.0004
<u>η_y vs tiempo</u>			
a _n	-52464	-45691	-31840
b _n	52.048	45.478	31.404
c _n	-0.0129	-0.0113	-0.0077
<u>W_f vs tiempo</u>			
a _w	-5991.2	-19277	-3512.8
b _w	6.0293	19.254	3.5369
c _w	-0.0015	-0.0048	-0.0009
<u>NPSH_r vs tiempo</u>			
a _h	16081	266.25	10261
b _h	-15.628	-0.1676	-9.8501
c _h	0.0038	2*10 ⁻⁵	0.0024

Los resultados obtenidos en este estudio se lograron mediante el análisis gráfico y analítico de las variables hidráulicas y eléctricas contenidas en un sistema de bombeo para riego, con la ayuda de un programa de cómputo, para obtener una metodología que proporcione la selección óptima del equipo electromecánico para un pozo de riego al menor costo por metro cúbico de agua bombeada.

Cuadro 17. Valores de los parámetros empleados en el modelo de costo.

Parámetro	Valor		
	Tipo de escenario		
	A	B	C
a_m	41265	54394	32990
b_m	-41.133	-54.16	-32.924
c_m	0.0103	0.0135	0.0082

3.6. Conclusiones

En un acuífero sobre-explotado el volumen de agua almacenado se reduce considerablemente. La variación de los niveles estáticos y dinámicos se profundizan y son las características más importantes que se deben de considerar al momento de la selección de un equipo electromecánico de bombeo para la extracción del agua en un acuífero.

Los niveles dinámicos se encuentran relacionados con la curva de aforo y éstos con las curvas del sistema a través del tiempo, lo cual afecta la *CDT* y, por ende, la eficiencia electromecánica, que a la vez afecta los costos por metro cúbico de agua bombeada. Es por ello que, utilizando la metodología planteada, se pueden reducir los costos por metro cúbico de agua bombeada significativamente. Considerando un menor costo, se puede hacer un uso eficiente de la energía y el agua mediante mejores condiciones de operación del sistema.

Los resultados obtenidos indican que con la metodología propuesta se reduce el costo de la energía consumida y con ello se obtiene el menor costo por metro cúbico de agua bombeada. A partir de los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología en este trabajo, la eficiencia promedio fue de 74.97 % y el costo mínimo promedio fue de 5.90 \$ m⁻³ para la zona norte; para la zona sur fue de 75 % y 5.84 \$ m⁻³; en la zona este los promedios fueron de 76 % y 8.42 \$ m⁻³, respectivamente, en el oeste del acuífero la eficiencia promedio fue de 75 % y el costo mínimo promedio fue de 5.71 \$ m⁻³ y, finalmente, en el centro fueron de 76 % de eficiencia y 6.54 \$ m⁻³ de costo mínimo. Considerando la información disponible; la mejor selección del equipo de bombeo en la zona norte fue al inicio de la vida útil del equipo, mientras que en las cuatro zonas restantes la mejor selección fue al final de la vida útil del equipo.

Con esta metodología el campo agrícola mexicano puede tener una herramienta para auxiliar en la selección del mejor equipo de bombeo en acuíferos sobre-explotados, con el menor costo de agua bombeada.

4. CONCLUSIONES GENERALES

El acuífero Texcoco se encuentra muy sobreexplotado y en riesgo de agotarse, debido a que la tendencia de los *NE* en los hidrógrafos de los 104 pozos se presenta una profundización creciente en todos ellos con un índice de abatimiento anual de 1.13 m/año, con un aumento en los últimos cinco años. Esta tendencia debe de detenerse reduciendo la cantidad de agua bombeada por pozo cuando sea posible haciendo su uso eficiente.

