

05-020

A PUMPING STATION DESIGN OPTIMIZATION METHOD BASED ON AN OPTIMAL FLOW DISTRIBUTION, A SEARCH SPACE REDUCTION APPROACH AND EVOLUTIONARY ALGORITHMS

Valdivia-Muñoz, Bastian Alberto (1); Mora-Melia, Daniel (1); Gutierrez-Bahamondes, Jimmy H. (1); Salgueiro-Sicilia, Yamisleydi (1)

(1) Universidad de Talca

In urban sectors, the installation and operation of pumping stations in water distribution networks is one of the highest public costs. Therefore, some researchers have proposed different optimization models trying to simultaneously minimize investment and operating costs. One possible approach is to design each pumping station based on an optimal flow distribution. However, the problem to be overcome by this approach considers a large number of decision variables, requiring a huge computational effort. This work presents a methodology for reducing the search space of solutions by preprocessing the initial data of the distribution network, determining the maximum and minimum flow that each pumping station can supply. Our proposal focuses on identifying regions where there are no feasible solutions to the problem, avoiding the subsequent search of the optimization algorithm in these regions. Finally, the methodology is applied in some water networks to show its validity. The results show search space reductions of up to 60% in a real case study. This improves the performance of the optimization algorithm, reducing the number of iterations performed to find the final solution of the problem.

Keywords: energy optimization; water networks; pump station

DISEÑO DE ESTACIONES DE BOMBEO BASADO EN DISTRIBUCIÓN ÓPTIMA DEL FLUJO, REDUCCIÓN DEL ESPACIO DE BÚSQUEDA Y ALGORITMOS EVOLUTIVOS

En sectores urbanos, la instalación y operación de estaciones de bombeo en Redes de Distribución de Agua representa uno de los costos públicos más altos. Numerosos investigadores han propuesto modelos de optimización que intentan minimizar simultáneamente costos de inversión y operación. Un posible enfoque es dimensionar cada estación de bombeo a partir de una distribución óptima de caudales. Este enfoque plantea numerosas variables de decisión, requiriendo un gran esfuerzo computacional. Este trabajo propone una metodología de reducción del espacio de soluciones mediante un preprocesado de los datos iniciales de la red, determinando máximo y mínimo caudal que puede suministrar cada estación de bombeo. Nuestra propuesta se enfoca en identificar regiones donde no existen soluciones factibles para el problema, evitando la búsqueda del algoritmo de optimización en estas regiones. La metodología se aplica en distintos casos de estudio para demostrar su validez. Los resultados muestran reducciones del espacio de búsqueda de hasta un 60% en un caso real de estudio. Esto mejora el desempeño del algoritmo de optimización, reduciéndose el número de iteraciones realizadas hasta encontrar la solución final del problema.

Palabras clave: optimización energética; redes de agua; estaciones de bombeo

Correspondencia: Daniel Mora Melia. Correo: [damora@utalca.cl](mailto:damura@utalca.cl)

Agradecimientos: Este trabajo fue apoyado por el Programa Fondecyt Regular (Proyecto N°1210410) de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Chile



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Numerosos investigadores han dedicado esfuerzos a optimizar el diseño y operación de redes de agua potable (RDA). Cuando los problemas a estudiar son NP-Hard es habitual recurrir a metaheurísticas de optimización. Ahora bien, independiente del algoritmo metaheurístico a emplear, el factor común será el dominio de las variables del sistema con el cual trabajarán.

La optimización del coste de instalación y operación de estaciones de bombeo a partir de una distribución óptima de caudales es uno de los posibles enfoques del diseño económico de estaciones de bombeo. En este caso, una de las principales variables de decisión es la cantidad de caudal que entrega cada estación de bombeo (EB). La reducción del dominio de esta variable puede generar grandes beneficios en la resolución del problema de optimización.

A este respecto, los algoritmos evolutivos basados en poblaciones han mostrado buen desempeño en redes de benchmarking o con un alto nivel de simplificación. Sin embargo, el problema radica en que a medida el tamaño de la red aumenta, el esfuerzo computacional crece considerablemente, limitando metodologías como la propuesta por (Gutiérrez Bahamondes et al., 2021) al uso de redes más pequeñas.

La hipótesis de este trabajo es que es posible reducir el dominio del problema de optimización acotando los rangos operacionales de las estaciones de bombeo, y estableciendo los máximos y mínimos caudales a entregar por cada EB. Esto reduce el espacio de búsqueda posterior del algoritmo y permite converger a la solución final con una menor cantidad de iteraciones, abordando uno de los principales retos del área en el diseño y operación de redes reales, que es el costo computacional (Mala-jetmarova et al., 2017).

En cuanto a los métodos de reducción de espacio de búsqueda: ¿cómo realizarlo sin comprometer la fidelidad del modelo de optimización y la simplificación indebida del sistema real? (Mala-jetmarova et al., 2017)

Este trabajo propone una nueva metodología que realiza un preprocesamiento de la red de abastecimiento, identificando el rango operacional de caudal de cada estación de bombeo. La metodología tiene en cuenta la capacidad máxima de las bombas disponibles según catálogo, la presión mínima requerida de la red y los patrones de demanda de la red. Esto permite descartar zonas de búsqueda que solo contienen soluciones infactibles, y que el algoritmo evitará posteriormente en su búsqueda de la mejor alternativa de bombeo, resguardando la calidad de las soluciones obtenidas y mejorando su desempeño.

