

REFERENCIAS

- Babarutsi, S., J. Ganoulis, y V.H. Chu. 1989. Experimental investigation of shallow recirculating flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(7), 906-924.
- Babarutsi, S., M. Nassiri, y V.H. Chu. 1996. Computation of shallow recirculating flow dominated by friction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(7), 367-372.
- Bousmar D. y Y. Zech. 1999. Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(7), 696-706.
- Francis, J.R.D., A.B. Pattanak, y S.H. Wearne. 1968. Observations of flow patterns around some simplified groyne structures in channels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, London, England, 829-846.
- Knight D., D. Demetriou, y E. Hamed. 1984. Boundary shear in smooth rectangular channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(4), 405-422.
- Mayerle, R., F.M. Toro, y S.S.Y. Wang. 1995. Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes. *Journal of Hydraulic Research*, 33(2), 243-256.
- Molinas, A., K. Kheireldin, W.U. Baosheng. 1998. Shear stress around vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(8), 822-830.
- Molinas, A., y Y. Hafez. 2000. Finite element surface model for flow around vertical wall abutments. *Journal of Fluids and Structures*, 14(5), 711-733.
- Ouillon, S., y D. Dartus. 1997. Three-dimensional computation of flow around a groyne. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(11), 962-970.
- Sturm, T.W., y N.S. Janjua. 1994. Clear-water scour around abutments in floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(8), 956-972.
- Tingsanchali, T., y S. Maheswaran. 1990. 2-D depth-averaged flow computation near groyne. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116 (1), 71-86.



Fig. 6. Campo de velocidades en torno al espigón de 1.43 m de ancho.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTOS DE BOMBEO EN SISTEMAS DE SUMINISTRO DE AGUA MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO MULTIOBJETIVO COMBINADO

ALDO SOTELO¹

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Alto costo que implica la operación de estaciones de bombeo en sistemas de agua, resulta más que interesante lograr la reducción de dichos costos mediante una herramienta informática innovadora. Esta herramienta buscará lograr los ahorros a través de la optimización de la programación de bombeo. Varios enfoques ya han sido presentados, demostrándose que pueden lograrse ahorros. El presente trabajo utiliza un modelo hidráulico simplificado y propone reemplazar la programación óptima de bombeo mediante una técnica de Computación Evolutiva, específicamente: *Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo*. Para ese efecto, fue utilizado el método: *el Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)*, combinado con un heurístico de factibilidad basado en la hidráulica de este problema. Este método optimizará simultáneamente cuatro objetivos: el costo de la energía eléctrica, el costo de mantenimiento de las bombas, la potencia máxima alcanzada (con el costo del sistema eléctrico y la potencia reservada) y el desnivel en el inicio y el final del periodo de optimización. Resultados experimentales muestran las ventajas de usar el SPEA sobre los métodos hoy utilizados por los especialistas en la distribución de agua.

¹ Centro Nacional de Computación, Universidad Nacional de Asunción, San Pedro de Asunción, Paraguay.
² Instituto de Investigación, Centro Nacional de Computación, Universidad Nacional de Asunción, San Pedro de Asunción, Paraguay.

Babarasi, S., M. Nassiri, y V.H. Chu. 1996. Computation of shallow recirculation by friction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(7), 367-372.

Bousmar D. y Y. Zech. 1999. Momentum transfer for practical flow channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(7), 696-706.

Francis, J.R.D., A.B. Papanak, y S.H. Weame. 1968. Observations of some simplified groin structures in channels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, London, England, 829-846.

Knight D., D. Demetrou, y E. Hamed. 1984. Boundary shear in smooth turbulent flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(4), 405-422.

Mayerle, R., F.M. Toro, y S.S.Y. Wang. 1995. Verification of a three-dimensional model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(3), 243-256.

Molinas, A., K. Kheireldin, W.U. Baosheng. 1998. Shear stress around vanes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(1), 1-10.

Molinas, A., y Y. Hafez. 2000. Finite element surface model for flow around abutments. *Journal of Fluids and Structures*, 14(5), 711-733.

Ouillon, S., y D. Dartus. 1997. Three-dimensional computation of flow around a pier. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(11), 962-970.

Sturm, T.W., y S.S. Janina. 1994. Clear-water scour around abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(8), 956-972.

Tingsanchai, T., y S. Mubewaran. 1990. 2-D depth-averaged flow computation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(1), 71-86.

XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTOS DE BOMBEO EN SISTEMAS DE SUMINISTRO DE AGUA MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO MULTI OBJETIVO COMBINADO

ALDO SOTELO¹
BENJAMÍN BARÁN²

RESUMEN

Debido a los altos costos que implica la operación de estaciones de bombeo en sistemas de suministro de agua, resulta más que interesante lograr la reducción de dichos costos mediante una herramienta informática innovadora. Esta herramienta buscará lograr los ahorros mencionados a través de la optimización de la programación de bombeo. Varios enfoques sobre este tema ya han sido presentados, demostrándose que pueden lograrse ahorros considerables. El presente trabajo utiliza un modelo hidráulico simplificado y propone resolver el problema de la programación óptima de bombeo mediante una técnica de Computación Evolutiva, específicamente: *Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo*. Para ese efecto, fue utilizado un reconocido método: *el Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)*, combinado con un algoritmo heurístico de factibilización basado en la hidráulica de este problema. Este método apunta a minimizar simultáneamente cuatro objetivos: el costo de la energía eléctrica consumida, el costo de mantenimiento de las bombas, la potencia máxima alcanzada (relacionada con el costo del sistema eléctrico y la potencia reservada) y el desnivel en el reservorio entre el inicio y el final del período de optimización. Resultados experimentales demuestran las ventajas de usar el SPEA sobre los métodos hoy utilizados por los especialistas de los centros de distribución de agua.

