

Bombeo óptimo de los pozos del sistema de abasto El Gato

Ing. Iosvany Alberto Recio Villa

Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, (CUJAE).

email: recio@cih.cujae.edu.cu

Ing. Haymelis Sandoval Perdomo

Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, (CUJAE).

Dr C. José Bienvenido Martínez Rodríguez

Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, (CUJAE).

email: bienvenido@cih.cujae.edu.cu

DrC. Alberto Rodríguez Rodríguez

Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador.

email: drrodriguezcc9564@gmail.com

RESUMEN

El suministro de agua mediante estaciones de bombeo implica un alto costo energético que a largo plazo se convierte en el mayor costo de operación. En este trabajo se aplica un modelo de optimización para desarrollar una propuesta de operación del sistema fuente de abasto de agua del acueducto El Gato con el objetivo de minimizar el costo de energía eléctrica. El resultado principal consiste en establecer un esquema operacional del acueducto que minimice el costo de energía eléctrica para un periodo de 168 horas. Como resultados prácticos de la aplicación del modelo se obtienen el costo y consumo de energía eléctrica y un cronograma de operación que define la secuencia de encendido y apagado de cada estación de bombeo.

Palabras clave: abasto de agua, algoritmos genéticos, costos de bombeo, optimización.

Optimal pumping of wells in El Gato water supply system

ABSTRACT

Water supply through pumping stations implies a high energy cost which in the long run becomes the highest operating cost. In this work, an optimization model is applied to develop a proposal for the operation of the water supply system “El Gato” for minimizing the cost of electric energy. The main result consists of establishing an operational scheme that minimizes the electric energy cost for a period of 168 hours. As practical results of the application of the model, the cost and consumption of electric energy and an operation schedule that defines the sequence of turning on and off of each pumping station are obtained.

Keywords: water supply, genetic algorithms, pumping costs, optimization.

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Distribución de Agua (SDA) son una de las infraestructuras básicas más importante para el bienestar y confort de la sociedad, cuyo objetivo principal es garantizar el agua a los usuarios con la calidad y en la cantidad requerida. Sin embargo, cuando se suministra agua se consume generalmente gran cantidad de energía eléctrica. El componente que mayor energía eléctrica consume dentro de un SDA son las estaciones de bombeo (EB). Los costos y consumo de energía eléctrica asociados con el bombeo de agua generalmente representan la mayor parte de los costos de operación en los SDA convencionales (Lansey and Awumah 1994). De ahí que la optimización de la operación de las EB sea uno de los campos de mayor atención por parte de la comunidad científica dedicada a la investigación en la ingeniería hidráulica, especialmente en los años recientes con el aumento del precio de la energía a nivel mundial (Giacomelo et al. 2012).

Las estaciones de bombeo funcionan de acuerdo con su política de operación (Sakarya and Mays 2000) que consiste en establecer el cronograma de operación óptima mediante el cual se definen los intervalos de tiempo en que deben encenderse y apagarse los equipos de bombeo con el propósito de reducir el costo y consumo de energía eléctrica. El cronograma de operación de las estaciones de bombeo ha probado ser una herramienta efectiva para reducir costos de operación sin necesidad de realizar grandes cambios en la infraestructura existente de los SDA (Giacomelo et al. 2012), ya que solamente modificando las reglas de operación de las EB para aprovechar las horas de menor costo de las tarifas energéticas se pueden reducir los costos de bombeo. Dicho cronograma se puede integrar con la actividad de mantenimiento del equipamiento de las EB planificando reparaciones en el periodo de descanso de un equipo de bombeo sin necesidad de afectar el suministro.

Disponer de un cronograma de operación óptima de EB es una actividad compleja ya que además de reducir el costo y consumo de energía eléctrica también deben garantizarse los requerimientos de servicio de los SDA, entiéndase caudales, presiones y niveles en los depósitos que garanticen un adecuado suministro, lo que significa que durante la operación en tiempo real la secuencia de encendido y apagado de los equipos de bombeo debe garantizar el suministro de agua. La optimización de la operación de las EB depende de parámetros y variables que tienen cierto grado de incertidumbre, como son la tarifa eléctrica y la demanda de agua. La tarifa eléctrica es una información que ofrecen las empresas encargadas de la gestión de la electricidad y generalmente se mantiene invariable durante el periodo de bombeo. Sin embargo, para optimizar la operación de las EB se debe estimar a futuro la demanda de agua que existirá en el SDA durante el periodo de operación. La precisión al estimar esta demanda es un factor clave para obtener el cronograma de bombeo que se ajuste a la realidad del SDA que representa (McCormick and Powell 2003).

Las técnicas de optimización han sido una herramienta muy valiosa en la optimización de la operación de las EB para obtener cronogramas de operación. En este sentido Ormsbee et al. (1989) y Lansey and Awumah (1994) presentan excelentes revisiones. Varios investigadores han propuesto métodos para determinar el cronograma de optimización de bombeo utilizando técnicas de optimización (Abiodun and Ismail 2013) como la programación lineal (LP) (Pasha and Lansey 2009); programación no-lineal (NLP) (Hajji et al. 2010); (Sakarya and Mays 2000). En ocasiones estas técnicas no son muy satisfactorias para todo tipo de problemas de

optimización del bombeo y algunas veces son difíciles de aplicar cuando el tamaño del SDA y las restricciones son considerables (Abiodun and Ismail 2013). Recientemente, mediante el empleo de algoritmos basados en la computación evolutiva y especialmente los Algoritmos Genéticos (GA) se ha incrementado la aplicabilidad de las técnicas de optimización para obtener cronogramas de operación óptima de EB. Los GA han emergido como una técnica robusta para enfrentar este tipo de problemas de optimización. Entre sus ventajas se destacan que no requieren de una simplificación del modelo hidráulico para lograr una buena solución ya que pueden manejar funciones objetivo y restricciones no lineales como es el caso de la optimización de los costos energéticos y, además, no se ven afectados por el tamaño del SDA y las restricciones.

Este trabajo tiene como objetivo obtener un cronograma de bombeo optimizado para el sistema fuente del acueducto El Gato mediante la aplicación de un modelo matemático de optimización. El modelo propuesto utiliza una función objetivo mediante la cual se minimiza el costo de bombeo sujeto a restricciones que garantizan un servicio adecuado en el SDA del acueducto El Gato. El modelo se aplica para un horizonte de operación de 7 días, es decir 168 horas con un paso de tiempo de 8 horas. Al aplicar el modelo se obtiene el costo y consumo de energía eléctrica de la fuente y se determinan los intervalos de tiempo donde debe encenderse y apagarse cada EB para minimizar los costos de energía eléctrica.