La selección de equipo electromecánico en pozos para riego debe de hacerse de tal forma que se obtenga la mayor eficiencia promedio durante su vida útil y de acuerdo con los resultados obtenidos, usando la metodología propuesta, se debe de considerar el costo mínimo por metro cúbico de agua bombeada. Para la zona norte al inicio (con un promedio de $5.90 \text{ \$ m}^{-3}$ y una eficiencia de la bomba promedio de 74.67 %), para la zona sur (con un costo promedio de $5.84 \text{ \$ m}^{-3}$ y una eficiencia de la bomba promedio de 75 %), para la zona este (el costo promedio es de $8.42 \text{ \$ m}^{-3}$ y una eficiencia promedio de la bomba de 76 %), para la zona oeste (la eficiencia de la bomba promedio es de 75 % y el costo promedio por metro cúbico de agua bombeada es de $5.71 \text{ \$ m}^{-3}$) y, finalmente, para la zona centro (con un costo promedio de $6.54 \text{ \$ m}^{-3}$ y una eficiencia de la bomba promedio de 76 %), con una elección de bomba al final de la vida útil de los equipos. Considerando la máxima eficiencia debe de hacerse para la zona norte, sur, oeste y centro al final, para la zona este al inicio o a la mitad de la vida útil del equipo.

Los costos fijos y de mantenimiento afectan ligeramente el valor del costo por metro cúbico de agua bombeada, debido a que son ligeramente afectados

cuando se profundizan los niveles porque sólo se cambian si se selecciona una nueva bomba.

La variación de los *NE* del acuífero sobre-explotado incide directamente en la eficiencia electromecánica, en los costos de operación del sistema y en consecuencia en el costo por metro cúbico del agua.

Los usuarios del agua en la agricultura han puesto poco interés en la eficiencia electromecánica porque las tarifas para riego están altamente subsidiadas, sin embargo, el consumo mal aprovechado o desperdiciado, lo pagamos todos con nuestros impuestos y que de acuerdo a las políticas gubernamentales los subsidios disminuirán con el tiempo y los usuarios tendrán que preocuparse por encontrar y utilizar metodologías basadas en el uso eficiente del agua y la energía.

Se debe contar con los datos precisos del pozo, de la bomba, sus pruebas de aforo y sobre todo la litología del acuífero para verificar si la curva de aforo es válida a mayor profundidad y pueda cumplirse la hipótesis de que la curva de aforo permanece constante en esta metodología.

El programa de cómputo en Matlab ® es un auxiliar importante para que se pueda aplicar esta metodología en cada pozo y con múltiples opciones de modelos de bombas.

En el acuífero Texcoco los usuarios de sistemas de riego han ido perdiendo el interés en la agricultura, porque esta se encuentra en condiciones poco rentables, dedicándose a otras actividades de mayor ingreso y simplemente realizan esta actividad como parte complementaria a sus actividades o por motivos culturales.

Los terrenos agrícolas han sido substituidos por la construcción urbana que tiene un alto valor de plusvalía en el Valle de México y por la construcción del nuevo aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Los habitantes de la zona siguen perdiendo valor como productores agrícolas, aunque reciban los subsidios gubernamentales necesarios para continuar con las labores agrícolas.

