NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA: CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
13 - 16 DE SEPTIEMBRE 2022 CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA
Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI

Implementación de herramientas computacionales para el diseño de redes de distribución de agua potable y de drenaje urbano

Eliana González, Laura Serje, Juan Saldarriaga

Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia

Resumen

En los últimos años se ha visto un notorio incremento en la implementación de herramientas computacionales como apoyo en el diseño de sistemas de acueducto y alcantarillados, tanto a nivel empresarial, como en el proceso de formación de futuros diseñadores.

Estas herramientas son de suma importancia en cursos relacionados con el diseño de sistemas de drenaje urbano y de distribución de agua, ya que, no solo permiten optimizar los costos de estas redes, sino también permiten obtener gráficos e incluso, videoclips mostrando el futuro funcionamiento del sistema. Atendiendo lo anterior, el Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA de la Universidad de los Andes, ha desarrollado dos herramientas. En primer lugar, el software REDES, enfocado en el diseño optimizado de redes complejas de distribución de agua potable, a partir de cinco metodologías de diseño y la segunda herramienta, UTOPÍA, centrada en el diseño optimizado de redes de drenaje urbano teniendo en cuenta la minimización de los costos, y no menos importante, se cuenta con varios programas, incluidos en el libro Hidráulica de Tuberías del ingeniero Juan Saldarriaga.

Con el fin de probar el rendimiento del programa UTOPÍA, se realizaron varias pruebas con diferentes casos de estudio y softwares similares, donde se ha obtenido un costo inferior al reportado en la literatura técnica; mientras que, el programa REDES se ha utilizado para dar solución a problemáticas relacionadas con RDAP, e incluso, se han generado propuestas enfocadas a la modificación de módulos que mejoren y aumenten la aplicabilidad del software en variadas situaciones obteniendo resultados satisfactorios.

Lo anterior lleva a concluir que en la actualidad se ha vuelto imprescindible el desarrollo de capacidades relacionadas con el uso de herramientas computacionales que faciliten el proceso de aprendizaje y mejoren los resultados obtenidos para un diseño de acueducto/alcantarillado.

Palabras clave: modelo matemático; acueducto; alcantarillado

Abstract

In recent years there has been a notable increase in the implementation of computational tools as support in the design of aqueduct and sewage systems, both at the business level, and in the training process of future designers.

In courses related to the design of urban drainage and water distribution systems, the implementation of mathematical models could be very useful, which even allow these networks to be optimized from the point of view of costs, without forgetting that the results can be obtained in the form of graphics and even video clips showing the future operation of the system. In response to the foregoing, the Aqueduct and Sewer Research Center-CIACUA of the Universidad de los Andes has developed, first of all, the REDES software, focused on the optimized design of complex drinking water distribution networks, based on five design methodologies and a second tool, UTOPÍA, focused on the optimized design of urban drainage networks taking into account the minimization of costs, and not least, there are several programs, included in the book Hydraulics of Pipes by engineer Juan Saldarriaga.

In order to test the performance of the UTOPÍA program, several tests were carried out with different case studies and similar software, where a cost lower than that reported in the technical literature has been obtained; while the REDES program has been used to solve problems related to RDAP, and even proposals have been generated focused on the modification of modules that improve and increase the applicability of the software in various situations, obtaining satisfactory results.

The foregoing leads to the conclusion that at present it has become essential to develop capacities related to the use of computational tools that facilitate the learning process and improve the results obtained for an aqueduct/sewerage design.

***Keywords**: mathematical model; water distribution system; sewer*

1. Introducción

Día a día, los retos a los que se ven enfrentados los investigadores al diseñar sistemas de acueducto y alcantarillado son más complejos, ya que, no solo deben centrar sus esfuerzos en el diseño sino también deben tener en cuenta la especificidad de cada caso, consideraciones topográficas y limitaciones económicas. Sin embargo, varios de los programas comerciales con los que cuentan, no ofrecen las herramientas necesarias para enfrentar estos casos. Es por esto que, en los últimos

años, se han centrado los esfuerzos en el desarrollo y la implementación de herramientas computacionales enfocadas en la modelación tanto del diseño hidráulico como del trazado de la red.

