

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-02-04

Artículos

Aplicación del algoritmo multiobjetivo NSGA-II en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable.

Caso: ciudad de Huancavelica, Perú

Application of the NSGA-II multi-objective algorithm in the optimal design of drinking water distribution networks. Case: Huancavelica City, Peru

Tony Tunque-Dueñas¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7893-299X>

Franzua Ricra-Dueñas², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4181-7354>

Iván Ayala³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6906-4120>

Eliana Contreras-Lopez⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0685-2004>

Marcelo Portuguez-Maurtua⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2396-0074>

¹Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú, 2011151135@unh.edu.pe

²Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú, 2012151082@unh.edu.pe

³Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú, ivan.ayala@unh.edu.pe



⁴Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú,
econtrerasl@unmsm.edu.pe

⁵Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú,
mportuguez@lamolina.edu.pe

Autor para correspondencia: Tony Tunque-Dueñas,
2011151135@unh.edu.pe

Resumen

En los últimos tiempos se han desarrollado diversos algoritmos genéticos multiobjetivo y su aplicación en optimización de redes de distribución de agua potable, de los cuales NSGA-II ha mostrado un desempeño más sólido. Esta investigación muestra la aplicación de NSGA-II en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable considerando costo (I_C) y confiabilidad hidráulica (I_R) como funciones objetivo. La investigación se realizó en respuesta a un problema real relacionado con el suministro de agua en la ciudad de Huancavelica. Mediante la información obtenida a través de la EPS EMAPA Huancavelica S.A., y el lenguaje de programación Python, con el Toolkit de Epanet se valida NSGA-II, aplicándolo al diseño de la red de Hanoi. Una vez validado, se analiza la red de Huancavelica, que cuenta con un I_C de 0.31, equivalente a USD 140 099.89 y un I_R de 0.25, y se obtiene un diseño óptimo de red que precisa un I_C de 0.24 con un valor de USD 117 590.12 y un I_R de 0.23, lo cual permite apreciar una diferencia en el I_C de USD 22 509.77 y una reducción del I_R , que la hace una red mucho más confiable que satisface

simultáneamente las restricciones de presión mínima en todos los nudos, además de garantizar condiciones de falla durante su operación. Se determinó que NSGA-II es favorable para el diseño óptimo de redes de agua potable al considerar dos funciones objetivo de costo y confiabilidad hidráulica.

Palabras clave: NSGA-II, red de distribución de agua, costo, confiabilidad hidráulica

Abstract

In recent times, several multi-objective genetic algorithms and their application in optimization of drinking water distribution networks have been developed, of which NSGA-II has shown the strongest performance. This research shows the application of NSGA-II in the optimal design of drinking water distribution networks considering cost (I_C) and hydraulic reliability (I_R) as objective functions. The research was carried out in response to a real problem related to water supply in the city of Huancavelica. Using the information obtained from EPS EMAPA Huancavelica S.A., and the Python programming language with the Epanet Toolkit, NSGA-II is validated by applying it to the design of the Hanoi network. Once validated, the Huancavelica network is analyzed, which has a I_C of 0.31 equivalent to USD 140 099.89 and an I_R of 0.25, and an optimal network design is obtained, which has a I_C of 0.24 with a value of USD 117 590.12 and an I_R of 0.23, which allows appreciating a difference in the I_C of USD 22 509.77 and a reduction of the I_R , which makes it a much more reliable network that simultaneously satisfies the minimum pressure restrictions in all the nodes, in addition to

guaranteeing a capacity to withstand failure conditions during its operation. It is determined that NSGA-II is favorable for the optimal design of drinking water networks considering two objective functions of cost and hydraulic reliability.

Keywords: NSGA-II, water distribution network, cost, hydraulic reliability

Recibido: 27/03/2023

Aceptado: 31/10/2023

Publicado *online*: 04/12/2023

Introducción

Las redes de distribución de agua potable son mecanismos que alimentan o distribuyen agua desde las fuentes hacia la población; están constituidas por componentes hidráulicos conectados para suministrar a los consumidores agua adecuada y de calidad (Parvaze *et al.*, 2023). Una red de abastecimiento de agua urbana debe ser capaz de satisfacer las demandas de agua de los consumidores. Por ello, el fin común que tienen las empresas prestadoras del servicio de agua potable en el mundo es proporcionar un nivel adecuado de servicio y operación eficiente que cumpla con las regulaciones (Wright, Parpas, & Stoianov, 2015). Sin embargo, en los países en vías de desarrollo, las malas estrategias de las empresas de servicios públicos de agua para elegir adecuadamente los diámetros de tuberías dentro de los límites presupuestarios guían a un

diseño inadecuado de redes de distribución de agua potable, lo que se traduce en redes deficientes con condiciones de presión insuficientes para suministrar agua de manera continua a todos los usuarios (Saldarriaga *et al.*, 2022). En consecuencia, se incrementan los reclamos de los usuarios por el servicio ineficiente. Por ejemplo, en la atención de reclamos de la empresa prestadora de servicios de saneamiento EMAPA Huancavelica S. A., que opera y regula el funcionamiento de la red de la ciudad de Huancavelica (Perú), los reclamos operacionales ascienden a un 60 % siendo las de mayor incidencia: falta de agua, fugas en tuberías y bajas presiones (EMAPA-HVCA, S. A., 2018).

Aproximadamente el 80 % de la inversión de un proyecto de abastecimiento de agua consiste en su sistema de distribución (Sangroula, Han, Koo, Gnawali, & Yum, 2022). En los últimos años, se ha investigado ampliamente el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable por la necesidad de diseños eficientes y sostenibles con escasos recursos (Saldarriaga *et al.*, 2020). En la actualidad, el problema de diseño de una red implica distintos objetivos, como reducir el costo, incrementar la confiabilidad, minimizar riesgos e incrementar la calidad. Por lo tanto, el diseño es de naturaleza multiobjetivo (Ostfeld, 2015). Ante esta necesidad, las investigaciones se han enfocado en la aplicación de algoritmos evolutivos elitistas, como el algoritmo genético de clasificación no dominada (NSGA-II) (Yazdandoost & Izadi, 2016). Aunque se han aplicado diversos algoritmos multiobjetivo a la resolución de problemas de diseño óptimo de redes de distribución de agua potable, con la capacidad de obtener una compensación casi óptima entre costo y confiabilidad, NSGA-II es probablemente el algoritmo multiobjetivo más

famoso y estándar, que ha sido aplicado con éxito en distintos campos (Wang, Guidolin, Savic, & Kapelan, 2015).

Al respecto, Wang *et al.* (2015) investigaron dos objetivos aplicados a 12 redes y realizaron una evaluación comparativa de cinco algoritmos multiobjetivo. NSGA-II con un mínimo ajuste de sus parámetros fue la mejor opción para la optimización de dos objetivos en diseño de redes porque demostró los mejores logros en todos los problemas. Zheng, Zecchin, Maier y Simpson (2016) compararon tres algoritmos multiobjetivo NSGA-II, SAMODE y Borg en seis muestras con dos objetivos, centrándose en la eficacia de búsqueda y el tiempo de ejecución. Si bien los tres algoritmos fueron exitosos en la generación de soluciones no dominadas al inicio e intermedio de la búsqueda con mejoras graduales, NSGA-II ilustró un rendimiento más sólido para encontrar los frentes de dominancia debido a su operador genético de cruce binario. Por otro lado, Zarei, Azari y Heidari (2022) definieron el problema de optimización en varias redes de muestra con los objetivos de minimización de costos y del déficit de presión en toda la red. Para el proceso de optimización codificaron los algoritmos NSGA-II y MOPSO. Los resultados mostraron que estos algoritmos tuvieron una alta capacidad para encontrar soluciones óptimas y capacidad de optimizar la red en términos de costo y presión al encontrar el diámetro de tubería adecuado. Cabe mencionar que NSGA-II utilizó menos tiempo de ejecución y menos repeticiones que MOPSO. La optimización multiobjetivo del diseño de las redes de distribución de agua es el paso previo hacia la gestión adecuada de estas infraestructuras. Por ello, la red de distribución de agua existente en la ciudad de Huancavelica puede ser un caso adecuado para el estudio

de la optimización multiobjetivo del diseño de las redes de distribución de agua mediante NSGA-II.

Por consiguiente, el objetivo de la presente investigación fue la aplicación de NSGA-II en el diseño de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica, en función de los objetivos de costo y confiabilidad hidráulica. Además de implementar un operador de distancia de hacinamiento modificado para mejorar el espacio de soluciones con una mejor distribución. Para ello, se implementó el algoritmo NSGA-II en el lenguaje de programación Python y se incorporó el Toolkit de EPANET (EPANETTOOLS 1.0.0) como motor de cálculo hidráulico de la red. Las alternativas generadas por NSGA-II fueron evaluadas por EPANET y las funciones objetivo se analizaron en el lenguaje Python.

Materiales y métodos

Área de estudio

El caso de estudio está delimitado dentro del sistema de abastecimiento de agua potable de los distritos de Huancavelica y Ascensión, provincia y departamento de Huancavelica, Perú, respectivamente (Figura 1). La red de distribución consta de 10 sectores operacionales o zonas de suministro autónomas administradas y operadas por la empresa prestadora de servicios de saneamiento EMAPA Huancavelica S. A. Los sectores operacionales seleccionados fueron el sector 3 y sector 5, los cuales se encontraban abastecidos por una entrada de caudal ubicado al noroeste

del sector 5. Dichos sectores son zonas céntricas consolidadas y desarrollan mayor actividad comercial, estatal y privada.

