

**Diseño óptimo de redes de riego a turnos y  
caracterización de su flexibilidad**

**Optimal design of irrigation network shifts and  
characterization of their flexibility**

C. Mireya Lapo P.<sup>1</sup>

Rafael Pérez-García<sup>2</sup>

Ricardo Aliod-Sebastián<sup>3</sup>

F. Javier Martínez-Solano<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador,  
cmlapo@utpl.edu.ec, ORCID: 0000-0002-5246-083X

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España,  
rperez@gmmf.upv.es

<sup>3</sup>Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, raliod@unizar.es, ORCID:  
0000-0001-6960-2702

<sup>4</sup>Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España,  
jmsolano@upv.es, ORCID: 0000-0002-8140-5960

Autor para correspondencia: C. Mireya Lapo P., [cmlapo@utpl.edu.ec](mailto:cmlapo@utpl.edu.ec)

## Resumen

En esta contribución se presenta un algoritmo híbrido genético-programación no lineal para el diseño óptimo de redes presurizadas de riego operando a turnos, y se implementa un indicador para evaluar la flexibilidad de los diseños resultantes del algoritmo híbrido. El objetivo principal es la minimización del costo económico de la red de tuberías y la evaluación de la flexibilidad de los diseños del sistema. La investigación considera como variables de decisión la asignación de turnos a las tomas de riego (hidrantes) y el dimensionado de las conducciones para reducir los costos de implementación. Con los resultados de la optimización se analiza la flexibilidad de la red hidráulica con base en la reasignación aleatoria de turno a los hidrantes, que simula las modificaciones susceptibles de ocurrir durante la explotación de la red. Para validar el algoritmo, una vez calibrado, éste fue aplicado al diseño de cuatro sectores de riego reales de Ecuador y España. Los resultados indican que los diseños obtenidos mejoran en

costo y flexibilidad respecto a los encontrados con el algoritmo tradicional de la serie económica, y que la asignación de los turnos es de suma importancia para minimizar los costos de inversión en tuberías, lo que a la vez constituye un factor determinante en la flexibilidad del sistema.

**Palabras clave:** diseño óptimo de redes, algoritmo genético, fiabilidad, programación no lineal, red colectiva de riego, modelo híbrido, operadores genéticos.

### **Abstract**

In this contribution, a nonlinear programming genetic hybrid algorithm for the optimal design of pressurized irrigation networks operating in shifts is presented, and an indicator is implemented to evaluate the flexibility of the resulting designs of the hybrid algorithm. The main objective is the minimization of the economic cost of the pipe network and the evaluation of the flexibility of the system designs. The research considers the allocation of shifts to the irrigation outlets (hydrants) and the sizing of the pipes as decision variables to reduce implementation costs. With the results of the optimization, the flexibility of the hydraulic network is analysed based on the random reassignment of shifts to the hydrants, which simulates the modifications that may occur during network operation. To validate the algorithm, once calibrated, it was

applied to the design of four real irrigation sectors of Ecuador and Spain. The results indicate that the designs obtained improve in cost and flexibility with respect to those found with the traditional algorithm of the Economic Series, and that the assignment of the shifts is of utmost importance to minimize investment costs in pipes. At the same time, it constitutes a determining factor in the flexibility of the system

**Keywords:** Optimal network design, genetic algorithm, reliability, non-linear programming, collective irrigation network, hybrid model, genetic operators.

Recibido: 22/08/2018

Aceptado: 20/03/2019

## Introducción

En las últimas décadas, la agricultura de regadío se ha incrementado rápidamente debido al crecimiento de la población y la necesidad de

garantizar la productividad óptima de los cultivos (Salazar-Moreno, Rojano-Aguilar, & López-Cruz, 2014). Esto ha impulsado el desarrollo de diferentes sistemas de riego tecnificado que usan conducciones presurizadas e infraestructuras específicas de distribución para llevar el agua hasta cada parcela. Tal es el caso de las redes colectivas de riego a presión. Una red colectiva de riego a presión (RCRP) es un sistema formado por un conjunto de tuberías, con topología por lo general ramificada, que permite el transporte del agua desde su origen hasta cada una de las tomas de entrada (hidrantes) en las parcelas de riego, con suficiente presión y caudal (Planells, Ortega, Valiente, Montero, & Tarjuelo, 1999). Su ventaja respecto a los sistemas tradicionales basados en canales es que facilita su construcción, resulta más económico y brinda mayor eficiencia en la aplicación y control del agua. Además, las RCRP permiten reducir o eliminar costos energéticos en el riego por goteo o aspersión.

Una RCRP puede ser diseñada para operar bajo dos modalidades: a la demanda o por turnos. La modalidad de riego a la demanda suministra el agua a voluntad del regante (Clément, 1966). Las técnicas de diseño de las RCRP operadas a la demanda definen un cierto caudal límite demandado en cada tramo de tubería, evaluado de forma probabilística. El diseño se realiza de forma tal que, para cualquier combinación de apertura, la presión resultante en las tomas de agua sea mayor que un valor de la altura de presión mínima requerida,

denominado altura de consigna ( $H_{\text{cons}}$ ). Esto implica un cierto grado de sobredimensionado de las conducciones, pero a cambio se tiene una flexibilidad total en el uso de las tomas.

Por su parte, la modalidad por turnos asigna un periodo de riego a cada toma en horarios fijos. Las conducciones se dimensionan para trasegar el caudal estrictamente requerido por los hidrantes abiertos en el turno prefijado. Otras combinaciones de tomas abiertas, incluso respetando el caudal total del turno, no garantizan que exista presión suficiente, superior a la  $H_{\text{cons}}$ . Por lo tanto, los regantes deberán limitarse a regar según la organización de los turnos que se definió en el momento del diseño. Debido a ello, la rigidez de uso es alta o, dicho con otras palabras, la flexibilidad del sistema ante cambios de turnos, de dotaciones, de cultivos, etcétera, es más reducida que en los diseños a la demanda (Espinosa, Flores, Hernández, & Carrillo, 2016). Por otra parte, en el diseño de la RCRP bajo la modalidad de turnos, existe una fuerte dependencia del resultado, en los términos de costo y flexibilidad de uso, respecto a la asignación de turnos en el proyecto, que de modo tradicional se realiza de forma heurística.

No obstante, las RCRP concebidas para operar en la modalidad por turnos gozan de propiedades de interés, dado que resultan generalmente más económicas, del orden de 15% al 50%, debido a que el diseño implica caudales inferiores a los que se encuentran a la demanda. Además, las redes diseñadas a turnos son más sencillas de

controlar, pues los usos están predeterminados (Alduán & Monserrat, 2009; Monserrat, Alduán, Cots, & Barragán, 2012).

En este sentido, son muy escasas todavía las investigaciones de algoritmos específicos para el diseño óptimo de RCRP a turnos (Farmani, Abadia, & Savic, 2007; García *et al.*, 2011) o para la gestión de las mismas (Jiménez, Martínez, Bou, & Bartolí, 2010; Faci *et al.*, 2015; Fernández, Montesinos, Camacho, & Díaz, 2017). Por último, los análisis de la flexibilidad de las RCRP —entendiendo por flexibilidad la fiabilidad de los diseños resultantes ante cambios de condiciones de explotación— no ha sido previamente contemplada en el caso de sistemas a turnos (Espinosa *et al.*, 2016). El avance del conocimiento en estos frentes permitirá un mejor diseño de RCRP operando a turnos y la identificación de las condiciones en que éstas son más favorables.

A lo largo del tiempo y desde la implementación de los primeros sistemas de riego presurizados, se han desarrollado diferentes técnicas para la optimización del diseño de RCRP. Igualmente, algunos autores han estudiado la fiabilidad, redundancia del sistema o calidad del agua, de forma que se mejore el proceso de riego (Lamaddalena, Khadra, & Tlili, 2012). Entre ellas se encuentran algoritmos de tipo analítico que ofrecen una solución óptima para el diseño de la red a través de un número definido de procesos. Estos algoritmos incluyen técnicas como optimización discontinua de Labye (1966); programación no lineal (PNL), (Theocharis, Tzimopoulos, Yannopoulos, & Sakellariou, 2006);

multiplicadores de Lagrange (método de la serie económica-MSE; Deb, 1974) o programación lineal (PL) (Pérez, Martínez, & Vela, 1993; Kale, Singh, & Mahar, 2008). Todos estos métodos han mostrado su eficacia y bajo tiempo de cálculo al ser aplicados a las redes ramificadas con caudales de diseño preestablecidos.