La implementación de estos programas permite enfrentar a los investigadores a suposiciones de diseño, operación y manejo de sistemas de redes de acueductos y alcantarillados, favoreciendo el proceso de aprendizaje y facilitando la obtención de resultados. Dada su gran importancia, el Centro de Investigación de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA de la Universidad de los Andes, ha diseñado dos herramientas computaciones centradas en la modelación de escenarios de optimización de diseños.

En primer lugar, se desarrolló el software REDES, enfocado en la modelación hidráulica de redes de acueducto. Por otro lado, para el diseño optimizado de redes de drenaje urbano, se desarrolló la herramienta UTOPIA, la cual se centra en la modelación de sistemas de alcantarillados urbano teniendo en cuenta la minimización de los costos de construcción, basándose en algoritmos de optimización, partiendo de un árbol seleccionado por el investigador, y obteniendo las variables hidráulicas óptimas para cada caso de estudio.

El desarrollo de estos programas computacionales no solo facilita el proceso de diseño a los investigadores, sino que también permite que los estudiantes de cursos relacionados con el diseño de sistemas de drenaje urbano y redes distribución de agua comprendan el proceso de diseño mediante modelos matemáticos, esquemas, gráficos e incluso, videoclips del futuro funcionamiento del sistema.

El diseño optimizado de los sistemas de acueducto y alcantarillado ha tomado gran relevancia no solo en el campo investigativo sino también a nivel empresarial. Es por esto que en esta investigación se busca analizar la implementación de modelos computaciones para el diseño de sistemas de redes de acueductos y alcantarillados, como una herramienta para el aprendizaje y la investigación.

2. Metodología

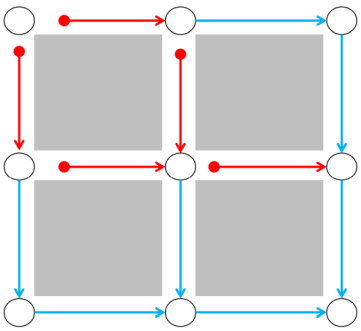
En este inciso se pretende explicar de manera clara y concisa el funcionamiento, ventajas, desventajas, datos de entrada y salida de los programas de diseño y de apoyo educativo, UTOPÍA, REDES y los adjuntos al libro “Hidráulica de Tuberías” del profesor Juan Saldarriaga, desarrollados desde el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA.

2.1. Programa de diseño óptimo de redes de alcantarillado-UTOPÍA.

UTOPÍA es un programa que consta de dos etapas, en la primera se encarga de realizar la selección del trazado de la red y posteriormente procede a realizar el diseño hidráulico óptimo, teniendo en cuenta las restricciones que puedan existir en la normatividad de cada país, en el caso de Colombia, lo establecido por el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS.

Es importante tener en cuenta algunas consideraciones para el adecuado uso de UTOPÍA; primero, en una cámara debe existir solo una tubería de salida y máximo tres tuberías de entrada, segundo, una red debe tener una única descarga o punto de entrega; si se tiene una red con más de un nodo de descarga se deben diseñar redes de recolección independientes para cada descarga y por último, es importante tener presente que una tubería continua es aquella que tiene tuberías conectadas tanto aguas arriba como aguas abajo del tramo, mientras que, una tubería de inicio es aquella que no tiene ninguna conexión aguas arriba.

Figura 1 Esquema del trazado de una red de alcantarillado.



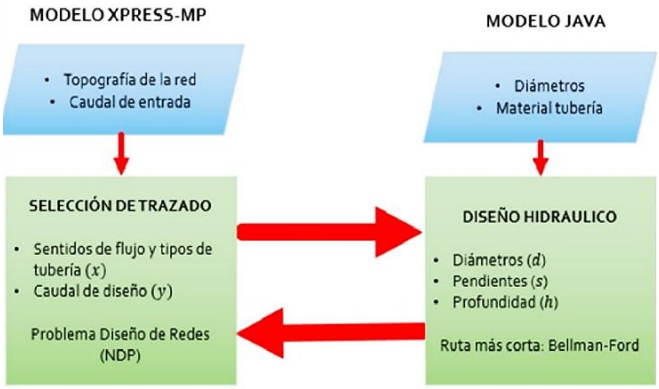
Nota: Las fechas rojas y azules corresponden a tuberías de inicio y continuas, respectivamente.
Fuente: Metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado, Duque, N. 2015.