La estructura del artículo es la siguiente: primeramente se abordan aspectos teóricos relacionados con la operación de estaciones de bombeo mediante el uso de la modelación matemática y técnicas de optimización. Seguidamente se presenta el modelo matemático de optimización que fue resuelto mediante el acoplamiento del modelo EPANET y el asistente matemático MATLAB. Finalmente se aplica el modelo propuesto para obtener un cronograma de operación de las EB del acueducto El Gato y se discuten los resultados obtenidos.

CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN

El modelo propuesto ha sido implementado mediante un acoplamiento entre el software EPANET y el asistente matemático MATLAB. Mediante la función objetivo que emplea se logra minimizar el costo de bombeo de las EB. Por otra parte, las restricciones consideradas en el modelo garantizan un adecuado suministro de agua del SDA. En la ecuación (1) se presenta la función objetivo.

$$Fo. \sum_{n=1}^{n=NB} CB \quad (1)$$

donde: CB es el costo total de bombeo en (\$); n es un contador de la cantidad de bombas; NB es el número total de bombas.

El costo de bombeo de cada EB se determina mediante las ecuaciones que siguen:

$$CB = \sum_{i=1}^{i=T} C_{b,i} \cdot E_{Bn} \quad (2)$$

$$E_{Bn} = Pot_{b,n} \cdot T_b \quad (3)$$

$$Pot_{b,n} = \frac{\gamma \cdot H_{b,n} \cdot Q_{b,n}}{e_{F,n}} \quad (4)$$

En las ecuaciones (2)-(3)-(4) se tiene que: $C_{b,i}$ es el costo unitario de la energía eléctrica, en (\$/kWh); E_{Bn} es la energía de bombeo de la bomba n en (kWh); T_b es el tiempo de bombeo en horas; $Pot_{b,n}$ es la potencia media de la bomba n ; γ es el peso específico del líquido a bombear en (N/m³); H_b es la carga de la bomba n en (m); Q_b es el caudal de la bomba n en (m³/s); ef es la eficiencia de la bomba n (adimensional); i es el contador del paso de tiempo; T es el tiempo total del periodo de optimización.

Restricciones del modelo matemático de optimización

Las restricciones que se muestran a continuación tienen como objetivo garantizar un servicio adecuado del SDA durante la operación. Concretamente las restricciones que se muestran limitan las presiones en nodos, niveles en los depósitos, arranques y paradas de las EB y velocidades en las tuberías.

$$V_{kmin} \leq V_{ki} \leq V_{kmax} \quad (5)$$

$$P_{jmin} \leq P_{ji} \leq P_{jmax} \quad (6)$$

$$NA \leq NA_{max} \quad (7)$$

$$L_{pmin} \leq L_{pi} \leq L_{pmax} \quad (8)$$

En estas ecuaciones se tiene que: V_{ki} es la velocidad en la tubería k en el tiempo i ; V_{kmax} es la velocidad máxima en la tubería k ; V_{kmin} es la velocidad mínima en la tubería k ; P_{jmin} es la presión mínima en el nodo j ; P_{jmax} es la presión máxima en el nodo j ; P_{ji} es la presión en el nodo j en el tiempo i ; NA es la secuencia de encendido y apagado de los equipos de bombeo; NA_{max} es la secuencia máxima de encendido y apagado de los equipos de bombeo; L_{pi} es el nivel del depósito p , en el tiempo i ; L_{pmin} es el nivel mínimo del depósito p ; L_{pmax} es el nivel máximo del depósito p .

Mediante la ecuación (5) se garantiza mantener las velocidades de las tuberías entre valores mínimos y máximos. Al considerar en el modelo una velocidad mínima se aseguran flujos y velocidades que contribuyan a mantener condiciones adecuadas de calidad de agua. Por otra parte, al considerar una velocidad máxima se limitan los flujos y velocidades para que no excedan los valores máximos normados. La ecuación (6) garantiza mantener las presiones entre valores mínimos y máximos en nodos estratégicos del SDA para garantizar un servicio adecuado y no exceder la presión nominal de las tuberías. La ecuación (7) limita los arranques de las EB a un valor máximo definido. Establecer los arranques máximos de las EB requiere de cierta experiencia por parte del especialista encargado de establecer el cronograma de bombeo optimizado. La ecuación (8) limita los niveles en los depósitos a valores máximos y mínimos. Al considerar un nivel mínimo se asegura que el depósito siempre almacene una cantidad de agua mínima que garantice un servicio adecuado. Por otra parte el nivel máximo garantiza mantener un nivel de operación favorable y evita el desbordamiento del depósito.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA FUENTE DEL ACUEDUCTO EL GATO

El sistema fuente del acueducto El Gato, se encuentra ubicado en el pueblo Catalina de Güines, en la provincia Mayabeque. Esta fuente extrae el agua de la cuenca subterránea Jaruco-Aguacate y está compuesta por un campo de pozos con 17 estaciones de bombeo. En el esquema operacional actual se utilizan 12 para la operación y cinco como reserva. El bombeo desde el campo de pozos se realiza hasta un depósito estabilizador del bombeo (TRP) de 5000 m³ mediante una conductora de acero (L-4) de Ø 1500 mm. Desde el TRP el suministro se realiza por gravedad mediante una conductora de Ø 1600 mm de hormigón con centro acero (L-5) hasta dos depósitos de almacenamiento, llamados depósitos principales (DP) de 30 000 m³ de capacidad cada uno y desde estos se realizan las entregas hacia la red de distribución. En la figura 1 se muestra la configuración topológica del sistema fuente y en la figura 2 se detalla la topología del campo de pozos con las EB. En la figura 1 se observa que el sistema tiene entregas en ruta a cuatro pequeños poblados (Zaragoza, Rotolactor, Chivería y El Triángulo) de donde se abastecen aproximadamente 1200 personas.