La reducción del espacio de soluciones será distinta para cada estación de bombeo y dependerá de las características de cada red, razón por la que se establece un indicador de área ponderado de cada red, correspondiente a la cantidad de espacio de búsqueda reducido, con respecto al espacio de búsqueda total de cada estación de bombeo.

Finalmente, se ejecutó el preprocesamiento en seis casos de estudio, 5 de benchmarking y uno real. Los resultados son analizados en función del tamaño de red y la cantidad de estaciones de bombeo en cada caso.

2. Objetivos

El objetivo del trabajo es reducir el espacio de soluciones de un problema de optimización mediante un preprocesado de datos. En particular, el problema de optimización sobre el que se aplica la metodología presentada en este trabajo busca minimizar los costes de instalación

y operación de una estación de bombeo y es propuesto por Gutiérrez Bahamondes et al., (2021).

2.1. Problema de optimización. Funciones de coste y objetivo

El modelo de optimización presentado por Gutiérrez Bahamondes et al., (2021) calcula los costes de capital (CAPEX) y operacionales (OPEX) a partir de los valores de las variables de decisión en cada iteración del algoritmo. El proceso de optimización da como resultado el diseño completo de una EB. Una EB se define completamente cuando se conoce la demanda máxima de la EB, el número de bombas y el modelo de bomba seleccionado en la base de datos. Luego, es posible calcular tanto el CAPEX como el OPEX, como se observa en las ecuaciones (1) y (2).

La función objetivo del problema de optimización es:

$$F = F_a \cdot CAPEX + OPEX \quad (1)$$

$$F_a = \frac{r \cdot (1 + r)^{Np}}{(1 + r)^{Np-1}} \quad (2)$$

donde F representa el costo total anualizado del proyecto. Para calcular la pérdida de valor de los activos a lo largo de la vida útil del proyecto, el CAPEX se amortiza mediante el factor F_a aplicando un tipo de interés r durante los períodos N_p . OPEX representa los gastos operativos totales a lo largo de la vida del proyecto.

Obviamente, el modelo de optimización está restringido por ecuaciones de continuidad y momento y por requisitos mínimos de cabeza en los nodos de demanda. Además, el modelo está limitado por ecuaciones que garantizan que el flujo total suministrado por la EB es igual al flujo demandado durante cada período. El planteamiento completo del problema de optimización puede consultarse en Gutiérrez Bahamondes et al., (2021)

2.2. Consideraciones previas

La metodología propuesta en este trabajo busca reducir el espacio de soluciones automatizando la búsqueda del dominio del caudal de cada una de las EB, acotando el rango operacional de cada estación de bombeo y definiendo automáticamente el caudal mínimo y máximo a suministrar.

Cabe destacar que el problema de optimización sobre el que se actúa solo contempla bombeo por inyección directa. Consecuentemente, y si era necesario, se realizaron las modificaciones mínimas a cada caso de estudio para que estas no tuvieran depósitos cuyo nivel hubiera que controlar. Adicionalmente, y por simplicidad a la hora de programar el código, se considera que:

- Al menos debe existir una fuente de agua (embalse) en la RDA. Esta fuente/s serán las encargadas de suministrar el consumo de la red.
- En Epanet, los nodos que simulan estaciones de bombeo tienen una demanda negativa. Esto permite simular un aporte de caudal para la RDA.
- Todos los nodos de la red siguen el mismo patrón de demanda. Este es predeterminado en las opciones generales de Epanet antes del análisis.

Tradicionalmente, la literatura plantea problemas de optimización a redes de benchmarking o versiones altamente esquelizadas de sistemas reales más grandes. Adicionalmente, aplicar algoritmos sobre la base de un único sistema puede llevar a conclusiones erróneas, ya que existe la posibilidad de que un determinado algoritmo sea capaz de aprovechar el espacio de estado único del problema particular sin ser tan robusto para otros problemas (Maier et al., 2003).

Es por esta razón que la metodología de reducción de espacio de soluciones propuesta se aplica sobre diferentes redes de benchmarking, clasificadas en base a tamaño (número de

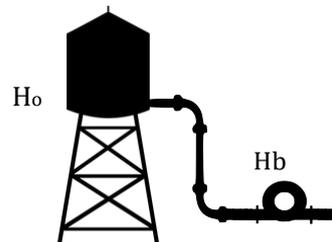
odos) y solicitud de demanda. Finalmente, la metodología se aplica sobre un caso real de estudio en Curicó (Chile), y sus resultados se presentan en detalle

2.3. Algoritmo de preprocesado. Formulación y restricciones

La metodología propuesta requiere de datos conocidos acerca de ciertas variables independientes para cada caso de estudio, como por ejemplo el número de EB, los patrones de consumo de la red, la presión mínima de trabajo (P_{min}), la presión máxima que puede suministrar una bomba según catálogo ($H_{b_{max}}$) y el número de puntos que utilizará para formar la curva (Np). Todos los datos referentes a topología y consumo de nudos y líneas también serán conocidos.