Por otra parte, se dispone de algoritmos de tipo evolutivo, que forman parte de las técnicas modernas de optimización, dentro de los cuales los de tipo genético (AG) son extensamente usados en el campo de las redes de distribución de agua por su versatilidad (Savic & Walters, 1997) para explorar y seleccionar las soluciones óptimas en el dimensionado y gestión de la red. Se han inspirado en el principio darwiniano de selección natural y reproducción genética (Holland, 1992), y han encontrado también aplicación en el diseño de RCRP (Farmani *et al.*, 2007), y en la gestión de las mismas (Fernández *et al.*, 2017).

García *et al.* (2011) investigan algoritmos de diseño específicos para RCRP a turnos que realizan una extensión recursiva del método de la serie económica para los sistemas a turnos, pero en el que la asignación de turnos a los hidrantes está prefijada. En Farmani *et al.* (2007) se recurre a un AG para obtener el diseño de una RCRP a turnos realizando la asignación tanto de turnos como de diámetros de las conducciones. Al considerarse turnos en los hidrantes y diámetros candidatos en las conducciones variables de decisión del AG, se

aumenta de forma innecesaria la dimensionalidad del AG y, en consecuencia, su complejidad en el tiempo de cálculo.

Para una determinada asignación de turnos, el problema de la definición de diámetros óptimos en el caso de redes ramificadas posee soluciones analíticas. Por ello, la optimización conjunta de turnos y diámetros en RCRP a turnos puede realizarse de manera ventajosa mediante el recurso de AG, limitándolo sólo a la asignación óptima de turnos. Este es un problema al que el AG parece especialmente adaptado, mientras que el dimensionado de la red ramificada puede desarrollarse con más eficacia por un proceso de optimización analítica subordinada, cuyo resultado ha de servir de función objetivo. La integración de diferentes algoritmos de optimización que explotan la mejor adaptación de diversas técnicas a subproblemas específicos es el ámbito en que se enmarca la presente investigación.

En consecuencia, el objetivo central de este trabajo es desarrollar y validar un algoritmo híbrido que combina un algoritmo genético (AG) con un algoritmo de tipo analítico basado en la programación no lineal (PNL). El AG realiza la asignación de turnos óptima a los hidrantes mientras que la PNL minimiza los costos de las conducciones de la red, satisfaciendo los requerimientos de presión con turnos candidatos dados. Además, se introduce un indicador que permite evaluar la flexibilidad de los diseños resultantes para encajar los cambios de turnos que puedan darse durante el servicio de la red. Por último, con apoyo en

dicho indicador de flexibilidad, se propone un criterio complementario de ayuda a la decisión, para seleccionar el tipo de diseño más conveniente en cada caso.

## **Formulación del algoritmo híbrido AG-PNL para diseño óptimo y del indicador la flexibilidad en redes a turnos**

### **Algoritmo y arquitectura del modelo híbrido**

#### **a) Algoritmo genético (AG)**

Los algoritmos genéticos fueron introducidos por primera vez por Holland (1992). La analogía de los AG con la naturaleza radica en la

creación de un conjunto de soluciones que van evolucionando y auto perfeccionándose de forma continua. Así, al conjunto de soluciones evaluadas se le denomina población y cada individuo de esta población representa una solución particular al problema, compuesta por un grupo de valores de cada una de las variables de decisión (genes), que describen dicha solución particular. Un individuo tendrá mayores probabilidades de supervivencia y de reproducción cuanto mayor sea su aptitud o adaptación, es decir, cuanto mejor sea el valor de su función objetivo. Para cada individuo, los genes proporcionan una solución numérica que se relaciona, por un lado, con su probabilidad de supervivencia y, con la probabilidad de reproducirse en la siguiente generación. Los procesos de supervivencia y reproducción se ejecutan a través de unos operadores genéticos que son la reproducción, el cruce y la mutación (Moradi-Jalal & Karney, 2008). La reproducción es la primera etapa, en la cual se determinan las mejores soluciones de cada cadena que perdurarán en el proceso. El operador de cruce permite el intercambio de información entre distintas soluciones, con el fin de mejorar el valor de la función objetivo hasta obtener un resultado óptimo (Savic & Walters, 1997). El número de cadenas que se cruzan entre sí se conoce como probabilidad de cruce ( $P_c$ ). La  $P_c$  será tanto mayor cuanto mayor sea su aptitud, medida a partir del valor de la función objetivo. Por último, el operador de mutación garantiza la diversidad de las soluciones de cada cadena. Su objetivo es acrecentar

las zonas de búsqueda dentro del espacio de soluciones factibles para evitar converger a óptimos locales. Mora-Melia, Iglesias, Martínez y Fuertes-Miquel (2013) sugieren tomar como valor para la probabilidad de mutación ( $P_m$ )  $1/N_{VD}$ , siendo  $N_{VD}$  el número de variables de decisión (en este caso, el número de hidrantes de la red,  $N_h$ ). Los valores de  $P_c$  y  $P_m$  serán considerados para el análisis de sensibilidad del modelo.

Los AG, por su naturaleza estocástica, no garantizan determinar el resultado óptimo global, aunque en numerosas aplicaciones se han obtenido excelentes resultados (Savic & Walters, 1997; Boulos *et al.*, 2001; Reis, Porto, & Chaudhry, 1997). La ventaja de este tipo de algoritmos radica en su generalidad, robustez y aplicabilidad a sistemas con múltiples interdependencias no modelizadas. Por esta razón, su uso es frecuente para resolver problemas complejos de las ciencias de la ingeniería, incluyendo el diseño de sistemas de distribución de agua (Simpson, Dandy, & Murphy, 1994). En esta investigación se utiliza el AG exclusivamente para establecer la asignación de turnos a los hidrantes que suponga el mínimo costo de la red, a diferencia de la aproximación de Farmani *et al.* (2007), quienes también realizan la asignación de diámetros a las conducciones mediante algoritmo genético.

El problema se puede enunciar de la siguiente manera. Se dispone de una red de riego ramificada con  $N_h$  hidrantes de forma que a cada hidrante le corresponde un turno de riego. Cada individuo o solución

está formado por un número de genes igual al número de variables de hidrantes. Es decir, cada gen representa un hidrante y su genoma recoge el valor correspondiente al turno que le ha sido asignado. Por lo tanto, el problema tiene tantas variables de decisión como hidrantes,  $N_{VD} = N_h$ . Cada gen  $X_j^i$  representará el turno asignado al hidrante  $j$  para la solución representada por el individuo  $i$ . Estos genes podrán tomar cualquier valor comprendido entre 1 y el número máximo de turnos ( $N_T$ ). Así, un individuo  $i$  en una población  $P$  se puede representar como un vector:

$$X^i = \{X_1^i, X_2^i, \dots, X_{N_h}^i\} \quad (1)$$

La aptitud de un individuo  $X^i$  se identifica a través del valor que adopta la función objetivo para dicha solución. En este caso, la función objetivo es el costo mínimo de la red correspondiente a la asignación de turnos codificada en el individuo  $X^i$ . En función de estos turnos asignados a cada hidrante se obtienen los caudales circulantes por cada tubería en cada turno. El proceso de dimensionamiento basado en PNL realiza el diseño de la red a mínimo costo correspondiente a dichos caudales. El proceso de dimensionamiento se describe a continuación.