5. LITERATURA CITADA

- Burt C. M., X. Piao, F. Gaudi, B. Busch, F.N. Taufik (2008). Electric motor efficiency under variable frequencies and loads. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE, 134 (2), 129-136. Obtenido de http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=bae_fac
- California Public Utilities Commission (2009-2011). The agricultural pumping efficiency program. Obtenido de: <https://www.sce.com/NR/rdonlyres/3B5E8568-EDBC-4B46-A986-78DED84BAF5C/0/SCE2510AGRICULTURALENERGYEFFICIENCYPROGRAM.pdf>
- Carrillo Carrillo Mauricio (2008). Rehabilitación de pozos para riego, agua potable e industria. Tesis profesional. Chapingo, México. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación.
- Carrillo García Mauricio (2009). Criterios de selección de equipo de bombeo para pozo de riego. Convenio SGIH-GUR-UACH-09-001-RF-CC. Chapingo, México. Instituto de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación.
- Carrillo García Mauricio, Torres Escobar Gabriel, Valentín Paz Oscar Gerardo, Gómez Pérez Yessica Alejandra (2013). Eficiencia electromecánica de pozos de riego en la zona occidente del municipio de Texcoco Estado de México. *In*: XI Congreso internacional de ingeniería hidráulica VII Seminario internacional del uso del agua. Cayo Coco, Ciego de Ávila, Cuba.
- Carrillo García Mauricio, Gaona Ponce Bonifacio, Gómez Pérez Yessica Alejandra (2014). Irrigation pumping plant efficiency in wells in eastern Valley of Mexico. *In*: ASABE Paper 141912705. St. Joseph, MI: ASABE (doi: 10.13031/aim.20141912705). Obtenido de: <http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?search=1&JID=5&AID=44541&CID=mon2014&v=&i=&T=1&urlRedirect=>
- Carrillo García Mauricio, Gómez Pérez Yessica Alejandra, Valle Guadarrama Salvador & Prado Hernández Jorge Víctor (2016). Behavior of

groundwater levels in Texcoco aquifer (1507) when they are lowered by excessive pumping from 1968 through 2014. *In*: ASABE Paper 162462745. St. Joseph, MI: ASABE (doi: 10.13031/aim.20162462745). Obtenido de: <http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?search=1&JID=5&AID=47273&CID=orl2016&v=&i=&T=2&urlRedirect=>

Center for Irrigation Technology (2005). Water wells and energy; Agricultural pumping efficiency program. California State University. Fresno California. Obtenido de: <http://www.pumpefficiency.org/wp-content/uploads/2015/05/Water-Wells-Brochure.pdf>

Cafaggi Félix Amalia Adriana, Rodal Canales Eduardo Antonio & Sánchez Huerta Alejandro (2011). Sistemas de bombeo (1ra reimpresión). México, D. F. Universidad Nacional Autónoma de México.

Chávez Guillen Rubén (1987). Geohidrología. México, Chapingo. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación.

Chávez J.L., Reich D., Loftis J.C., Miles D.L. (2011, septiembre). Irrigation pumping plant efficiency. No. 4.712. Fort Collins, Colorado. Colorado State University. Obtenido de <http://extension.colostate.edu/topic-areas/agriculture/irrigation-pumping-plant-efficiency-4-712/>

Comisión Nacional del Agua (2015a, abril 20). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México. Publicado por el Diario Oficial de la Federación. Edición 2015. México. Obtenido de http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR_1507.pdf

Comisión Nacional del Agua (2015b, diciembre). Estadísticas del Agua en México. Edición 2015. Comisión Nacional del Agua. México, D. F. Obtenido de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EAM2015_ing_alta.pdf

Comisión Nacional del Agua (2015c, diciembre). Num3ragua México. Edición 2015. Comisión Nacional del Agua. México, D. F. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/NUMERAGUA2015.pdf>

Comisión Nacional del Agua (n.d.). Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejo de Cuenca Valle de México. 1ª Versión. Comisión Nacional del Agua. México, D. F. Revisado Septiembre 12, 2016 Obtenido de

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99972/PMPMS_CC_Vall_e_de_M_xico_R.pdf

DeBenedicts A., Haley B., Woo C. K., Cutter E. (2013). Operational energy-efficiency improvement of municipal water pumping in California. *Journal of Energy*, 53 (2013), 237-243. Elseiver Ltd. Obtenido de http://ac.els-cdn.com/S0360544213001187/1-s2.0-S0360544213001187-main.pdf?_tid=56538e1c-7922-11e6-b87f-00000aacb362&acdnat=1473710086_b795f0efcdf8c48ccbe4735d104fb4dc

Diario Oficial de la Federación (2015, abril 20). Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos. 20 de abril del 2015. México, D. F. Obtenido de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5389380&fecha=20/04/2015

Escobar Villagrán Bernardo Samuel (2010). Análisis de la sobre-explotación del acuífero de Texcoco. Tesis Doctoral. Montecillo, Texcoco, Estado de México. Colegio de Postgraduados, Camps Montecillo, Posgrado de Hidrociencias.

