

XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

“DISEÑO ÓPTIMO DE CÁMARAS DE AIRE PARA MITIGAR LOS EFECTOS DE LOS TRANSITORIOS GENERADOS POR PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN ACUEDUCTOS”

Martín Rubén Jiménez Magaña (1), Sonia Paulina Espinosa Peralta (2), Katya Rodríguez Vázquez (3), Mario Sosa Rodríguez (4)

(1) (2) (4) Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM, Av. Rancho Seco s/n, Col. Impulsora, Nezahualcóyotl, Estado de México. C.P. 57130, Tel. +52 55 5623 1090 Ext. 39221, mrjm.unam.mx@hotmail.com

(3) Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., CP 04510, Tel. +52 55 5622 3623, katya.rodriguez@iimas.unam.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para determinar las dimensiones óptimas de una cámara de aire cuyo objetivo es disminuir los efectos del transitorio producido por el paro repentino de los equipos de bombeo. La optimización se lleva a cabo mediante el empleo de algoritmos genéticos (AG), una herramienta del cómputo evolutivo ampliamente utilizada en ingeniería, en conjunto con TRANS, un software de modelación numérica de fenómenos transitorios y estructuras hidráulicas tales como cámaras de aire, pozos de oscilación, tanques unidireccionales y válvulas de admisión y expulsión de aire, desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, dicho software utiliza el método de las características para determinar las envolventes de presión máximas y mínimas, así como otras variables propias del fenómeno transitorio en cuestión. Aquí se presenta la implementación del AG para determinar las dimensiones más adecuadas de la cámara de aire que minimicen la carga máxima presentada durante el transitorio y maximicen la carga mínima, todo esto con el menor costo posible de inversión en la estructura hidráulica.

Palabras claves: Cruce de tuberías, Coeficiente de pérdida local, Redes de tuberías.

ABSTRACT

This paper describes a methodology to set optimal dimension of air chambers in order to decrease effects of hydraulic transients produced by suddenly pumping stop. Optimal solution is sought using genetic algorithm, this optimization technique is inspired by natural evolution and adaptation and has been used widely in engineering, joined with TRANS, a software of hydraulic transient simulator based on the method of characteristics. In this exploratory study the goal is to minimize the maximum head, to maximize the minimum head and minimize the air chamber volume.

Key words: Genetic Algorithms, Air chamber, transient.

SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

Profesor de Carrera en la Facultad de Estudios Superiores Aragón. Maestro en Ingeniería por la UNAM. El presente artículo es parte del trabajo de Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil de la alumna Paulina Espinosa.

INTRODUCCIÓN

De los transitorios que se pueden presentar en una conducción por bombeo, el más desfavorable es el caso del paro repentino de los equipos de bombeo cuando se presenta un corte en el suministro de energía eléctrica.

Para garantizar la seguridad de la línea de conducción, resulta necesario analizar los transitorios que pueden presentarse y determinar si existe algún peligro derivado de sus efectos, y en consecuencia tomar medidas para proteger la línea de conducción, si así resulta necesario.

Algunas de las medidas pueden ser las siguientes: usar tubería y accesorios que soporten sin problema las sobre presiones y depresiones que pudieran presentarse durante el fenómeno transitorio; forzar a que los transitorios sean menos bruscos, por ejemplo haciendo el paro de los equipos o el cierre de válvulas más lento; instalar equipos variadores de velocidad para propiciar una rampa en el arranque de los equipos de bombeo; realizar maniobras de apertura muy lentas; diseñar estructuras especiales que reduzcan los efectos negativos de los transitorios.

En la mayoría de los casos resulta más conveniente, desde el punto de vista técnico y económico el diseño, construcción y operación de estructuras mitigadoras del fenómeno. Algunas de ellas son por ejemplo: torres de oscilación, tanques unidireccionales y cámaras de aire.