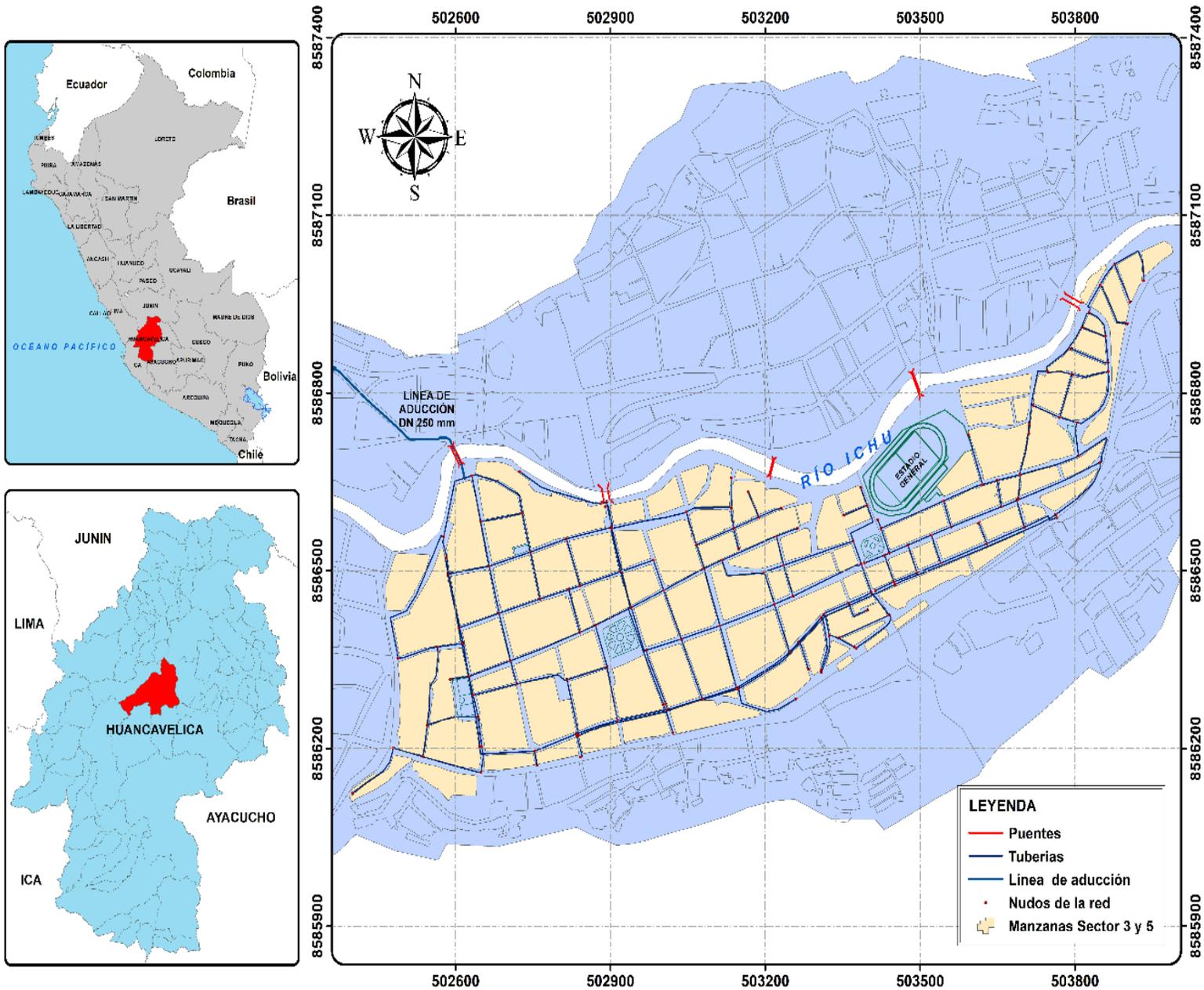


Figura 1. Zona de ubicación.

Optimización de redes de abastecimiento de agua

El problema de optimización multiobjetivo en este estudio se define de tal manera que el primer objetivo fue minimizar el costo de diseño de la red versus el segundo objetivo, que fue maximizar la confiabilidad hidráulica de toda la red.

Objetivo 1: minimizar el costo de diseño de la red

El costo de las tuberías se determinó con la Ecuación (1), que depende del costo del diámetro y de la longitud de la tubería (Saldarriaga, 2007):

$$C_{total} = \sum_{i=1}^{NT} Cd_i L_i \quad (1)$$

Donde:

C_{total} = costo total de la red

NT = número de tuberías de la red

Cd_i = costo del diámetro por metro lineal de cada tubería particular

L_i = longitud de cada tubería particular

El costo total de la red está determinado por el índice de costo (Ecuación (2)), el cual es un valor adimensional que se encuentra en el rango de 0 a 1. Cuando tiende hacia 0 representa el costo mínimo, mientras que cuando se acerca a 1 indica el costo máximo:

$$I_C = \frac{C_{total} - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad (2)$$

Donde:

I_C = índice de costo de la red

C_{total} = costo total de la red

C_{max} = costo máximo de la red

C_{min} = costo mínimo de la red

Objetivo 2: maximizar la confiabilidad hidráulica de la red

El concepto de confiabilidad en una función multiobjetivo todavía es un campo en investigación. Sin embargo, la confiabilidad se puede expresar mediante la "resiliencia", que es la capacidad intrínseca de un sistema para superar fallas. Está representado por el índice de resiliencia (I_r), para tener en cuenta que las redes de distribución de agua son sistemas diseñados en bucle, y es una manera de aumentar la confiabilidad hidráulica y la disponibilidad de agua durante posibles fallas de las tuberías (Todini, 2000). El índice de resiliencia de la red de acuerdo con la Ecuación (3) considera la uniformidad de diámetros en las tuberías y las presiones excedentes en los nudos (Prasad & Park, 2004):

$$I_r = \frac{\sum_{j=1}^{nn} C_j Q_j (H_j - H_j^*)}{\sum_{r=1}^{nr} Q_r H_r - \sum_{j=1}^{nn} Q_j H_j^*} \quad (3)$$

Donde:

I_r = índice de resiliencia de la red

nn = número de nudos de la red

nr = número de reservorios de la red

C_j = coeficiente de conectividad

Q_j = caudal de demanda en cada nudo

H_j = altura piezométrica real

H_j^* = altura piezométrica ideal

Q_r = caudal entregado por el reservorio

H_r = la altura piezométrica del reservorio

Para este caso se buscan reducir ambos objetivos, razón por la cual el índice de resiliencia está dado por la Ecuación (4):

$$I_R = 1 - I_r \quad (4)$$

El índice de resiliencia (I_R) es un valor adimensional definido entre 0 y 1; si el índice de resiliencia supera el valor de 0.5, el sistema es muy vulnerable a fallas, fugas o rupturas en las tuberías. En caso de que la red tenga presiones negativas se considera con el valor de 1 y se entiende como una red no resiliente.

Número de restricciones incumplidas de la red (N_{RIR})

La velocidad del fluido en las tuberías se consideró entre 0.6 y 3.0 m/s, en casos justificados hasta 5 m/s, y la presión dinámica no menor a 10 m, de columna de agua de acuerdo con la norma OS.050 (RNE, 2009).

Ecuación para el cálculo de la pérdida de presión en tuberías

Ecuación de Darcy-Weisbach

La ecuación de Darcy-Weisbach, considerada una ecuación universal, destaca como una de las expresiones matemáticas más utilizadas para calcular la pérdida de presión en tuberías. Su amplitud radica en su relación tanto con las propiedades del fluido en movimiento como con el material del conducto, lo que permite su aplicación a una diversidad de materiales y diámetros de tuberías (Renata, Pereira, da Silva, Castro, & Saad, 2020):

$$H_f = f \frac{l v^2}{d 2g} \quad (5)$$

Donde:

H_f = pérdida de carga debido a la fricción

f = factor de fricción de Darcy

l = longitud de la tubería

v = velocidad media de flujo

d = diámetro de la tubería

g = aceleración de la gravedad

Ecuaciones explícitas para calcular el factor de fricción

Ecuación de Colebrook-White

La ecuación de Colebrook es una fórmula matemática que relaciona el factor de fricción de un fluido que fluye a través de una tubería con el número de Reynolds y la rugosidad de la pared de la tubería. La ecuación de Colebrook es una ecuación empírica, lo cual significa que se basa en datos experimentales y no puede resolverse de forma explícita (Brkic & Praks, 2018):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \log \left(\frac{K_s}{3.7 d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

Donde:

f = factor de fricción de Darcy

K_s = rugosidad absoluta

Re = número de Reynolds

d = diámetro

Ecuación de Swamee y Jain

El principal desafío para obtener una solución directa radica en la naturaleza implícita de la ecuación de Colebrook-White, que rige la resistencia al flujo en tuberías de uso común. Esto implica la realización de una serie de pruebas y ajustes para lograr resultados de alta precisión (Swamee & Jain, 1976). En este contexto, Swamee y Jain desarrollaron una ecuación explícita para el factor de fricción, que ofrece una aproximación matemáticamente precisa de la ecuación de Colebrook-White. Dicha ecuación se ha convertido en un estándar en el campo de la ingeniería y se utiliza de modo amplia, como por ejemplo en aplicaciones como el *software* EPANET. La ecuación se representa de la siguiente forma:

$$f = \frac{0.25}{\left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (7)$$

Donde:

f = factor de fricción

ε = rugosidad de la tubería

d = diámetro de la tubería

Re = número de Reynolds

EPANET

Es un *software* diseñado para llevar a cabo el análisis hidráulico y evaluar el comportamiento de la calidad del agua en sistemas de distribución de agua bajo presión. Incorpora un simulador hidráulico avanzado fundamentado en el principio de conservación de la masa y en ecuaciones de pérdida de carga, lo que facilita la obtención de resultados confiables, incluso en redes de distribución de agua con un elevado número de nodos y tuberías. Además, incluye una caja de herramientas conocida como Toolkit, que consiste en una librería dinámica con una variedad de funciones. Esto posibilita a los usuarios desarrollar diversas aplicaciones en varios lenguajes de programación que necesiten llevar a cabo múltiples simulaciones hidráulicas o procesar información de manera más detallada (Rossman, 2000).