## **b) Programación no lineal (PNL)**

El conjunto de restricciones de un sistema de riego (presión, caudal, pérdida de carga) y su costo, depende de los diámetros de las conducciones mediante relaciones no lineales. Por tanto, la PNL puede ser aplicada para encontrar soluciones óptimas que dependan de los diámetros como variables de decisión. Existen diversos métodos de PNL para resolver problemas en ingeniería (Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Alcorta-García, Sáenz-López, & González-Barrios, 2015), y enfocados a optimizar el diseño de las tuberías, en el sentido de minimizar los costos del sistema satisfaciendo ciertas restricciones. En este caso se seleccionó el método de gradiente reducido generalizado (GRG) debido a su efectividad y precisión (Lasdon, Fox, & Ratner, 1974). El GRG se puede aplicar tanto para funciones lineales como no lineales.

La función objetivo a minimizar mediante PNL en el problema estudiado es el costo total de las tuberías de la red, que depende de los diámetros a asignar a cada tramo, y se describe como sigue:

$$C_T = \sum_{k=1}^{ND} C_D(D_k) \cdot L_k \quad (2)$$

En la Ecuación (2),  $C_T$  es el costo total de tuberías expresado en unidades monetarias;  $C_D(D_k)$  representa el costo unitario por metro lineal para cada diámetro;  $L_k$  es la longitud de la tubería  $k$  expresada en metros, y  $ND$  es el número de tuberías que componen la red.

La configuración de redes que se usa en esta investigación es ramificada, con un solo tipo de material, una sola presión nominal de tubería y una única fuente de alimentación (embalse). Se considera como restricción la presión mínima en cada hidrante por turno, considerando el número de turnos ( $t$ ), la ubicación de la fuente de alimentación y su altura piezométrica establecida. Así, para cada turno  $t$  y cada nudo  $n$ , esta restricción se puede presentar como (Ecuación (3)):

$$\sum_{i \in S_n} hf_{i,n,t} = \sum_{i \in S_n} J_{i,n,t} \cdot L_i \leq \Delta H_n \quad (3)$$

En esta ecuación,  $hf_{i,n,t}$  representa las pérdidas de carga de la tubería  $i$  perteneciente al trayecto  $n$  en el turno  $t$ . Para cada nudo se puede definir un trayecto entre la fuente de alimentación y el propio nudo. Al tratarse de redes ramificadas, este trayecto será único.  $\Delta H_n$  es

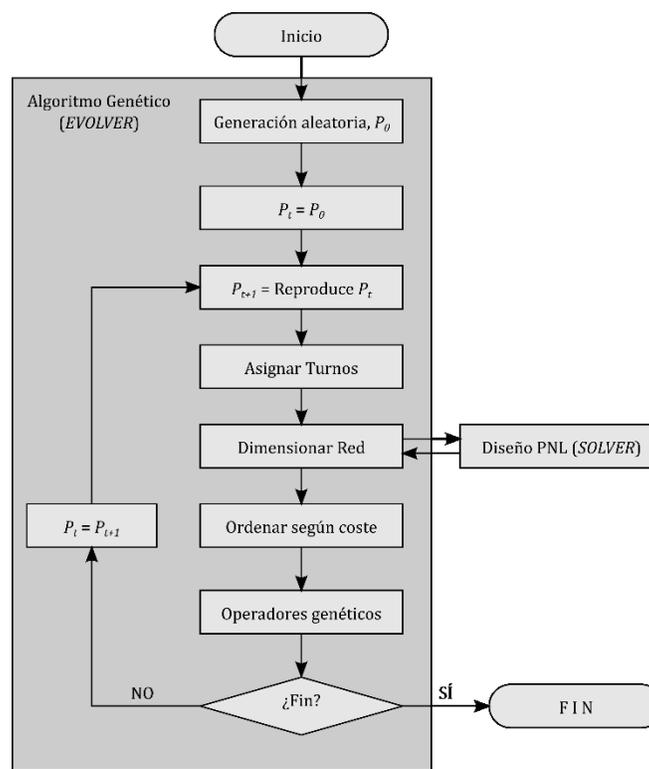
la máxima pérdida de carga admisible a lo largo del trayecto  $n$ , expresada en metros de columna de agua. Por último,  $J_{i,n,t}$  es la pendiente hidráulica del conjunto de la línea  $i$  perteneciente al trayecto  $n$  en el turno  $t$ .  $S_n$  representa el conjunto de líneas que pertenecen al trayecto  $n$ .

El método GRG de PNL usa los diámetros como variables de decisión continuas, cuyos valores óptimos no se corresponden con diámetros comerciales estandarizados. Debido a esto, es necesario realizar un proceso de normalización posterior que modifica cada diámetro teórico óptimo resultante por la PNL al diámetro más próximo disponible en el mercado (diámetros discretos). Finalizado este proceso de normalización, se alcanza el costo de inversión en la instalación.

### **c) Algoritmo híbrido (AG-PNL)**

El algoritmo híbrido (AG-PNL) realiza el diseño de una RCRP ramificada  $n$ , operando con la modalidad a turnos, optimizando de modo simultáneo los turnos asignados a cada hidrante (haciendo uso del AG) y el dimensionado de las tuberías de la red (mediante PNL). El objetivo es

minimizar el costo del sistema, explotando de esta manera las mejores características de cada tipo de algoritmo. En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo del método AG-PNL.



**Figura 1.** Diagrama de flujo de método de optimización AG-PNL.

Mediante el AG se encuentra el turno de pertenencia a cada hidrante que minimiza la función objetivo, que es el costo de tuberías de la red. De esta manera, las variables de decisión son exclusivamente la

asignación de turnos a los hidrantes y se reduce la dimensionalidad del problema en la formulación del AG. En cada paso del AG se hacen evolucionar los turnos tentativos asignados a los hidrantes, utilizando como evaluación de la aptitud de cada individuo el costo de la red para la asignación de turnos candidatos. Este proceso se implantó en el paquete *EVOLVER* (Palisade Corporation, 2010), que permite incorporar procesos de optimización mediante AG a problemas de carácter general convenientemente codificados.

A su vez, el costo de la red para una asignación de turnos candidatos es el resultado de la optimización de conducciones mediante el algoritmo analítico GRG con PNL. La función del algoritmo GRG es calcular la distribución de tubería de diámetros continuos en la red que satisfaga los requisitos de presión y genere un costo mínimo para una cierta asignación de turnos a los hidrantes. El GRG está incorporado en el paquete *SOLVER* (Frontline Systems Inc., 2011), paquete informático para la simulación y optimización de propósito general. En este trabajo se ha realizado una vinculación de ambos algoritmos, que ha permitido comunicar los resultados obtenidos por el *SOLVER* para el diseño de la red como valores de la función objetivo utilizados después por *EVOLVER* para la implementación del AG, tal y como muestra la Figura 1, donde  $P_0$  representa la población inicial y  $P_t$  la población resultante para el proceso en el algoritmo genético.

Determinada la solución final de proceso, con los diámetros en

cada línea se procederá a:

- Normalizar los diámetros teóricos por el criterio del diámetro más próximo.
- Comprobar los valores de presiones resultantes en cada turno en todos los hidrantes de la red con restricción de presión y reajuste del diámetro si es necesario.
- Verificar la velocidad de flujo en todas las conducciones de la red y reajuste si es necesario.
- Computar el costo de cada tubería de la red según el diámetro normalizado finalmente asignado.

## **Indicador de flexibilidad de las RCRP a turnos**

En la construcción del algoritmo híbrido AG-PNL para el diseño de una RCRP se han aplicado dos criterios: a) cumplir con la presión establecida, y b) minimizar los costos de la red con variables de decisión tanto de diámetro de tuberías como la asignación de turnos. En la formulación de la función objetivo no se introducen criterios de fiabilidad o flexibilidad. Sin embargo, en todas las redes a turnos, una vez

dimensionadas, es conveniente evaluar su capacidad para continuar dando adecuado servicio en caso de modificación de los turnos, característica que constituirá su flexibilidad respecto a los cambios de turno. Estas modificaciones se producen con frecuencia en las redes a lo largo de su explotación, y conducen a adoptar diferentes combinaciones de hidrantes asignados a un cierto turno respecto a la asignación inicial asumida en el diseño, respetando al menos el caudal total correspondiente al turno.