¹ Investigador. Centro Nacional de Computación. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo. Paraguay.
² Coordinador de Investigación. Centro Nacional de Computación. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo. Paraguay.

1. INTRODUCCIÓN

El creciente consumo de agua en las ciudades hace que los sistemas de suministro se tornen cada vez más complejos. Dependiendo de las variables a considerar y de los objetivos a tomar en cuenta, el trabajo de optimizar la programación de bombeo se vuelve también una tarea complicada y de vital importancia, por lo que diversos autores han abordado el tema, presentando distintos enfoques. En principio, programaciones de tipo lineal, no lineal, lineal mixta, entera, dinámica, etc., fueron aplicadas para optimizar un único objetivo: el costo de la energía eléctrica del bombeo (Ormsbee y Lansey, 1994). Por otra parte, Lansey y Awumah (1994) introdujeron el concepto del número de encendidos de las bombas como medida sustituta para evaluar el costo de mantenimiento de las mismas, siendo éste el segundo objetivo considerado en la bibliografía recopilada. Recientemente, técnicas de Computación Evolutiva fueron introducidas al estudio de este problema. En efecto, Mackle et al. (1995) realizaron una optimización de simple objetivo (costo de energía eléctrica) aplicando Algoritmos Genéticos (AG), mientras que Savic et al. (1997) propusieron la hibridación de los AG con un método de búsqueda local para la optimización de dos objetivos (costo de energía eléctrica y costo de mantenimiento de bombas). Además, Schaetzen (1998) realizó un enfoque utilizando AG y estableciendo penalidades a la violación de las restricciones del problema presentado como una optimización de simple objetivo.

Debido al gran avance obtenido recientemente en el campo de la optimización multiobjetivo (Zitzler et al., 2001) y a la probada utilidad de la misma (Savic et al., 1997; Sotelo et al., 2001), el presente trabajo propone la resolución de la programación óptima de bombeo como un problema de optimización multiobjetivo que por primera vez trata con cuatro objetivos simultáneos.

Para dicho efecto, este trabajo se encuentra organizado de la siguiente forma: la sección 2 presenta una descripción del problema de minimización con cuatro objetivos. La sección 3 presenta el método de resolución computacional implementado: el *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA), un reconocido Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo (MOEA: *MultiObjective Evolutionary Algorithm*). Además, debido a las características hidráulicas del problema, se introduce la combinación de este método con un algoritmo heurístico de factibilización que corrige soluciones no factibles desde el punto de vista hidráulico. La sección 4 analiza los resultados experimentales considerando un problema paradigma para una estación con 5 bombas. Finalmente, la sección 5 resume las conclusiones y las recomendaciones para trabajos futuros.

2. EL PROBLEMA DE LA PROGRAMACIÓN ÓPTIMA DE BOMBEO

2.1. Conceptos básicos

Como la demanda de agua de una población es variable en el tiempo, la cantidad de agua a suministrar para satisfacer dicha demanda deberá ser también variable en el tiempo. En general, una estación de bombeo cuenta con un conjunto de bombas de diferentes capacidades que bombean agua a uno o más reservorios. Estas bombas trabajan combinadas para bombear la cantidad de agua necesaria, atendiendo a las restricciones del problema (por ejemplo, capacidad máxima del reservorio). Luego, dependiendo del instante considerado, algunas bombas estarán encendidas y otras apagadas. Así, programar el bombeo en una estación consiste en establecer la combinación de bombas a utilizarse en cada intervalo de tiempo del horizonte de planificación. Por lo tanto, una programación de bombeo es el conjunto de todas las combinaciones de bombas

a utilizarse durante cada intervalo del horizonte de planificación (Mackle et al., 1995). Una programación óptima de bombeo puede definirse entonces, como una programación que cumple con las restricciones del problema, pero que además optimiza los objetivos establecidos.

2.2. Modelo hidráulico

Un modelo hidráulico simplificado fue escogido. El mismo consiste en: una fuente inagotable de agua potable; una estación de bombeo constituida por n bombas que impulsan el agua desde la fuente hasta el reservorio; un reservorio de almacenamiento de agua y una tubería aductora que conduce el agua desde la estación de bombeo hasta el reservorio. La hidráulica existente a partir del reservorio no es considerada. El único dato necesario de esta parte del sistema es la demanda de consumo, la cual es abastecida desde el reservorio. Este modelo se presenta en la Figura 1.