NSGA-II

Deb, Pratap, Agarwal Y Meyarivan (2002) desarrollaron el algoritmo genético Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II), el cual se caracteriza por su enfoque de clasificación rápida de soluciones no dominadas y la inclusión de un operador de selección que permite identificar las soluciones óptimas. Este algoritmo surge como una versión mejorada de su predecesor (NSGA-I), el cual fue mejorado respecto a su alta carga computacional, su enfoque no elitista y la necesidad de especificar un parámetro para garantizar la diversidad de soluciones.

NSGA-II ha demostrado excelentes resultados en la resolución de problemas complejos, pues logra una distribución de soluciones más

efectiva y una convergencia más rápida hacia el frente óptimo de Pareto. Por esta razón se ha convertido en la opción más popular y ampliamente utilizada en la optimización multiobjetivo, gracias a la implementación de nuevas y mejores estrategias de búsqueda. El esquema principal se detalla en la Figura 2.

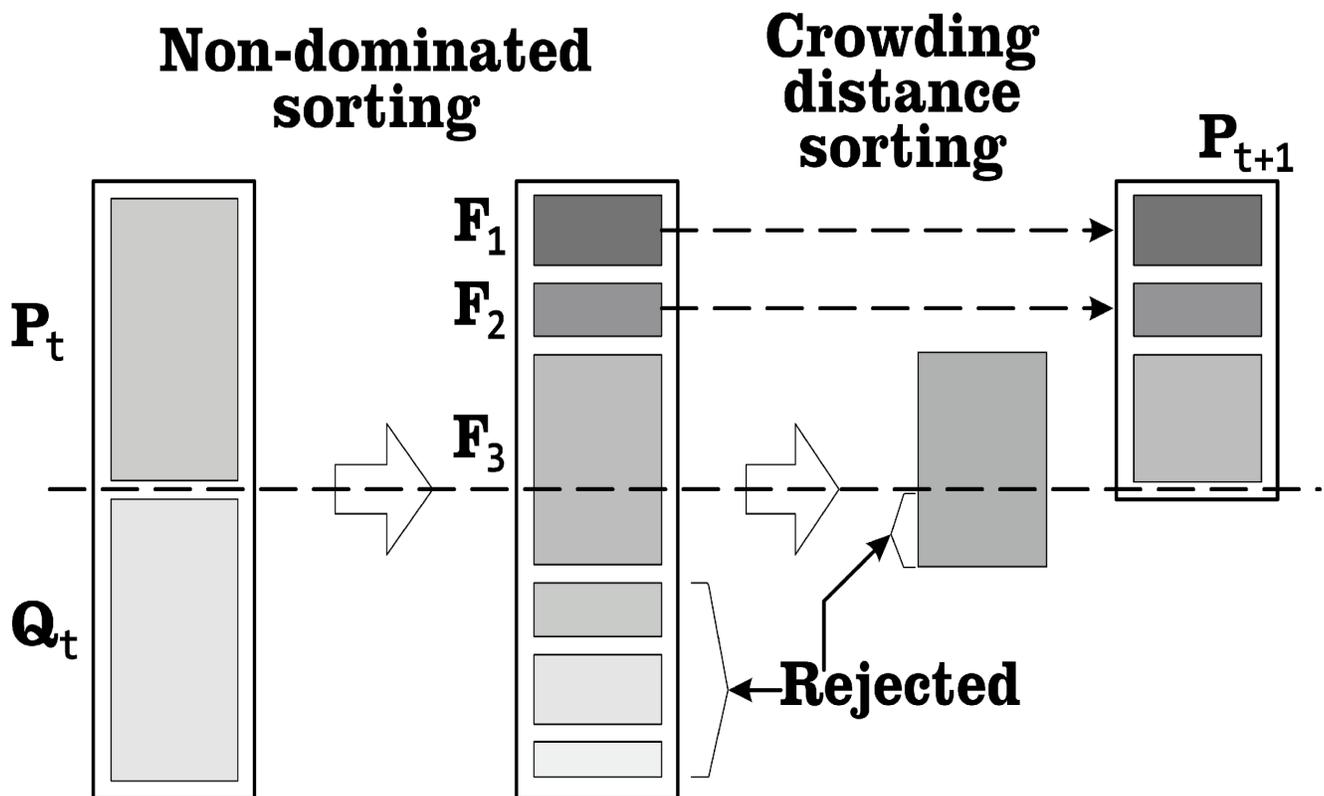


Figura 2. Proceso NSGA-II. Fuente: Deb *et al.* (2002).

El proceso del algoritmo inicia con la creación de una población aleatoria denominada P_0 (tamaño N). En la primera generación, esta población se convierte en la población padre, P_t (tamaño N). A través de operadores genéticos de selección, cruzamiento y mutación, se genera

una población descendiente Q_t (tamaño N). Luego, estas dos poblaciones se combinan para formar una población R_t (tamaño $2N$).

A continuación, se lleva a cabo un ordenamiento no dominado (non-dominated sorting) para categorizar los individuos en distintos frentes de Pareto. La nueva población se construye seleccionando individuos de estos frentes no dominados, comenzando con el mejor frente no dominado (F_1), seguido del segundo frente (F_2), tercer frente (F_3) y así sucesivamente hasta tener el número necesario de soluciones que conformen la nueva población (tamaño N).

Puede darse el caso de que el número de soluciones requerido para la nueva población sea compuesto por las soluciones de los primeros frentes y solo necesite parte del siguiente frente. Para ello, se debe seleccionar el número necesario de soluciones de dicho frente con base en la distancia de hacinamiento (crowding distance sorting), para así conservar la diversidad. Los frentes y las soluciones que no se consideraron se desechan. La población resultante P_{t+1} (tamaño N) se convierte en la nueva población padre P_t , la cual se prepara para repetir el procedimiento.

Ordenamiento no dominado

La clasificación no dominada es una técnica utilizada para asignar diferentes frentes de Pareto en una población de soluciones de acuerdo con sus relaciones de dominancia. Debido a que los individuos de la población en el primer frente tienen el valor máximo de aptitud, pueden

obtener más probabilidad de reproducción (Rahimi, Gandomi, Deb, Chen, & Nikoo, 2022).

Según Prasad y Park (2004), para un problema multiobjetivo, cualquiera de dos soluciones p y q puede presentar una de dos situaciones posibles: una puede dominar a la otra o ninguna dominar a la otra. Para establecer que una solución p domina a la solución q , se deben cumplir las siguientes condiciones: 1) la solución p es mejor que la solución q en todos los objetivos, o 2) la solución p es estrictamente mejor que la solución q en al menos un objetivo.

Para asignar los frentes de Pareto se analizan todas las soluciones entre sí; en primer lugar, cada solución posee dos parámetros: n_p (número de soluciones que dominan a la solución p) y S_p (conjunto de soluciones que p domina).

Ahora, se evalúa la solución p con cada solución q para calcular sus parámetros n_p y S_p . Si el valor de n_p es igual a 0, entonces la solución p se incluye en el primer frente no dominado. Este procedimiento se realiza hasta obtener los valores de n_p y S_p para todas las soluciones.

Cada valoración de p con $n_p = 0$ se evalúa con cada elemento del conjunto S_p de q y disminuye su cuenta de dominación en 1. Si en algún momento el contador de dominación de algún elemento llega a 0, se agrega a una lista denominada Q. Estos elementos constituyen el segundo frente no dominado. El proceso se repite para cada miembro de la lista Q, identificando así los frentes restantes de manera sucesiva.

Un frente no dominado puede estar conformado por una, dos o incluso más soluciones no dominadas. En las etapas iniciales del

algoritmo, es evidente que los primeros frentes contienen un conjunto reducido de soluciones no dominadas. No obstante, a medida que el proceso avanza a través de un mayor número de generaciones, se observa que los primeros frentes comienzan a aumentar su conjunto de soluciones no dominadas hasta que finalmente solo exista un frente. Cuando ya no sea posible mejorar un objetivo sin perjudicar al otro, este será el conjunto de soluciones óptimas, el cual se denomina solución óptima de Pareto (Gunantara, 2018).

Distancia de hacinamiento

La distancia de hacinamiento, basado en la diversidad de soluciones, es un mecanismo para asegurar una buena distribución de soluciones en cada generación, para evitar aglomeración y superposición de soluciones. Su fórmula está representada por la Ecuación (8) (Peñuela & Granada, 2007):

$$d_i = \sum_{m=1}^M \left| \frac{f_m^{(i+1)} - f_m^{(i-1)}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \right| \quad (8)$$

Donde:

d_i = distancia de hacinamiento de cada individuo

$f_m^{(i+1)}$ y $f_m^{(i-1)}$ = i -ésimos valores objetivo para las dos soluciones adyacentes

f_m^{max} y f_m^{min} = valores de aptitud máxima y mínima

M = número de objetivos

Distancia de hacinamiento modificada

Se plantea una alternativa a la distancia de hacinamiento inicial, realizando una modificación en su ecuación. Por lo tanto, para un conjunto de soluciones en competencia, la alternativa que introduce mayor nivel de diversidad es la que tiene mayor distancia de hacinamiento (Chu & Yu, 2018):

$$d_i = \sum_{m=1}^M \left| \frac{f_m^{(I_{i+1}^m)} - f_m^{(I_i^m)}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \right| \quad (9)$$

Comparado con la ecuación inicial, la nueva definición solo convierte $f_m^{(I_{i-1}^m)}$ en $f_m^{(I_i^m)}$. Este cambio hereda todas las ventajas de la distancia de hacinamiento inicial y no requiere de otra modificación sustancial. Si se usa el ejemplo (Figura 3), la distancia de hacinamiento de la solución F es el pequeño rectángulo al igual que la solución E, lo cual no es del todo cierto. En la nueva definición, ya sea que una solución se encuentre en el punto E o F hace la diferencia, la primera tendrá alta prioridad para ser seleccionado, lo que compensaría la desventaja de la ecuación inicial.