Para el análisis, se define un parámetro que será crucial para definir finalmente que será la altura de cabecera de diseño ($H_{diseño}$) la cual corresponderá a la altura inicial del embalse (H_o) más la altura de la bomba (H_b) la cual variará desde 0 hasta $H_{b_{max}}$ (ver Figura 1)

Figura 1: Esquema de altura de cabecera de diseño.



Esta $H_{diseño}$ corresponderá a la suma de altura del embalse con la que se fijará el análisis con la altura de la bomba utilizada como se muestra en la ecuación (3).

Las variables dependientes serán el caudal máximo y mínimo que puede suministrar cada estación de bombeo.

$$H_{diseño} = H_o + H_b \quad (3)$$

Las restricciones son principalmente las asociadas a las relaciones hidráulicas dentro de la propia red. Por ello, se hace necesario modelar matemáticamente la red de modo que cumpla los siguientes requisitos:

- La suma de los caudales aportados por las estaciones de bombeo debe ser la demanda del sistema, como se muestra en la ecuación (4):

$$Q_B = \sum_i^n f_i \cdot Q_{b_i} \quad (4)$$

Donde:

Q_B : Caudal aportante de la RDA.

n : Cantidad de nodos de la red, con demanda mayor o igual a cero.

f_i : factor de demanda, extraído del patrón de consumo, para el nodo i .

Q_b : Caudal de demanda base para el nodo i .

- La presión máxima suministrada por una estación de bombeo no debe superar la máxima presión que puede dar la bomba por catálogo, ver ecuación (5):

$$P_{EBi} < Hb_{M\acute{a}x} \quad (5)$$

Donde:

P_{EBi} : Presi3n suministrada en la estaci3n de bombeo i.

$Hb_{M\acute{a}x}$: Presi3n m\acute{a}xima de la bomba por cat\acute{a}logo.

- La presi3n en el nodo critico no debe tender a la presi3n m\acute{in}ima de funcionamiento de la red, ver ecuaci3n (6):

$$P_{Alcanzado} = P_{m\acute{in}} \quad (6)$$

Donde:

$P_{Alcanzado}$: Presi3n del nodo cr\acute{it}ico.

$P_{m\acute{in}}$: Presi3n m\acute{in}ima de funcionamiento de la red.

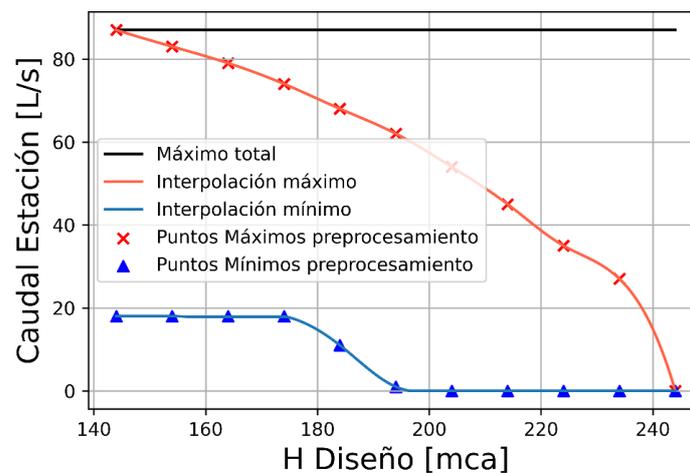
2.4. An\acute{a}lisis del espacio de soluciones

Inicialmente el espacio de soluciones presentado por (Guti\errez Bahamondes et al., 2021), considera el m\acute{a}ximo caudal que puede otorgar cada EB, el cual tiene una probabilidad uniforme de b\acute{u}squeda desde cero hasta el m\acute{a}ximo encontrado.

Una vez preprocesada la red, y habiendo encontrado los caudales m\acute{a}ximos y m\acute{in}imos de cada estaci3n para las distintas alturas de dise\~no, dependiendo de la discretizaci3n, es necesario interpolar los datos. As\~i se propone utilizar el m\acute{e}todo num\erico de spline cubica, debido a su utilidad para interpolar datos con un polinomio cubico por partes y que es dos veces diferenciable continuamente (ver Figura 2). Cabe destacar que el m\acute{e}todo no entregar\~a resultados correctos para la extrapolaci3n, por lo que si se usa fuera del dominio establecido podr\~a tener problemas de convergencia.

De esta forma, para saber el espacio total reducido, es necesario integrar los datos obtenidos, para lo cual se propone utilizar el m\acute{e}todo num\erico del trapecio, con el cual se hallar\~a el \rea entre curvas que corresponder\~a al espacio de soluciones factibles.