Generalmente la protección contra el golpe de ariete puede lograrse de diferentes formas y con diferentes estructuras o combinación de ellas. El objetivo es seleccionar la estructura más conveniente, el criterio determinante más frecuente es el económico, se busca tener la mejor protección posible con el mínimo de inversión inicial, mantenimiento y gastos complementarios como energía eléctrica.

Uno de los dispositivos más empleados para el control de transitorios, particularmente para proteger estaciones de bombeo, producidos por fallo en el suministro eléctrico, es la cámara de aire. Figura 1. Es un depósito cerrado, conectado a la tubería teniendo en la parte superior un volumen de aire comprimido. Durante la operación normal, en régimen permanente, el aire está comprimido a una presión igual a la existente en la línea de conducción, no habiendo flujo entre la cámara y la tubería.

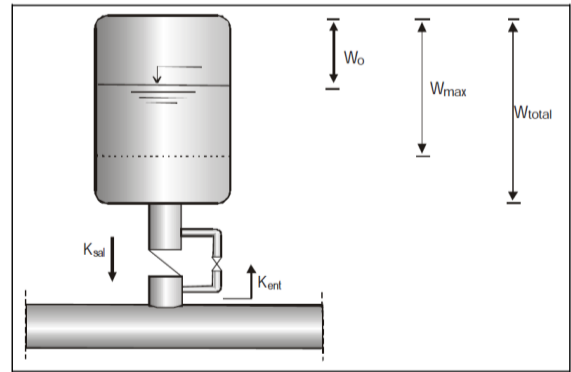


Figura 1. Cámara de aire

Cuando se presenta el fallo en el suministro eléctrico la presión dentro de la tubería comienza a bajar por lo tanto se presenta un flujo de la cámara hacia la tubería, tratando así, de suministrar el flujo que ha dejado de impulsar la bomba, reduciendo las depresiones generadas por el transitorio. El volumen de aire dentro de la cámara se expande y su presión disminuye generando ahora un flujo hacia la cámara. El gasto que fluye hacia la cámara disminuye las sobrepresiones en la tubería, el aire en la cámara disminuye su volumen y la presión aumenta. El flujo en la tubería se reduce de una manera controlada y más lenta de lo que se presentaría si no existiera la cámara de aire.

La localización ideal de la cámara es lo más cerca posible de los equipos de bombeo, con el objeto de que lo más rápido posible se proporcione el flujo que la bomba ha dejado de dar. Se busca siempre que la conexión entre la cámara y la tubería oponga poca resistencia al flujo de agua cámara-tubería, por el contrario, se pretende que el flujo tubería-cámara tenga ciertas pérdidas para tener un mejor amortiguamiento del fenómeno transitorio.

El diseño de una cámara de aire contempla determinar las siguientes variables: 1) Volumen de aire, W_0 , que hay que mantener constante durante la operación a flujo permanente, 2) Volumen máximo de aire, $W_{m\acute{a}x}$, que se alcanza durante el transitorio al final de la fase de vaciado, 3) Volumen total de la cámara, W_t , 4) Coeficientes de pérdidas de carga K_{out} y K_{in} , para el flujo cámara-tubería-cámara, respectivamente. Todo lo anterior con el objeto de que no existan depresiones en la tubería, reducir las presiones máximas por debajo de las presiones de trabajo de la tubería y que el volumen de la cámara sea el mínimo posible, así la inversión en su construcción, será la mínima también.

El diseño de una cámara de aire se vuelve entonces un problema de optimización, en el cual se busca minimizar el volumen de la cámara, determinar el

volumen óptimo inicial de aire en la misma y optimizar el coeficiente de pérdidas K_{in} .

Existen varios métodos para el predimensionamiento de cámaras de aire, algunos de ellos basados en nomogramas y gráficos. En el caso particular de las cámaras de aire se cuenta con los ábacos de Parmakian (1963), Graze y Horlacher (1986 y 1989) y los de Russ E. (Chaudhry(1979)), Mancebo (1987) con base a la solución de ecuaciones diferenciales establecidas para sistemas hidráulicos con fricción, obtuvo unas cartas mediante las cuales se puede predimensionar una torre de oscilación así como también una cámara de aire.