En Lamaddalena y Sagardoy (2000), para RCRP a la demanda, se encuentra un antecedente que define indicadores que valoran si el nivel de presión aportado a los hidrantes es suficiente según el número de hidrantes abiertos, con caudales totales por debajo o por encima de las condiciones de diseño. Es posible extender estos conceptos a RCRP diseñadas con operación por turnos, con el fin de evaluar la flexibilidad de las mismas para encajar cambios de turnos.

El cambio de turno es un suceso impredecible con un gran espacio de posibilidades. Por ello, la confección de indicadores debe explorar escenarios que contemplen cualquier reorganización de turnos con la condición de que se mantenga el caudal total demandado en el turno, que se corresponde con un determinado porcentaje global de hidrantes abiertos. Siempre que la red disponga de un número suficiente de hidrantes con dotaciones semejantes; un cambio en la configuración de turnos puede asimilarse a una apertura aleatoria de un porcentaje de

hidrantes igual al que corresponde a cada turno inicial.

Para cada asignación de turnos (aleatoria o determinista), la condición de suficiencia de presión en cada hidrante ( $n$ ) durante un turno ( $t$ ) significa que se satisface la siguiente relación (Lamaddalena & Sagardoy, 2000):

$$H_{n,t} \geq H_{cons_n} \quad (4)$$

Donde  $H_{n,t}$  es la presión en el hidrante  $n$  dentro del turno  $t$  al que pertenece, expresada en metros, y  $H_{cons_n}$  es la altura de presión mínima requerida o de consigna del hidrante  $n$  en metros.

La variable de cumplimiento de presión ( $CP_{n,t}$ ) en el hidrante  $n$  durante el turno  $t$  se define como un valor binario entre 0 y 1, donde el valor 1 indica que se verifica la condición de satisfacción de presión y el valor 0 señala que no llega presión suficiente. Si se genera un número de escenarios distintos  $N_E$  que se asocian con el turno  $t$  en que el hidrante  $n$  participa, y se evalúa  $CP_{n,t}^i$  para cada escenario  $i$  en cada hidrante, el parámetro de fiabilidad en presiones en cada hidrante ( $FP_n$ ) se define como sigue:

$$FP_n = \frac{1}{N_E} \sum_{i=1}^{N_E} CP_{n,t}^i \quad (5)$$

$FP_n$  representa la ratio de número de escenarios o turnos en que la presión fue suficiente respecto al total de posibles turnos ensayados en que el hidrante  $n$  participa. Este parámetro calculado para cada hidrante identifica la vulnerabilidad del hidrante ante cambios en la organización de los turnos, y permite discriminar si existen fallos, esporádicos o frecuentes, en solo unos hidrantes determinados, o en todo el conjunto de ellos.

Si en la red existen  $N_h$  hidrantes en total, el indicador de flexibilidad del sistema frente a cambio de turnos, IFCT, se define como el promedio de la fiabilidad en las presiones de todos los hidrantes.

$$IFCT = \frac{1}{N_h} \sum_{n=1}^{N_h} FP_n \quad (6)$$

El IFCT es un indicador sintético que amortigua las posibles insuficiencias de presión ante cambios de turnos que estén localizados en pocos hidrantes. Si su valor es alto, es decir próximo a 1, se deduce que todos los hidrantes del sistema mantienen presión suficiente ante

cualquier cambio de turno, indicando alta flexibilidad de la RCRP. Si el índice es bajo (valores cerca de 0), la incapacidad de suministrar presión suficiente fuera del turno de diseño es frecuente y afecta a muchos hidrantes de la RCRP (baja flexibilidad).

## **Procedimiento para validación del algoritmo híbrido (AG-PNL) y su aplicación al diseño de RCRP**

Con objeto de verificar la correcta implementación del AG-PNL, investigar las prestaciones que suministra, y evaluar la relación costo *versus* flexibilidad de los sistemas diseñados, se ha desarrollado una metodología sistemática que se resume en los siguientes pasos.

1. Calibración de los parámetros que influyen en la obtención de soluciones del AG.

2. Comparación de los resultados con otros algoritmos de diseño de redes a turnos en un conjunto de cuatro RCRP reales que se constituyen como casos de estudio.
3. Análisis de la flexibilidad de los diseños encontrados.

## **Análisis de sensibilidad, parámetros AG**

Para este estudio se han tomado como tamaños de la población valores entre 50 y 200 individuos para el conjunto de redes seleccionadas. Además, se han fijado como valores de referencia para el operador de cruzamiento una probabilidad de cruce ( $P_c$ ) de 0.5 (Mora, 2012). Por otro lado, Mora-Melia *et al.* (2013) proponen determinar la probabilidad de mutación ( $P_m$ ) en función de la cantidad de variables de decisión del problema. Estos autores proponen tomar la inversa, es decir,  $1/N_h$  y definen el espacio de las soluciones factibles para reducir el tiempo de búsqueda. Valores cercanos a 0.01 indican que el proceso utiliza un espacio grande para generar la solución óptima, valores cerca de 1 limitan la búsqueda. El número de hidrantes es diferente en cada una de las redes de estudio y se utilizará este criterio como valor de referencia.

Así, para ajustar el AG, se han probado valores de población de 50, 100 y 200 individuos; probabilidades de cruce de 0.1 y 0.5, y valores de  $P_m$  entre  $1/N_{VD}$  y 0.9.

## Comparación de resultados con algoritmos alternativos

Para evaluar la efectividad del algoritmo híbrido (AG-PNL), en términos del costo de los diseños producidos, se compararon los costos totales obtenidos en el proceso de diseño óptimo de un conjunto de redes mediante AG-PNL con otros tres métodos de diseño alternativos.

Los tres métodos alternativos empleados utilizan variantes de un algoritmo basado en el uso de multiplicadores de Lagrange, (conocido en la literatura de diseño de redes como serie económica, MSEM). Este método fue mejorado para RCRP a la demanda (González & Aliod, 2003) y después se extendió para RCRP a turnos (García *et al.*, 2011). Tal algoritmo está implementado en el *software GESTAR 2016*. *GESTAR 2016* es un paquete integrado y concebido para el diseño y análisis de RCRP. Es muy usado en el proyecto y la gestión de RCRP, y empleado en la literatura para la comparación de los costos de diseños a turnos y

a la demanda (Alduán & Monserrat, 2009; Monserrat *et al.*, 2012). También se usó uno de los módulos de esta aplicación *GESTAR* para facilitar el cómputo de los índices de  $FP_n$  en los hidrantes necesarios para el cálculo del *IFCT*.

Puesto que el método híbrido AG-PNL obtiene diámetros continuos, que es preciso normalizar al final del proceso, se incorporan en este trabajo ambos resultados. La nomenclatura y descripción de las alternativas de diseño comparadas se enuncian a continuación:

Método 1 (AG-PNL, diámetros continuos): asignación de turnos óptimos mediante AG y diseño de la red mediante PNL, sin ajuste de diámetros.

Método 2 (AG-PNL, diámetros normalizados): método 1 más normalización de los diámetros, mediante asignación automática a diámetros más próximos, y revisión para la verificación de presiones mínimas y velocidades máximas.

Método 3 (MSEM): dimensionado óptimo a turnos, a través de MSEM integrado en la herramienta *GESTAR*, con la asignación de turnos obtenidos con los métodos 1 y 2.

Método 4 (MSEM-tur-aleat): dimensionado óptimo a turnos, mediante MSEM integrado en la herramienta *GESTAR*, con asignación de turnos de modo arbitrario manual (sin optimización).

Método 5: diseño de la red operando a la demanda mediante

MSEM integrado en la herramienta *GESTAR*, con tiempo de riego total igual a la suma de los tiempos de los turnos.