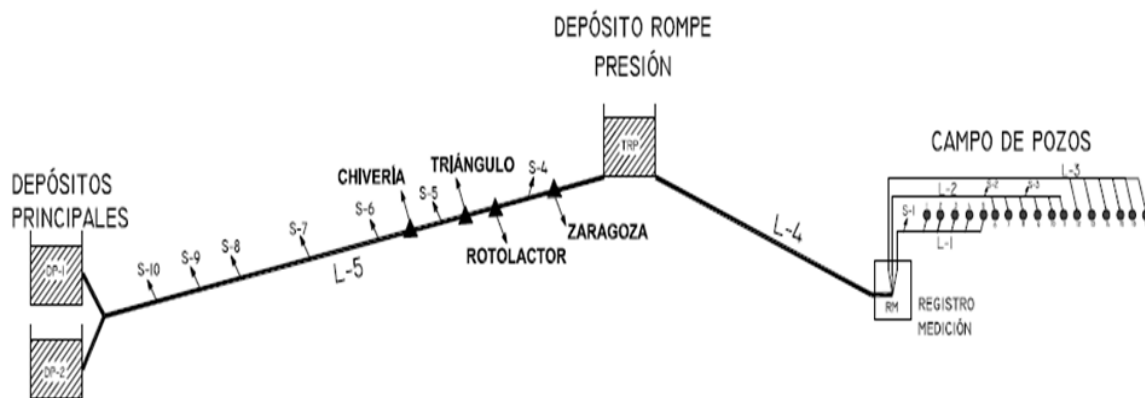


Figura 1. Configuración topológica del acueducto El Gato

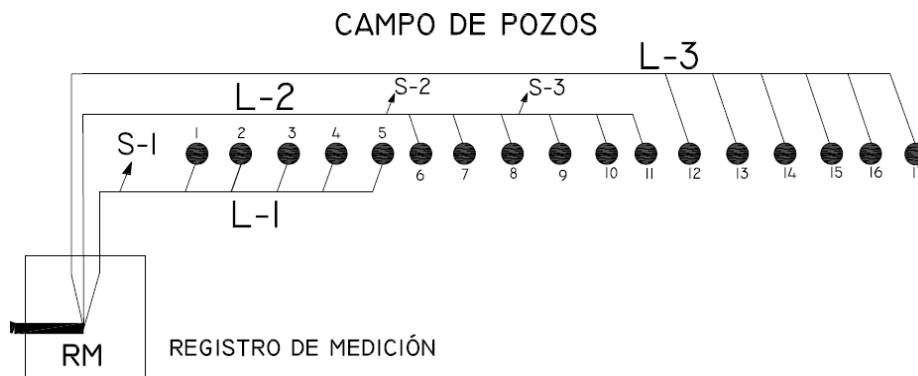


Figura 2. Configuración topológica del campo de pozo del acueducto El Gato

Información para establecer el cronograma de operación del sistema fuente

En (Bosch y Recio 2014) se realiza un estudio de calibración y validación de este sistema en el cual se determinan los parámetros que caracterizan los coeficientes de rugosidad de las tuberías, se ajustan matemáticamente las curvas características de los equipos de bombeo y se

determinan los coeficientes de pérdidas en los salideros. Aquí ahora se emplean estos parámetros para obtener el cronograma de bombeo optimizado de esta fuente. Por otra parte, para llevar a cabo un estudio de optimización de bombeo se necesita disponer de la demanda pronosticada para el periodo de optimización, las características de los equipos de bombeo, características geométricas, capacidad y niveles de operación de los depósitos, presión nominal y velocidades máximas y mínimas de circulación de las tuberías y la tarifa de energía eléctrica.

En la figura 3 se muestran las demandas horarias para el sistema fuente del acueducto El Gato, considerando una semana de operación, es decir 168 horas.

Caudales demandados en el acueducto El Gato

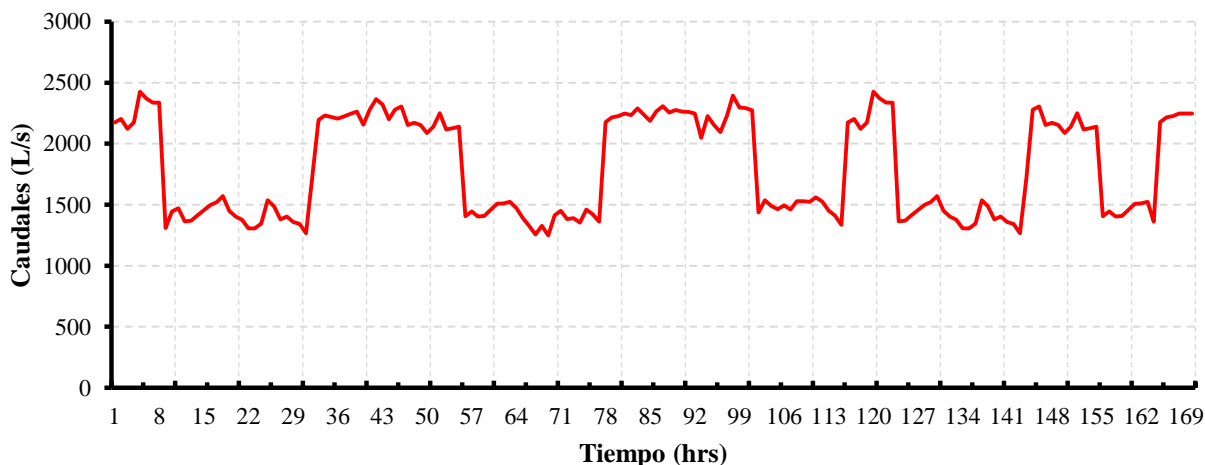


Figura 3. Demanda del sistema fuente del acueducto El Gato

Como se observa en la figura 1, en el sistema fuente del acueducto El Gato existen tres depósitos. En el (DP) los límites máximos y mínimos de los niveles de operación son de 6,0 m y 0,30 m respectivamente y en el (TRP) estos niveles son de 10,0 m y 4,0 m respectivamente. La operación de este SDA se rige por lo establecido en la Norma GOC-2016-472-EX16 (2016), por lo que en los poblados Zaragoza, Rotolactor, Chivería y El Triángulo deben garantizarse presiones mínimas y máximas de 14 mca y 50 mca respectivamente. Este valor de presión máxima garantiza no exceder la presión nominal de las tuberías de 80 mca. En las tuberías las velocidades de circulación mínima y máxima se han establecido entre 0,3 m/s y 1,8 m/s respectivamente. Los valores mínimos y máximos de presión, velocidad y niveles se utilizan en las ecuaciones (5)- (6) y (8) para acotar las restricciones del modelo de optimización. Para controlar las secuencias de arranques y apagados de las bombas durante el periodo de optimización, que son 7 días equivalentes a 168 horas, se ha establecido un límite máximo de 3 arranques por cada equipo de bombeo. Esto significa que en ese periodo cada bomba podrá tener como máximo 3 secuencias.

La tarifa eléctrica adoptada ha sido suministrada por especialistas de la empresa Aguas de La Habana, de Cuba. Dicha tarifa es variable durante el día, con valores mayores en el horario pico de consumo eléctrico y valores menores en el horario diurno. Los valores de la tarifa se muestran a continuación:

Horario normal: desde 5 am – hasta 5 pm (12 h): 0,24 \$/ kWh.

