

Construcción y empleo de los diagramas C-Q. Una vía para minimizar los costos de operación y mantenimiento de los sistemas de bombeo de pozos profundos.

R. Morales, C. Batista-Rodríguez

Recibido el 11 de octubre de 2008; aceptado el 20 de enero de 2009

Resumen

En el trabajo se plantea la necesidad de establecer un Sistema de Mantenimiento Preventivo por condición técnica para los pozos profundos de regadío del estado de Cojedes en la República Bolivariana de Venezuela, debido a que el alto porcentaje de sólidos por unidad de volumen de agua provoca el desgaste acelerado de diferentes elementos de máquinas de las bombas, lo que trae consigo que se acorte la vida útil de dichas máquinas, así como se incrementen sus costos de operación. Como resultado de la investigación se hace una propuesta de procedimiento para construir los diagramas C-Q y con su uso poder determinar cuando es necesario realizar el mantenimiento de los pozos y de esa forma evitar las fallas prematuras en las bombas y minimizar los costos de la operación y mantenimiento del sistema pozo-bomba.

Palabras claves: diagnóstico, rapidez de cambio, estado técnico, mantenimiento, parámetros de condición, parámetros de salida.

Construction and use of diagrams C-Q. A road to minimize the operating costs and maintenance of the pumping systems of artesian wells.

Abstract

This paper exposes the need of establishing a Preventive Maintenance System, for technical condition, for the irrigated artesian wells at Cojedes's state, in the Bolivarian Venezuelan Republic. Due to the high solids percentage per water volume unit, the wear of different hardware elements of the pumps is accelerated. This fact provokes the shortening of the service life of the aforementioned hardware and consequently the increase in operating costs. As a research result this article presents a procedure proposal to construct C-Q diagrams to determine when it will be necessary to accomplish the well maintenance. In that way one can avoid premature faults in pumps and minimize the operation and maintenance costs of the pumping system.

Key words: diagnostic, speed of change, technical status, maintenance, parameters of condition, outgoing parameters.

1. Introducción.

El agua y la seguridad alimentaria están estrechamente relacionadas. La agricultura es con gran diferencia respecto a las demás, la mayor consumidora de agua. Representa alrededor del 69 por ciento de todas las extracciones en el mundo entero y más del 80 por ciento en los países en desarrollo. Un acceso fiable de agua suficiente aumenta los rendimientos agrícolas, proporcionando más alimentos e ingresos más altos en las zonas rurales, donde viven las tres cuartas partes de la población hambrienta del mundo. No es de extrañar que los países con mejor acceso al agua suelen ser también los que presentan niveles más bajos de subnutrición.

Diversos factores e insumos son fundamentales para el establecimiento de una agricultura eficiente. Entre ellos destaca el agua por ser imprescindible y porque su provisión oportuna durante todo el ciclo agrícola, especialmente en el trópico, requiere de obras relativamente costosas

En el contexto de la crisis del agua de riego, producto de cambios físicos, sociales y políticos, la agricultura campesina enfrenta problemas de escasez del agua, aspecto que ha provocado cambios en la forma de manejar el recurso. Por tal motivo, se ha trabajado en identificar las estrategias de manejo y conservación del agua que han adoptado los campesinos, y que están basadas en conocimientos ancestrales para continuar practicando la agricultura.

Estudios más recientes cifran en 1.7 millones de hectáreas la superficie potencial de riego, de las cuales el 35% sería regado a partir de aguas subterráneas y el 65% a partir de aguas superficiales. Los sistemas de riego bajo la administración del sector público tienen grandes restricciones presupuestarias. Por ello, la operación y el mantenimiento de dichos sistemas generalmente es escasa y los sistemas funcionan con limitaciones.