## Casos de estudio

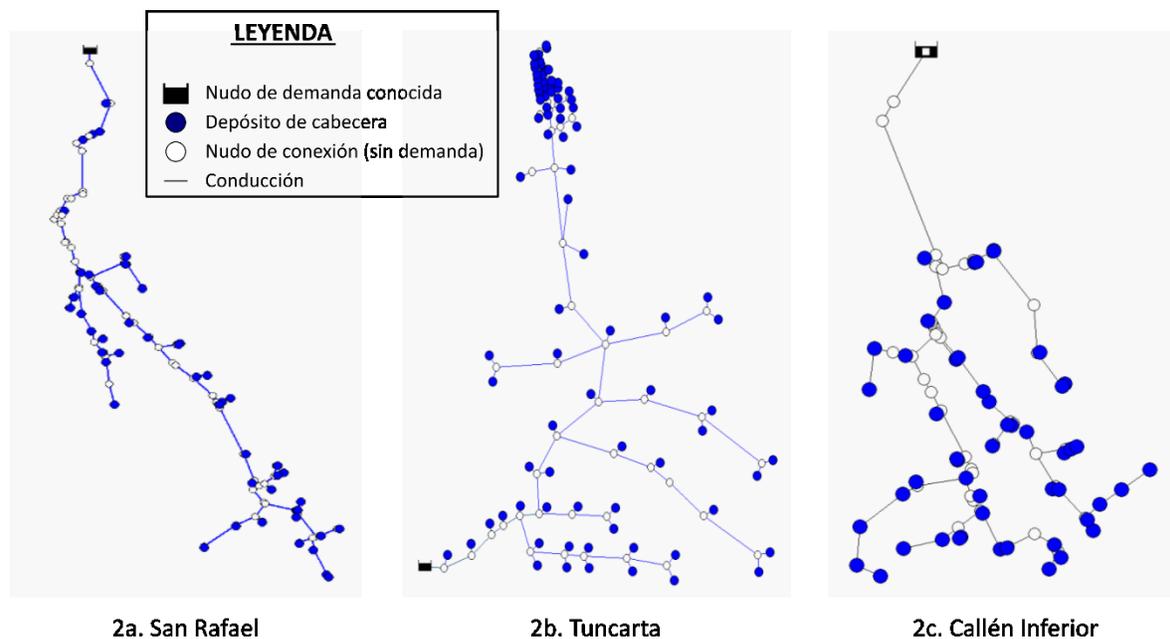
Para el presente estudio se seleccionaron cuatro redes de riego: dos ubicadas en Ecuador (San Rafael y Tuncarta) y dos en España (Callén Inferior y Valcuerna). En la Tabla 1 se muestra el número de hidrantes, la superficie de riego, la cota de superficie de embalse en cabecera, las presiones de consigna, el caudal ficticio continuo y la jornada efectiva de riego de las cuatro redes seleccionadas.

**Tabla 1.** Datos de entrada de las redes estudiadas.

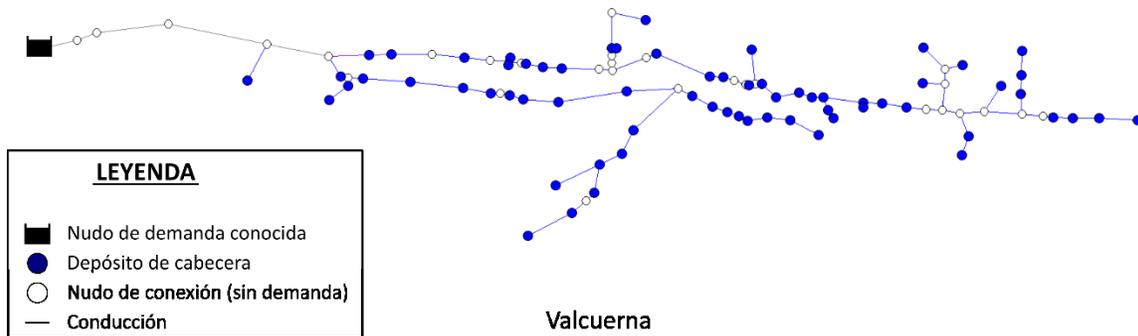
	<b>San Rafael</b>	<b>Tuncarta</b>	<b>Callén Inferior</b>	<b>Valcuerna</b>
Número de hidrantes	48	84	51	67
Superficie de riego (ha)	84.42	93.56	628.30	585.65
Cota embalse superficie libre (mca)	3 093.00	1 540.00	437.50	399.00

Presiones de consigna (mca)	40	40	45-65	40
Caudal ficticio continuo (l/s ha)	0.30	0.35	0.80	0.82
Jornada efectiva de riego (h)	17.49	23.82	23.52	23.62

En la Figura 2 y Figura 3 se muestra la topología de las diferentes redes de estudio. En dichas figuras se ha representado el nodo de cabecera que corresponde al embalse (nodo 0), los nodos de unión en la línea principal de la red y los nodos de demanda (hidrantes), y las conducciones.



**Figura 2.** Topología sistemas de riego: a) "San Rafael"; b) "Tuncarta"; c) "Callén Inferior".



**Figura 3.** Topología de sistema de riego "Valcuerna".

Un resumen de las características de los turnos para el diseño de las cuatro RCRP bajo estudio se presenta en la Tabla 2, donde se incluye el tiempo de la duración del turno y el caudal en la cabecera para cada turno.

**Tabla 2.** Características principales de las redes de estudio.

Red	Núm. hidr.	Núm. turnos	Turno 1		Turno 2		Turno 3	
			Tiempo riego (h)	Caudal (l/s)	Tiempo riego (h)	Caudal (l/s)	Tiempo riego (h)	Caudal (l/s)
San Rafael	48	3	5.83	31	5.83	35	5.83	38
Tuncarta	84	3	7.94	37	7.94	40	7.94	40
Callén-Inf	51	2	11.76	771	11.76	684		

Valcuerna	67	2	11.81	808	11.81	757		
-----------	----	---	-------	-----	-------	-----	--	--

## Resultados y discusión

### Análisis de sensibilidad y calibración de los parámetros del algoritmo híbrido AG-PNL

Los resultados del costo de los diseños obtenidos por el algoritmo híbrido AG-PNL para cada uno de los casos de estudio considerados se muestran en la Tabla 3, en función de dos conjuntos de parámetros de configuración del AG de acuerdo con lo expuesto en el apartado "Análisis de sensibilidad parámetros AG". En el primer conjunto de parámetros, denominado "P. Unif." (parámetros uniformes) la configuración de los parámetros de probabilidad de cruce ( $P_c$ ), probabilidad de mutación ( $P_m$ ) y tamaño de población es asignada al inicio por defecto y de manera uniforme para todos los casos, con valores de 0.1, 0.9 y 200,

respectivamente. El segundo conjunto, denotado como “P. Calibr.” (parámetros calibrados) corresponde a una combinación de parámetros calibrada para que, en cada caso, conduzca al mínimo costo, reduciendo además los tiempos de cálculo, encontrándose ambas configuraciones en rangos extremos de  $P_m$ . El ordenador utilizado dispone de un procesador Core i7 a 3.40 GHz, con una memoria RAM de 16 Gb. La Tabla 3 incluye el tiempo de ejecución del algoritmo, número de ensayos o ejecuciones, el costo total del diseño de la red directamente obtenido por el AG-PNL con diámetros continuos de tubería (método 1) y el costo total del diseño una vez normalizados los diámetros según el procedimiento descrito en el apartado “Comparación de resultados con algoritmos alternativos” (método 2).