Horario pico: desde 5 pm – hasta 8 pm (4 h): 0,48 \$/ kWh

Horario diurno: desde 9 pm – hasta 4 am (8 h): 0,16 \$/ kWh

RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN

En el modelo de optimización las variables de decisión son los gastos de los equipos de bombeo que se encuentran en las EB. Anteriormente se ha establecido que el periodo de optimización es de 168 horas y el paso de tiempo es de 8 horas. Este paso de tiempo implica que existan 21 intervalos de bombeo. En cada EB se tiene solamente un equipo de bombeo. El problema de optimización tiene 357 variables de decisión, resultantes de multiplicar los 17 flujos de los equipos de bombeo por los 21 intervalos. La técnica de optimización empleada han sido los algoritmos genéticos (GA) implementados en el asistente matemático MATLAB con la *function (ga)*. Para la ejecución del algoritmo se establecieron 500 generaciones para una población de 200 individuos con factores de cruzamiento y mutación de 0,8 y 0,2 respectivamente.

El valor de la función objetivo obtenido de la corrida del GA es \$ 86980,10 que representa el costo de bombeo del sistema fuente del acueducto El Gato para el periodo de optimización seleccionado. Para obtener estos resultados se ha consumido un tiempo de cómputo de 2 horas en una PC Dual Core con 4 Gb de RAM. En la optimización se consideró que inicialmente todos los equipos de bombeo se encontraban encendidos.

Comportamiento hidráulico del sistema fuente del acueducto El Gato

El análisis del comportamiento hidráulico del sistema fuente del acueducto El Gato se realiza para comprobar que la solución propuesta por el modelo garantiza los requerimientos de servicio, entiéndase presiones en los nodos claves, caudales, velocidades y secuencias de arranques y paradas de los equipos de bombeo del SDA. Seguidamente se analiza el comportamiento de los arranques de las bombas, tabla 1.

Tabla 1. Arranques de las bombas obtenidos de la ejecución del modelo

Equipos de Bombeo	Secuencia máxima	Secuencia Simulada	Equipos de Bombeo	Secuencia máxima	Secuencia Simulada
PMP-1	3	1	PMP-10	3	0
PMP-2	3	1	PMP-11	3	2
PMP-3	3	1	PMP-12	3	1
PMP-4	3	1	PMP-13	3	1
PMP-5	3	1	PMP-14	3	1
PMP-6	3	2	PMP-15	3	1
PMP-7	3	0	PMP-16	3	1
PMP-8	3	0	PMP-17	3	2
PMP-9	3	1	-----	-----	-----

En la tabla 1 se muestra la secuencia de encendidos y apagados propuestos para los equipos de bombeo durante el periodo de optimización, donde se puede apreciar que la secuencia máxima nunca es excedida. También en la tabla 1 se evidencia que los equipos PMP-7 y PMP-8 tienen valores nulos (ceros) en las secuencias, esto significa que el modelo propone una solución en la cual durante el periodo de optimización estos equipos de bombeo no se utilizan, por lo tanto

se apagan, de ahí el valor nulo. Por otra parte, el equipo PMP-10 presenta una situación particular ya que comienza la optimización encendido y también presenta un valor nulo de secuencia. En la tabla 3 se presenta el cronograma de operación de los equipos de bombeo, donde se puede observar que el modelo propone una solución en la cual este equipo siempre está encendido durante el periodo de operación y por ese motivo es que su secuencia tiene un valor igual a cero.

Niveles de agua en los depósitos

En la tabla 2 se observa de manera muy resumida el comportamiento de los niveles en los depósitos. Como se puede apreciar nunca se exceden los niveles mínimos y máximos de operación que fueron establecidos como condiciones de contorno en las restricciones del modelo.

Tabla 2. Resultados de la optimización de los niveles en los depósitos

Depósitos	Nivel Mínimo (m)	Nivel Mínimo Simulado (m)	Nivel Máximo (m)	Nivel Máximo Simulado (m)	Nivel Final Simulado (m)
TRP	4,00	4,30	11,40	7,00	4,45
DP-1	0,32	2,00	6,00	6,00	5,62
DP-2	0,32	2,00	6,00	6,00	5,62

En la figura 4 y figura 5 se muestra el comportamiento dinámico de los niveles de los depósitos durante el periodo de optimización.

Niveles simulados en el tanque estabilizador de bombeo (TRP)

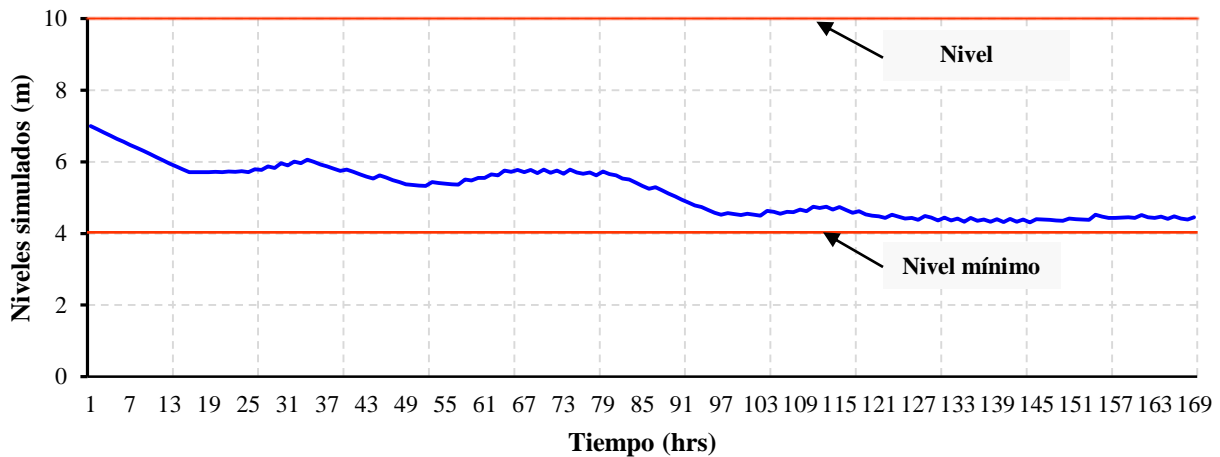


Figura 4. Comportamiento de los niveles en el tanque estabilizador de bombeo (TRP)

En el gráfico de la figura 4 se observa que el depósito (TRP) comienza la simulación con un nivel de 7,00 m y durante el transcurso del periodo de optimización su nivel tiende a disminuir hasta alcanzar los 4,45 m. Como se puede observar en ningún instante de tiempo los niveles en este depósito son inferiores al límite mínimo de 4,0 m y tampoco superiores al límite máximo de 11,40 m.