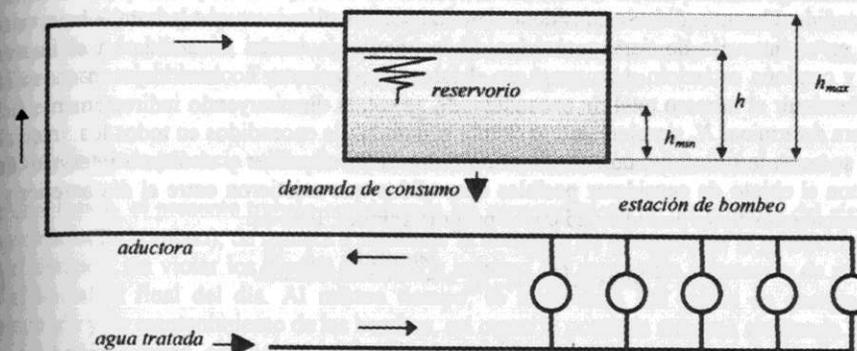


Figura 1. Modelo hidráulico adoptado.

2.3. Período de optimización e intervalos de tiempo

El presente trabajo considera un periodo de optimización de un día, tomando como dato el patrón de la demanda de consumo histórico para un día promedio. El periodo de optimización fue dividido en 24 intervalos de 1 hora. Se asume que las bombas pueden ser apagadas o encendidas solo al inicio de cada intervalo. Intervalos de menor duración pueden ser considerados cuando requeridos, a pesar de que resulta usual la utilización de estos intervalos de 1 hora.

2.4. Objetivos de la programación

Costo de la energía eléctrica consumida (f_1)

El costo de la energía eléctrica consumida se refiere al gasto que significa el consumo de energía eléctrica por parte de las bombas de la estación de bombeo.

Un factor importante en el costo de la energía eléctrica es la estructura de sus tarifas. En muchos sistemas de suministro de electricidad, el costo de la energía eléctrica no es el mismo en todas las horas del día, dado que existen horas de mayor consumo y otras de menor consumo; sin embargo, las instalaciones deben dimensionarse para el consumo máximo. Esto es conocido como tarifa diferenciada. Este trabajo considerará una tarifa más cara para las horas pico (T_p), de 17 a 22 hs. y otra más barata (T_b), para el resto del día.

Cabe destacar que la influencia de tal diferencia tarifaria dentro de la programación de bombeo es notable, ya que los costos en energía eléctrica se reducen si la programación de bombeo óptima establece la menor cantidad posible de bombas encendidas durante el horario de tarifa cara, haciendo uso de la capacidad útil del reservorio. También cabe mencionar que pueden usarse tres

o más tarifas según sea el caso. Matemáticamente, el costo de energía eléctrica consumida C_e está dado por:

$$C_e = T_r \sum_{i=1}^{17} c(b_i) + T_r \sum_{i=18}^{22} c(b_i) + T_r \sum_{i=23}^{24} c(b_i) \quad (1)$$

donde:

- i intervalo de tiempo del período de optimización, utilizado como unidad
- b_i combinación de bombas en el intervalo i ($b_i \in B^n$, $B \in \{0,1\}$, detalles en sec. 2.7)
- n número de bombas
- $c(b_i)$ electricidad consumida en el intervalo i , con la combinación b_i

Costo de mantenimiento de las bombas (f_2)

Este trabajo utiliza el concepto del número de encendidos de las bombas, introducido en Lansey y Awumah (1994), como forma indirecta de medir el costo de mantenimiento. Es decir, el desgaste de una bomba puede ser medido indirectamente a través del número de veces que la misma ha sido encendida. Un encendido se considera como tal sólo en el caso en que la bomba haya estado apagada en el intervalo de tiempo anterior. Si la bomba ya estaba encendida en el intervalo anterior y continúa estándolo o se apaga en el intervalo siguiente, no constituye un encendido. Así, al disminuir el número total de encendidos N_e se estará disminuyendo indirectamente dicho costo. Para determinar N_e simplemente se cuenta el número de encendidos en todos los intervalos y a esto se suma la mitad del número de encendidos entre el primer y el último intervalo. Esto último, con el objeto de considerar posibles encendidos que existieron entre el día anterior y el actual, suponiendo cierta periodicidad en las programaciones. Esto es:

$$N_e = \sum_{i=1}^{24} \max\{0; (b_i - b_{i-1})\} + \frac{\max\{0; (b_1 - b_{24})\}}{2} \quad (2)$$

Diferencia de nivel en el reservorio entre el inicio y el final del período de optimización (f_3)

Existen tres niveles importantes a ser considerados dentro del reservorio:

- a. un nivel mínimo, que garantice suficiente presión en las tuberías y deba mantenerse por seguridad en caso de imprevistos que demanden gran cantidad de agua en poco tiempo,
- b. un nivel máximo, que evite pérdidas en las tuberías y sea compatible con la capacidad del reservorio, y
- c. un nivel inicial, que debe tratar de ser recuperado nuevamente al final del período de optimización.

Los niveles máximo y mínimo de agua en el reservorio serán considerados como restricciones propiamente dichas, de manera que el nivel en el reservorio al final de cada intervalo h_i , deberá ser menor o igual que el nivel máximo h_{max} y mayor o igual que el nivel mínimo h_{min} . Sin embargo, la diferencia de nivel en el reservorio entre el inicio y el final del período de optimización Δh , será planteada como un objetivo adicional a minimizar. Esto se expresa como:

$$\Delta h = \sum_{i=1}^{24} [q(b_i) - d_i] / S \quad (3)$$

con:

$$h_i = h_{i-1} + [q(b_i) - d_i] / S \quad (4)$$

sujeto a:

$$\begin{aligned} h_i &\leq h_{max} \\ h_i &\geq h_{min} \end{aligned}$$

donde:

- S superficie del reservorio
- $q(b_i)$ caudal bombeado en el intervalo i con la combinación de bombas b_i
- d_i demanda de consumo en el intervalo i

Un modelo hidráulico como el de la Figura 1 presenta otras restricciones como:

- cantidad de agua suministrada por la fuente: se supondrá en este trabajo que la fuente proporciona toda el agua que sea necesaria en cualquier momento y sin costos adicionales;
- condiciones necesarias de presión en la red: se supondrá que las condiciones de presión máxima y mínima en las tuberías son satisfechas cualquiera sea el nivel en el tanque;
- características de las válvulas: no serán tomadas en cuenta en este trabajo;
- características de las bombas (caudal, potencia, etc.): para los experimentos fueron adoptadas las características de las bombas de un sistema real en uso (sección 4.1, Tabla 1);
- demanda de consumo: considerada al adoptar una curva de demanda (sección 2.6, Figura 2).

Potencia máxima alcanzada (f_4)

Muchas empresas de suministro de energía eléctrica facturan a los usuarios de gran envergadura basándose en la potencia reservada por los mismos y cobrando un elevado costo adicional al máximo pico de potencia que haya sobrepasado dicho valor contratado. Por lo tanto, se deben reducir estos picos de potencia para evitar dichos sobre-costos. Como primera aproximación a tal problema, este trabajo buscará obtener programaciones de bombeo óptimas que minimicen los picos diarios de potencia, introduciendo la potencia máxima alcanzada en el día P_{max} como un objetivo a ser minimizado. Esta potencia se calcula con la ecuación:

$$P_{max} = \max\{p(b_i)\} \quad (5)$$

donde: $p(b_i)$ es la potencia utilizada en el intervalo i con la combinación de bombas b_i .

En conclusión, el presente trabajo considerada las características de las bombas del sistema (sus capacidades de bombeo), de manera a abastecer la demanda de consumo de la población (variable en el tiempo), sin violar los niveles máximo y mínimo del reservorio y tratando de recuperar el nivel inicial al final del día. Al mismo tiempo, se minimizan los costos de energía eléctrica consumida y de mantenimiento de las bombas, así como la potencia máxima alcanzada.

2.5. Bombas y Reservorio

En general, el problema podría considerar un sistema con n bombas centrífugas de velocidad constante asociadas en paralelo, que pueden ser encendidas o apagadas solamente al inicio de cada hora. Las capacidades de bombeo son consideradas constantes para todas las combinaciones durante los intervalos. Es decir, a cada combinación de bombas se puede asignar un volumen bombeado de agua, energía eléctrica consumida y potencia eléctrica utilizada (Dolqachev y Pashkov, 1985; Mataix, 1982; Streeter y Wylie, 1996). El caudal bombeado por una combinación de bombas no es considerado como lineal en este trabajo, es decir, no es la suma directa de los caudales bombeados por separado por cada bomba (ver Sección 4.1, Tabla 1).

Además, es importante que el reservorio termine su ciclo diario con el mismo nivel con el que comenzó el día pues con esto se aseguraran dos cosas:

- que no se bombeó agua de más para elevar el nivel final con respecto al inicial. Este desnivel implica agua acumulada en el reservorio que no se usó, aumentando el costo inútilmente;
- que no se utilizó agua ya almacenada en el reservorio en el período anterior, quedando el mismo con un nivel final por debajo del inicial. Este desnivel implica agua que deberá ser recuperada luego con bombeo, y que afectará las condiciones iniciales y programación del siguiente período (día siguiente).

En síntesis, debe existir un balance o equilibrio de las masas de agua que entran y salen del reservorio entre el inicio y el final del período de optimización. El modelo matemático adoptado es entonces el de balance de masas (Ormsbee y Lansey, 1994). Por último, el reservorio posee un volumen útil V_{util} correspondiente a una altura útil $h_{util} = h_{max} - h_{min}$ y a una superficie S . Una ventaja más de este enfoque es la periodicidad, es decir, poder utilizar una misma programación de bombeo para varios días consecutivos, si la demanda de consumo no varía sustancialmente.

2.6. Demanda de Consumo

Siendo la demanda de consumo un dato de entrada del problema, la misma debe ser obtenida a priori, de fuentes confiables. Varios modelos para determinar la demanda de consumo son

presentados en Ormsbee y Lansley (1994). El presente trabajo adopta una curva de demanda similar a la utilizada en Savic et al. (1997), la cual se presenta en la Figura 2.

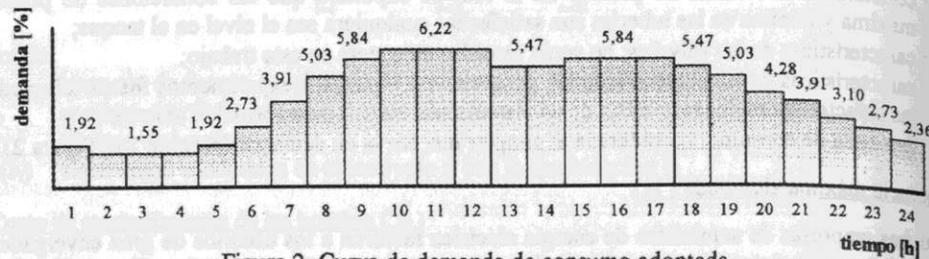


Figura 2. Curva de demanda de consumo adoptada

2.7. Codificación

Según la técnica de los Algoritmos Genéticos (Goldberg, 1989), el principal requisito para la codificación de un problema es que la misma pueda representar cada solución potencial. Esto se logra mediante una representación adecuada de los parámetros del problema y la unión de los mismos en una cadena o *string*. Los parámetros codificados son llamados genes y la cadena de genes es conocida como cromosoma. En este caso, un cromosoma representa a un individuo o solución posible del problema.