**Tabla 3.** Resultados de calibración de operadores genéticos redes de estudio.

		$P_c$ (%)	$P_m$ (%)	Tamaño población	Tiempo ejec. (h)	Núm. ensayos	Costo diámetros continuos (USD)	Costo diámetros normaliz. (USD)
<b>San Rafael</b>	P. Unif.	0.1	0.900	200	11.20	1154	98 755.75	132 257.19
	P. Calibr.	0.5	0.021	50	0.45	104	88 778.01	137 722.00
<b>Tuncarta</b>	P. Unif.	0.1	0.900	200	14.10	1463	21 114.63	27 387.44
	P. Calibr.	0.5	0.012	50	5.00	2079	20 614.93	27 489.99
<b>Callén-Inf</b>	P. Unif.	0.1	0.900	200	8.45	947	1 717	1 876
							194.71	238.34

	P. Calibr.	0.5	0.020	50	3.17	1001	1 461 169.30	1 747 343.00
<b>Valcuerna</b>	P. Unif.	0.1	0.900	200	9.55	1970	5 718 114.75	7 111 668.49
	P. Calibr.	0.5	0.015	50	4.42	2735	5 416 379.63	6 981 602.00

Como se puede observar, las diferencias en el costo de los diseños con diámetros normalizados para los casos de estudio, usando valores de operadores de cruce y mutación iniciales uniformes, o parámetros calibrados para cada caso, que suponen incluso valores extremos, es reducida. Sin embargo, el tiempo de cálculo sí se reduce de forma notable cuando los parámetros son calibrados debido al tamaño de población asociado (Tabla 3). En función de lo anterior, para los análisis y comparativas subsiguientes se adoptarán los resultados encontrados con parámetros uniformes, no calibrados *ad hoc* para cada caso, dado que representan la condición más desfavorable. Estos resultados demuestran la robustez y consistencia del algoritmo híbrido AG-PNL, presentado para encontrar soluciones viables al ser aplicado a casos de estudio de características diversificadas, incluso con parámetros  $P_c$  y  $P_m$  muy diversos, sin necesitar forzar la introducción *ad hoc* de perturbaciones en el proceso de mutación, como sucede en Farmani *et al.* (2007) por la alta dimensionalidad de las variables decisión que

supone tratar en el mismo AG tanto la asignación de turnos como de diámetros.

## **Comparación de costos y flexibilidad de los diseños del algoritmo híbrido AG-PNL y métodos de diseño alternativos**

Los resultados en términos de costo de las tuberías de las redes de los diseños óptimos de los casos de estudio para todos los métodos de diseño descritos en el apartado “Comparación de resultados con algoritmos alternativos” se presentan en la Tabla 4. También se incluye el valor del IFCT de las redes diseñadas con cada uno de dichos métodos.

**Tabla 4.** Valores de costos y IFCT para las redes de los casos de estudio en función del método de diseño.

Caso de estudio		Mét. 1	Mét. 2	Mét. 3	Mét. 4	Mét. 5
San Rafael	Costo US\$	98 755	132 257	132 976	146 556	195 698

	<b>IFCT</b>	0.80	0.90	0.82	0.77	0.91
<b>Tuncarta</b>	<b>Costo US\$</b>	21 114	27 387	27 191	28 274	34 012
	<b>IFCT</b>	0.77	1	0.88	0.86	0.99
<b>Callén Inf</b>	<b>Costo US\$</b>	1 717 194	1 876 238	1 900 494	1 925 878	2 461 679
	<b>IFCT</b>	0.88	0.81	0.81	0.80	0.99
<b>Valcuerna</b>	<b>Costo US\$</b>	5 718 114	7 111 668	6 885 207	8 370 887	6 883 102
	<b>IFCT</b>	0.91	0.94	0.93	0.92	0.97

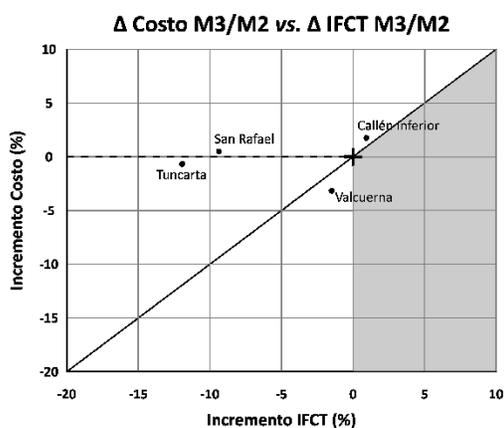
Se observa en la Tabla 4, que aún sin considerar el método 1 —resultado directo de aplicar el AG-PNL previo a la normalización de los diámetros— dicho algoritmo con normalización posterior (método 2) obtiene siempre menor costo que el procedimiento de diseño a turnos optimizado mediante algoritmos analíticos tradicionales, tipo serie económica, con turnos asignados de forma heurística (método 4). Al comparar los resultados del costo de las redes mediante el método 2, con el método 3, en que se ha introducido la asignación de turnos resultante mediante AG-PNL (métodos 1 y 2) se encuentran valores semejantes. Esto sugiere la determinante influencia de la asignación de turnos en la reducción de los costos en las redes diseñadas operando a turnos, siendo aparentemente esta capacidad del AG-PNL más relevante que el algoritmo en sí empleado en el dimensionado de las conducciones.

Una vez comprobada la eficacia del algoritmo híbrido AG-PNL para generar diseños en las redes a turnos más económicos que los encontrados por métodos alternativos tradicionales, se puede analizar la flexibilidad alcanzada en los diseños con el AG-PNL (método 2) respecto a los métodos alternativos de diseño presentados en este estudio. En la Tabla 5 se muestran las variaciones porcentuales de los costos de tuberías y del IFCT de los métodos 3, 4 y 5 (M3, M4 y M5, respectivamente, en dicha tabla) con respecto al método 2, que se toma como referencia en todas las variantes. Los porcentajes de incrementos de costo positivos ( $\Delta$  Costo%) y de incrementos de IFCT negativos ( $\Delta$  IFCT %) implican mayor precio y menor flexibilidad, respectivamente, de la alternativa indicada respecto a los resultados del AG-PN (M2).

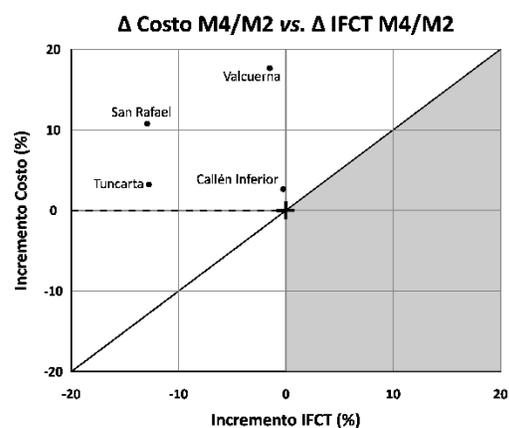
**Tabla 5.** Variaciones relativas de costos y de IFCT para los casos de estudio.

CASO	(M3-M2)/M2 %		(M4-M2)/M2 %		(M5-M2)/M2 %	
	$\Delta$ IFCT (%)	$\Delta$ costo (%)	$\Delta$ IFCT (%)	$\Delta$ costo (%)	$\Delta$ IFCT (%)	$\Delta$ costo (%)
<b>San Rafael</b>	-8.97	0.54	-13.94	10.81	1.42	47.97
<b>Tuncarta</b>	-11.97	-0.72	-13.71	3.24	-0.41	24.19
<b>Callen Inferior</b>	0.93	1.29	-0.35	2.65	22.66	31.20
<b>Valcuerna</b>	-1.48	-3.18	-2.01	17.71	3.33	-3.21

En la Figura 4 (a, b) se correlacionan los incrementos porcentuales (con su signo) de costo ( $\Delta$  costo%) *versus* el incremento respectivo del IFCT ( $\Delta$  IFCT %) para los métodos 3 y 4.



**Figura 4a. Comparativa M3/M2**



**Figura 4b. Comparativa M4/M2**

**Figura 4.** a) Variación relativa de costo *versus* variación relativa de IFCT M3/M2 para casos de estudio; b) variación relativa de costo *versus* variación relativa de IFCT M4/M2 para casos de estudio.

De la comparación entre el método 3 (que ha requerido de información de los turnos óptimos obtenidos del método 2) y el método 2, se observa en la Tabla 5 (columna primera) y Figura 4a, que en los diseños de RCRP a turnos con el método 3, los costos son semejantes al método 2, pero éste genera diseños más flexibles. Con el método 3, la flexibilidad de las redes disminuye en un promedio total de -5.37%,

excepto para la red Callén Inferior, donde la flexibilidad aumentó de modo ligero (0.92%).