Escobar Villagrán Bernardo Samuel (2012-2013). Estancia Posdoctoral 2012-2013. Chapingo, México. Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

Escobar Villagrán Bernardo Samuel & Oscar Luis Palacios Vélez (2012). Análisis de la sobreexplotación del acuífero Texcoco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol. III, núm., 2, abril – junio de 2012, pp. 67-84. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n2/v3n2a5.pdf>

Kranz William, (2010, febrero 23-24). Updating the Nebraska pumping plant performance criteria. *In: Proceedings of the 22nd Annual central plains irrigation conference* (pp. 51-57). Kearney, Nebraska. Available from CPIA, 760 N. Thompson, Colby, Kansas. Obtenido de <http://extension.missouri.edu/sare/documents/UpdatingPumpingPlantPerformanceCriteria2012.pdf>

Heggeler Joseph C. (2012). Irrigation systems, wells and pumps of the Mississippi River alluvium aquifer of southeast Missouri University of Missouri T.E. “Jake” Fisher Delta Center. Commercial Agricultural Program. Obtenido de http://crops.missouri.edu/irrigation/irrigationsystems_semo.pdf

Herrera Ponce Juan Carlos, Martínez Sainos Fernando & Carrillo García Mauricio (2007). Manual para diseño de zonas de riego pequeñas (2da

ed.) (pp. 1-139-1-172). Morelos, México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Martínez Sainos Fernando & Gutiérrez Carrillo Natalio (2003). Máquinas Hidráulicas (1ra Reimpresión). Chapingo, Estado de México. Universidad Autónoma Chapingo.

Montes Larios Leandro (1980). Instalaciones Eléctricas para Equipos de bombeo (2ª. Edición). México, D. F. Secretaria de Infraestructura Hidráulica. Dirección General de Obras Hidráulicas y de Ingeniería Agrícola para el Desarrollo Rural. Subdirección de Construcción. Departamento de Equipos de Bombeo y Electromecánica.

Mora M., Vera J., Rocamora C. & Abadia R. (2013, agosto 25). Energy efficiency and maintenance cost of pumping systems for groundwater extraction. *Water Resource Management* (2013) 27:4395-4408. doi: 10.1007/s11269-013-0423-z. Obtenido de http://download.springer.com/static/pdf/780/art%253A10.1007%252Fs11269-013-0423-z.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%252Fs11269-013-0423-z&token2=exp=1473713754~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F780%2Fart%25253A10.1007%25252Fs11269-013-0423-z.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1007%252Fs11269-013-0423-z*~hmac=5fb48c67a2bf620331c476d4a5ef4fca5555501f92c2e7f578b06738d2121e12

Rain Bird Corporation (2008). Pump efficiency program, Providing completely integrated irrigation systems for efficient water management – from reservoir to rotor. Obtenido de: <https://www.rainbird.com/documents/golf/PumpEfficiencyCatalog.pdf>

Romo Godínez David & Rivas Clavería Donovan Eduardo (2016). Metodología para la evaluación electromecánica de equipos de bombeo. Tesis profesional. Chapingo, México. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola.