Figura 2: Esquema de preprocesamiento de las redes



Una vez los rangos de operaci3n de las EB est\~an establecidos, es necesario hacer la diferencia con respecto a lo que s\~i utilizaba anteriormente. Como, por ejemplo, el caso de optimizaci3n establecido por, aqu\~i se utiliza una probabilidad uniforme de cero y el m\acute{a}ximo caudal posible independiente del valor de la altura de dise\~no que se obtenga, la cual ser\~a

considerada como el 100% del espacio de búsqueda. Es aquí donde entra la utilidad del preprocesamiento, ya que ahora se utilizará una probabilidad desde el caudal mínimo hasta el máximo, los cuales irán variando a medida cambie la altura de diseño, recorriendo en lugares que están las soluciones factibles.

Finalmente, se precisa disponer de un indicador que nos indique de modo efectivo la reducción del espacio de soluciones sobre el que actuará el algoritmo de optimización. A su vez, cada EB puede tener distintos rangos de operación, y así también distintas reducciones de sus dominios. Para parametrizar la reducción se utilizará una medida ponderada media como indicador para ver los resultados de la red, como se ve en la ecuación (7):

$$ART = \frac{\sum_i^n AR_i \cdot AT_i}{\sum_i^n AT_i} \quad (7)$$

Donde:

ART : Es el área total reducida de la RDA.

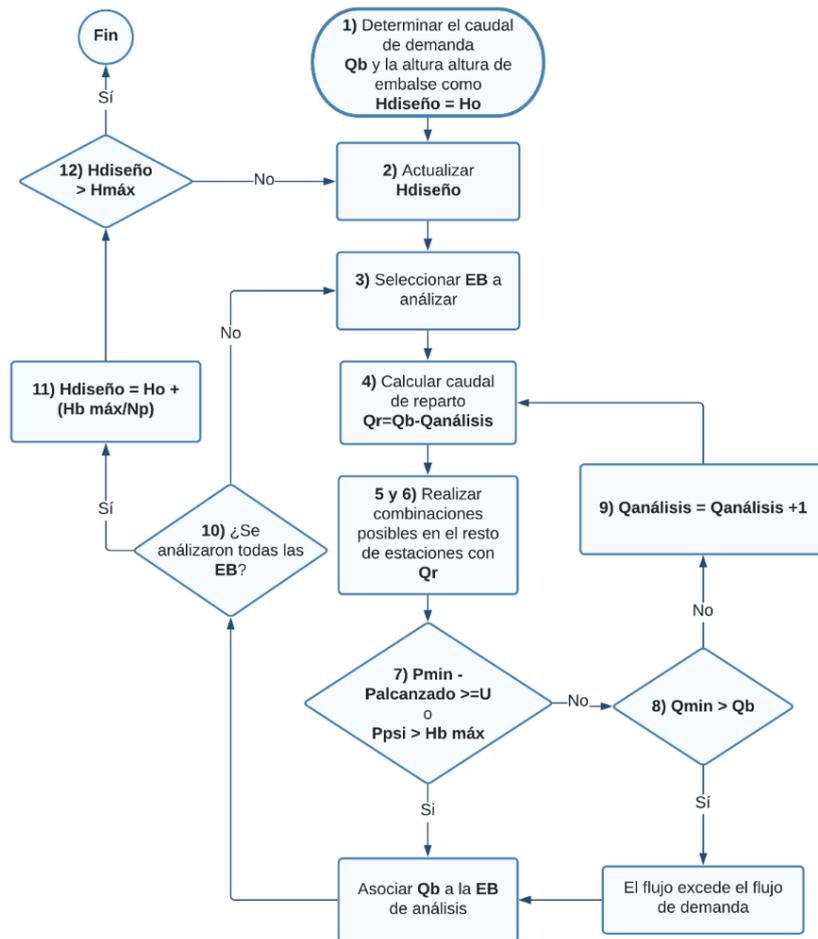
AR_i : Es el área reducida de la EB_i .

AT_i : Es el área total de la EB_i .

3. Metodología

Una vez definidas las restricciones, se realiza un análisis independiente para cada estación de bombeo. El caudal mínimo (Q_{min}) que puede suministrar una estación de bombeo es cero. Las diferentes etapas del modelo propuesto se muestran en la Figura 3:

Figura 3: Diagrama de algoritmo de preprocesamiento de datos



1. Determinar la suma del producto de las demandas bases de los nodos con el factor de demanda extraído del patrón de consumo (Q_B), correspondiente al menor consumo en todos los periodos del análisis.
2. Determinar el límite de la altura piezométrica del embalse. El valor mínimo será la altura piezométrica inicial de la red (H_o). El valor máximo será la altura inicial más la máxima presión otorgada por el catálogo de bombas ($H_{máx} = H_o + Hb_{Máx}$). Asignar la altura al embalse ($H_{diseño}$) correspondiente.
3. Se selecciona una de las estaciones de bombeo, y se le asigna $Q_{mín}$.
4. Luego, se considerará un caudal de reparto (Q_r), el cual corresponde a la diferencia de Q_B con $Q_{mín}$.
5. Se debe realizar un reparto del Q_r con todas las posibles combinaciones de las estaciones de bombeo restantes. Estas pueden variar desde 0 % hasta 100%.
6. Inicializar el análisis hidráulico, asignando y probando las posibles combinaciones del Q_r en las estaciones restantes.