Así, se adoptó el alfabeto binario para codificar el problema de la programación de bombeo. Cada bomba, durante cada intervalo, es representada por un bit de la cadena. Luego, si el valor del bit es cero, la bomba correspondiente estará apagada durante ese intervalo, y si el valor es uno, estará encendida. Para cada intervalo se requieren n bits, siendo n el número de bombas de la estación. La Fig. 3 muestra la codificación para una estación con $n = 5$ bombas. Una cadena, consistente en $5 \times 24 = 120$ bits, describe una solución completamente. Por lo tanto, el número de soluciones posibles sería de $2^{120} \approx 10^{36}$, un espacio de búsqueda que no podría ser tratado por métodos tradicionales. Sin embargo, debido a las restricciones del problema, muchas de estas soluciones no serán factibles ya que no cumplirán con los niveles máximo y mínimo establecidos en el reservorio. De ahí surge la necesidad de utilizar un algoritmo de factibilización que corrija las soluciones no factibles, de manera a satisfacer las restricciones. Este procedimiento hará que el espacio de búsqueda de soluciones quede reducido al espacio de las soluciones factibles.

hora	1					...	24				
bomba	B1	B2	B3	B4	B5	...	B1	B2	B3	B4	B5
bit	0	1	1	0	1	...	1	0	0	0	1
significado	apagada	encendida	encendida	apagada	encendida	...	encendida	apagada	apagada	apagada	encendida

Figura 3. Codificación del problema de la programación óptima de bombeo para $n = 5$ bombas.

2.8. Formulación matemática del problema

$$\text{Minimizar } y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x))$$

donde:

- f_1 : costo de energía eléctrica consumida; ver ecuación (1).
- f_2 : número de encendidos de las bombas; ver ecuación (2).
- f_3 : diferencia de nivel en el reservorio; ver ecuación (3).
- f_4 : potencia máxima alcanzada; ver ecuación (5).

sujeto a:

$$h_i = h(x_i) \leq h_{max} \quad \text{y} \quad h_i = h(x_i) \geq h_{min}, \text{ para cada intervalo } i.$$

$$h_i: \text{ nivel en el reservorio al final del intervalo } i; \text{ ver ecuación (4).}$$

donde:

$$x \in X \subseteq B^{n \times 24} \text{ es el vector de decisión, } B = \{0,1\};$$

$$y = (y_1, y_2, y_3, y_4) \in Y \subset R^4 \text{ es el vector objetivo;}$$

El conjunto de las mejores soluciones y es conocido como Frente Pareto FP .

3. RESOLUCIÓN UTILIZANDO MOEA

Se resuelve el problema de la programación óptima de bombeo a través de Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo, MOEA (Zitzler et al., 2001). Dos reconocidos métodos fueron implementados: el SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*; Zitzler y Thiele, 1999) y el NSGA (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*; Srinivas y Deb, 1994), ambos combinados con un algoritmo heurístico de factibilización desarrollado para este trabajo. Sin embargo, debido a que el análisis comparativo de los resultados obtenidos por ambos métodos, utilizando métricas propias de los MOEA (Van Veldhuizen, 1999), ha demostrado la enorme superioridad del SPEA sobre el NSGA en este problema (Sotelo et al, 2001), sólo se presentará la descripción del algoritmo del SPEA implementado, así como los resultados obtenidos con el mismo.

3.1. Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)

Se desarrolló un nuevo enfoque basado en el *Strength Pareto Evolutionary Algorithm*. Este método, muy relacionado con los Algoritmos Genéticos (Goldberg, 1989), almacena en una población externa P' las mejores soluciones (no dominadas) (Zitzler y Thiele, 1999) encontradas en una población general evolutiva P en cada generación (iteración) del algoritmo. La calidad de las soluciones de P' y de P se mide según su *fitness* (Goldberg, 1989), que está asociado a la probabilidad que tiene una solución de ser seleccionada para una próxima generación. La asignación del *fitness* a las soluciones se hace de forma que el mínimo *fitness* asignado en la población externa P' sea mayor que cualquier *fitness* asignado en la población evolutiva P , ya que en el SPEA implementado, cuanto mayor sea el *fitness* de una solución, mayor será la probabilidad de que sea seleccionada. Además, ambas poblaciones (P y P') se juntan para aplicar los operadores genéticos de selección, cruzamiento y mutación (Goldberg, 1989), manteniéndose constante el tamaño de la población P . El SPEA preserva la diversidad en la población usando relaciones de dominancia Pareto e incorporando un procedimiento de *clustering* para reducir el conjunto de no dominados sin destruir sus características (Zitzler y Thiele, 1999). En general, el *clustering* particiona un conjunto de m elementos en g grupos de elementos relativamente homogéneos, donde $g < m$, seleccionando una solución representante por cada uno de los g *clusters*. Así, un número determinado de g soluciones puede mantenerse en la población externa preservando las principales características del Frente Pareto (Zitzler y Thiele, 1999). Además, otra importante característica del SPEA es su convergencia, no siempre presente en otros MOEA.