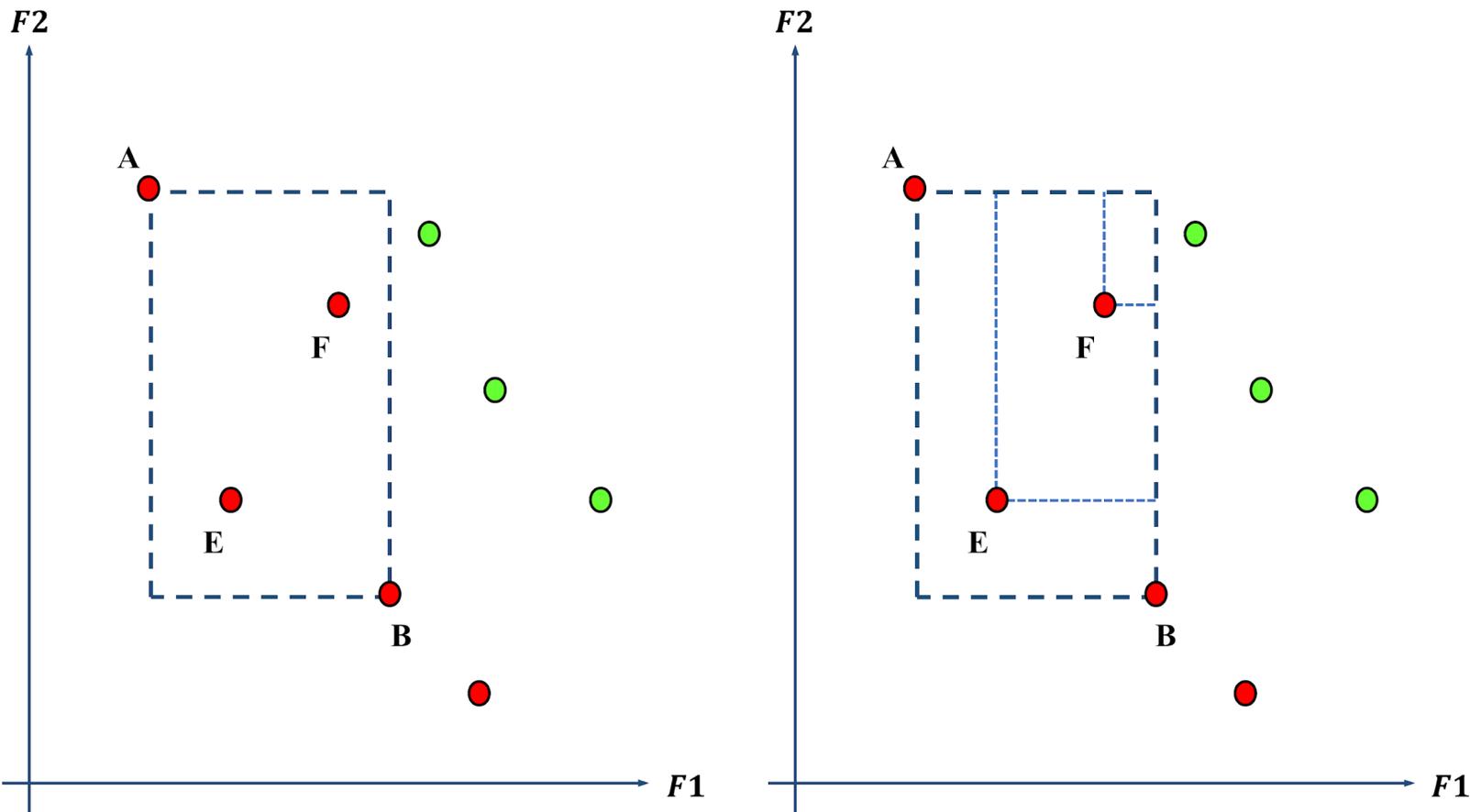


Figura 3. Distancia de hacinamiento normal y mejorada. Fuente: Chu y Yu (2018).

Parámetros del algoritmo genético NSGA-II

De acuerdo con el estudio de Wang *et al.* (2019), los parámetros más importantes de NSGA-II para el diseño de redes poseen un rango de valores recomendados y se jerarquizan de la siguiente manera:

- **Tamaño de la población:** es el parámetro principal y se recomienda utilizar un valor razonablemente grande que dependa de la escala del problema de diseño, a fin de mejorar la diversidad poblacional y

reducir el riesgo de quedar atrapado en óptimos locales. Para el caso de estudio, se utilizó el valor de 50, que incluye, además de los pobladores aleatorios, a un poblador constituido por los mayores diámetros disponibles y otro con los menores diámetros disponibles.

- **Cruce binario simulado y mutación polinomial:** son parámetros importantes, pues afectan la posición de los descendientes generados a partir de sus padres. Teniendo en cuenta la naturaleza discreta de los problemas de diseño de redes, sus rangos deben mantenerse entre 1 y 20. Para el caso de estudio, se utilizó cruce y mutación en un punto aleatorio.
- **Probabilidad de cruzamiento y probabilidad de mutación:** tienen un impacto menor en la efectividad de NSGA-II, es decir, no requieren de ajuste fino; se recomienda usar valores altos de la probabilidad de cruzamiento (aproximadamente 0.9) y valores pequeños de la probabilidad de mutación (valor igual a la inversa del número de variables de decisión o valores entre 0.001 y 0.05). Para este caso, se utilizó una probabilidad de cruzamiento de 35 %, a fin de no alterar de manera sustancial las características de padres hacia los descendientes. También se empleó la probabilidad de mutación de 0.05.

Parámetros de la red de distribución de agua potable

Se empleó el *software* EPANET como motor de cálculo hidráulico, el cual utiliza implícitamente las ecuaciones (5) y (7) para el cálculo de la pérdida de presión en nudos de la red. Además, se consideraron los valores de

viscosidad cinemática $1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, rugosidad absoluta 0.0015 mm, presión mínima requerida en los nudos de 10 m de columna de agua y no se tomaron en cuenta pérdidas menores en las tuberías.

Esquema metodológico

La Figura 4 muestra el esquema metodológico.

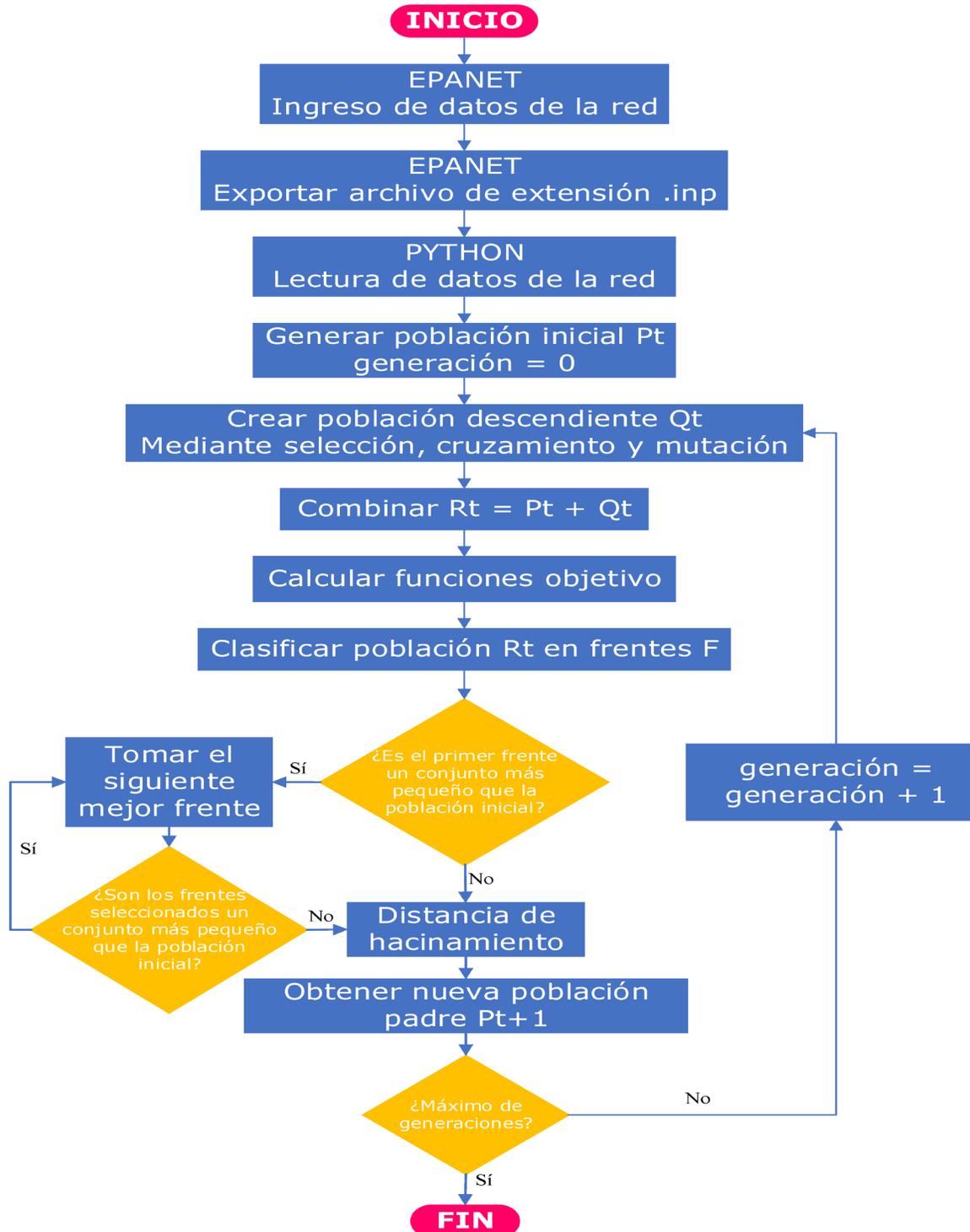


Figura 4. Esquema metodológico.