7. Si la diferencia de $P_{mín}$ con $P_{Alcanzado}$ es menor o igual al U o la presión de EB_i mayor a $H_{Máx}$, el caudal mínimo que puede otorgar la estación es $Q_{mín}$ y se comienza con otra estación de bombeo desde el paso 3.
8. Si $Q_{mín}$ es mayor a Q_B se acaba el análisis, dejando $Q_{mín}$ considerado, ya que se necesitaría producir mayor caudal del solicitado y se estaría ocupando energía potencial extra que no se utilizaría, por lo que debe indicar que el caudal otorgado por la estación supera el caudal demandado por la RDA.
9. De no cumplir con los requisitos del paso 7, hay que aumentar $Q_{mín}$ en 1 l/s. y repetir en paso 4.
10. De no haberse analizado todas las estaciones de bombeo de la RDA, continuar con la siguiente estación desde el paso 3.
11. De haberse analizado todas las estaciones de bombeo, se procede a aumentar la altura del embalse en un $Hb_{Máx}/Np$. Queda a criterio del operador el número de puntos para crear una curva que envuelva los máximos y mínimos caudales
12. Si la $H_{diseño}$ es mayor a $H_{máx}$ el análisis concluye, caso contrario continuar el análisis desde el paso 2.

Posteriormente se realiza el análisis para los caudales máximos de modo similar, reemplazando en el paso 1) el periodo de menor demanda por el de mayor demanda de la red y en el paso 7) se elimina la condición de que la diferencia de presión alcanzada con la presión mínima de la red sea mayor a $P_{mín}$.

4. Casos de estudio

La metodología propuesta se aplica inicialmente sobre distintas redes de benchmarking que pueden encontrarse en la literatura. Se seleccionan casos de estudio de diferente tamaño, ya que el número de nodos y conducciones de la red es la principal causa de ralentización de cálculo computacional, debido a que el motor hidráulico calcula cada nudo y cada conducción en cada iteración del algoritmo.

En particular se seleccionan 5 redes de la base de datos "Research Database of Water Distribution System Models" (Jolly et al., 2014). Esta base de datos es gratuita y está a disposición de la comunidad científica. Las redes seleccionadas son KY3, KY4, KY6, KY8 y KY13 y sus características pueden consultarse en la Tabla 1.

Una vez comprobada la bondad de la metodología, esta se aplica sobre un caso de estudio real situado en la ciudad de Curicó (Chile). El modelo de la red fue propuesto por (Negrete Flores, 2021). De la Tabla 1 se puede observar que el caso de estudio de Curicó es el más grande, con una demanda 8 veces más grande que KY8, que es la siguiente red en cuanto a demanda de agua. En cuanto al número de nodos, la red de Curicó tiene 7630, siendo prácticamente 7 veces más grande que la red KY8.

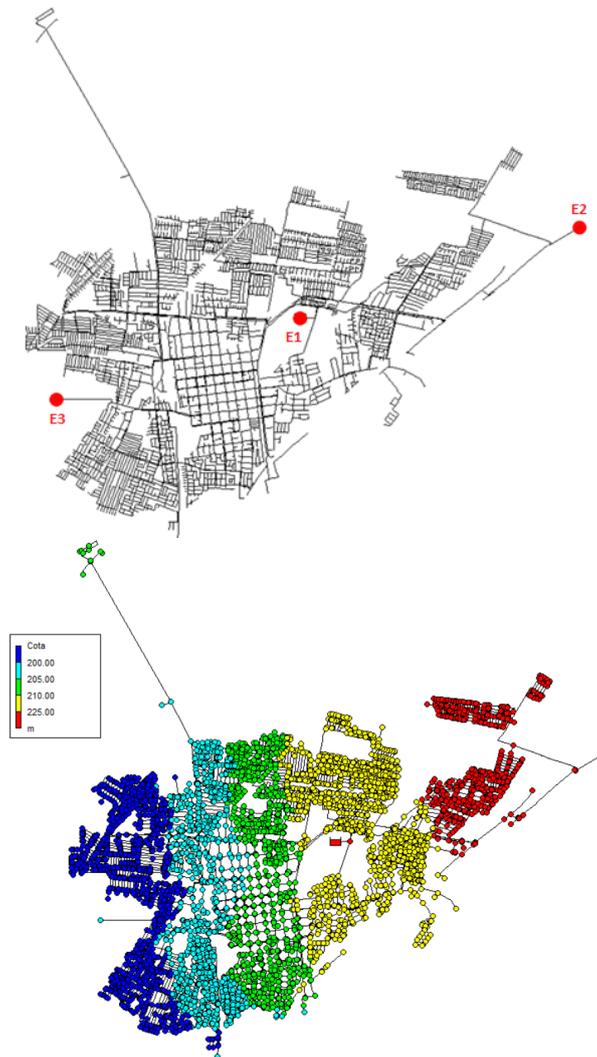
Tabla 1: Resumen de las redes seleccionadas con sus características principales.