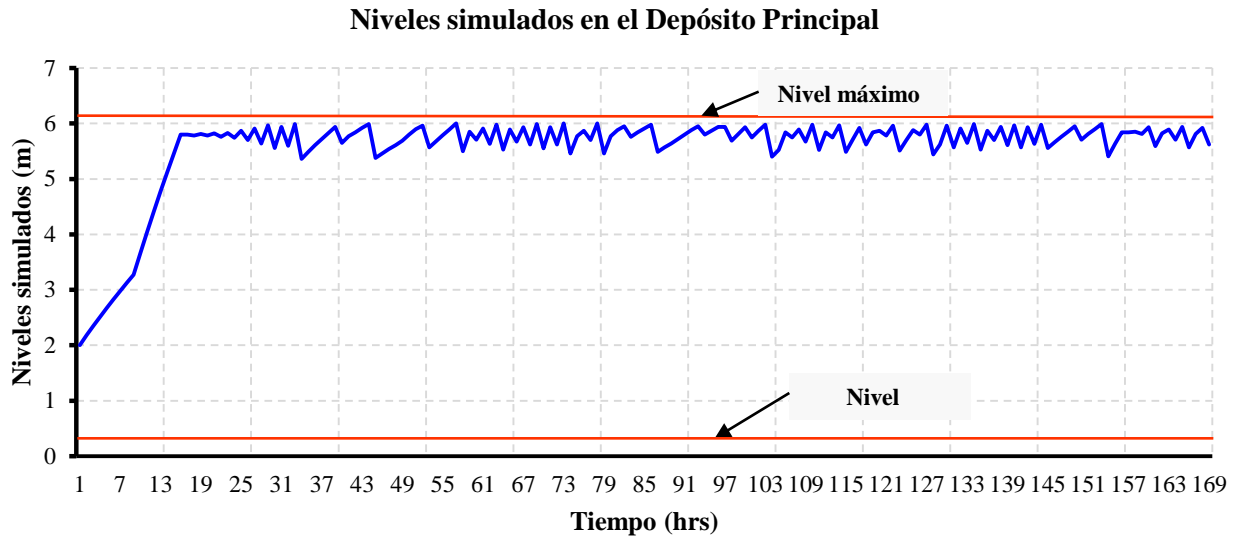


Figura 5. Comportamiento de los niveles en el Depósito Principal

En el gráfico de la figura 5 se observa que el (DP) comienza la simulación con un nivel de 2,00 m y durante el transcurso del periodo de optimización su nivel tiende al aumento, e incluso en varios momentos alcanza su nivel máximo finalizando con un nivel de 5,62 m. Se puede observar que en ningún instante los niveles en este depósito son inferiores al límite mínimo de 0,32 m y tampoco superiores al límite máximo de 6,0 m. Los resultados propuestos por el modelo indican que se cumplen las restricciones de la ecuación (8) ya que en ningún instante de tiempo se alcanzan los niveles máximos y mínimos de los depósitos.

Presiones de servicio en los poblados Zaragoza, Rotolactor, Chivería y El Triángulo

En las figuras 6, 7, 8 y 9 se observa el comportamiento dinámico de las presiones en los nodos de conexión de los poblados Zaragoza, Chivería Rotolactor y el Triángulo para el periodo de optimización.