Sánchez Calvo R. L., L. Juana Sirgado, F. Laguna Peñuelas, A. Losada Villasante, L. Rodríguez Sinobas y G. Castañón Lion (2008, junio 24-26). Consumo de energía con bombas de velocidad variable. Grupo de Investigación en Hidráulica de Riego. In: XXVI congreso Nacional de Riegos 24/06/2008 -26/06/2008. Huescas, Madrid. ISBN 84-8181-227-7. Obtenido de http://oa.upm.es/4289/1/INVE_MEM_2008_59551.pdf

- Shearer Marvin N. (1989, abril 11-13). Cost analysis of the electric energy for irrigation. *In: Seminario Internacional sobre Tecnificación de Riego y Uso Racional de la Energía*, pp: 84-92. Torreon, Coahuila, México.
- Shearer Marvin N. (1989, abril 11-13). Efficient operation of pumping equipment. *In: Seminario Internacional sobre Tecnificación de Riego y Uso Racional de la Energía*, pp: 74-8. Torreón, Coahuila, México.
- Secretaria de Energía (1995, noviembre 09). Norma Oficial Mexicana NOM-006-ENER-1995. Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y método de prueba. Obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4884607&fecha=09/11/1995
- Secretaria de Energía (1999, julio 13). Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-1999. Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución. México, D. F. obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4951217&fecha=13/07/1999
- Secretaria de Energía (2000, septiembre 01). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ENER-2000. Eficiencia energética de bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical. Límites y método de prueba. Obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2059427&fecha=31/12/1969
- Secretaria de Energía (2005, abril 18). Norma Oficial Mexicana NOM-010-ENER-2004. Eficiencia energética del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo. Límites y método de prueba. Obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2033456&fecha=18/04/2005
- Sulzer Brothers Ltd (1989). Sulzer Centrifugal Pump Handbook. London and New York. Elsevier Applied Science.
- Viejo Zubicaray Manuel (1975). Bombas teoría, diseño y aplicaciones (2da ed.). México, D. F. Editorial Limusa, S. A.

6. APÉNDICES

Apéndice 1. Valores de la Carga Dinámica Total del 2016 al 2031

Cuadro 18. Carga dinámica total del 2016 al 2031 de la zona sur del acuífero Texcoco.

Q (L s⁻¹)	0	10	20	30	40	45	50
Tiempo (años)	CDT (m)						
2016	72.00	82.00	87.00	93.01	97.01	98.01	99.02
2017	73.29	83.29	88.30	94.30	98.31	99.31	100.31
2018	74.59	84.59	89.59	95.60	99.60	100.60	101.61
2019	75.88	85.88	90.89	96.89	100.89	101.90	102.90
2020	77.18	87.18	92.18	98.18	102.19	103.19	104.20
2021	78.47	88.47	93.47	99.48	103.48	104.49	105.49
2022	79.77	89.77	94.77	100.77	104.78	105.78	106.78
2023	81.06	91.06	96.06	102.07	106.07	107.07	108.08
2024	82.35	92.35	97.36	103.36	107.37	108.37	109.37
2025	83.65	93.65	98.65	104.65	108.66	109.66	110.67
2026	84.94	94.94	99.94	105.95	109.95	110.96	111.96
2027	86.24	96.24	101.24	107.24	111.25	112.25	113.25
2028	87.53	97.53	102.53	108.54	112.54	113.55	114.55
2029	88.82	98.83	103.83	109.83	113.84	114.84	115.84
2030	90.12	100.12	105.12	111.13	115.13	116.13	117.14
2031	91.41	101.41	106.42	112.42	116.42	117.43	118.43

Cuadro 19. Carga dinámica total del 2016 al 2031 de la zona este del acuífero Texcoco.