Zarco (2000), presenta un método simplificado para el predimensionamiento de cámaras de aire, Carmona et al (2002) hace uso de un modelo paramétrico para calcular las dimensiones de cámaras de aire. Ramalingam (2007) presenta unas ayudas de diseño para cámaras de aire para proteger redes de tuberías de los transitorios hidráulicos, basado en técnicas de parametrización.

En este trabajo se presentan los avances de una metodología basada en el empleo de los algoritmos genéticos para minimizar el efecto del transitorio generado por el paro de equipos de bombeo, en esta primera parte la metodología se centra en determinar el volumen mínimo de la cámara de aire, así como el volumen mínimo de aire al inicio del transitorio para mitigar los efectos del mismo; minimizando la carga máxima y maximizando la carga mínima presentadas durante el fenómeno transitorio.

El Algoritmo Genético es una técnica de optimización (Holland,1975) basada en la supervivencia del más apto, técnica ampliamente utilizada hoy día en la optimización en diversos problemas de ingeniería.

Se hace uso de un programa de cómputo (TRANS), desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, para la modelación del transitorio, el programa hace uso del método de las características para resolver las ecuaciones de continuidad y movimiento.

METODOLOGÍA

La metodología presentada, en esta primera etapa, se enfoca en la determinación del volumen mínimo de la cámara de aire, para que la inversión en ella, sea mínima también. En una segunda parte, se abordará

la optimización de las pérdidas por entrada y salida así como la longitud óptima de conexión (diámetro y longitud) entre la cámara y la línea de conducción.

Se utilizó un algoritmo genético de triple cromosoma, el primer cromosoma representa el volumen total de la cámara de aire, el segundo, el volumen inicial de aire, como un porcentaje del volumen total, y el tercer cromosoma determina la altura de la cámara. Una vez simulado cada individuo con el programa TRANS, se determina el factor de aptitud de cada individuo con la ecuación 1.

$$fa = \frac{1}{Cu + \Delta pm_{\max} * Kp + \Delta pm_{\min} * Kp} \quad (1)$$

Donde Cu representa el costo, en pesos mexicanos, de construir e instalar una cámara de aire de un cierto volumen, refiriéndose al total aire-agua. Δpm_{\max} y Δpm_{\min} , respectivamente, la variación máxima del promedio de la envolvente de sobre presiones y depresiones con respecto a la piezométrica de operación normal. Y Kp representa un factor de penalización para aquellas envolventes, ya sean máximas o mínimas que “están más lejos” de parecerse a la piezométrica de operación normal.

El programa TRANS requiere de los siguientes datos para poder modelar la cámara de aire:

- 1) Coeficiente de pérdida de una válvula de salida de la cámara (s^2/m^5)
- 2) Volumen de aire inicial en la cámara (m^3)
- 3) Área de la cámara (m^2)
- 4) Cota del agua en la cámara (msnm)
- 5) Coeficiente de pérdida de una válvula de entrada a la cámara (s^2/m^5)
- 6) Longitud de la tubería de conexión cámara-conducción (m)
- 7) Diámetro de la tubería de conexión cámara-conducción (m)
- 8) Número de tramo siguiente (un número entero)

El procedimiento de cálculo es el que se describe a continuación:

- 1) Se debe contar con los datos siguientes:
 - a. Perfil topográfico de la línea de conducción, diámetro, material, espesor, y presión de trabajo de la tubería
 - b. Niveles de agua en la toma y descarga de la bomba
 - c. Momento de inercia del conjunto motor-bomba