El algoritmo está basado en el SPEA original, pero difiere en dos aspectos:

- Incorporación de un algoritmo heurístico de factibilización, el cual corrige las soluciones no factibles obtenidas en cada iteración, de manera que cumplan con las restricciones hidráulicas del problema. Dicho algoritmo será presentado en la siguiente sección.
- Doble criterio de parada: uno de los criterios detiene al algoritmo si cierto número máximo de generaciones es alcanzado. El otro criterio lo detiene si no se incorporan nuevas soluciones no dominadas a la población externa luego transcurrido de cierto número de generaciones.

El Pseudocódigo del SPEA propuesto se presenta en la Figura 4.

Inicio	Leer parámetros evolutivos para el algoritmo. Leer parámetros Hidráulicos
	Generar aleatoriamente población inicial P y factibilizar P según restricciones hidráulicas
	Generación $G = 1$
	MIENTRAS $G < G_{max}$ y no se ha alcanzado aún la condición de parada
	Calcular valores de las funciones objetivo para todas las soluciones en P
	Encontrar soluciones no dominadas en la población actual P
	Modificar la población externa de soluciones no dominadas P' con las mejores soluciones de P
	SI el número de soluciones en la población externa P' excede cierto número máximo
	Purgar P' mediante clustering
	Fin SI
	Calcular el fitness de cada solución en P y P'
	Seleccionar soluciones de la unión de $P + P'$
	Aplicar operadores de cruzamiento y mutación para generar nueva población P
	Factibilizar población P según restricciones hidráulicas del problema
	$G = G + 1$
	Fin MIENTRAS
Fin	Escribir resultados en archivo de salida

Figura 4. Pseudocódigo del SPEA propuesto.

3.2. Algoritmo heurístico de factibilización

No todas las soluciones dadas por el SPEA cumplen con las restricciones hidráulicas presentadas en (4). Por ello, se propone combinar los Algoritmos Evolutivos con un algoritmo basado en la heurística del problema, es decir, en la hidráulica del modelo de la Fig. 1. Así, se transforma cada solución no factible en otra que cumpla las restricciones. Tal algoritmo se muestra en la Fig. 5.

```

Inicio
Leer parámetros de entrada. Leer restricciones hidráulicas:  $h_{max}$ ,  $h_{min}$ 
PARA soluciones desde 1 hasta número total de soluciones
  Verificar las restricciones hidráulicas
  SI  $h_i < h_{min}$  en algún intervalo (1-24)
    MIENTRAS  $h_i < h_{min}$ , encender aleatoriamente una bomba (0→1) entre el inicio y el intervalo de infracción
    SI el cambio (0→1) no origina violación de la restricción  $h_i \leq h_{max}$  en intervalos anteriores al considerado
      Aceptar el cambio
    Fin SI
  Fin MIENTRAS
  O SI  $h_i > h_{max}$  en algún intervalo (1-24)
    MIENTRAS  $h_i > h_{max}$ , apagar aleatoriamente una bomba (1→0) entre el inicio y el intervalo de infracción
    SI el cambio (1→0) no origina violación de la restricción  $h_i \geq h_{min}$  en intervalos anteriores al considerado
      Aceptar el cambio
    Fin SI
  Fin MIENTRAS
  Fin SI
  Escribir resultados en archivo de salida
Fin
  
```

Figura 5. Pseudocódigo del algoritmo heurístico de factibilización.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Problema paradigma

Los experimentos se realizaron con tres tipos de demanda de consumo: baja, media y alta, en un ejemplo inspirado en un centro de distribución de agua en Asunción, Paraguay. Sólo se presentan los resultados correspondientes a la demanda baja, ya que es la más representativa. Las características de este ejemplo son: a) una estación de bombeo con $n = 5$ bombas (las combinaciones se presentan en la Tabla 1); b) un reservorio con $S = 2600 \text{ m}^2$, $h_{max} = 7 \text{ m}$, $h_{min} = 1 \text{ m}$, $h_{inicial} = 3 \text{ m}$, $V_{util} = 15.600 \text{ m}^3$; c) una curva de demanda de consumo como la mostrada en la Figura 2, siendo el caudal total demandado $Q = 54.788 \text{ m}^3 / \text{día}$ (demanda baja); d) una estructura tarifaria con $T_p = 2 T_f$. Se utilizaron las mismas características para los experimentos realizados con las demandas media y alta, variando solamente el caudal demandado (Q).

Tabla 1. Características de las combinaciones de bombas utilizadas en el problema paradigma.

id	Código	Caud. m^3/h	Pot. kW	id	Código	Caud. m^3/h	Pot. kW	id	Código	Caud. m^3/h	Pot. kW	id	Código	Caud. m^3/h	Pot. kW
0	00000	0	0	8	01000	1440	445	16	10000	1800	595	24	11000	3235	1040
1	00001	1800	595	9	01001	3235	1040	17	10001	3600	1190	25	11001	5035	1635
2	00010	828	260	10	01010	2260	705	18	10010	2620	855	26	11010	4060	1300
3	00011	2600	855	11	01011	4060	1300	19	10011	4420	1450	27	11011	5860	1895
4	00100	828	260	12	01100	2260	705	20	10100	2620	855	28	11100	4060	1300
5	00101	2600	855	13	01101	4060	1300	21	10101	4420	1450	29	11101	5860	1895
6	00110	1650	520	14	01110	3090	965	22	10110	3450	1115	30	11110	4890	1560
7	00111	3450	1115	15	01111	4890	1560	23	10111	5250	1710	31	11111	6690	2155