Q (L s⁻¹)	0	10	20	30	40	45	50
Tiempo (años)	CDT (m)						
2016	112.73	122.73	127.73	132.73	137.74	138.75	139.74
2017	113.38	123.39	128.39	133.39	138.40	139.40	140.40
2018	114.04	124.04	129.05	134.05	139.05	140.06	141.06
2019	114.70	124.70	129.70	134.71	139.71	140.72	141.72
2020	115.36	125.36	130.36	135.36	140.37	141.38	142.38
2021	116.02	126.02	131.02	136.02	141.03	142.03	143.03
2022	116.67	126.67	131.68	136.68	141.69	142.69	143.69
2023	117.33	127.33	132.33	137.34	142.34	143.35	144.35
2024	117.99	127.99	132.99	138.00	143.00	144.01	145.01
2025	118.65	128.65	133.65	138.65	143.66	144.67	145.67
2026	119.31	129.31	134.31	139.31	144.32	145.32	146.32
2027	119.96	129.96	134.97	139.97	144.98	145.98	146.98
2028	120.62	130.62	135.62	140.63	145.63	146.64	147.64
2029	121.28	131.28	136.28	141.29	146.29	147.30	148.30
2030	121.94	131.94	136.94	141.94	146.95	147.96	148.96
2031	122.59	132.60	137.60	142.60	147.61	148.61	149.61

Cuadro 20. Carga dinámica total del 2016 al 2031 de la zona oeste del acuífero Texcoco.

Q (lps)	0	10	20	30	40	45	50
Tiempo (años)	CDT (m)						
2016	64.56	74.56	79.57	84.57	89.58	90.57	91.58
2017	65.84	75.84	80.85	85.85	90.85	91.85	92.86
2018	67.12	77.12	82.12	87.13	92.13	93.13	94.14
2019	68.40	78.40	83.40	88.41	93.41	94.41	95.42
2020	69.68	79.68	84.68	89.69	94.69	95.69	96.70
2021	70.96	80.96	85.96	90.97	95.97	96.97	97.98
2022	72.24	82.24	87.24	92.24	97.25	98.25	99.26
2023	73.52	83.52	88.52	93.52	98.53	99.53	100.54
2024	74.80	84.80	89.80	94.80	99.81	100.81	101.81
2025	76.07	86.08	91.08	96.08	101.09	102.09	103.09
2026	77.35	87.35	92.36	97.36	102.37	103.36	104.37
2027	78.63	88.63	93.64	98.64	103.64	104.64	105.65
2028	79.91	89.91	94.91	99.92	104.92	105.92	106.93
2029	81.19	91.19	96.19	101.20	106.20	107.20	108.21
2030	82.47	92.47	97.47	102.48	107.48	108.48	109.49
2031	83.75	93.75	98.75	103.76	108.76	109.76	110.77

Cuadro 21. Carga dinámica total del 2016 al 2031 de la zona centro del acuífero Texcoco.

Q (L s⁻¹)	0	10	20	30	40	45	50
Tiempo (años)	CDT (m)						
2016	87.85	97.85	102.85	107.86	112.86	113.86	114.87
2017	89.12	99.12	104.12	109.13	114.13	115.14	116.14
2018	90.39	100.39	105.40	110.40	115.41	116.41	117.41
2019	91.67	101.67	106.67	111.67	116.68	117.68	118.68
2020	92.94	102.94	107.94	112.94	117.95	118.95	119.96
2021	94.21	104.21	109.21	114.22	119.22	120.22	121.23
2022	95.48	105.48	110.48	115.49	120.49	121.50	122.50
2023	96.75	106.75	111.76	116.76	121.77	122.77	123.77
2024	98.03	108.03	113.03	118.03	123.04	124.04	125.04
2025	99.30	109.30	114.30	119.30	124.31	125.31	126.32
2026	100.57	110.57	115.57	120.58	125.58	126.58	127.59
2027	101.84	111.84	116.84	121.85	126.85	127.86	128.86
2028	103.11	113.11	118.12	123.12	128.13	129.13	130.13
2029	104.39	114.39	119.39	124.39	129.40	130.40	131.40
2030	105.66	115.66	120.66	125.66	130.67	131.67	132.68
2031	106.93	116.93	121.93	126.94	131.94	132.94	133.95