- d. Gasto de diseño y punto de operación a flujo permanente
- 2) La conducción se analiza para flujo permanente con el objeto de definir las condiciones iniciales para el análisis del transitorio y poder determinar la situación más desfavorable
 - 3) Se hace un primer análisis del transitorio sin medios de control.
 - 4) Damos por hecho que en la metodología establecida se requiere de una cámara de aire como estructura mitigadora de los efectos del transitorio generado por paro de equipo de bombeo, aunque se sabe que cada línea de conducción merece un estudio particular.
 - 5) Se genera la población inicial con el cromosoma triple. Cada uno de los individuos generados, que representa una opción diferente de cámara de aire, se simula en TRANS, obteniéndose de él, envolventes de presiones máximas y mínimas, variación de nivel en la cámara de aire, flujo de entrada y salida, evolución de la velocidad de giro de las bombas una vez que se ha dado el corte en el suministro eléctrico y la evolución en el tiempo del flujo descargado por las bombas.
 - 6) Con base en los resultados obtenidos se determina un factor de aptitud con la ecuación 1.
 - 7) Se utiliza la técnica de la ruleta para realizar la selección de los individuos que serán cruzados y pasarán a la siguiente generación.
 - 8) Se realiza la cruce en un solo punto con una probabilidad de 0.7
 - 9) El operador de mutación se aplica con una probabilidad de 0.05
 - 10) Se repite el ciclo por un número de generaciones especificado por el usuario.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el propósito de mostrar la bondad de la metodología, se aplicó a una línea de conducción cuya estación de bombeo cuenta con tres bombas de 15 HP cada una, se debe suministrar un caudal de 39 l/s existiendo un desnivel topográfico de 40 m. En los primeros 30 metros la tubería es de acero con un diámetro de 6 pulgadas, los siguientes 570 metros son de tubería de polietileno de alta densidad con el mismo diámetro de 6 pulgadas. En la figura 2 se muestra el perfil de la línea de conducción.

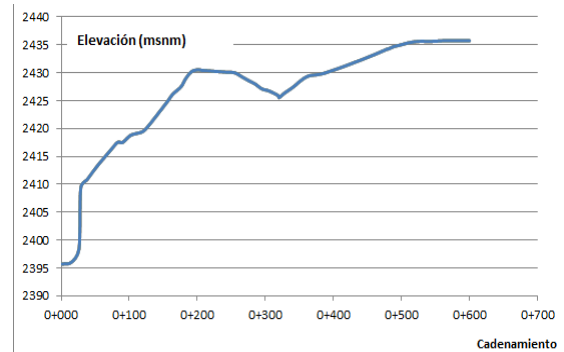


Figura 2. Perfil topográfico de la línea de conducción.

En la figura número 3 se presenta el punto de operación para 1, 2, 3 y 4 equipos de bombeo, así como la curva del sistema.

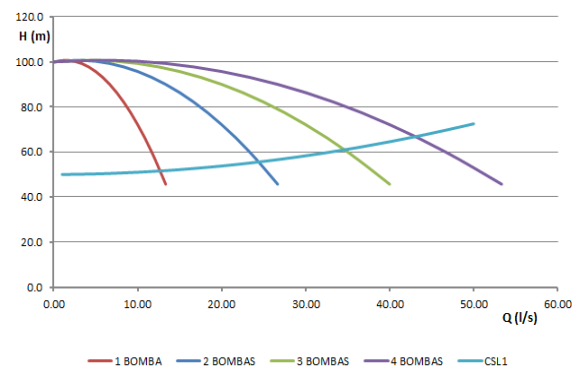


Figura 3. Puntos de operación y curva del sistema.

Se realizó una primera simulación con TRANS para determinar el funcionamiento sin elementos de protección, mostrándose los resultados en la figura 4.

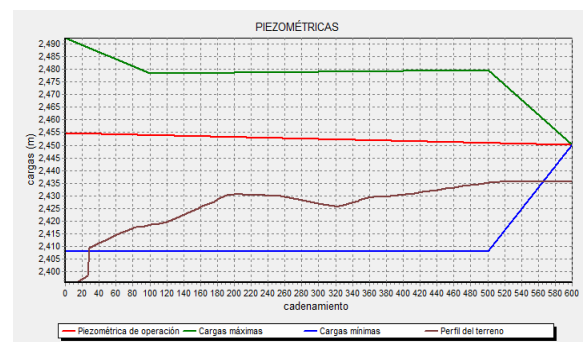


Figura 4. Envolventes de presión, sin elementos de protección.