La perforación de los pozos y su sistema de bombeo son muy costosos (Figura 1), por lo que es necesario realizar el mantenimiento cada cierto tiempo para aumentar la vida útil de las bombas, ya que son afectadas por la fricción de los agregados gruesos del acuífero que pasan a

través de las rejillas, causando así el desgaste de los impulsores y del árbol. Teniendo en cuenta que el pase de sólidos a través de las ranuras se debe a varios factores, tales como mal diseño de las rejillas, mala ubicación de las rejillas en las ranuras y por no utilizar la granulometría requerida de los sólidos para los filtros.

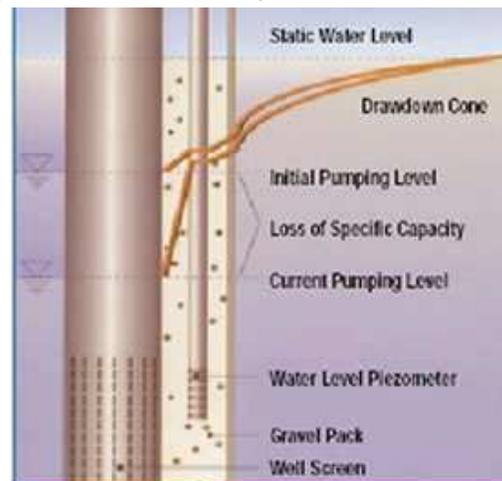


Figura 1. Estructura constructiva de un pozo profundo.

En el Estado Cojedes, República Bolivariana de Venezuela, los sistemas de bombeo de agua para la agricultura utilizan bombas centrífugas en pozos profundos. Los mismos se explotan con un exceso de sólidos disueltos, que originan el desgaste acelerado de los diferentes elementos constructivos de las bombas, debido a la ausencia de una política de mantenimiento a los pozos. Esto provoca que se incrementen los gastos de operación de las bombas, y se desestimule el empleo de estos sistemas de bombeo entre los agricultores.

¿Cómo determinar los tiempos entre servicios técnicos de mantenimiento preventivo a los pozos, para evitar o prevenir la aparición de desgastes acelerados en los diferentes elementos constructivos de las bombas centrífugas? Para responder a esta pregunta se hace necesario establecer un sistema de Mantenimiento Preventivo por estado de condición de los pozos profundos del estado de Cojedes, que permita establecer cuándo realizar la limpieza general del pozo y evite el desgaste acelerado de los diferentes elementos constructivos de las bombas centrífugas.

En un análisis de fiabilidad, la selección de un intervalo de tiempo entre dos servicios técnicos (T_s) a efectuar a un pozo (limpieza y restablecimiento de algunos parámetros estructurales) se calcula teniendo en cuenta determinadas condiciones climáticas y de operación. Al cambiar dichas condiciones no es válido el T_s preestablecido, provocando que el pozo se opere en condiciones técnicas que afectan el estado técnico del sistema de bombeo, por lo que los trabajos preventivos cíclicos en muchas ocasiones no son económicamente efectivos.

Para disponer de un efectivo sistema de mantenimiento del pozo y que a su vez su estado técnico no afecte al sistema de bombeo, es necesario controlar algunos parámetros funcionales de forma sistemática. Para lograr lo anterior se ha desarrollado una rama de la Ciencia que se dedica al estudio y determinación del estado técnico de cada *artículo* en explotación con un enfoque individual para restablecer sus requisitos de funcionamiento, que se ha denominado *Diagnóstico Técnico*.

La base del Diagnóstico Técnico consiste en saber medir (de forma continua o discreta) los parámetros (directos o indirectos) que caracterizan el estado técnico del artículo; parámetros que permiten establecer el estado real de un artículo en particular y determinar su posible tiempo de explotación, hasta el momento en que alcance su estado límite.

Durante la explotación de los pozos ocurren diferentes procesos que reflejan la calidad funcional del mismo y pueden ser parámetros generales o particulares. Los parámetros de procesos de salida pueden ser medidos mientras se opera el pozo y ser utilizados para evaluar su estado técnico, a dichos parámetros se les denomina *síntomas* o *señales de diagnóstico*.