Resultados

Diseño de la red de Hanoi (red de verificación de código implementado)

Se llevó a cabo la simulación de esta red para 500 generaciones, acompañado de los parámetros de NSGA-II y parámetros de la red, evaluando las dos funciones objetivo I_R e I_C , cuyos valores oscilan entre 0 y 1. Para la investigación se buscó reducir ambos índices; es decir, se priorizó un valor más cercano a 0. En la Tabla 1 se muestran los índices obtenidos con NSGA-II y su variación respecto a otros algoritmos. También se mostraron datos como el costo y el número de restricciones incumplidas de la red (N_{RIR}), para complementar las variaciones (Δ) en distintos campos.

Tabla 1. Comparación del índice de resiliencia (I_R) e índice de costo (I_C) obtenidos con NSGA-II vs. citados en la literatura científica.

Algoritmos	I_R	I_C	Costo (M USD)	N_{RIR}
NSGA-II	0.48	0.46	6.04	4
Savic y Walters (1997) GA 1	0.51	0.47	6.07	7
Δ respecto a NSGA-II	0.03	0.01	0.03	3
Savic y Walters (1997) GA 2	0.49	0.48	6.19	6
Δ respecto a NSGA-II	0.01	0.02	0.15	2
Cunha y Sousa (1999)	0.51	0.46	6.06	7
Δ respecto a NSGA-II	0.03	0	0.02	3
Liong y Atiquzzaman (2004)	0.49	0.48	6.22	5
Δ respecto a NSGA-II	0.01	0.02	0.18	1
Suribabu y Neelakantan (2014)	0.51	0.47	6.08	6
Δ respecto a NSGA-II	0.03	0.01	0.04	2

Al comparar los índices obtenidos de NSGA-II respecto a Savic y Walters (1997) GA 1, se obtuvo una reducción del I_R en 0.03 y del I_C en 0.01, reflejado en la diferencia de costo de USD 0.03M y la disminución de N_{RIR} en 3. Con relación a Savic y Walters (1997) GA 2, se logró una disminución del I_R en 0.01 y del I_C en 0.02, traducido en la diferencia de costo de USD 0.15M, y una disminución del N_{RIR} en 2. En cuanto a Cunha y Sousa (1999), se alcanzó una minoración del I_R en 0.03 y del I_C solo una leve reducción, lo que evidencia la diferencia de costo de USD 0.02M, y una disminución de N_{RIR} en 3. Acerca de Liong y Atiquzzaman (2004), se consiguió una minimización del I_R en 0.01 y del I_C en 0.02, lo cual

muestra la diferencia de costo de USD 0.18M, y una disminución de N_{RIR} en 1. Sobre Suribabu y Neelakantan (2014), se llegó a una reducción del I_R en 0.03 y de I_C en 0.01, lo que indica la diferencia de costo de USD 0.04M, y la disminución de N_{RIR} en 3. Por lo tanto, NSGA-II fue capaz de reducir ambos índices mejor que los otros algoritmos, lo que permitió su validación y poder emplearlo en una red real.

Diseño de la red de Huancavelica

La red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica consta de un total de 186 tuberías y 144 nudos interconectados alimentados por una entrada de caudal. Los diámetros comerciales de las tuberías utilizados para la simulación y sus respectivos costos por metro lineal se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Diámetros comerciales de la red de Huancavelica.

Diámetro (pulg)	Diámetro interno (mm)	Costo por ml (USD)
2 1/2	71.2	3.42
3	85.6	4.88
4	104.6	7.32
5	133	12.28
6	152	15.38
8	190.2	24.03

Se hizo la simulación para 2 000 generaciones con los parámetros de NSGA-II y parámetros de la red. Culminada la ejecución del código principal, se obtuvo el conjunto de índices de costo, resiliencia, costo total y número de restricciones incumplidas de la red, y se generó una distribución de soluciones adecuada en el frente de Pareto. La evolución de soluciones se muestra en el historial de generaciones (Figura 5).

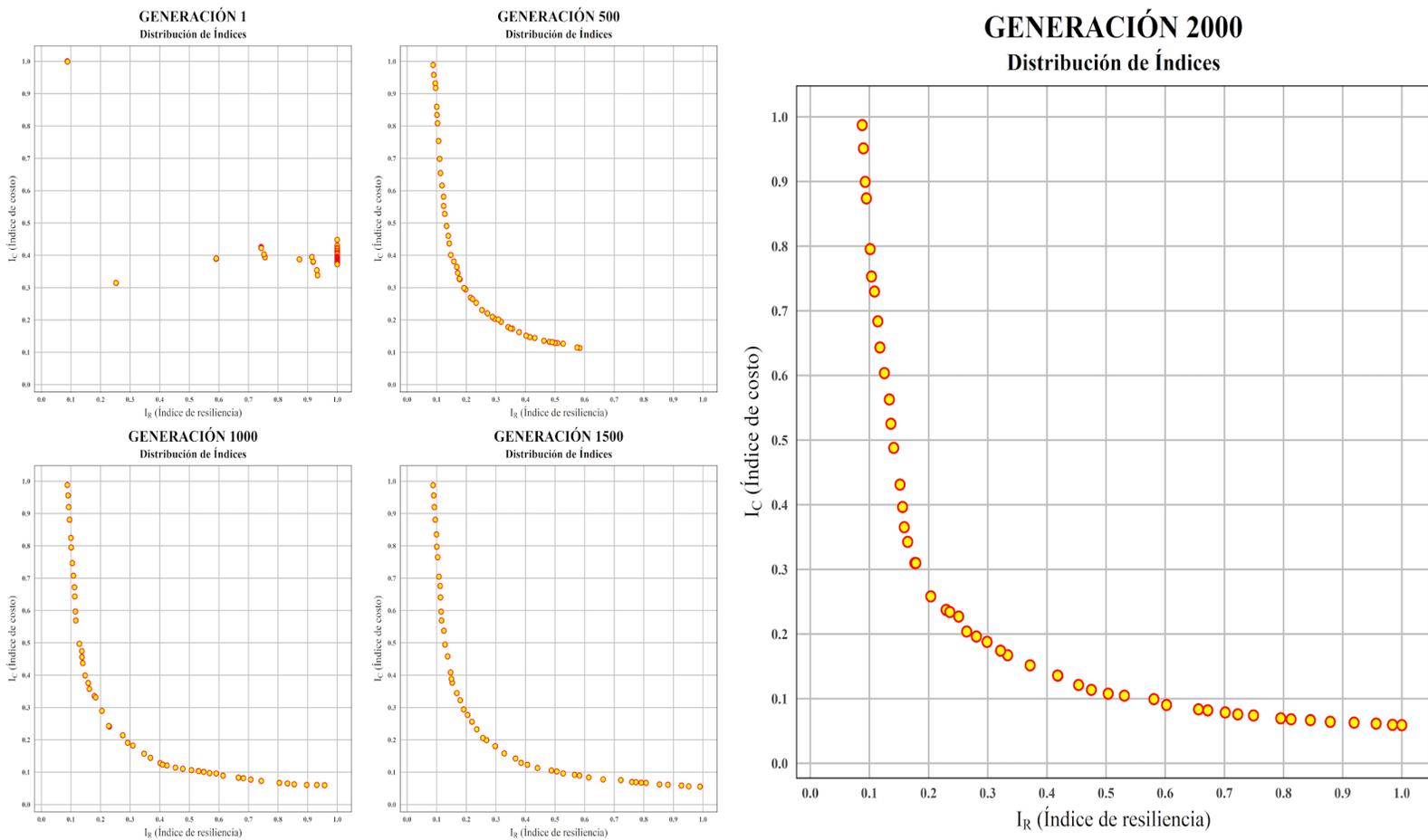


Figura 5. Historial de generaciones para la red de Huancavelica.

La generación 2000 es la última de acuerdo con los parámetros de ingreso para la ejecución del código principal. Se puede ver que las soluciones van evolucionando y tomando una forma exponencial descendente, donde mientras haya reducción del I_R se incrementa el I_C , y viceversa. Los resultados más equilibrados tienen aproximación hacia el punto de origen de coordenadas o punto (0, 0). Las soluciones obtenidas en la última generación se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Soluciones de la generación 2000 (final).