En una primera etapa, UTOPÍA utiliza un vínculo con el programa de optimización XPRESS-MP, debido a que este software cuenta con un solver de optimización entera mixta. En esta sección el programa se encarga de leer un documento con la topografía de la red con las coordenadas x e y de cada punto y los caudales de entrada, posteriormente, XPRESS-MP realiza la optimización del trazado y se obtiene como resultado el tipo de tubería y dirección del flujo en cada tramo. (Duque & Saldarriaga, 2016)

Finalmente, en la segunda etapa el programa determina el diámetro d y la pendiente que debe tener cada tubería para poder transportar el caudal requerido. Para ello, el programa requiere los resultados de la primera sección: el tipo de tubería, dirección de cada tramo, caudal de cada tramo de la red y no menos importante, la lista de diámetros comerciales y el material de la tubería; teniendo todas las soluciones posibles mediante condiciones de flujo uniforme, el programa selecciona la opción de menor costo de cada tramo, siempre y cuando esta cumpla con los requisitos establecidos por la normativa, para posteriormente sumar los costos de todos los tramos. (Duque & Saldarriaga, 2016)

La Figura 2 corresponde a una esquematización del funcionamiento de UTOPIA.

Figura 2 Esquema del funcionamiento de UTOPIA.



Fuente: Metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado, Duque, N. 2015.

2.2. Programa de diseño de redes de distribución de agua potable-REDES.

REDES es un programa que cuenta con diferentes módulos que permiten la edición, diseño y cálculo hidráulico y de calidad del agua de redes de distribución. El programa permite guardar y cargar archivos de tres tipos: modelo hidráulico, series utilizados en calibración y patrones. Los modelos hidráulicos pueden ser importados o exportados desde o hasta Epanet, Microsoft Access e Intebase y las series pueden ser cargadas o guardadas en archivos propios o compatibles con Epanet.

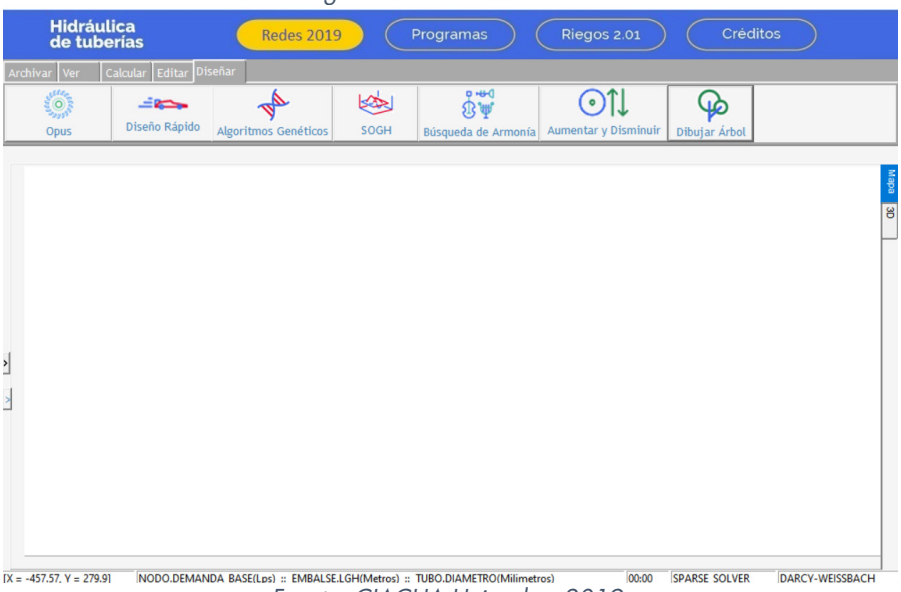
En el módulo de edición, se pueden crear las diferentes redes a diseñar o pueden ser importadas de diferentes programas en varios formatos (".inp", ".mbd", ".ibd"). El módulo de diseño optimizado cuenta con cinco metodologías diferentes, donde se pueden utilizar las dos ecuaciones más usadas en el diseño: la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach (establecida por defecto por ser físicamente basada y no tener restricciones en su uso); las metodologías de diseño incluidas son: Superficie de Uso Óptimo de Potencia (SUOP), Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH), Algoritmos Genéticos, Búsqueda Armónica y Diseño Rápido (combinación entre SOG y programación por restricciones). Los métodos mencionados anteriormente buscan un diseño de costo mínimo, con parámetros ingresados por el usuario, dependiendo de los costos de las tuberías comerciales disponibles. En el módulo de cálculo se pueden encontrar diferentes características de la red como, el cálculo hidráulico estático y dinámico de la red, el cálculo de calidad del agua en períodos estático y dinámico, y la calibración de la red. (Saldarriaga , López, & Páez, 2017)