Apéndice 2. Carga Dinámica Total del 2016 al 2031

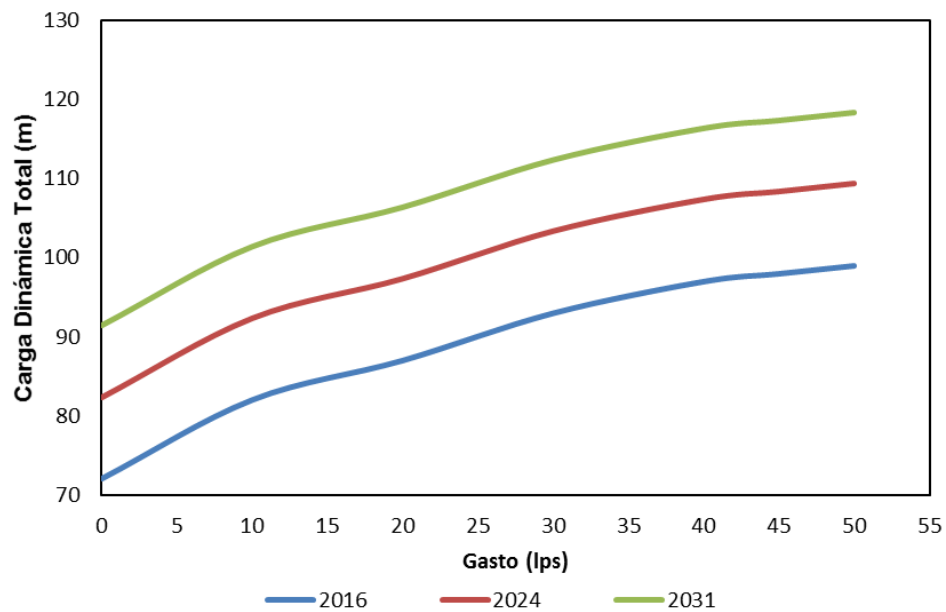


Figura 35. Carga dinámica total para la zona sur del acuífero Texcoco durante la vida útil del equipo de bombeo.

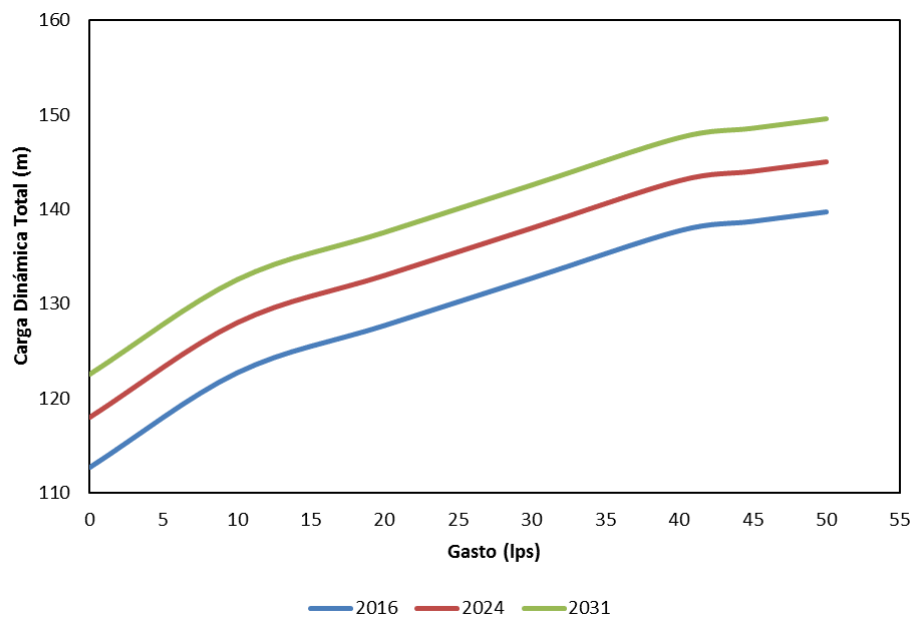


Figura 36. Carga dinámica total para la zona este del acuífero Texcoco durante la vida útil del equipo de bombeo.