En el Diagnóstico Técnico una cuestión básica es determinar los valores límites de los síntomas de diagnóstico. En la actualidad, la evaluación del estado técnico de un sistema cualquiera se realiza dándole seguimiento y analizando los diferentes valores de las variables globales que cuantifican los síntomas de diagnóstico. Dichas evaluaciones

habitualmente se pueden realizar por tres métodos:

1. Estado comparativo de los valores de las variables con respecto a los niveles de aviso o alarma y disparo que se hayan establecido, según recomendaciones del fabricante, normas conocidas y estudiadas que se ajustan a las condiciones de operación del sistema evaluado o según normas propias establecidas para cada uno de los sistemas a partir de sus condiciones particulares de explotación [EASA 1994].
2. A través de la razón de crecimiento del valor de la variable [ISO 2372-1974 (E)].
3. Por el Método de Rapidez de Cambio del valor de la variable [Batista, 2005].

A partir de la problemática existente en la explotación de los pozos del Estado de Cojedes, que provoca la ocurrencia de fallos funcionales prematuros en las bombas, acarreado altos costos para su reparación o cambio, y conociendo de la existencia de procedimientos para establecer un sistema de Mantenimiento por estado de condición, se ha desarrollado el trabajo que a continuación se expone.

2. Desarrollo.

La tarea de investigación consiste en poder establecer cual es el límite de concentración de sólidos disueltos en el agua del pozo que provocan el desgaste acelerado de los elementos de máquinas de las bombas y al darle un seguimiento a dicha variable poder determinar cuál es el momento oportuno en que se debe acometer el mantenimiento del pozo, minimizando los gastos por mantenimiento del sistema de bombeo.

Antes de proceder a diseñar y establecer el procedimiento se realizaron un grupo de tareas concernientes a conocer y profundizar respecto a:

- Sistemas de bombeos
- Tipos de acuíferos y sus características.
- Perforación de pozos profundos para fines de riego. Sus características, funcionamiento y mantenimiento.
- Bombas centrifugas para pozos profundos con sus características y funcionamiento, según la figura 2

- Metodologías para evaluar la concentración de sólidos disueltos en el interior de los pozos.
- Técnicas de Mantenimiento Predictivo posibles de aplicar.

Realizado el estudio anterior se procedió a diseñar y establecer un procedimiento que permita resolver la tarea propuesta.

Procedimiento para establecer un Sistema de Mantenimiento Preventivo por condición que minimice los costos de mantenimiento conjunto del sistema de bombeo.

1. Recolección de la muestra de sólidos en el agua del pozo.

La recolección de las muestras se hará teniendo en cuenta los requisitos necesarios de la misma para ser procesada en laboratorio y poder determinar la cantidad de sólidos por unidad de agua (g/Lts). La periodicidad de la toma de la muestra se hará en correspondencia con la Rapidez de Cambio del valor de la concentración y del cambio de factores climatológicos que puedan afectar los parámetros funcionales del pozo, es decir:

- Se recolecta una muestra inicial y se determina la concentración media (C_1), al término de un pequeño período (1 mes) se toma la siguiente muestra y se calcula C_2 .

- Se calcula la Rapidez de Cambio del Valor de la Concentración (RCVC) por la ecuación (1). Si $RCVC \leq 0$ el período para la toma de la siguiente muestra se puede alargar ($t > 1$ mes). En caso contrario, si el RCVC es pequeño se mantendrá el período de muestreo, si el RCVC es grande debe disminuirse el período de muestreo ($t < 1$ mes).

Las muestras a tomar en cada período se realizarán a tiempo fijo, después del arranque de la bomba, es decir 30 minutos, para con ello lograr que exista una buena disolución de los sólidos depositados en el pozo en el agua extraída.