El método 4 no sólo genera diseños más costosos sino menos flexibles que el método 2 (ver Tabla 5, segunda columna, y Figura 4b). Se observa una tendencia de incremento de los costos totales de las redes (promedio: 8.6%) y una reducción de la flexibilidad (promedio: -7.50%). La razón es la falta de optimización de los turnos que suponen el método 4, lo que de nuevo subraya la gran importancia de la asignación de turnos en la concepción del diseño.

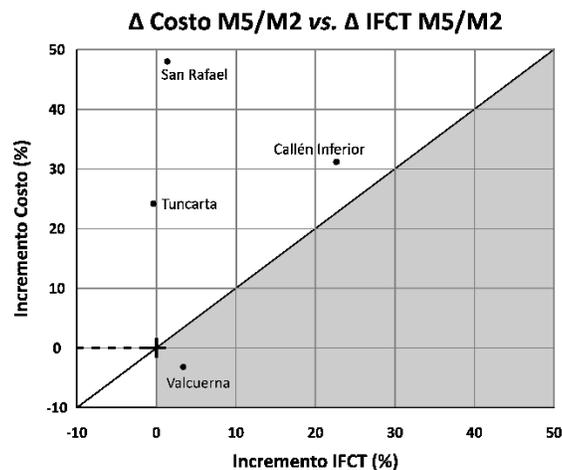
Todo ello indica que el algoritmo AG-PNL no sólo genera diseños con resultados más económicos que los procedimientos alternativos de diseño a turnos barajados, sino que éstos son además más flexibles frente a los cambios de turnos sobrevenidos.

## **Diseños a turnos vs. diseños a la demanda**

Como resultado colateral, a la luz de los análisis precedentes, se ha inferido un criterio para ayudar a la toma racional de decisiones a la hora de establecer la conveniencia de un diseño a turnos o ante la

demanda de una nueva RCRP. Este criterio consiste en relacionar los costos y flexibilidad del diseño a turnos (método 2) con el del diseño a la demanda (método 5).

Con los datos de la Tabla 5 (tercera columna), se confecciona la Figura 5. En el eje de las abscisas se representa el porcentaje del incremento del IFCT del diseño a la demanda (método 5) en relación con el diseño a turnos (método 2). El eje de las ordenadas indica el porcentaje de incremento de costo del diseño a la demanda (método 5) en cuanto al diseño a turnos (método 2). La línea diagonal marcada indica la región donde el incremento de costos crece de forma semejante al aumento de flexibilidad.



**Figura 5.** Variaciones relativas de costo *versus* variaciones relativas de IFCT al pasar a un diseño a la demanda (M5) desde un diseño a turnos (M2) para los casos de estudio.

Cuando los incrementos de costo frente al incremento de la flexibilidad (IFCT) se localicen netamente por encima de dicha línea, el diseño a turnos será el más indicado, pues los incrementos de costo del diseño a la demanda respecto al diseño a turnos superarán a los aumentos de flexibilidad correspondientes. Los casos que se sitúen próximos a dicha línea o netamente por debajo (zona sombreada de la Figura 5) apuntarían a una preferencia de un diseño a la demanda. Estas condiciones se pueden formalizar afirmando que el diseño a la demanda será recomendable si:

$$\frac{\Delta C (\%)}{\Delta IFCT (\%)} \leq 1 \quad (7)$$

En caso contrario, será más aconsejable realizar un diseño a turnos. Este criterio no puede tomarse de forma absoluta sino indicativa, y debe complementarse con otros parámetros importantes en la toma de decisiones, como se expone en Espinosa *et al.* (2016).

Al aplicar este criterio a los cuatro casos de estudio, se evidencia que en las redes Tuncarta y San Rafael el costo se incrementa de forma notable (en promedio 36%) sin mejorar la flexibilidad y en la Figura 5 se sitúan netamente muy por encima de la zona sombreada. Para estas

redes se aconsejaría realizar el diseño con la modalidad a turnos. Para la red de Callén Inferior, el IFCP y el costo aumentaron 20 y 30%, respectivamente, situándose en el umbral de la conveniencia del diseño a la demanda. Por lo tanto, en tales redes podría ser aconsejable un diseño de la red operando a la demanda para obtener mejores ventajas en explotación del sistema, considerando los recursos disponibles. Para el caso Valcuerna, el diseño a la demanda resultó de menor costo que el diseño a turnos. Esto se debe a que los tiempos de apertura de los hidrantes son muy distintos y, en consecuencia, los caudales de diseño a la demanda resultan menores que los de diseño a turnos. Por este motivo, la mejor opción será realizar el diseño a la demanda, a no ser que se redefiniera tanto el número de turnos como la duración de los mismos, y se procediera a modificar las dotaciones para homogeneizar los tiempos de apertura de los hidrantes. Se observa una elevada variabilidad de las diferencias de costos entre diseños a la demanda y a turnos según la red de cada caso de estudio, con unos ahorros en el diseño a turnos respecto a la demanda situados entre 19 y 32%. Tales variaciones están en línea con lo observado en otras investigaciones centradas en establecer comparativas entre diseños a la demanda y a turnos. En la red estudiada en Espinosa *et al.* (2016), el ahorro del sistema a turnos respecto a la demanda es de 22%. En la red analizada por Alduán y Monserrat (2009), dicho ahorro es de 15% y en los tres casos encontrados en Monserrat *et al.* (2012) se encuentra en un rango

de 5 a 9%. El que en esta investigación se hayan encontrado ahorros generalmente mayores se interpreta que se debe al hecho de haber optimizado la asignación de turnos, como sucede también en el caso presentado en Farmani *et al.* (2007), en el cual el ahorro ascendía hasta 55%.

## Conclusiones

Se ha presentado un algoritmo híbrido (AG-PNL) que ha demostrado ser robusto y eficaz para obtener diseños de RCRP de mínimo costo, en donde las variables de decisión que se optimizan de modo simultáneo son la asignación de turnos a los hidrantes y la variable de diámetro a cada tramo de tubería. La calibración de los parámetros que controlan la evolución del AG involucrado ha concluido que el tiempo de cálculo requerido es sensible a los mismos, pero no lo son tanto los costos mínimos encontrados. El algoritmo y sus prestaciones se han validado mediante la aplicación a cuatro casos de estudio reales. Los resultados se han comparado con procedimientos de diseño óptimo alternativos de

RCRP, basados en algoritmos del tipo serie económica, que se ejecutan en tiempos muy reducidos, encontrándose que el algoritmo híbrido AG-PNL, si bien requiere de mucho mayor tiempo de cálculo, genera diseños de menor costo, y que dicha economía se debe en gran parte a la optimización de turnos que provee.

Se ha introducido además un parámetro indicador de la flexibilidad de una RCRP respecto a los cambios de turnos, IFCT, que se ha utilizado para evaluar la capacidad de adaptación de los diseños encontrados ante cambios posteriores de la configuración de turnos. Se concluye que el algoritmo híbrido AG-PNL no sólo produce diseños más económicos, sino que además éstos son más flexibles que los métodos alternativos de diseño a turnos con los que se ha comparado.

Por último, la correlación de las variaciones del indicador IFCT con las variaciones del valor del costo de la red, al pasar de un diseño a turnos a un diseño a la demanda, ha permitido formular un criterio racional complementario para ayudar a la decisión sobre el tipo de diseño más conveniente de una RCRP a la demanda o turnos.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a la Universidad Técnica Particular de Loja por el auspicio brindado para el desarrollo de la presente investigación; al Dr. Andreas Fries y al Ing. José María Ciria por su colaboración.