4.2. Resultados experimentales

Al no poder graficar cuatro objetivos a la vez, las soluciones se agruparon en ventanas según rangos de diferencia de nivel. Luego se representó el número de encendidos con símbolos diferentes. Así, gráficos en dos dimensiones de los costos de energía eléctrica en función de la potencia máxima alcanzada fueron elaborados para cada ventana, con los números de encendidos, permitiendo analizar gráficamente las soluciones en el espacio objetivo de cuatro dimensiones. Las mejores soluciones según el SPEA, para demanda baja y $\Delta h = 0$, se muestran en la Fig. 6.

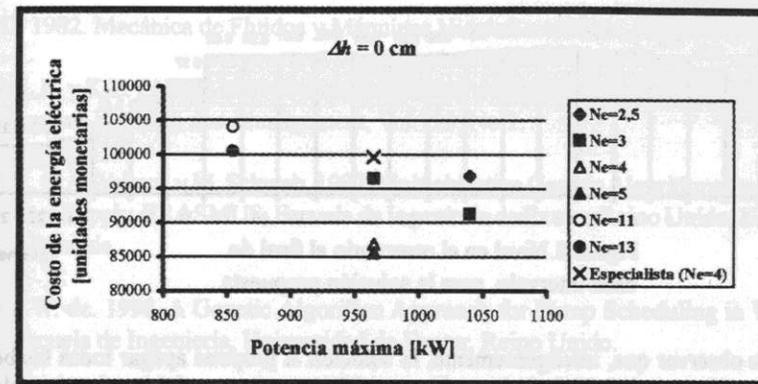


Figura 6. Mejores resultados experimentales obtenidos con el SPEA para demanda baja y $\Delta h = 0$; x corresponde a una solución obtenida por un especialista de la planta de bombeo mencionada.

La Fig. 6 presenta varias soluciones interesantes. Aquella denotada por Δ supera a la solución \times del especialista, ya que ambas presentan la misma diferencia de nivel ($\Delta h = 0$), el mismo número de encendidos ($N_e = 4$) y la misma potencia máxima alcanzada ($P_{max} = 965 \text{ kW}$), pero la solución Δ presenta un costo de energía eléctrica $C_e = 86850$ en comparación con el $C_e = 99675$ obtenido por la del especialista, un ahorro aproximado del 13% en el costo de energía eléctrica. Por otro lado, puede observarse que la solución \bullet , en comparación con la del especialista, presenta la misma diferencia de nivel, un costo de energía eléctrica muy similar y un número de encendidos algo superior. Sin embargo, esta solución obtiene una potencia máxima de 850 kW que es mucho menor que los 965 kW obtenidos por el especialista, lo que corresponde a un ahorro aproximado de 12% en potencia máxima.

Para hacer más evidente la comparación entre las soluciones obtenidas por el programa con la del especialista, la Figura 6 sólo presenta aquellas soluciones que tienen $\Delta h = 0$. Sin embargo, debe resaltarse que el algoritmo obtuvo muchas soluciones que presentan ahorros aún mayores que los mencionados en cuanto a energía eléctrica y potencia máxima, pero con $|\Delta h|$ ligeramente diferente a cero. De esta manera, el SPEA no proporciona una única solución, sino un conjunto de soluciones óptimas. Luego, el ingeniero encargado de realizar la programación de la estación de bombeo puede utilizar el criterio que considere más importante en ese momento, así como su experiencia, para escoger la mejor solución dentro del conjunto de soluciones proporcionado por el algoritmo. Esto representa una de las enormes ventajas de este método.

Las Figuras 7 y 8 presentan los gráficos de caudal bombeado y nivel en el tanque para la programación de bombeo dada por la solución Δ , de manera de poder analizar sus efectos.

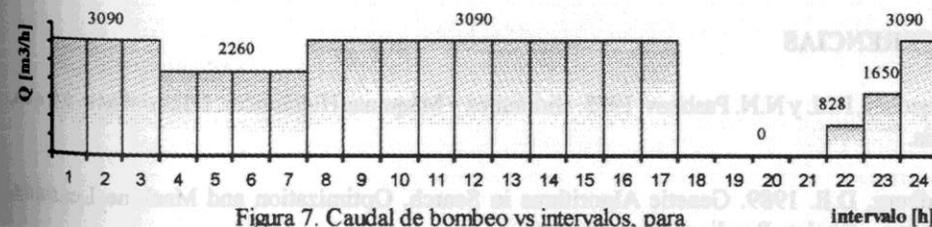


Figura 7. Caudal de bombeo vs intervalos, para solución propuesta.