La expresión para el cálculo de la Rapidez de Cambio del Valor de la Concentración será:

$$RCVC = \frac{C_2 - C_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Donde:

C_1 - Concentración de sólidos en el agua del pozo en el instante de tiempo t_1

C_2 - Concentración de sólidos en el agua del pozo en el instante de tiempo t_2

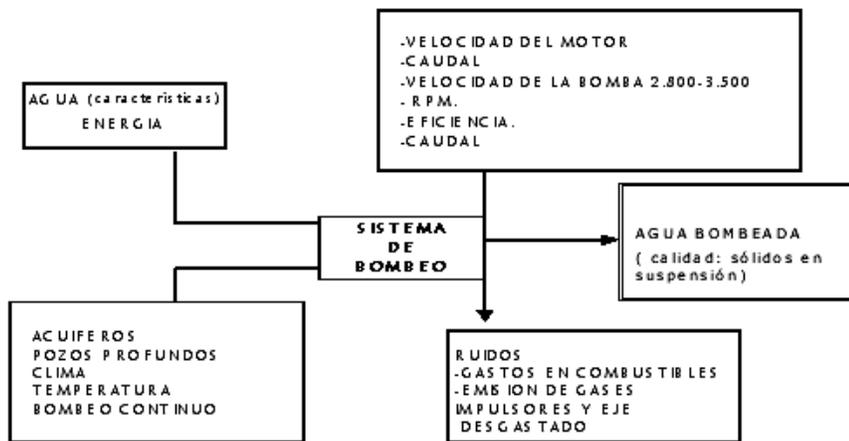


Figura 2. Análisis conjunto del sistema de bombeo.

2. Establecer el valor de Caudal Mínimo (Q_m) en el que se considera que comienza el desgaste acelerado de los elementos de máquina que provocan su disminución, manteniendo

constante la altura de bombeo (h) y la potencia suministrada en el rotor de la bomba ($T \omega$).

Para establecer el valor del Caudal Mínimo (Q_m) en que comienza el desgaste acelerado de los

elementos de máquinas es necesario consultar a los diseñadores y fabricantes de bombas que establecen los requisitos de funcionamiento. Si no es posible encontrar dichos valores, los mismos deben ser estimados a partir de estudios anteriores realizados o establecerlos a través de consulta de expertos.

3. Realizar el muestreo del Caudal (Q) que suministra la bomba en el mismo período que se toman los valores de concentración de los sólidos en el agua (C).

Estas muestras son de extrema importancia para establecer la correlación existente entre el Caudal que suministra la bomba y la concentración de sólidos en el agua en un período dado de tiempo. Se considera que la pérdida de caudal está dada por el desgaste excesivo de los elementos de máquinas, como pueden ser el impulsor, la voluta u otros.

4. Determinar la función o modelo de dependencia del Caudal (Q) de la bomba respecto a la Concentración de sólidos en el agua del pozo (C).

Se propone determinar dicha función a través del ajuste de curvas, utilizando el método de los mínimos cuadrados y como criterio del mejor ajuste el coeficiente de determinación R^2 .

5. Construcción de un diagrama (C-Q) de coordenadas cartesianas en el cual se represente la función de dependencia del

caudal de la bomba respecto a la concentración de sólidos en el agua.

Para la construcción del gráfico se colocarán por el eje de las X las posibles concentraciones de sólidos y por el eje de las Y el caudal que debe suministrar la bomba. Además, se representará la función continua a través de la cual se podrá determinar el caudal que debe suministrar la bomba, conocido C y se representará el valor del Caudal Mínimo establecido como se muestra en la Figura 3.

6. Uso del gráfico. Concentración de sólidos en agua del pozo visitado. Caudal suministrado por la bomba en lo adelante denominado diagrama C-Q

Conocido el diagrama C-Q, el operador del sistema de bombeo recolectará la muestra de sólidos en el agua del pozo (según el punto 1) y determinará la concentración C, entrará dicho valor en el eje de las abscisas X y determinará el Caudal (Q), el cual será comparado con el valor mínimo establecido (Q_m). Si el valor de Q es mucho mayor que Q_m , el próximo muestreo de concentración de sólidos se realizará a mayores intervalos de tiempo. A medida que Q se vaya acercando a Q_m , el muestreo se realizará con menores intervalos de tiempo para poder estimar correctamente cuándo es el momento adecuado para proceder a realizar el mantenimiento al pozo (limpieza y otras tareas).