Nombre de la red de agua potable	Nº Estaciones de bombeo	Nº nodos	Nº tuberías	Demanda Base (l/s)
KY3	4	266	361	88
KY6	4	538	638	71,8
KY13	6	771	936	103,3
KY4	5	957	1156	66
KY8	5	1319	1611	108,0
Curicó	3	7630	8359	513,3

Por otro lado, si bien Curicó es la red de mayor tamaño, también es la que tiene menos estaciones de bombeo, por lo que estas estaciones deberán trabajar de forma más solicitada debido a la cantidad de demanda de la red. Dada la mayor complejidad de la red, esta se analiza y presenta con mayor detalle en el contexto de este trabajo.

En la actualidad, la red de Curicó cuenta únicamente con 2 estaciones de bombeo. El caso de estudio propone la instalación de una nueva estación de bombeo (E3) debido al crecimiento de la ciudad. La Figura 3 muestra la ubicación de cada estación de bombeo, en la que (E3) es la estación propuesta y, las estaciones E1 y E2 son las estaciones que con ubicación real en la actualidad. El nodo con menor cota ronda tiene 190 m y la cota del nodo mayor es aproximadamente 295 m, teniendo una distribución ascendente de izquierda a derecha, tal como muestra la distribución altimétrica de la Figura 5.

Figura 4: Ubicación de las EB de Curicó y distribución altimétrica



5. Resultados

5.1. Calibración del algoritmo de preprocesamiento.

El algoritmo de preprocesamiento se aplica a todas las redes de benchmarking seleccionadas para comprobar la bondad de la metodología. Para todas las redes se consideran los siguientes supuestos de entrada:

- La presión mínima de funcionamiento es de 15 mca.
- La presión máxima otorgada por las bombas es de 100 mca.
- Se considera una discretización porcentual del caudal de reparto entre 0 y 100, en intervalos del 20%.
- La simulación inicial comienza en la altura inicial del embalse, aumentando 5 mca cada simulación hasta alcanzar la presión máxima que puede ser suministrada por las bombas.

La región acotada del espacio de soluciones en cada caso se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2: Resumen del preprocesamiento de los casos de estudios

Nombre Red	Nº Estaciones de bombeo	Nº Nodos	Región acotada del espacio de soluciones
KY3	4	266	46,9 %
KY6	4	538	37,7 %
KY4	5	957	89,4 %
KY8	5	1319	75,0 %
KY13	6	771	88,3 %

Los resultados se muestran en orden ascendente en cuanto al número de estaciones de bombeo que tiene cada caso de estudio. El primer aspecto para destacar es que para todos los casos de estudio existe una reducción efectiva del espacio de soluciones que contendrá soluciones factibles para el problema de optimización. La columna de la derecha muestra la región que poseerá todas las soluciones factibles del problema. Cabe destacar que, de acuerdo a la metodología aplicada, esta región poseerá tanto soluciones factibles como soluciones infactibles, pero fuera de ella, no existirán soluciones factibles.

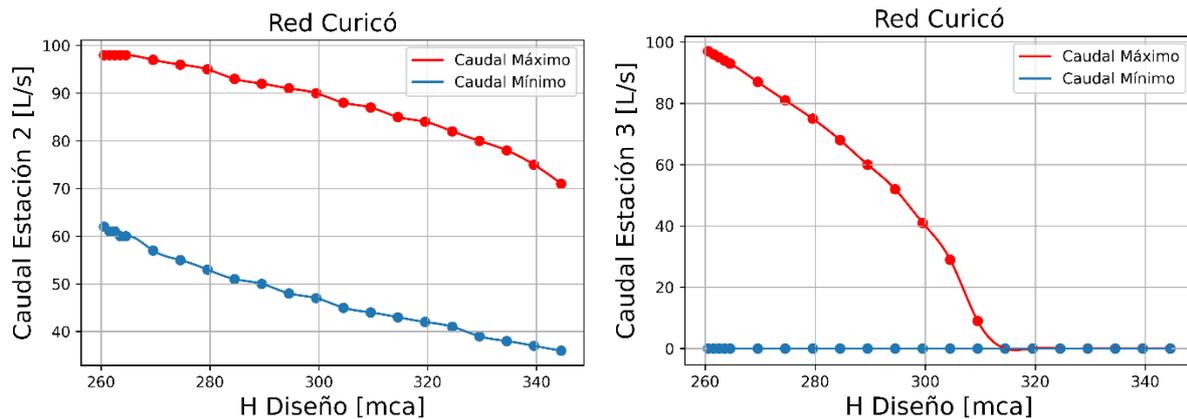
Al analizar los datos con mayor detalle puede observarse que la reducción del espacio de búsqueda es mayor conforme menor es el número de estaciones de bombeo. Esto es lógico, ya que cuanto menor es el número de estaciones de bombeo más restrictivo es el problema, existiendo menor número de combinaciones que cumplen con las restricciones. Esto se atribuye a que los rangos de caudales de trabajo que posee la red son mayores porque en caso de que una EB no trabaje, tiene más opciones de suplir su aporte con otras EB. Numéricamente, los resultados muestran como cuando hay cuatro estaciones de bombeo, el algoritmo de preprocesado permite eliminar más de un 50% del espacio inicial de soluciones, mientras que, para redes con más de 4 estaciones de bombeo, la máxima reducción es de un 25%.