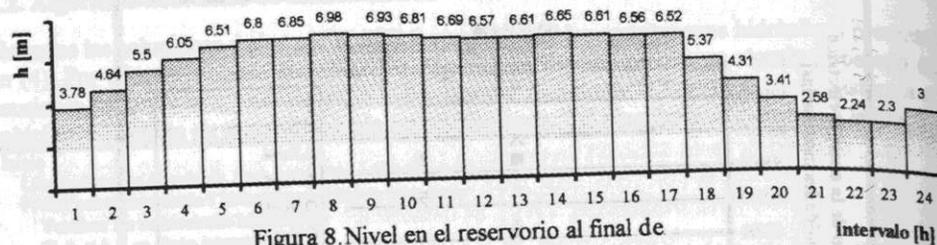


Figura 8. Nivel en el reservorio al final de cada intervalo, para la solución propuesta

Es interesante observar que, inteligentemente, la solución Δ propone apagar todas las bombas en el horario de tarifa cara (17–22 hs.), lo cual se manifiesta en un caudal bombeado nulo durante este período (ver Figura 7). Además, la misma solución propone utilizar la capacidad del tanque para suplir a las bombas en este período, lo cual se manifiesta en el pronunciado y continuo descenso del nivel en el tanque durante el mismo (ver Figura 8). Como resulta evidente, la programación de bombeo graficada debe elevar el nivel del tanque lo máximo posible antes del horario de tarifa cara, de forma que el tanque tenga la capacidad de abastecer la demanda por sí solo durante dicho horario (ver Figura 8). Por último, puede constatar que los niveles mostrados en la Figura 8 se encuentran en el rango establecido en las restricciones, demostrándose así la efectividad del algoritmo de factibilización implementado.

5. CONCLUSIONES

El problema de la programación óptima de bombeo es presentado y resuelto en el presente trabajo utilizando un reconocido Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo: el SPEA. Los resultados de los experimentos realizados sobre tres tipos de demanda demuestran que el SPEA logra ahorros promedios del orden del 10% en el costo de energía eléctrica y en la potencia máxima alcanzada, principales componentes del costo total de bombeo, en comparación con los métodos aplicados por experimentados especialistas. Además, el SPEA presenta las siguientes ventajas técnicas:

- proporciona un conjunto de soluciones óptimas en vez de una sola solución
- permite predecir las consecuencias de introducir cambios en las características de las bombas, capacidad del tanque y demanda de consumo, mediante simulaciones hechas con el algoritmo

Es de esperar que trabajos futuros permitan: (a) analizar un modelo hidráulico más complejo; (b) considerar costos adicionales en caso de sobrepasarse la potencia reservada; (c) analizar la programación de bombeo semanal o mensualmente; (d) paralelizar el algoritmo; y (e) corregir la programación a tiempo real en caso de una notable variación en la demanda pronosticada.

REFERENCIAS

- Dolqachev, F.M. y N.N. Pashkov. 1985. Hidráulica y Máquinas Hidráulicas. Editorial Mir, Moscú, Rusia.
- Goldberg, D.E. 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison – Wesley, Reading, Massachusetts.
- Lansley, K.E. y K.Awumah. 1994. Optimal pump operations considering pump switches, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.120, No.1.
- Mackle, G., D.A.Savic y G.A. Walters. 1995. Application of Genetic Algorithms to Pump Scheduling for Water Supply, GALESIA'95, Londres.

Mataix, C. 1982. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Harla, México, 2ª edición.

Ormsbee, L.E. y K.E. Lansley. 1994. Optimal control of water supply pumping systems, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.120, No.2.

Savic, D.A., G.A.Walters, y M. Schwab. 1997. Multiobjective Genetic Algorithms for Pump Scheduling in Water Supply, ERASMUS, Escuela de Ingeniería de Exeter, Reino Unido, Universidad de Stuttgart, Alemania.

Schaetzen, W. de. 1998. A Genetic Algorithm Approach for Pump Scheduling in Water Supply Systems, Escuela de Ingeniería, Universidad de Exeter, Reino Unido.

Sotelo A., J. Basualdo, P. Doldán P. y B. Barán. 2001. Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo Combinados para la Optimización de la Programación de Bombeo en Sistemas de Suministro de Agua. JIT-CITA 2001. Asunción, Paraguay.

Srinivas, N. y K. Deb K. 1994. Multiobjective optimization using nondominated sorting genetic algorithms. Evolutionary Computation, 2(3): 221-248.

Streeter, V.L. y B. Wylie. 1996. Mecánica de los Fluidos, McGraw-Hill, México, 8ª edición.

Van Veldhuizen, D.A. 1999. Multi-objective Evolutionary Algorithms: Classification, Analysis and New Innovation, Ph.D. Dissertation, Air Force Institute of Technology, Air University. USA.

Zitzler E., K. Deb, L. Thiele, C. Coello y D. Corne. 2001. Evolutionary Multi-criterion Optimization, Lecture Notes in Computer Science 1993, First International Conference, EMO 2001, Zurich, Switzerland, ISBN 3-540-41745 Springer-Verlag.

Zitzler, E. y L. Thiele. 1999. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 3, N° 4

...diseño de un sistema supervisor de un nodo hidráulico que considera las restricciones, así como también los objetivos de entrega de caudales preestablecidos, a la vez el uso de agua almacenada. Como ejemplo de aplicación y evaluación de este tipo de sistemas, se presenta la simulación del nodo hidráulico del sistema. Los resultados muestran que ponderando adecuadamente la importancia relativa de cada uno de los objetivos adoptados, se pueden cumplir apropiadamente cada uno de los objetivos y requeridos, tanto en estado transiente como en estado estacionario.

Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción
Riego y Drenaje, Universidad de Concepción
Obras, Canales y Puentes, Universidad Politécnica de Cataluña, España