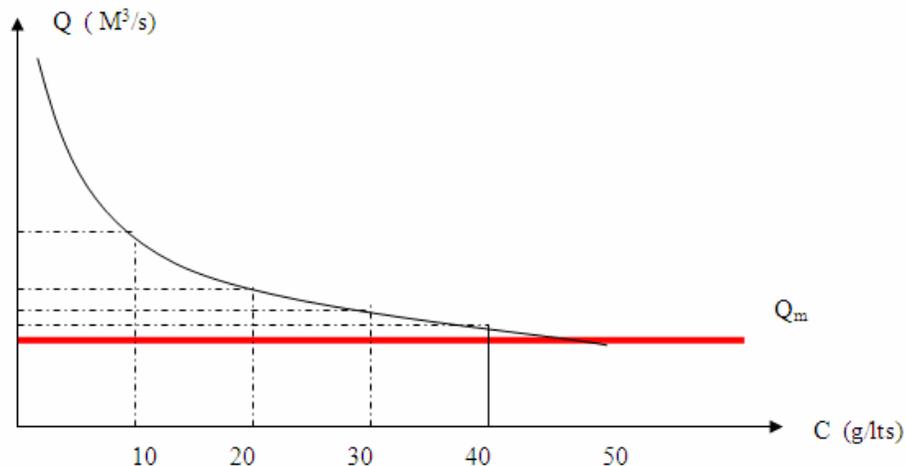


Figura 3. Diagrama C-Q.

3. Conclusiones.

Calcular y disponer del diagrama C-Q es una herramienta de trabajo para el usuario de sistemas de bombeo de pozos profundos que le permite establecer de forma razonable cuál es el mejor momento para acometer las tareas de mantenimiento del pozo, para con ello evitar el desgaste acelerado de los elementos de máquinas de las bombas y de esa forma minimizar los gastos de operación y mantenimiento del sistema conjunto pozo - bomba.

4. Recomendaciones.

Se recomienda utilizar el procedimiento propuesto para construir los diagramas C-Q para diferentes pozos y ser utilizados por los agricultores, para con ello poder minimizar los gastos de operación y mantenimiento del sistema conjunto pozo-bomba.

5. Referencias.

1. **ÁLVAREZ, M.; GUERRA HERNÁNDEZ, A., et al.** *Matemática Numérica, La Habana.* La Habana. Cuba: Editorial Félix Varela, 2004. 296 p.
2. **ANILOVICH, B. R.** *Fiabilidad de la explotación de las máquinas agrícolas.* Minsk: Editora Cosecha, 1974. 255 p.
3. **BATISTA RODRÍGUEZ, C.** *Diagnóstico Técnico de máquinas rotatorias. Monografía.* Holguín, Cuba: 2005. 102 p.
4. **CREUS SOLÉ, A.** *Seguridad y Fiabilidad de procesos industriales.* Barcelona, España: MARCOMBO S.A, 1991. 123 p.
5. **EASA.** *Manual de Mantenimiento Predictivo en grupos hidroeléctricos.* 1994. 151 p. Programa de investigación electrotécnica. Proyecto PIE No. 121.046.

R. Morales¹, C. Batista-Rodríguez²

1. Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora - UNELLEZ, San Carlos Cojedes. República Bolivariana de Venezuela.

E-mail: cancer0676@hotmail.com

2. Universidad de Holguín. Avenida XX Aniversario s/n, Reparto. Piedra Blanca. Holguín. Cuba
Telefono: (53) (24) 48 2672

E-mail: batista@facing.uho.edu.cu