La línea verde representa la envolvente de presiones máximas, la línea azul, la envolvente de presiones mínimas, la línea roja es la piezométrica de operación a flujo establecido y la línea café representa el perfil topográfico de la línea de

conducción. Desde el cadenamiento 0+040 en adelante se puede presentar colapso de tubería e incluso separación de columna por lo tanto se optó por colocar una cámara de aire lo más cerca posible de la estación de bombeo.

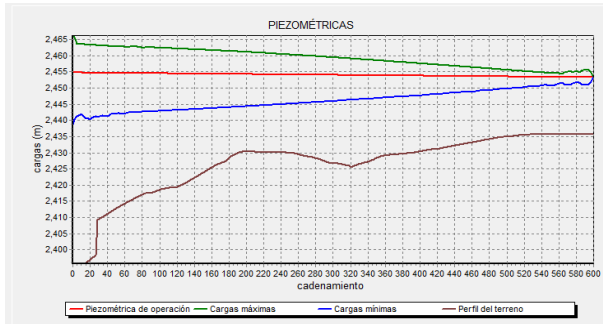


Figura 5. Envolventes de presión con una cámara de aire

La cámara de aire resultante de haber optimizado utilizando el algoritmo genético en conjunto con el programa TRANS debe tener un volumen de 1.5 m^3 , con un volumen inicial de aire del 33% de ese volumen, esto es, 0.5 m^3 , con una altura de 2m y un diámetro de 97 cm. Con ella se mitiga claramente el efecto del transitorio generado por el paro de los equipos de bombeo. Ya no se tiene el riesgo de colapso por depresión ni la separación de columna además de que la envolvente de presiones máximas disminuye considerablemente si se compara con la envolvente sin elementos de protección contra el transitorio generado por el paro de equipos de bombeo.

CONCLUSIONES

La metodología aquí presentada puede ser una herramienta útil en la toma de decisiones pues no se requiere tener experiencia previa, en cuanto a las dimensiones de la cámara de aire, sin embargo el algoritmo lleva a buenos resultados minimizando los efectos del golpe de ariete y con la menor inversión posible en la construcción de la estructura hidráulica. Se continúa trabajando en el desarrollo del programa para que éste minimice no sólo el volumen de la cámara de aire sino también, optimice los coeficientes de pérdida por entrada y salida que hagan más eficiente el funcionamiento de la cámara. La metodología puede ser aplicable al diseño de otras estructuras de protección como son la torre de oscilación y el tanque unidireccional, también se está trabajando en ello.

El hecho de contar con una metodología nos permite ahorrar, no sólo en el aspecto financiero, sino tener

resultados, ingenierilmente realizables, en periodos relativamente cortos de tiempo pues el algoritmo genético permite analizar cientos de opciones en periodos de tiempo que de otra forma serían impensables.

BIBLIOGRAFÍA

- Parmakian (1963). "Waterhammer analysis". Editorial Dover INC, New York.
- Chaudhry, A. (1979). "Applied hydraulic transients". Van Nostrand Reinhold, New York.
- Mancebo (1987). "Teoría del golpe de ariete y sus aplicaciones en ingeniería hidráulica". Editorial Limusa, México.
- Zarco (2000). "Método simplificado para el predimensionamiento de cámaras de aire". Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Carmona (2002). "Modelo paramétrico para calcular dimensiones de tanques de oscilación y de cámaras de aire en sistemas a bombeo". XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica: La Habana, Cuba.
- Ramalingan (2007). "Design aids for air vessels for transient protection of large pipe networks-a framework based on parameterization of knowledge- based derived from optimized network models". University of Kentucky, Doctoral Dissertation.