En este caso, es importante centrar la atención en una de las funcionalidades más utilizadas por los estudiantes, el diseño de redes de distribución de agua potable.

Para realizar un diseño optimizado es necesario especificar los diámetros que se tienen disponibles para el diseño, los parámetros con los que se calculará el costo constructivo de la red, la presión mínima de diseño y la rugosidad de las tuberías, para elegir la rugosidad de diseño se tienen dos opciones: utilizar la rugosidad actual, en cuyo caso se utiliza la rugosidad que tienen los tubos en el modelo abierto, o especificar una rugosidad para toda la red, en cuyo caso se asignará dicho valor a todos los tubos del modelo al realizar el diseño. (Saldarriaga , López, & Páez, 2017)

Posteriormente, debe elegir algunas de las opciones de diseño que le permite el programa: Diseño con superficie optima de presiones, Diseño con algoritmos genéticos, Diseño con programación por restricciones, Diseño rápido y por aproximación de diámetros. (Saldarriaga , López, & Páez, 2017)

Figura 3 Interfaz de REDES.



Fuente: CIACUA Uniandes, 2019.

2.3. Programas del libro "Hidráulica de tuberías".

Los programas del libro "Hidráulica de tuberías", desarrollado por el profesor Juan Saldarriaga para el apoyo y uso en actividades educativas y de diseño en el área de redes de distribución de agua potable están disponibles para todos los estudiantes y/o profesores que adquieran la herramienta.

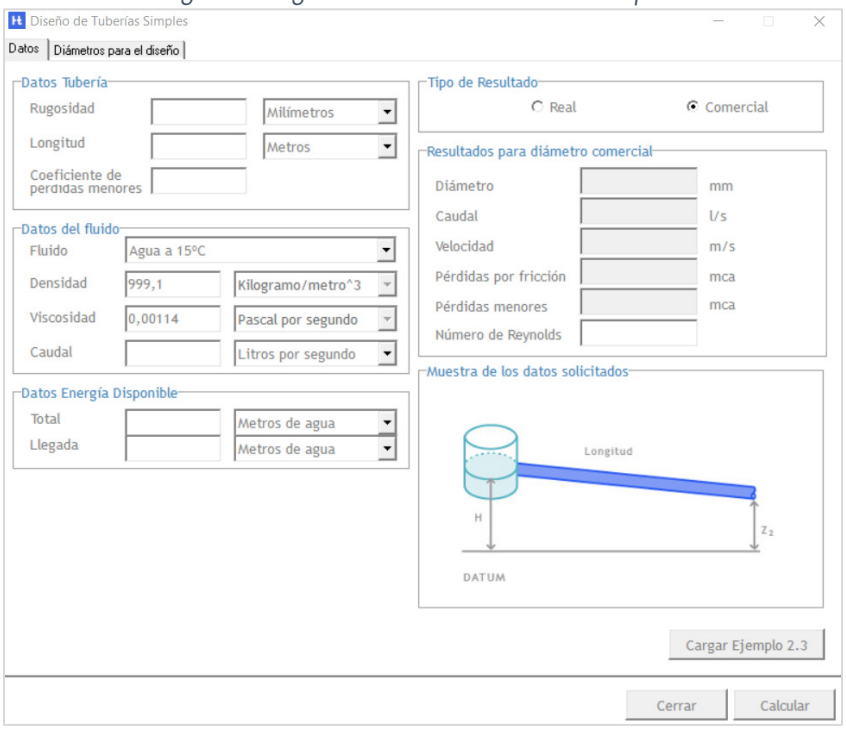
El libro incluye programas enfocados en el "Diseño", "Cálculo de potencia", "Comprobación", "Calibración" y "Cálculo del factor de fricción", en el presente documento se hace énfasis en uno de los programas propuestos para el diseño, específicamente, el cálculo de tuberías simples. En las figuras a continuación se presenta la oferta de softwares incluidos en el libro "Hidráulica de Tuberías".