Núm.	I _R	I _C	Costo (USD)	N _{RIR}	Núm.	I _R	I _C	Costo (USD)	N _{RIR}
1	0.09	0.99	336 166.43	172	26	0.30	0.19	103 128.84	108
2	0.09	0.95	325 630.35	172	27	0.32	0.17	99 138.78	105
3	0.09	0.90	310 576.66	171	28	0.33	0.17	97 172.82	107
4	0.09	0.87	303 110.24	170	29	0.37	0.15	92 547.08	105
5	0.10	0.80	280 232.61	167	30	0.42	0.14	87 938.59	101
6	0.10	0.75	267 928.35	168	31	0.42	0.14	87 923.50	101
7	0.11	0.73	261 162.18	168	32	0.45	0.12	83 714.91	106
8	0.11	0.68	247 699.35	161	33	0.48	0.11	81 506.15	100
9	0.12	0.64	235 939.26	161	34	0.50	0.11	79 761.86	108
10	0.13	0.60	224 303.18	158	35	0.53	0.10	78 855.15	102
11	0.13	0.56	212 426.03	153	36	0.58	0.10	77 310.25	130
12	0.14	0.53	201 493.02	157	37	0.60	0.09	74 698.59	113
13	0.14	0.49	190 607.66	154	38	0.66	0.08	72 689.03	121
14	0.15	0.43	174 102.36	144	39	0.67	0.08	72 242.13	120
15	0.16	0.40	163 938.80	143	40	0.70	0.08	71 278.49	138
16	0.16	0.37	154 867.43	140	41	0.72	0.08	70 443.26	147
17	0.16	0.34	148 204.94	142	42	0.75	0.07	69 898.55	145
18	0.18	0.31	138 695.06	128	43	0.80	0.07	68 654.22	144
19	0.18	0.31	138 655.72	128	44	0.81	0.07	68 193.11	146
20	0.20	0.26	123 627.87	119	45	0.85	0.07	67 810.91	149
21	0.23	0.24	117 590.12	111	46	0.88	0.06	67 067.48	158
22	0.24	0.23	116 605.64	110	47	0.92	0.06	66 705.20	162
23	0.25	0.23	114 588.51	109	48	0.96	0.06	66 236.64	160
24	0.26	0.20	107 791.51	105	49	0.98	0.06	65 729.22	164
25	0.28	0.20	105 566.83	103	50	1.00	0.06	65 599.40	167

La selección de la solución óptima dependerá de las necesidades del diseñador, ya sea que se busque una red con alta confiabilidad y elevado costo, o una red con índices equilibrados. Asimismo, cabe recalcar que los índices están representados numéricamente en el rango de 0 a 1, siendo el índice más cercano a 0 el más óptimo; de igual manera, es recomendable que cada uno de los índices esté por debajo de 0.5 para garantizar un buen resultado. Para la investigación, se buscó una solución que contenga índices equilibrados, donde prime un bajo I_R , por consiguiente, la seleccionada fue la núm. 21, que cuenta con un índice de resiliencia $I_R = 0.23$ y un índice de costo $I_C = 0.24$, ambos por debajo de 0.5 y más equilibrados en comparación con las demás soluciones.

Discusión

Comparación de índices entre la red de Huancavelica optimizada y no optimizada

En la red de Huancavelica, los resultados obtenidos se evaluaron mediante el índice de resiliencia, índice de costo y otros datos complementarios (Tabla 4).

Tabla 4. Índices de la red Huancavelica optimizada y no optimizada.

	Red optimizada	Red no optimizada	Δ
Índice de resiliencia (I_R)	0.23	0.25	0.02
Índice de costo (I_C)	0.24	0.31	0.07
Costo total (USD)	117 590.12	140 099.89	22 509.77
Número restricciones incumplidas de la red (N_{RIR})	111	132	21

Al comparar los valores de la red no optimizada con los valores obtenidos de la aplicación de NSGA-II en la red de Huancavelica (red optimizada), se obtuvo una reducción del I_R en 0.02 o 2% y una disminución de I_C en 0.07 o 7 %, lo cual evidencia la diferencia de costo de USD 22 509.77, y una minoración del N_{RIR} en 21, todo a favor de la red optimizada.

Comparación del mecanismo de “distancia de hacinamiento” entre la red de Huancavelica optimizada y no optimizada

En la Figura 6 se muestra la distribución de índices obtenidos con la distancia de hacinamiento modificada respecto a cuatro hallados al utilizar la distancia de hacinamiento inicial.

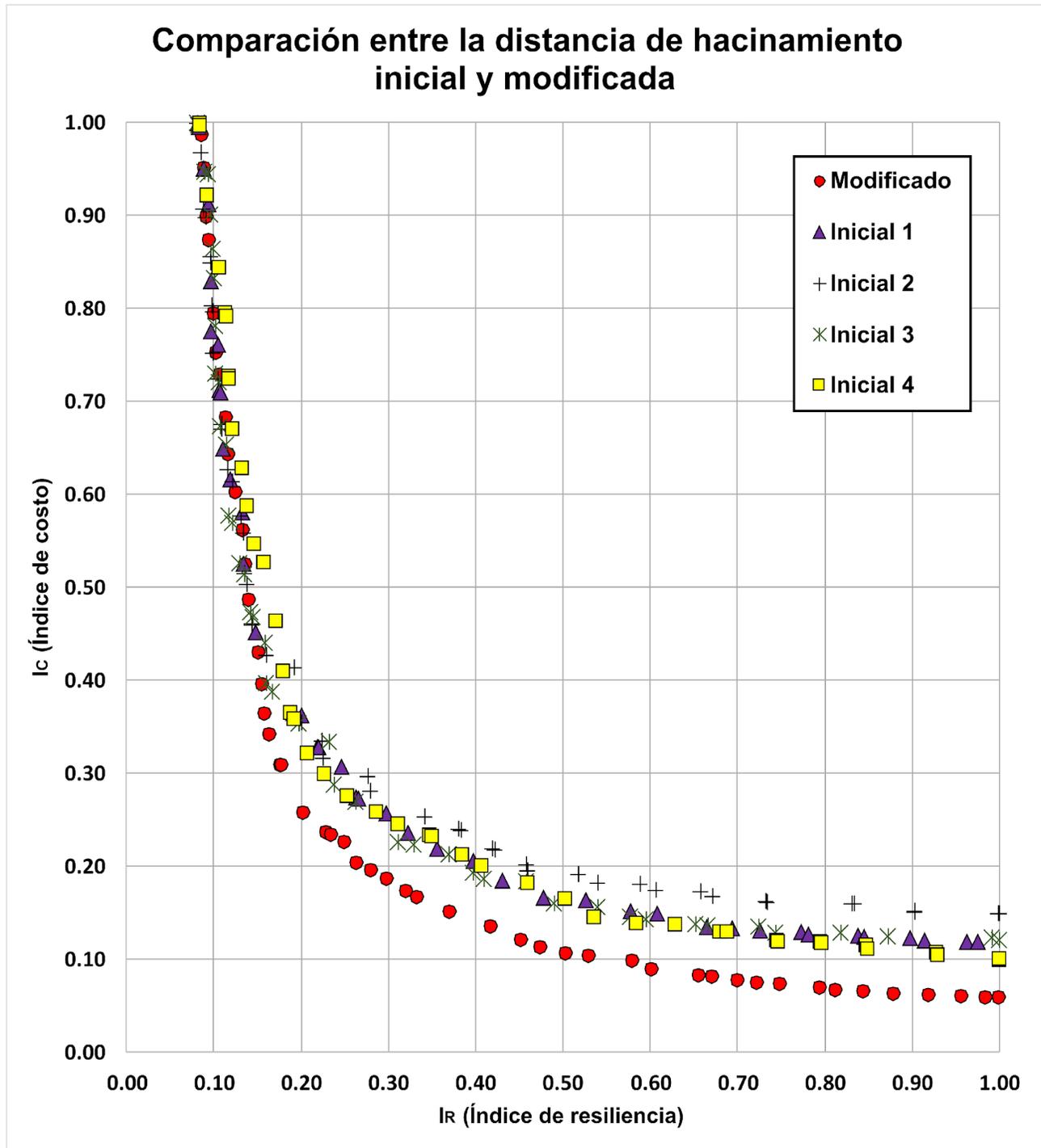


Figura 6. Comparación gráfica del mecanismo de “distancia de hacinamiento” empleada en el diseño de la red de Huancavelica.

En la Tabla 5 se compara la solución seleccionada resultante del uso de la distancia de hacinamiento modificada en relación con cuatro soluciones producto de la distancia de hacinamiento inicial, en la que se evaluó la distancia de la solución al origen, I_R , I_C , costo total y número de restricciones incumplidas de la red (N_{RIR}):

Tabla 5. Comparación de valores de “distancia de hacinamiento” empleada en el diseño de la red de Huancavelica.

	Distancia de hacinamiento mejorada	Distancia de hacinamiento Inicial 1	Distancia de hacinamiento Inicial 2	Distancia de hacinamiento Inicial 3	Distancia de hacinamiento Inicial 4
Distancia del origen a la solución	0.33	0.38	0.39	0.38	0.38
Índice de resiliencia (I_R)	0.23	0.26	0.23	0.24	0.25
Índice de costo (I_C)	0.24	0.28	0.32	0.29	0.28
Costo total (USD)	117 590.12	128 603.70	140 227.62	134 339.66	130 126.59
Numero de restricciones incumplidas de la red (N_{RIR})	111	139	132	134	135

Las soluciones más equilibradas se aproximan al punto de origen (0, 0). El uso de la distancia de hacinamiento mejorada permitió disminuir la distancia al origen de la solución seleccionada con un valor de 0.33, la cual es menor que todas las obtenidas por la distancia de hacinamiento inicial. De igual manera, el I_R de 0.23 y el I_C de 0.24 son menores, por ende, mejores que todas las obtenidas con la distancia de hacinamiento

inicial. También el N_{RIR} hallado por la distancia de hacinamiento mejorada es menor a todos las demás.

Comparación de diámetros entre la red de Huancavelica optimizada y no optimizada

Se comparan los diámetros utilizados de la red actual y la red optimizada de Huancavelica (Figura 7).