De igual modo, a igualdad de estaciones de bombeo, cuanto mayor es el número de nodos de la red mayor es también la reducción del espacio de búsqueda al aplicar el algoritmo de preprocesado. Consecuentemente, el algoritmo de preprocesado cumple con su objetivo inicial, que era reducir el espacio de búsqueda en redes de mayor complejidad para reducir el costo computacional del algoritmo de optimización que se aplicará posteriormente.

5.2. Preprocesamiento red Curicó

Una vez comprobada la bondad de la metodología, esta se aplica sobre un caso real. Cabe destacar que la red de abastecimiento de Curicó es la de mayor complejidad entre todas las redes estudiadas, ya que es la red más grande (7630 nudos) y la que menos estaciones de bombeo tiene (3). La Figura 6 muestra con detalle los resultados del algoritmo de preprocesado:

Figura 6: Caudales máximos y mínimos para las EB2 y EB3 de Curicó, con sus respectivas $H_{\text{diseño}}$.



La Figura 4 muestra como a medida que aumenta la $H_{\text{diseño}}$, los caudales ya sean máximos y mínimos disminuyen. Esto implica un menor trabajo de EB2 y EB3 conforme aumenta $H_{\text{diseño}}$.

La curva de caudal mínimo representa el caudal que la estación debe suministrar para cumplir las presiones mínimas en la red (15 mca para el caso). Por contra, la curva de caudal máximo muestra el caudal limite que podría entregar la EB, considerando la bomba que entrega mayor presión de acuerdo al catálogo disponible (100 mca en este caso).

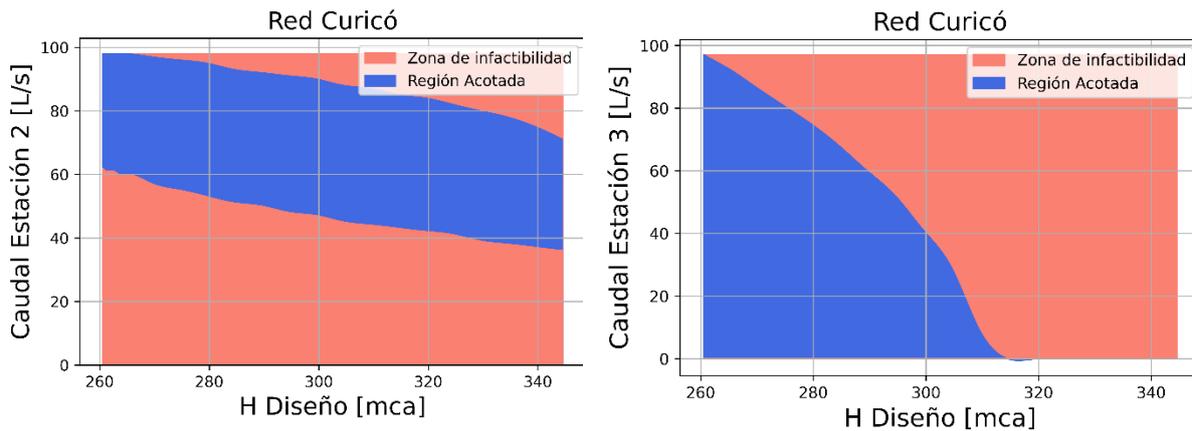
Existen ciertos rangos donde no existen soluciones factibles. Por ejemplo, cuando el embalse tiene $H_{\text{diseño}}$ menor a 260 mca tanto para EB2 y EB3. Esto se produce porque el caudal que debiesen aportar excede la demanda de la red, por lo que se estaría aportando más agua de la que se consume.

Así, en este caso particular, las soluciones factibles para EB2 ocurren a partir de una $H_{\text{diseño}}$ 260,5 mca, que considera la suma de la cota del embalse y la altura proporcionada por la EB. Esto correspondería con un caudal máximo de 98 l/s. En el otro extremo, el mínimo caudal que puede suministrar EB2 para que haya soluciones factibles es de 36 l/s, y en este caso $H_{\text{diseño}}$ sería 344,5 mca.

Para la estación EB3, las soluciones factibles partirán también desde $H_{\text{diseño}} = 260,5$ m. Esto debido a que se debe considerar una cruce entre las curvas de EB, ya que en una red se considera un mismo $H_{\text{diseño}}$ cuando se hace el análisis. El caudal máximo inicial que puede suministrar será de 97 l/s y el mínimo de 0 l/s. No existirían soluciones factibles para $H_{\text{diseño}} > 315$ mca en EB3.

Los resultados muestran como en términos generales EB3 es menos necesaria que EB2, hasta el punto de existir soluciones factibles incluso cuando EB3 no aporta caudal a la red. Una posible causa a esto es la propia distribución altimétrica de la red. A modo de resumen, la Figura 5 muestra, para EB2 y EB3, tanto la zona de infactibilidad como la región acotada que contiene todas las soluciones factibles.

Figura 5: Región acotada del espacio de soluciones de EB2 y EB3 de Curicó, con sus respectivas $H_{\text{diseño}}$.