## Referencias

- Alduán, A., & Monserrat, J. (2009). Estudio comparativo entre la organización a la demanda o por turnos en redes de riego a presión. *Ingeniería del Agua*, 16(3), 235-244. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/2951/2954>
- Boulos, P. F., Wu, Z., Orr, C. H., Moore, M., Hsiung, P., & Thomas, D. (2001). Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms. *Distribution System Symposium. American Water Works Association (AWWA)*. Denver, Co., USA. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Optimal-Pump-Operation-of-Water-Distribution-Using-Boulos-Wu/30bd0b8898b9c7eede6581df60fe8aaf2964d0f7>
- Clément, R. (1966). Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande. *La Houille Blanche*, (5), 553-576, DOI: 10.1051/lhb/1966034.
- Cortés-Martínez, F., Treviño-Cansino, A., Alcorta-García, M. A., Sáenz-López, A., & González-Barrios, J. L. (2015). Optimización en el diseño de lagunas de estabilización con programación no lineal. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(2), 85-100. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n2/v6n2a6.pdf>

- Espinosa, E., Flores, M., Hernández, R.A., & Carrillo, F. (2016). Análisis técnico y económico del diseño de un sistema de riego a hidrante parcelario utilizando el método por turnos y la técnica de Clement. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 431-440. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n4/2395-8030-tl-34-04-00431.pdf>
- Deb, A. K. (1974). Least cost design of branched pipe network system. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 100(4), 821-835. Recuperado de <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0021690>
- Faci, E., García, S., Aliod, R., Paño, J., Seral, P., & García, A. (octubre, 2015). Algoritmos y herramientas para la aplicación de estrategias de reducción de costes energéticos en sistemas de riego a presión. J. En: Roldán-Cañas, J. (presidencia). *La precipitación y los procesos erosivos. Simposio llevado a cabo en las IV Jornadas de Ingeniería del Agua*. Organiza: Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua, Córdoba, España, 21-22 de octubre de 2015. Recuperado de <http://www.uco.es/jia2015/ponencias/b/b022.pdf>
- Farmani, R., Abadia, R., & Savic, D. (2007). Optimum design and management of pressurized branched irrigation networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(6), 528-537, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:6(528)

- Fernández, I., Montesinos, P., Camacho, E., & Rodríguez, J. A. (2017). Optimal design of pressurized irrigation networks to minimize the operational cost under different management scenarios. *Water Resources Management*, 31(6), 1995-2010, DOI: 10.1007/s11269-017-1629-2
- Frontline Systems Inc. (2011). *Frontline Solvers User Guide for Use with Excel 2003-2010 (Versión 11.5)*. Recuperado de [https://www.solver.com/files/\\_document/FrontlineSolvers\\_UserGuideV11.pdf](https://www.solver.com/files/_document/FrontlineSolvers_UserGuideV11.pdf)
- García, S., Ruiz, R., Aliod, R., Paño, J., Seral, P., & Faci, E. (junio, 2011). Nuevas herramientas implementadas en GESTAR 2010 para el dimensionado de tuberías principales en redes de distribución en parcela y redes de distribución general a turnos. En: Berbel-Vecino, J. (presidencia). *Hacia un regadío eficiente y rentable. Simposio llevado a cabo en el XXIX Congreso Nacional de Riegos*. Organiza: Agencia Española de Riegos y Drenajes Córdoba, España, 7-9 de junio de 2011. Recuperado de <http://www.aeryd.es/escaparate/gmms/aeryd/buscadortrabajos?accion=ver&id=7355>
- González, C., & Aliod, R. (mayo, 2003). Mejoras en el método de la serie económica para el dimensionado de redes ramificadas. En: Vélez-Sánchez, A. (presidencia). *Ingeniería del riego. Simposio llevado a cabo en el XXI Congreso Nacional de Riegos*. Organiza: Agencia

Española de Riegos y Drenajes Mérida, España, 6-8 de mayo de 2003. Recuperado de

<http://www.aeryd.es/escaparate/gmms/aeryd/buscadortrabajos?accion=ver&id=6715>

Holland, J. H. (1992). Genetic Algorithms. *Scientific American*, 267(1), 66-72, DOI: 10.1038/scientificamerican0792-66

Jiménez, M. A., Martínez, F., Bou, V., & Bartolí, H. J. (2010). Methodology for grouping intakes of pressurized irrigation networks into sectors to minimize energy consumption. *Biosystems Engineering*, 105(4), 429-438, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.12.014

Kale, R. V., Singh, R. P., & Mahar, P. S. (2008). Optimal design of pressurized irrigation subunit. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(2), 137-146, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(137)

Labye, Y. (1966). Etude des procedes de calcul ayant pour but de rendre minimal le cout d'un reseau de distribution d'eau sous pression. *La Houille Blanche*, (5), 577-583, DOI: 10.1051/lhb/1966035

Lamaddalena, N., Khadra, R., & Tlili, Y. (2012). Reliability-based pipe size computation of on-demand irrigation systems. *Water Resources Management*, 26(2), 307-328. DOI: 10.1007/s11269-011-9919-6

- Lamaddalena, N., & Sagardoy, J. (2000). *Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. Recuperado de [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=TWFiibeFFUC&oi=fnd&pg=PA1&ots=8Ck9thVE8i&sig=fsV4wuAIAAXMNtdI\\_jcbos-ALSc#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=TWFiibeFFUC&oi=fnd&pg=PA1&ots=8Ck9thVE8i&sig=fsV4wuAIAAXMNtdI_jcbos-ALSc#v=onepage&q&f=false)
- Lasdon, L. S., Fox, R. L., & Ratner, M. W. (1974). Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. *Revue Française d'Automatique, Informatique, Recherche Opérationnelle*, 3, 73-103. Recuperado de [http://www.numdam.org/item?id=RO\\_1974\\_\\_8\\_3\\_73\\_0](http://www.numdam.org/item?id=RO_1974__8_3_73_0)
- Monserrat, J., Alduán, A., Cots, L., & Barragán, J. (septiembre, 2012). ¿Turnos o demanda? En el proyecto de redes de distribución de riego a presión. *XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Organiza: IAHR Latin-American Division, San José, Costa Rica, 9-12 de septiembre de 2012. Recuperado de <https://repositori.udl.cat/bitstream/handle/10459.1/45935/Comparaci%F3n?sequence=1>
- Mora, D. (2012). *Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/16803>

- Mora-Melia, D., Iglesias, P. L., Martínez, F. J., & Fuertes-Miquel, V. S. (2013). Design of water distribution networks using a pseudo-genetic algorithm and sensitivity of genetic operators. *Water Resources Management*, 27(12), 4149-4162, DOI: 10.1007/s11269-013-0400-6
- Moradi-Jalal, M., & Karney, B. W. (2008). Optimal design and operation of irrigation pumping stations using mathematical programming and Genetic Algorithm (GA). *Journal of Hydraulic Research*, 46(2), 237-246, DOI: 10.1080/00221686.2008.9521858
- Palisade Corporation. (2010). *Guía para el uso de Evolver. Solver de algoritmo genético para Microsoft Excel (Versión 5.7)*. Recuperado de [http://www.palisade.com/downloads/manuals/ES/Evolver5\\_es.pdf](http://www.palisade.com/downloads/manuals/ES/Evolver5_es.pdf)
- Pérez, R., Martínez, F., & Vela, A. (1993). Improved design of branched networks bely using pressure-reducing valves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(2), 164-180, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(164)
- Planells, P., Ortega, J. F., Valiente, M., Montero, J., & Tarjuelo, J. M. (1999). Criterios para el diseño de redes colectivas de riego. *Ingeniería del Agua*, 6(1), 27-36, DOI: 10.4995/ia.1999.2773
- Reis, L. F. R., Porto, R. M., & Chaudhry, F. H. (1997). Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. *Journal of*

*Water Resources Planning and Management*, 123(6), 317-326,  
DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:6(317)

Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & López-Cruz, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(2), 177-183. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n2/v5n2a12.pdf>

Savic, A., & Walters, A. (1997). Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2), 67-77, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:2(67)

Simpson, A. R., Dandy, G. C., & Murphy, L. J. (1994). Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4), 423-443, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(423)

Theocharis, E., Tzimopoulos, D., Yannopoulos, I., & Sakellariou, M. (2006). Design of optimal irrigation networks. *Irrigation and Drainage*, 55, 21-32, DOI: 10.1002/ird.214