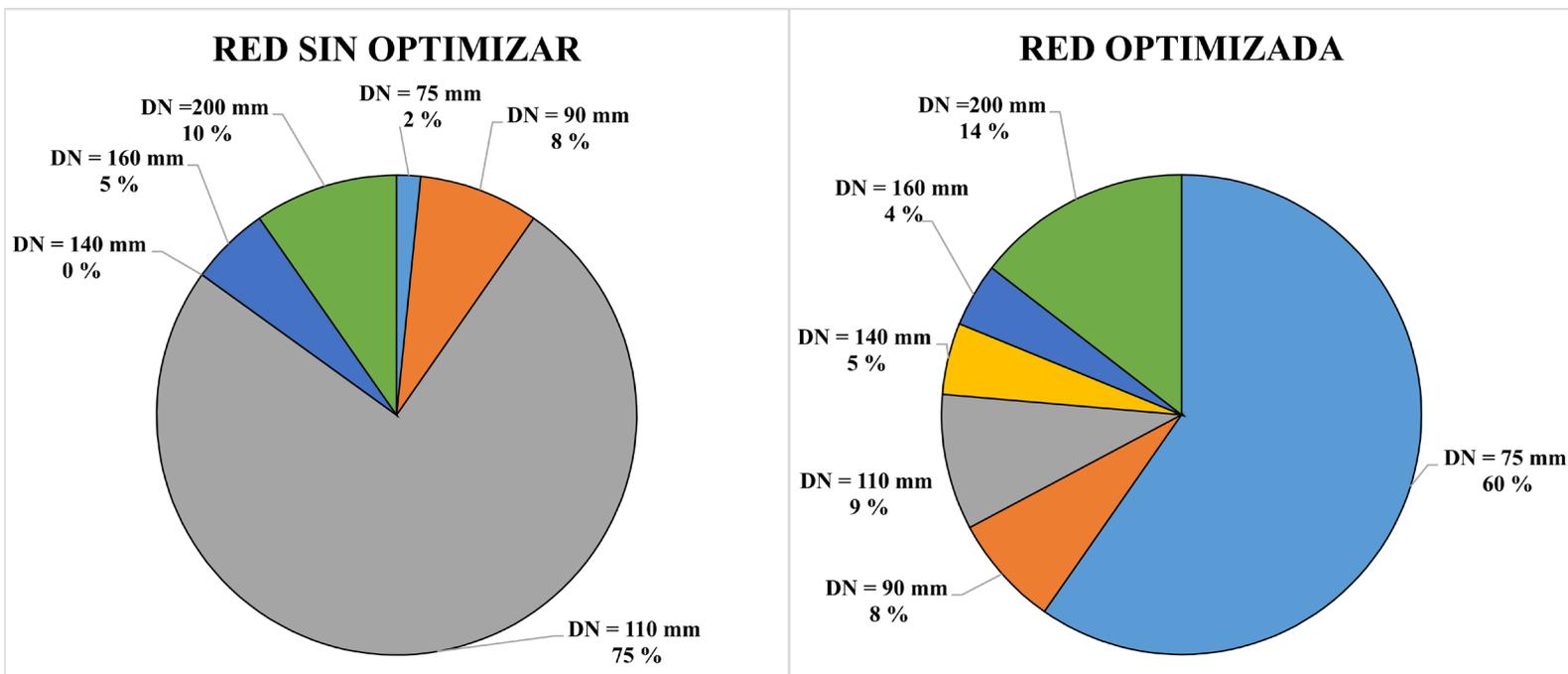


Figura 7. La variación entre los diámetros de la red actual y la red optimizada.

Se presentaron cambios en los porcentajes de uso de los diámetros de tuberías de la red optimizada en comparación con la red sin optimizar. Para el diámetro de 200 mm, la red optimizada presentó un uso del 14 %, mientras que la red sin optimizar un 10 %, una diferencia del 4 % en favor de la red sin optimizar. Para el diámetro de 160 mm, la red optimizada mostró un uso del 4 % y la red sin optimizar un 5 %, una leve diferencia del 1 % en favor de la primera. Para el diámetro de 140 mm, la red optimizada seleccionó un 5 % y la red sin optimizar un 0 %, lo que hace una diferencia de 5 % en favor de la red sin optimizar. Para el diámetro de 110 mm, la red optimizada eligió un 9 % y la red sin optimizar un 75 %, una diferencia considerable del 66 % en favor de la red optimizada. Para el diámetro de 90 mm, ambos obtuvieron un 8 %. Para el diámetro de 75 mm, la red optimizada presentó un 60 % y la red sin optimizar un 8 %, una diferencia del 52 % en favor de esta última.

Comparación de velocidades entre la red de Huancavelica optimizada y no optimizada

Las velocidades en las tuberías de la red actual y la red optimizada de Huancavelica son comparadas (Figura 8).

COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE VELOCIDADES

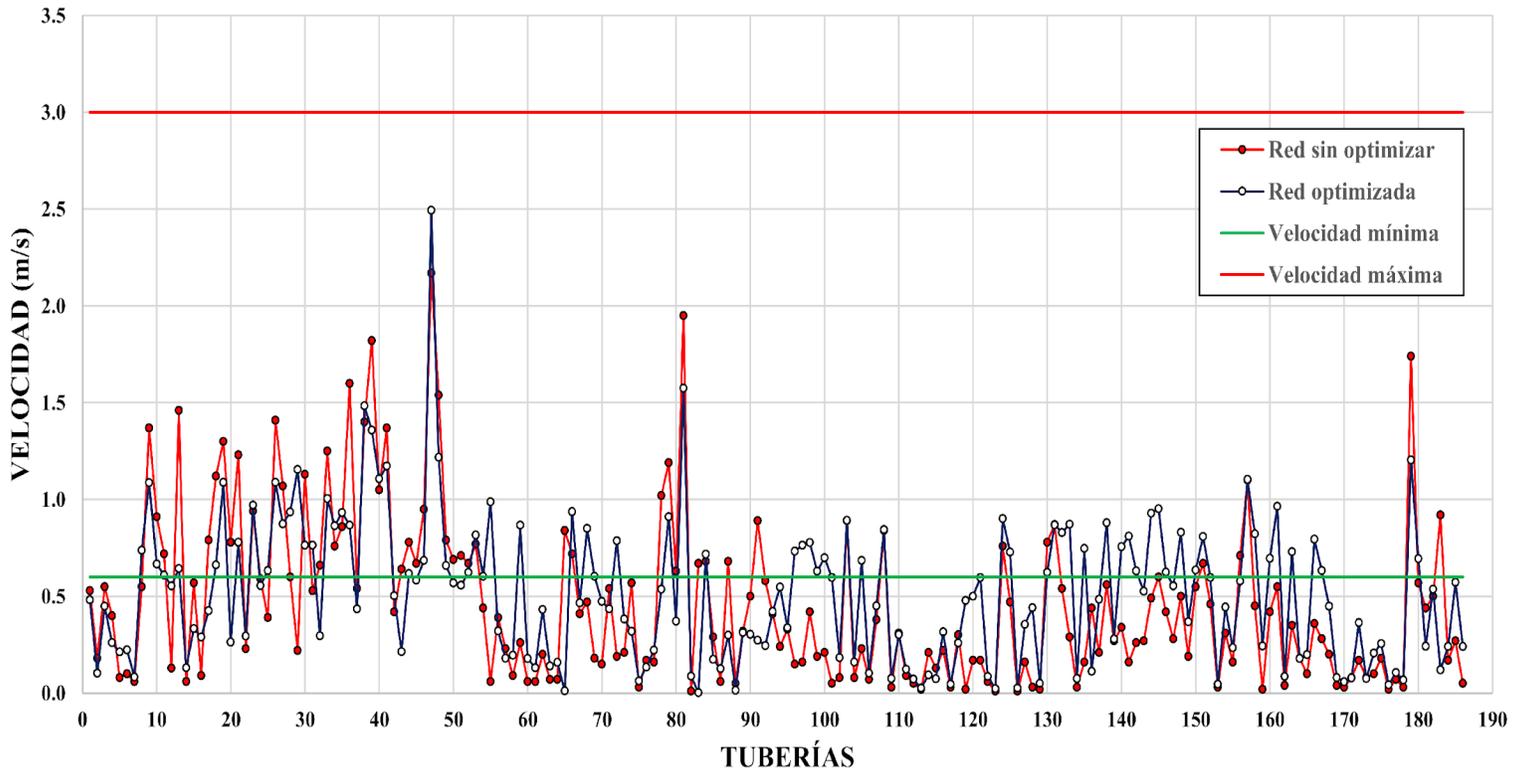


Figura 8. Comparación de las velocidades en las tuberías de la red actual y la red optimizada de Huancavelica.

La red no optimizada contó con 131 tuberías, cuyas velocidades se encuentran por debajo de los 0.6 m/s, que representa el 70 %; por otro lado, la red optimizada mostró 111 tuberías, que simbolizan el 60 %. Entonces, se muestra una mejora del 10 % en velocidades del fluido en las tuberías.

Comparación de presiones entre la red de Huancavelica optimizada y no optimizada

También se compararon las presiones en los nudos de la red actual y la red optimizada de Huancavelica (Figura 9).

COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE PRESIONES

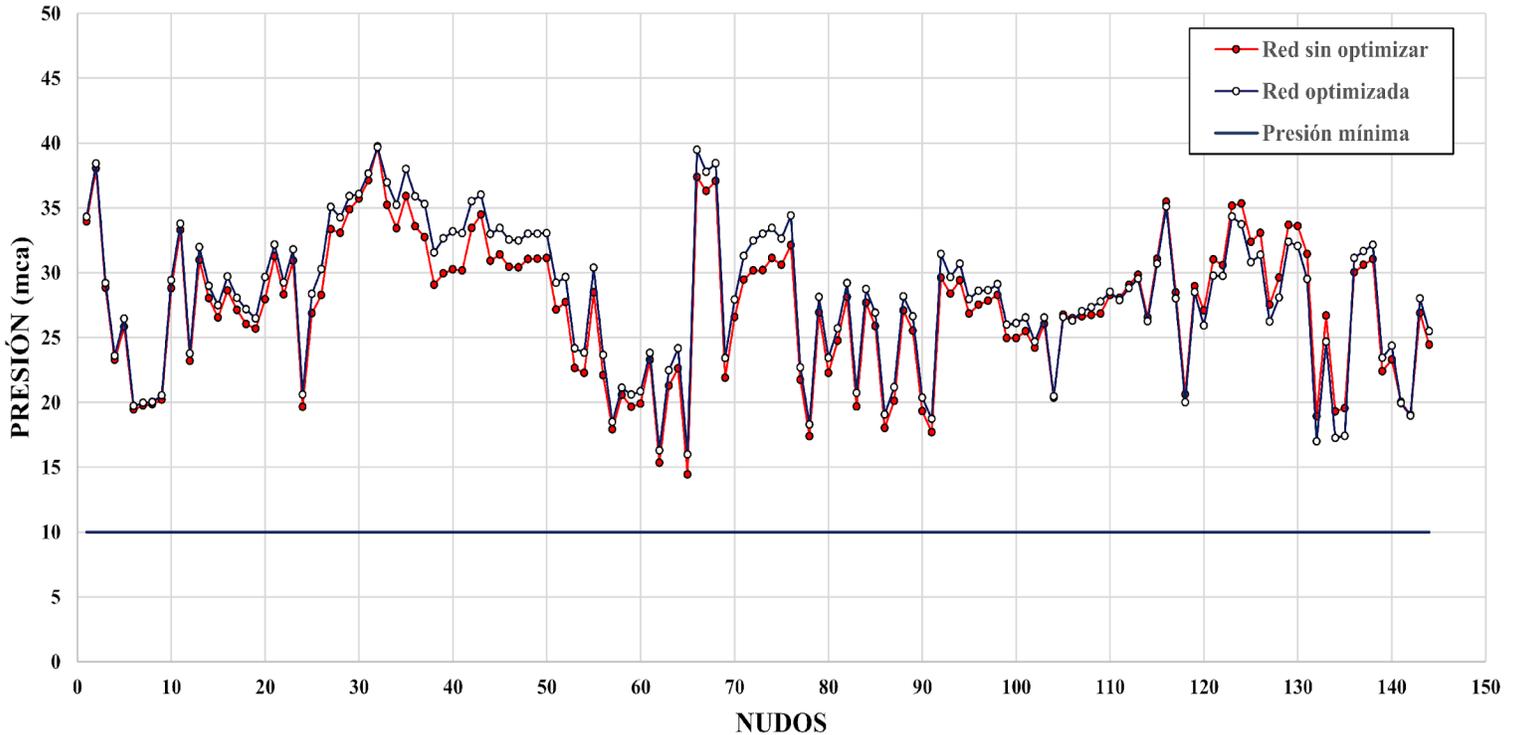


Figura 9. Comparación de las presiones en los nudos de la red actual y la red optimizada de Huancavelica.

Todas las presiones en los nudos de la red están por encima de los 10 m de columna de agua, valor recomendado por la norma OS-050. El rango de presiones de la red sin optimizar oscila entre 14.95 y 39.76

m.c.a., mientras que de la red optimizada entre 15.98 y 39.76 m.c.a. Se muestra una leve mejora de las presiones en los nudos en favor de la red optimizada.

Conclusiones

Se ha determinado que el algoritmo genético de clasificación no dominada II(NSGA-II) es favorable para el diseño óptimo de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica; esto, al considerar dos funciones objetivo de costo y confiabilidad hidráulica, pues su proceso iterativo de selección de diámetros permite de forma simultánea minimizar el costo y aumentar la confiabilidad; a su vez, cumple con las restricciones hidráulicas de presiones en nudos y velocidades del fluido en las tuberías de acuerdo con la Norma Técnica Peruana OS.050. También el uso de la distancia de hacinamiento mejorada ayudó a obtener resultados óptimos en ambos índices.

El costo se logró disminuir en un 7 %, valor que aminora en USD 22 509.77 el costo de la red actual. En cuanto a la confiabilidad hidráulica, se obtuvo una red 2 % más confiable que la actual.

Al realizar la modificación de la distancia de hacinamiento, se logró mejorar la distribución dentro del espacio de soluciones, además de mejorar los valores de índice de costo, resiliencia y número de restricciones incumplidas de la red.

En los diámetros de tuberías seleccionados hubo cambios considerables, con una diferencia del 66 % en favor de la red optimizada

para el diámetro de 90 mm y un 52 % en favor de la red actual para el diámetro de 75 mm.

La cantidad de velocidades del fluido de la tubería que se encontraban fuera del rango establecido por la norma logró una disminución del 10 %.

Las presiones en los nudos de la red incrementaron su valor, que iba de 14.95 a 39.76 m.c.a., por un nuevo intervalo de 15.98 a 39.76 m.c.a.

Agradecimiento

A la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Huancavelica-Perú.

Referencias

- Brkic, D., & Praks, P. (2018). Accurate and efficient explicit approximations of the colebrook flow friction equation based on the wright ω -function. *Mathematics*, 7(1). DOI: 10.3390/math7010034
- Chu, X., & Yu, X. (2018). *Improved crowding distance for NSGA-II*. DOI: 10.48550/arxiv.1811.12667
- Cunha, M. C., & Sousa, J. (1999). Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:4(215)

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2). DOI: 10.1109/4235.996017

EMAPA-HVCA, S. A. (2018). *Plan maestro (2018-2047)*. Huancavelica, Perú: EPS EMAPA Huancavelica. Recuperado de https://www.emapahvca.com/muni.php/ver_documento/id/munihvca7b8c6de4d949b3e51c816a1d5173de5b.pdf/

Gunantara, N. (2018). A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 5(1). DOI: 10.1080/23311916.2018.1502242

Liong, S. Y., & Atiquzzaman, M. (2004). Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution. *Journal of The Institution of Engineers, Singapore*, 44(1), 93-107.

Ostfeld, A. (2015). Water distribution networks. *Studies in Computational Intelligence*, 565. DOI: 10.1007/978-3-662-44160-2_4

Parvaze, S., Kumar, R., Khan, J. N., Al-Ansari, N., Parvaze, S., Vishwakarma, D. K., Elbeltagi, A., & Kuriqi, A. (2023). Optimization of water distribution systems using genetic algorithms: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. DOI: 10.1007/s11831-023-09944-7

Peñuela, C. A., & Granada, M. (2007). Optimización multiobjetivo usando un algoritmo genético y un operador elitista basado en un ordenamiento no-dominado (NSGA-II). *Scientia et Technica*, 13(35), 175-180.

- Prasad, T. D., & Park, N.-S. (2004). Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1). DOI: 10.1061/(asce)0733-9496(2004)130:1(73)
- Rahimi, I., Gandomi, A. H., Deb, K., Chen, F., & Nikoo, M. R. (2022). Scheduling by NSGA-II: Review and bibliometric analysis. *Processes*, 10. DOI: 10.3390/pr10010098
- Renata, R. T., Pereira, F. F. S., Da Silva, T. B. G., Castro, E. R., & Saad, J. C. C. (2020). The performance of explicit formulas for determining the darcyweisbach friction factor. *Engenharia Agricola*, 40(2). DOI: 10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V40N2P258-265/2020
- RNE, Reglamento Nacional de Edificaciones. (2009). *Redes de distribución de agua para consumo humano (OS.050)*. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones. Recuperado de <https://ww3.vivienda.gob.pe/ejes/vivienda-y-urbanismo/documentos/Reglamento%20Nacional%20de%20Edificaciones.pdf>
- Rossman, L. A. (September, 2000). *EPANET 2 Users Manual EPA/600/R-00/57*. Washington, DC, USA: Water Supply and Water Resources Division, U.S. Agency, Environmental Protection.
- Saldarriaga, J., Páez, D., Salcedo, C., Cuero, P., López, L. L., León, N., & Celeita, D. (2020). A direct approach for the near-optimal design of water distribution networks based on power use. *Water*, 12(4). DOI: 10.3390/W12041037

- Saldarriaga, J., Salcedo, C., González, M. A., Ortiz, C., Wiesner, F., & Gómez, S. (2022). On the evolution of the optimal design of WDS: Shifting towards the use of a fractal criterion. *Water*, 14(23), 3795. DOI: 10.3390/W14233795/S1
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías: abastecimiento de agua, redes, riegos*. Bogotá, Colombia: Alfaomega.
- Sangroula, U., Han, K. H., Koo, K. M., Gnawali, K., & Yum, K. T. (2022). Optimization of water distribution networks using genetic algorithm based SOP-WDN Program. *Water*, 14(6). DOI: 10.3390/w14060851
- Savic, D. A., & Walters, G. A. (1997). Genetic algorithms for leastcost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:2(67)
- Suribabu, C. R., & Neelakantan, T. R. (2014). Optimal upgradation and expansion of existing water distribution networks using differential evolution algorithm. *Asian Journal of Applied Sciences*, 7(6). DOI: 10.3923/ajaps.2014.375.390
- Swamee, P. K., & Jain, A. K. (1976). Explicit equations for pipe-flow problems. *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, 102(5). DOI: 10.1061/jyceaj.0004542
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2). DOI: 10.1016/s1462-0758(00)00049-2

- Wang, Q., Guidolin, M., Savic, D., & Kapelan, Z. (2015). Two-objective design of benchmark problems of a water distribution system via MOEAs: Towards the best-known approximation of the true Pareto front. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(3). DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000460
- Wang, Q., Wang, L., Huang, W., Wang, Z., Liu, S., & Savić, D. A. (2019). Parameterization of NSGA-II for the optimal design of water distribution systems. *Water*, 11(5). DOI: 10.3390/w11050971
- Wright, R., Parpas, P., & Stoianov, I. (2015). Experimental investigation of resilience and pressure management in water distribution networks. *Procedia Engineering*, 119(1). DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.917
- Yazdandoost, F., & Izadi, A. (2016). A decision-making framework for designing water distribution networks based on multi-objective optimisation. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 6(4). DOI: 10.1504/IJMCDM.2016.081379
- Zarei, N., Azari, A., & Heidari, M. M. (2022). Improvement of the performance of NSGA-II and MOPSO algorithms in multi-objective optimization of urban water distribution networks based on modification of decision space. *Applied Water Science*, 12(6), 1-12. DOI: 10.1007/S13201-022-01610-W/TABLES/5
- Zheng, F., Zecchin, A. C., Maier, H. R., & Simpson, A. R. (2016). Comparison of the Searching Behavior of NSGA-II, SAMODE, and Borg MOEAs applied to water distribution system design problems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(7). DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000650