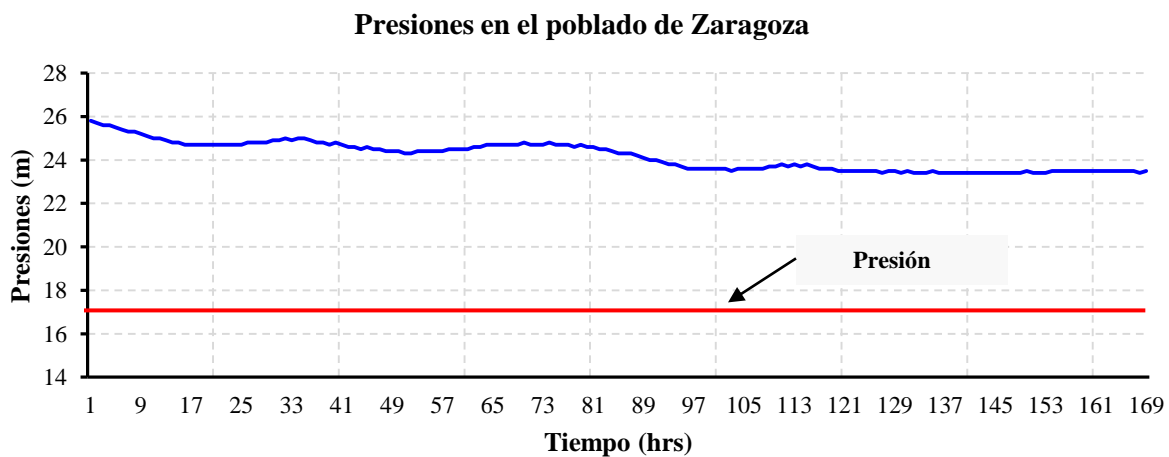


Figura 6. Comportamiento de las presiones en el poblado Zaragoza

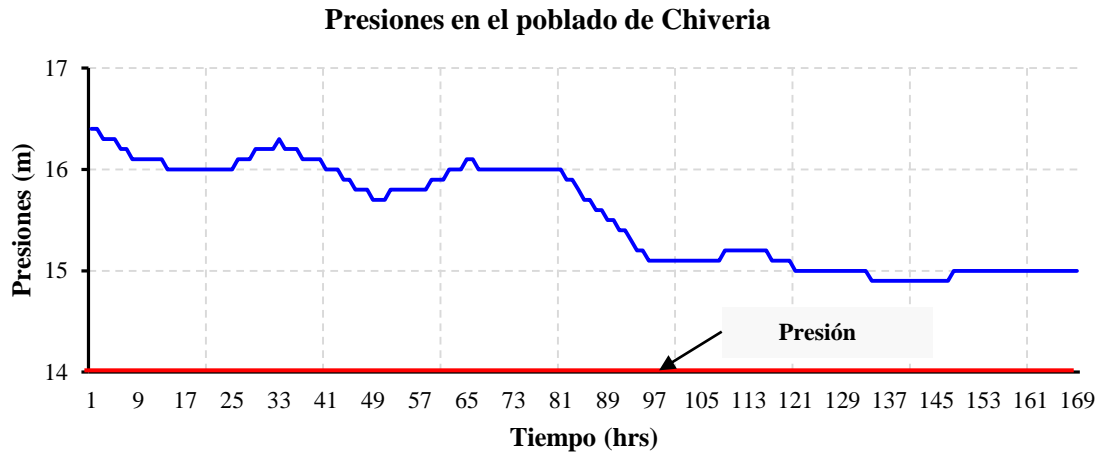


Figura 7. Comportamiento de las presiones en el poblado Chivería

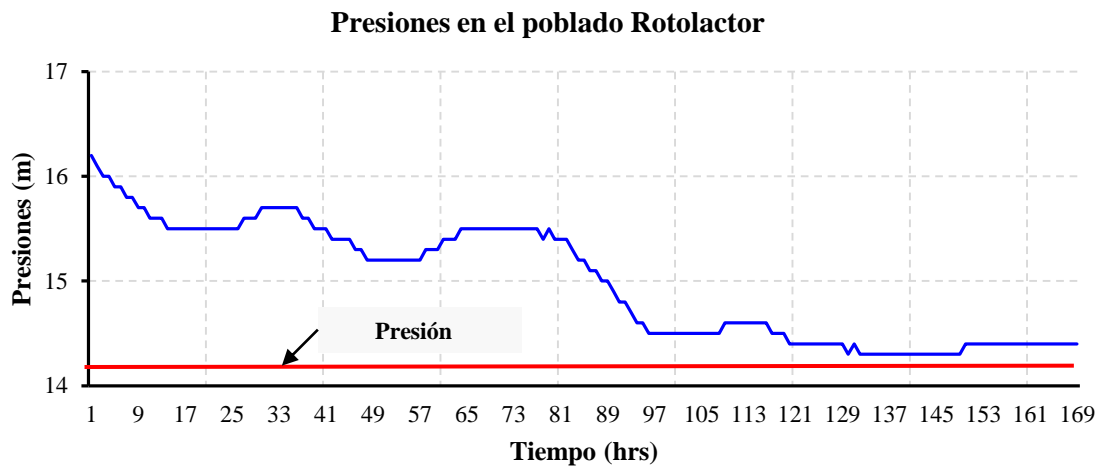


Figura 8. Comportamiento de las presiones en el poblado Rotolactor

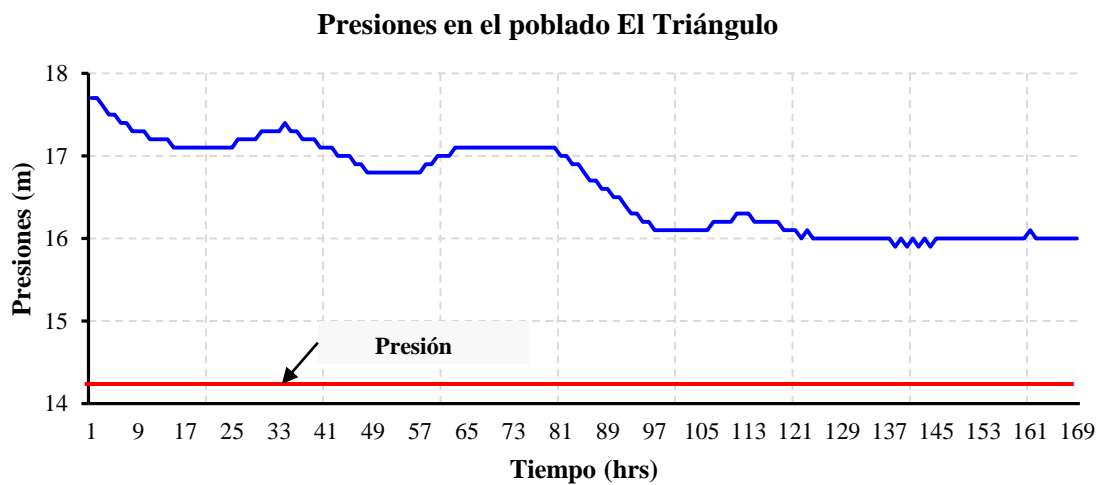


Figura 9. Comportamiento de las presiones en el poblado El Triángulo

Como se puede observar en ningún instante de tiempo las presiones en los nodos de conexión de los poblados son inferiores a 14 mca ni exceden los 50 mca. Se considera que los valores obtenidos garantizarán un servicio adecuado en estos poblados. Los resultados obtenidos garantizan el cumplimiento de las restricciones de presiones máximas y mínimas establecidas en la ecuación (6).

Velocidades en las tuberías

En la figura 10 se observa el comportamiento dinámico de las velocidades en las tuberías principales del SDA para el periodo de optimización. Como se puede observar en las tuberías se cumple la restricción de velocidad máxima y mínima establecida en la ecuación (5) del modelo. En ningún instante de tiempo las velocidades son inferiores a 0,30 m/s ni exceden los 1,8 m/s. De estos resultados se puede afirmar que en la instalación existirán velocidades normales de circulación.