Figura 4. Hoja de acceso a los programas.

Fuente: Material web "Hidráulica de tuberías", Juan Saldarriaga, 4ta edición.

A continuación, se puede apreciar la información requerida para realizar el diseño de tuberías simples y los resultados arrojados por el programa, exponiendo la sencillez y fácil comprensión de este.

Figura 5 Programa de diseño de tuberías simples.



Fuente: Material web "Hidráulica de tuberías", Juan Saldarriaga, 4ta edición.

3. Resultados y análisis

Partiendo de la metodología desarrollada por Natalia Duque Y Juan Saldarriaga (2016), se han desarrollado varios proyectos enfocados en la definición del trazado y el diseño hidráulico de las redes alcantarillado, minimizando los costos de construcción haciendo uso del programa UTOPIA.

En primer lugar, María Alejandra González (2022), realizó una comparación entre los alcantarillados condominales y los alcantarillados convencionales optimizados. En su investigación, González, se enfocó en el análisis económico del macroproyecto "Ciudad Verde", en el municipio de Soacha, en donde por medio de UTOPIA, modelo ambos tipos de alcantarillados y concluyo que la construcción de alcantarillados convencionales optimizados es un 25.11 % menos costosa que la construcción de alcantarillados condominales. Estos resultados son de suma relevancia no solo en el ámbito investigativo, sino a nivel de desarrollo, ya que, permite evaluar la posibilidad de ampliar la cobertura de sistemas de drenaje en zonas de difícil acceso y recursos económicos limitados.

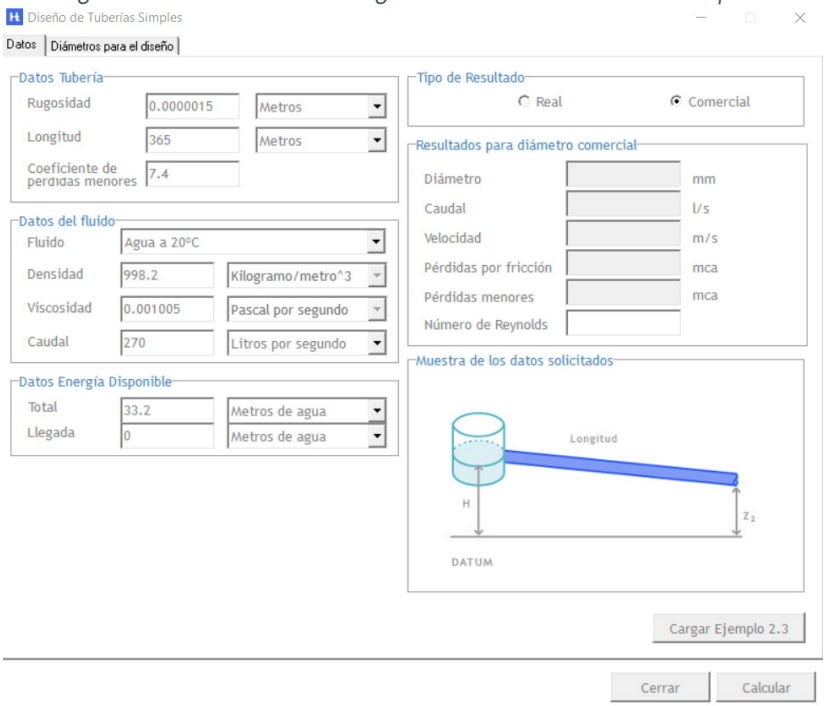
De igual manera, con el objetivo de realizar el levantamiento el catastro de redes de drenaje urbano, María Ximena Valenzuela Blanco (2021), implemento la herramienta UTOPIA, la cual le permitió determinar las características hidráulica de varias redes de alcantarillado en la ciudad de Bogotá. De manera paralela, en su investigación, Valenzuela realizo un estudio de los parámetros y aspectos que los diseñadores de sistema de drenaje en Colombia tienen en cuenta a la hora de realizar los diseños, concluyendo que la mayoría de ellos no utilizan ningún programa de optimización para la selección del árbol, trazado de la red ni diseño hidráulico del sistema. Este estudio, permite observar la necesidad de integrar la enseñanza del uso de herramientas computacionales en las aulas de clase.