La Figura 5 muestra que en EB2 la zona de infactibilidad es de un 58,15% del área total. Para EB3, la zona de infactibilidad es de un 61,7%.

Cabe destacar que la región acotada del espacio de soluciones también contiene soluciones infactibles, además de todas las factibles. Esto se produce porque las EB trabajan en conjunto. Consecuentemente, puede ocurrir que para una $H_{\text{diseño}}$ existan soluciones infactibles en una EB y en otra EB la misma $H_{\text{diseño}}$ sea factible. Un ejemplo claro se da para $H_{\text{diseño}} = 315$ mca, donde existen soluciones para EB2 y no para EB3.

El gráfico muestra como EB2 tiene un espacio reducido de soluciones factibles, debido a la cantidad de caudal mínimo que tiene que suministrar a la red para que esta funcione con los requerimientos mínimos establecidos. En el caso de EB3, los resultados también permiten observar una considerable reducción del espacio de soluciones. Esto deja en evidencia que la red, al ser muy grande y por la cantidad de estaciones de bombeo que tiene, tiene un rango de operabilidad bien acotado.

Finalmente, se realizó una media ponderada de la reducción de la red dejando un total de 40,1% de región acotada para la red de Curicó quitando un 59,9% de zona infactible. La reducción del espacio de búsqueda favorece la convergencia del algoritmo de optimización posterior, que busca seleccionar las bombas que operan la red a menor coste cumpliendo todas las restricciones de diseño.

6. Conclusiones

El coste de instalación y operación de estaciones de bombeo es uno de los más elevados en las redes de abastecimiento de agua. Entre los distintos modelos de optimización que tratan de minimizar este gasto se encuentra el dimensionar cada estación de bombeo a partir de una distribución óptima de caudales, pero el número de variables de decisión es elevado. Esto dificulta su resolución en redes reales, ya que, al ser el espacio de búsqueda muy grande, el costo computacional es elevado.

Este trabajo propone un preprocesado automático de la red, que permite reducir el espacio de búsqueda del algoritmo de optimización y favorecer la convergencia de este hacia mejores soluciones. La metodología está basada en criterios hidráulicos que aseguran el cumplimiento de las restricciones del problema. En este sentido, la red debe cumplir con una presión mínima en todos los nudos de la red, la máxima presión que puede suministrar una EB es una variable discreta de las bombas contenidas en el catálogo y la producción de agua potable en las EB debe ajustarse a la demanda de la red.

La bondad de la metodología propuesta se comprueba aplicándola en 5 redes de benchmarking extraídas de la literatura. Una vez validada se aplica a una red de abastecimiento real. De los resultados se concluye que:

- La metodología localiza regiones de soluciones infactibles en todas las redes. Estas pueden eliminarse del espacio de búsqueda del algoritmo, favoreciendo el proceso de optimización.
- La reducción del espacio de soluciones es mayor cuanto menor es el número de estaciones de bombeo. Esto ocurre porque el problema es más restrictivo cuando hay menos EB, ya que existe un menor número de combinaciones que cumplen con las restricciones del problema.
- A igualdad de estaciones de bombeo, la reducción del espacio de soluciones es mayor cuanto mayor es el tamaño de la red.
- La metodología permite determinar que estaciones son más necesarias en la red, esto debido a que calcula los máximos y mínimos caudales con los que cada EB puede trabajar en el rango de soluciones factibles.
- La aplicación sobre un caso de estudio real determina que el espacio de soluciones sobre el que trabajará el algoritmo puede reducirse al menos en un 60%.

En cuanto a las limitaciones del estudio cabe destacar que la metodología solo trabaja con EB de inyección directa, sin considerar variación en el nivel de los depósitos. Adicionalmente, si bien la metodología reduce el espacio de soluciones y por tanto favorece el proceso de convergencia posterior del algoritmo, todavía es necesario cuantificar numéricamente la mejora efectiva del proceso de optimización en término de número de iteraciones.

7. Referencias bibliográficas

- Gutiérrez Bahamondes, J. H., Mora-meliá, D., Iglesias-rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., & Salgueiro, Y. (2021). *Pumping Station Design in Water Distribution Networks Considering the Optimal Flow Distribution between Sources and Capital and Operating Costs*.
- Jolly, M. D., Lothes, A. D., Sebastian Bryson, L., & Ormsbee, L. (2014). Research Database of Water Distribution System Models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(4), 410–416. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000352](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000352)
- Maier, H. R., Simpson, A. R., Foong, W. K., Phang, K. Y., Seah, H. Y., & Tan, C. L. (2003). Ant colony optimization for the design of water distribution systems. *Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges - Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress 2001*, 111, 1–10. [https://doi.org/10.1061/40569\(2001\)375](https://doi.org/10.1061/40569(2001)375)
- Mala-jetmarova, H., Sultanova, N., & Savic, D. (2017). Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental Modelling and Software*, 93, 46. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.009>
- Negrete Flores, M. Y. (2021). *Modelación computacional en epanet de un sector de la red de abastecimiento de agua potable de Curicó*. (Issue Noviembre).

**Comunicación alineada
con los Objetivos de
Desarrollo Sostenible**