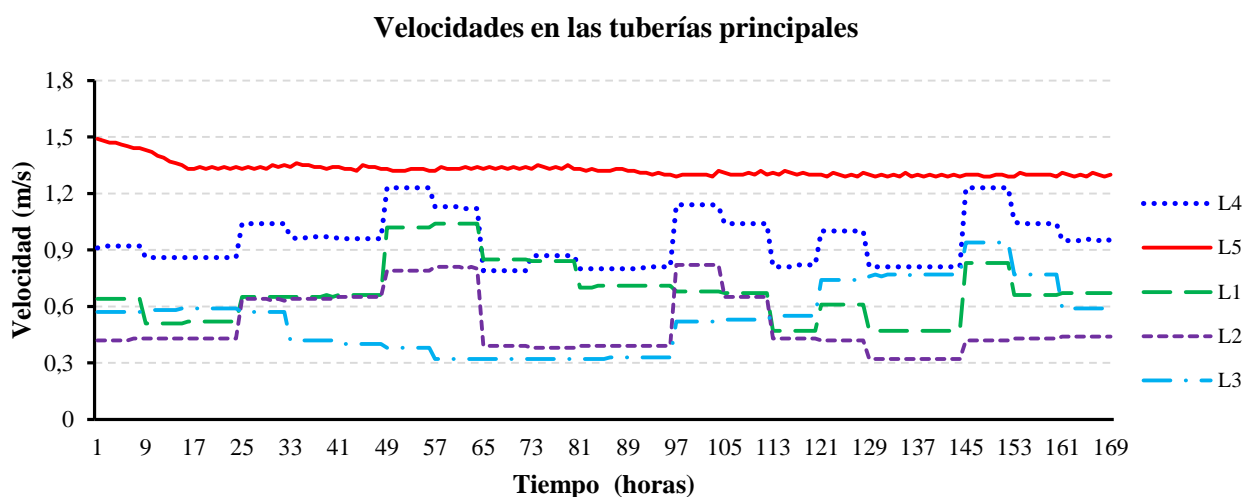


Figura 10. Comportamiento de las velocidades en las tuberías principales

Cronograma de operación de las EB

Los resultados anteriores demuestran que la propuesta de operación del sistema fuente del acueducto El Gato satisface los requerimientos de servicio de este SDA ya que se cumplen todas las restricciones del modelo matemático de optimización y la simulación de la operación refleja un buen comportamiento hidráulico de los parámetros velocidad, presiones, niveles en los depósitos y secuencias de encendido y apagado de los equipos de bombeo. En este sentido, se considera que se está en condiciones de confeccionar el cronograma de operación de las EB. Este cronograma abarca un periodo de tiempo de una semana con 168 horas e intervalo de tiempo de 8 horas. Esta herramienta ha sido elaborada para que los operadores de este SDA lo utilicen en la operación en tiempo real, dicho cronograma indica la secuencia de encendidos y apagados de los equipos de bombeo en cada intervalo de operación y mediante su empleo se logra minimizar el costo y consumo de energía eléctrica de la fuente.

En la tabla 3 se muestra el cronograma de operación propuesto, donde se definen los intervalos de bombeo de cada EB para todo el periodo de optimización. Puede verse en el cronograma de operación, que el modelo brinda una solución en la cual los equipos PMP -7 y PMP - 8 no se utilizan, lo que se debe a que el SDA no los necesita para satisfacer

completamente las demandas esperadas. Sin embargo, el equipo PMP – 10 se emplea durante toda la semana. Uno de los atractivos de este cronograma es que brinda la posibilidad de planificar acciones de mantenimiento en los periodos en que los equipos de bombeo se encuentren apagados (*OFF*) sin necesidad de interrumpir el servicio. El uso de este cronograma alcanza real aplicabilidad cuando se dispone de un sistema SCADA o sistemas automatizados que les permitan a los operadores de la fuente controlar la secuencia de bombeo sin necesidad de interactuar con el equipo de bombeo.

Tabla 3. Cronograma de operación de las estaciones de bombeo

Equipo de Bombeo	DÍA 1			DÍA 2			DÍA 3			DÍA 4			DÍA 5			DÍA 6			DÍA 7		
	12	8	4	12	8	4	12	8	4	12	8	4	12	8	4	12	8	4	12	8	4
	AM	AM	PM	AM	AM	PM	AM	AM	PM	AM	AM	PM	AM	AM	PM	AM	AM	PM	AM	AM	PM
PMP-1				OFF	OFF	OFF	OFF	OFF													
PMP-2							OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF			
PMP-3					OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF										
PMP-4	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF					OFF	OFF	OFF
PMP-5	OFF	OFF	OFF	OFF																OFF	OFF
PMP-6								OFF	OFF	OFF	OFF			OFF	OFF	OFF	OFF				
PMP-7	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
PMP-8	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
PMP-9	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF									OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
PMP-10																					
PMP-11	OFF	OFF						OFF	OFF	OFF	OFF					OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
PMP-12														OFF	OFF	OFF	OFF				
PMP-13		OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF				
PMP-14								OFF	OFF	OFF	OFF	OFF									
PMP-15	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF														OFF	OFF	OFF
PMP-16	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF									OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
PMP-17	OFF	OFF								OFF	OFF	OFF	OFF	OFF		OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

LEYENDA: Encendido **OFF:** Apagado

Costos y consumo de energía eléctrica de los equipos de bombeo

En la tabla 4 se muestran los valores totales del costo y consumo de energía eléctrica como consecuencia del funcionamiento de los equipos de bombeo. Las EB realizan una descarga sumergida en el TRP, condicionando una carga de bombeo variable debido a la fluctuación del nivel de agua, lo que implica que durante la operación los equipos de bombeo no funcionen en su punto de máxima eficiencia. Sin embargo, se considera que no existe inconveniente alguno para aceptar los resultados del modelo de optimización. En la tabla 5 se presentan, para cada equipo de bombeo, los valores promedios de eficiencia y su respectivo coeficiente de variación (Cv). Los valores mínimos y máximos del Cv son de 0,01 y 0,09 en todos los equipos, excepto en el equipo PMP-13 donde se obtiene un Cv de 0,14.

En la tabla 6 se muestran índices técnico-económico de la propuesta de operación de las EB del sistema fuente del acueducto El Gato. Durante el periodo de optimización se extraen de la fuente 1 216 367 m³ de agua. Para su extracción se consumen 50 094 kW-h de energía

diariamente con un costo promedio diario de \$12425,00. La EB PMP-10 presenta la mayor utilización y tiempo de bombeo, por este motivo realiza la mayor extracción de la fuente, consume la mayor cantidad de energía y genera los mayores costos de bombeo.

Tabla 4. Resumen del consumo y costos de energía de los equipos de bombeo

Equipo de Bombeo	Energía (kW-h)	Costo (\$)
PMP-1	29979,60	7480,60
PMP-2	21273,60	5267,10
PMP-3	25570,40	6349,00
PMP-4	8382,80	1984,40
PMP-5	25402,20	6449,10
PMP-6	25943,20	6271,90
PMP-7	0,00	0,00
PMP-8	0,00	0,00
PMP-9	11583,60	2835,40
PMP-10	48070,90	12198,80
PMP-11	17462,90	4160,10
PMP-12	39570,60	9886,10
PMP-13	6194,90	1476,90
PMP-14	36495,80	9233,00
PMP-16	15828,40	3864,30
PMP-17	14856,30	3529,50
PMP-15	24054,50	5993,90
Total	350669,70	86980,10