Asimismo, en el 2021, Juan Saldarriaga, Jesús Zambrano, Juana Herrán y Pedro Iglesias, propusieron una metodología para la selección del trazado de un sistema de drenaje como una extensión a la metodología propuesta por Duque y Saldarriaga (2016). Esta nueva extensión se basó en la implementación de un objetivo función que involucra todos los datos de entrada del sistema, tales como, la topografía del terreno, la topografía de la red de la calle, y el flujo de entrada en cada pozo. Con el fin de analizar la metodología propuesta, Saldarriaga et al, se centraron en tres casos de estudio: la red de alcantarillado de Chicó en la ciudad de Bogotá y dos redes de alcantarillado propuestas en la literatura. Al implementar la nueva extensión en estas redes, se obtuvo un costo de construcción menor que el reportado en la literatura. Estos resultados se obtuvieron corriendo en modelo con menos iteraciones y en un tiempo computacional menor que el obtenido con la metodología propuesta por Duque y Saldarriaga (2016).

De manera integral, el Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA de la Universidad de los Andes, ha venido trabajando en la adaptación del programa REDES. En el 2018, Kevin Alberto Vargas Álvarez, estudio el código existente e implemento por medio de programación orientada a objetivos, nuevos elementos. A final de su investigación, incluyo nuevos modelos característicos de las redes de distribución de agua potable.

Por último, en las aulas de clase, se han utilizado los programas de modelación de tuberías propuestas por Juan Saldarriaga en su libro "Hidráulica de tuberías" cuarta edición, como herramientas de aprendizaje. Estas herramientas computacionales de fácil uso permiten que el estudiante se enfrente a problemas reales sobre el diseño de tuberías simples, por medio del uso de programas donde únicamente deben ingresar los datos de entrada característicos a la tubería tales como el caudal, rugosidad, longitud de la tubería y el coeficiente de pérdidas de energía (Figura 6).

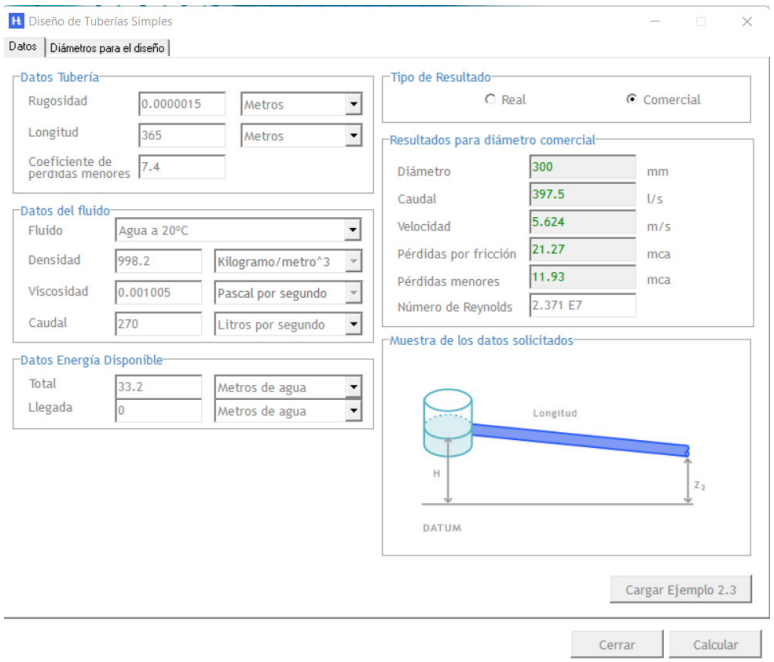
Figura 6 Datos de entreda Programa de diseño de tuberías simples.



Fuente: Material web "Hidráulica de tuberías", Juan Saldarriaga, 4ta edición.

Una vez se ingresaban los datos de entrada, el estudiante corrió el programa y se obtiene el diámetro comercial que se requería para transportar el caudal teniendo en cuenta las pérdidas menores (Figura 7).

Figura 7 Datos de salida Programa de diseño de tuberías simples.