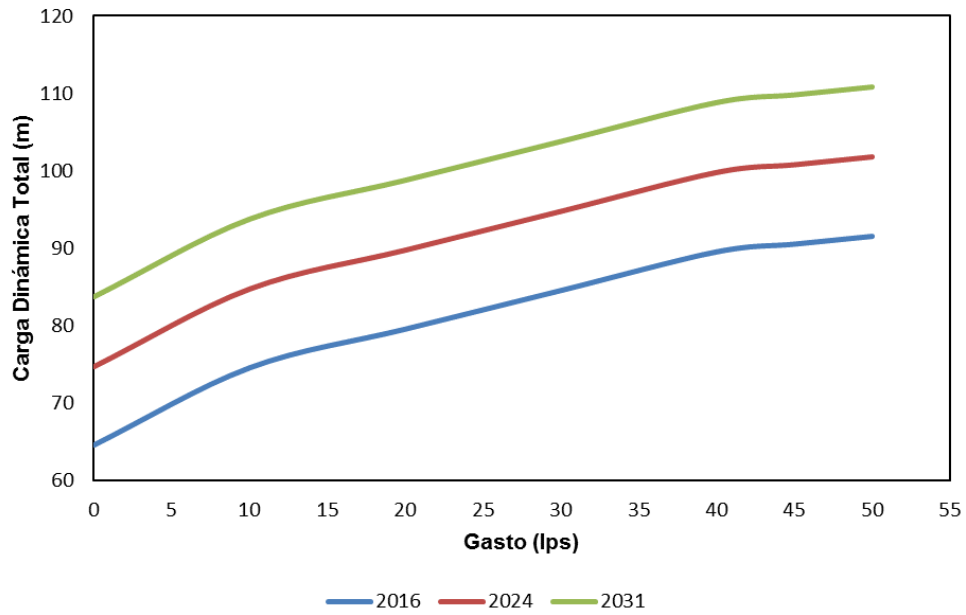


Figura 37. Carga dinámica total para la zona oeste del acuífero Texcoco durante la vida útil del equipo de bombeo.

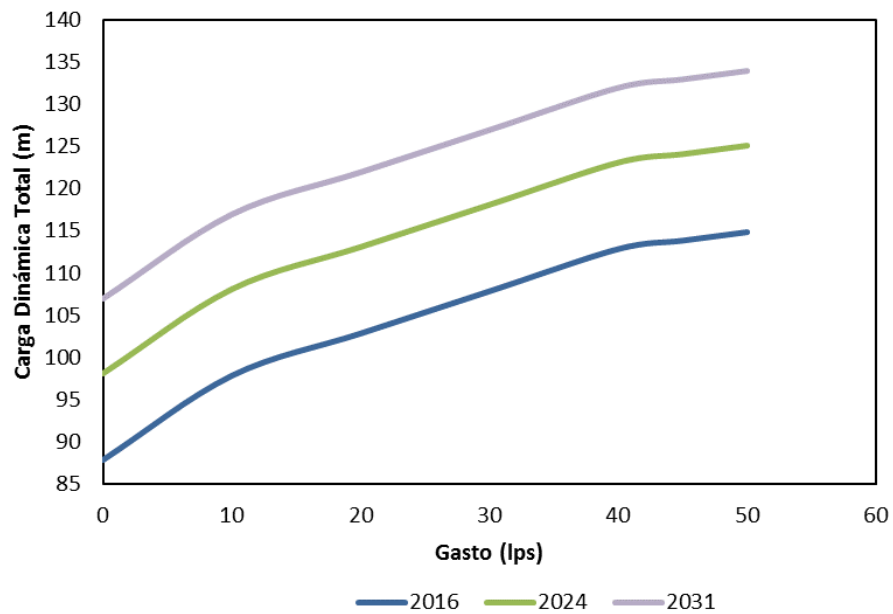


Figura 38. Carga dinámica total para la zona centro del acuífero Texcoco durante la vida útil del equipo de bombeo.