Tabla 5. Resumen del consumo y costos de energía de los equipos de bombeo

Equipo de Bombeo	Tiempo de bombeo (hrs)	Utilización (%)	Volumen bombeado (m ³)	Potencia promedio (kW)	Eficiencia		Energía diaria consumida (kW-h)	Costo diario de Energía (\$)	Costo por unidad de volumen (\$/m ³)
					promedio (%)	Cv			
PMP-1	128,00	76,20	81355,18	147,20	83,80	0,04	4282,70	1068,60	0,09
PMP-2	80,00	47,60	76880,05	220,60	83,00	0,04	3038,90	752,40	0,07
PMP-3	112,00	66,70	97251,67	190,90	83,60	0,01	3652,80	907,00	0,07
PMP-4	32,00	19,00	27592,25	195,70	74,70	0,06	1197,60	283,50	0,07
PMP-5	120,00	71,40	90952,75	179,60	84,90	0,09	3628,70	921,30	0,07
PMP-6	104,00	61,90	100086,38	200,60	80,40	0,06	3706,10	896,00	0,06
PMP-7	0,00	0,00	0,00	0,00	----	----	0,00	0,00	----
PMP-8	0,00	0,00	0,00	0,00	----	----	0,00	0,00	----
PMP-9	56,00	33,30	42280,82	175,60	84,90	0,09	1654,80	405,00	0,07
PMP-10	168,00	100,00	168968,52	233,00	81,40	0,06	6867,00	1742,60	0,07
PMP-11	72,00	42,90	63863,99	202,90	83,70	0,04	2494,60	594,30	0,07
PMP-12	128,00	76,20	137158,41	249,60	80,70	0,06	5652,80	1412,20	0,07
PMP-13	32,00	19,00	18439,40	158,10	81,60	0,14	884,90	211,00	0,08
PMP-14	128,00	76,20	127742,24	232,70	81,60	0,07	5213,50	1319,00	0,07
PMP-15	64,00	38,10	38409,63	143,80	82,60	0,04	2122,30	504,20	0,09
PMP-16	104,00	61,90	88945,53	194,30	84,00	0,05	3436,20	856,20	0,07
PMP-17	64,00	38,10	56440,01	205,80	83,20	0,08	2261,10	552,00	0,07

La propuesta de operación para las estaciones de bombeo del acueducto El Gato obtenida mediante la aplicación del modelo de optimización cumple con la GOC-2016-472-EX16 (2016) y asegura un adecuado funcionamiento de esta fuente porque cumple con las restricciones de presión, nivel, secuencias de encendido y apagado de las EB, velocidad en los nodos, depósitos y tuberías.

El cronograma de operación para las EB obtenido contribuye a disminuir los costos de operación del sistema fuente del acueducto El Gato y constituye una herramienta muy útil para la operación en tiempo real de dicha fuente. Mediante su empleo se logra una rotación de los equipos de bombeo que implica minimizar los costos de bombeo.

CONCLUSIONES

- En el presente artículo se logra desarrollar un estudio de optimización de la operación de estaciones de bombeo en el sistema fuente del acueducto El Gato al aplicar un modelo matemático de optimización que emplea una función objetivo mediante la cual se minimiza el costo de energía eléctrica de dicha fuente para un periodo de operación de 168 horas. En este sentido se considera que la creación del modelo es de gran utilidad para la gestión de la empresa Aguas de la Habana pues a partir del mismo se pueden elaborar los planes de operación para esta fuente sobre bases científicas.
- El cronograma de bombeo propuesto permite realizar una rotación adecuada de las EB y es una herramienta muy útil para la operación en tiempo real de esta fuente ya que indica los intervalos de operación con las secuencias de encendidos y apagados de las EB. Los resultados obtenidos demuestran que la propuesta de operación de la fuente cumple con las restricciones de presión en los nodos, niveles en los depósitos, arranques de las bombas y velocidades en las tuberías que garantizan un adecuado funcionamiento del SDA. Esto se evidencia además en el comportamiento de las presiones en los puntos de conexión (nodos) en los poblados Rotolactor, Chivería, El Triángulo y Zaragoza.
- A partir de los resultados obtenidos del modelo de optimización se determina que el costo de bombeo de esta fuente para el periodo de operación establecido asciende a \$ 86980,10 lo que implica un consumo de energía de 350669,70 kW-h.

RECOMENDACIONES

- La primera recomendación de este trabajo de investigación consiste en proponerle la realización de un Consejo Técnico organizado por el INRH para debatir los resultados del estudio de operación del sistema fuente del acueducto El Gato con vistas a incluir el cronograma de bombeo optimizado dentro del proceso de automatización de esta fuente.
- Se recomienda hacer un estudio sobre el fenómeno del golpe de ariete que evidencie las posibles consecuencias que puede traer al sistema la propuesta de operación de esta fuente ya que el continuo arranque y parada de los equipos de bombeo puede provocar este fenómeno.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer por el apoyo a las siguientes instituciones: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Empresa de Acueductos y Alcantarillados del Este, Dirección de operaciones del Acueducto El Gato y empresa Aguas de La Habana.

REFERENCIAS

- Abiodun F.T and Ismail F.S** (2013). "Pump scheduling optimization model for water supply system using AWGA". Symposium on Computers and Informatics. Vol. 9, No 13, pág. 4799-4890. ISSN 13797846, IEEE, Langkawi, Malasia.
- Bosch P. y Recio I. A** (2014). "Calibración y simulación del sistema fuente para abasto de agua del acueducto El Gato". Ingeniería Hidráulica y Ambiental Vol. 35, No.1, pág. 101-115, ISSN 1815-591X, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana.
- Giacomello C., Kapelan Z. and Nicolini M.** (2012). "Fast hybrid optimization method for effective pump scheduling". Journal of Water Resources Planning and Management Vol. 3, No.1, pág. 1-34, ISSN 07339496, ASCE, USA.
- GOC-2016-472-EX16** (2016). "Determinación de la demanda de agua potable en poblaciones con sistemas de acueductos no rehabilitados". Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Gaceta Oficial de la República de Cuba, Cuba.
- Hajji M., Fares A.; Glover F. and Driss O.** (2010). "Water pump scheduling system using scatter search, tabu search and neural networks—the case of Bouregreg water system in Morocco". World Environmental and Water Resources Congress, Vol. 371, No. 92, pág. 822-832. ISBN 9780 7844 11148, ASCE, Providence, Rhode Island, USA.
- Lansey K.E. and Awumah K.** (1994). "Optimal pump operations considering pump switches". Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 120, No.1, pág. 17-35, ISSN: 0733 9496, ASCE, USA.
- McCormick G. and Powell R. S.** (2003). "Optimal pump scheduling in water supply systems with maximum demand charges." Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 129, No.5, Pág. 372-379, ISSN: 0733 9496, ASCE, USA.
- Ormsbee L. E., Walski T. M., Chase D. V. and Sharp W.W.** (1989). "Methodology for improving pump operation efficiency." Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 115, No. 2, pág. 148-164, ISSN 07339496, ASCE, USA.
- Pasha M.F.K. and Lansey K.** (2009). "Optimal pump scheduling by linear programming" World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers. pág. 395-404, ISBN: 9780 7844 10363. ASCE, Kansas City, Missouri, USA.
- Sakarya A.B.A. and Mays L.W.** (2000). "Optimal operation of water distribution pumps considering water quality." Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 126, No. 4, pág. 210-220, ISSN: 0733 9496, ASCE, USA.