Fuente: Material web "Hidráulica de tuberías", Juan Saldarriaga, 4ta edición.

4. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos es posible afirmar que UTOPIA permite encontrar la mejor solución de diseño optimizado de redes de alcantarillado. En varios trabajos desarrollados, algunos relacionados en el aparte de resultados del presente documento, se muestra la eficiencia del programa en la optimización de redes de alcantarillado con pendientes bajas y altas, algunas de estas, incluso, han sido utilizadas por otros autores implementando diferentes herramientas computacionales con el fin de obtener el mínimo costo, sin embargo, en la actualidad la red de mínimo costo ha sido obtenida utilizando UTOPÍA.

Como ya se expuso antes, UTOPÍA presentó el menor costo total de la red teniendo en cuenta los mismos requerimientos que otras metodologías aplicadas por diferentes autores; adicionalmente, los tiempos de ejecución obtenidos son significativamente bajos respecto a los tiempos de metodologías ajenas.

Por otro lado, a partir de los análisis realizados se ha podido llegar a la importante conclusión de que un alcantarillado convencional optimizado en mucho más económico que un alcantarillado condominal, lo cual resulta transcendental dado el auge actual en la construcción de sistemas de alcantarillado condominal y que en realidad no ofrecen las mismas garantías de funcionamiento de un sistema de alcantarillado convencional.

Con relación a la herramienta computacional REDES, ha sido implementada de manera óptima por los estudiantes de pregrado y postgrado en el diseño y verificación de redes de distribución de acueducto optimizadas, una de las funcionalidades más valoradas por los investigadores en RDAPs, corresponde a las diversas formas de visualización de los valores y parámetros de los elementos; estos pueden presentarse en forma de etiquetas, escala de colores, curvas de nivel, tablas y superficies 3D, como lo hace cualquier otro software comercial.

Es importante mencionar que, REDES no solo se encuentra constantemente actualizado con los últimos desarrollos en algoritmos matemáticos e hidráulicos, sino que genera conocimiento y permite el desarrollo de nuevas metodologías para el análisis de redes de distribución de agua potable y con el tiempo se han ido agregando nuevos módulos de diseño que lo hacen una excelente herramienta computacional para el uso de ingenieros en preparación y en proyectos que ameriten el diseño de RDAPs.

Finalmente y nos menos importante, los programas del libro “Hidráulica de tuberías” del profesor de la Universidad de los Andes, Juan Saldarriaga, ofrecen una amplia gama de alternativas para el docente y el estudiante en el área de diseño y comprobación de la capacidad y comportamiento hidráulico de las tuberías, haciendo uso de las ecuaciones físicamente basadas y recomendadas de acuerdo a su gran confiabilidad y considerando la importante oferta de tuberías de materiales modernos con rugosidades relativamente bajas que ofrece actualmente el mercado.

5. Referencias

- Duque, N., & Saldarriaga, J. (2016). A new methodology for the optimal design of series of pipes on sewer systems. Journal of Hydroinformatics.
- González Molina, M. A. (2022). Comparación económica entre alcantarillado condominial y alcantarillado convencional optimizado.
- Saldarriaga, J., López, L., & Páez, D. (2017). Diseño Optimizado de Redes de Distribución de Agua Potable (Programa REDES). Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.
- Saldarriaga Juan, Zambrano Jesús, Herrán Juana y Iglesis Pedro. (2021). Layout selection for an optimal sewer network design bases on land topography, streets network topology and inflows. Water 2021, 13, 2491.
- Valenzuela María M. (2021). Uso de metodologías de diseño optimizado para el levantamiento de catastro de redes de drenaje urbano. Universidad de los Andes, Colombia.
- Vargas Kevin A. (2018). Adaptación del programa redes para incluir diferentes elementos típicos de las redes de distribución de agua potable. Universidad de los Andes, Colombia.

6. Sobre los autores

- **Juan Guillermo Saldarriaga Valderrama**. Profesor titular, Universidad de los Andes. e-mail: jsaldarr@uniandes.edu.co
- **Laura Serje Martínez**. Estudiante de maestría en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. e-mail: l.serje@uniandes.edu.co
- **Eliana Gonzalez Puello**. Estudiante de maestría en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. e-mail: ep.gonzalezp1@uniandes.edu.co

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)