

**MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA
POTABLE**

**Por
Dario Alberto Hernández Hernández**

www.bdigital.ula.ve

**Trabajo para optar al grado de Magíster Scientiae en Desarrollo de los Recursos Aguas y
Tierras mención: “Obras Hidráulicas”**

**Centro Interamericano de Desarrollo e
Investigación Ambiental y Territorial
Universidad de Los Andes
Mérida- Venezuela
2024**

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso y a la Virgen María, por darme vida y salud para lograr esta meta. Bendíganme siempre.

A mis padres, Ramón Darío Hernández y Rosa Hermildes Hernández, porque hicieron todo en la vida para cumplir mi sueño, por motivarme y darme su mano desde mis primeros pasos, por todas sus enseñanzas a lo largo de mi vida, por su amor y apoyo, mil gracias.

A la memoria de mis abuelos, Ramón Hernández, Rita García, Melicio Hernández, Rosa Valladares y Eduviges Graterol, a todos ellos agradezco su ejemplo y lecciones de vida aprendidas a través de mis padres.

A mis hermanos, Rubén Mejía y Rossymell Hernández, mis compañeros de vida y cómplices, ustedes son mis mejores amigos y mi ejemplo a seguir.

A Maralba Bracamonte, por todo su cariño, comprensión, amor y motivación para lograr esta meta, hoy cumplida. Gracias.

AGRADECIMIENTO

A Dios Todopoderoso, por ser nuestra fortaleza y luz en todo momento.

A la Ilustre Universidad de Los Andes y el CIDIAT, por abrirme sus puertas, por dotarme de los conocimientos y herramientas necesarias para mi formación como Magíster Scientiae en Desarrollo de los Recursos Aguas y Tierras mención: “Obras Hidráulicas”.

A mi tutor, Dr. Luis Mora, por su tiempo y apoyo absoluto para el desarrollo y feliz culminación de este Trabajo de Grado.

A la Hidrológica Municipal Aguas de Ejido C.A. Especialmente al Gerente General Ing. Carlos Suescum, por su colaboración y dedicación en prestarme todo su apoyo y ponerme en contacto con los ingenieros de la sala de proyectos que me facilitaron todos los datos necesarios para poder trabajar con las dos redes del municipio Campo Elías estudiadas en este trabajo.

A la Alcaldía de Campo Elías, por darme acceso a toda la información que fue requerida de la sala de proyectos con respecto a los precios de las tuberías que están manejando en la actualidad.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xxi
NOMENCLATURA.....	xxv
RESUMEN.....	xxvii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. EL PROBLEMA	3
<i>1.1 Planteamiento del problema.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2 Formulación del problema</i>	<i>6</i>
<i>1.3 Objetivos de la investigación.....</i>	<i>6</i>
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos específicos	6
<i>1.4 Justificación de la investigación</i>	<i>6</i>
<i>1.5 Sistema de hipótesis.....</i>	<i>8</i>
<i>1.6 Limitaciones</i>	<i>8</i>
<i>1.7 Alcance</i>	<i>8</i>
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	9
<i>2.1 Antecedentes de la investigación.....</i>	<i>9</i>

2.2 Bases teóricas.....	12
2.2.1 Optimización	13
2.2.2 Modelo de optimización del uso del agua	13
2.2.3 Modelo de optimización de redes de distribución de agua.....	14
2.2.4 Modelo de programación lineal	14
2.2.5 Red de distribución de agua potable (RDAP)	15
2.2.6 Metaheurística	15
2.2.7 Algoritmo Genético	15
2.2.8 Recocido Simulado.....	18
2.2.9 Harmony Search HS (Búsqueda de la armonía).....	20
2.2.10 Velocidades	23
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO.....	25
3.1 Nivel de investigación.....	25
3.2 Diseño de la investigación.....	25
3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	26
3.4 Descripción del área de estudio	27
3.5 Descripción general de la red de agua potable del sector El Palmo.....	28
3.6 Recopilación de datos.....	30

<i>3.7 Modelación de las redes de abastecimiento de agua</i>	<i>31</i>
3.7.1 Recopilación de información.....	31
3.7.2. Creación del modelo en Epanet.....	32
3.7.3. Simulación hidráulica	32
3.7.4. Análisis de resultados	32
3.7.5. Aplicaciones típicas de Epanet.....	33
<i>3.8 Implementación de los métodos optimizadores.....</i>	<i>33</i>
3.8.1. Epanet Brasil	33
3.8.2. Harmony Search (HS)	36
3.8.3. WaterGEMS	40
3.8.4. Otros métodos optimizadores	42
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
<i>4.1 Redes sintéticas estudiadas</i>	<i>44</i>
4.1.1 Red de Hanoi	45
4.1.2 Red de Two-Loops	52
4.1.3 Red de Go-Yang	57
4.1.4 Red de Balerna	63
4.1.5 Red R 9 de Joao Pessoa	66

4.2 Redes del municipio Campo Elías.....	76
4.2.1 Red de El Palmo	76
4.2.2 Red de la Urbanización Don Luis.....	83
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	95
5.1 CONCLUSIONES.....	95
5.2 RECOMENDACIONES.....	97
REFERENCIAS	99
ANEXOS	105

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Velocidades máxima y mínima permisibles en tuberías.	23
Tabla 2. Demanda y cota de los nodos de la red de Hanoi.....	46
Tabla 3. Longitud de las tuberías de la red de Hanoi.	47
Tabla 4. Diámetros y costo de las tuberías para la red de Hanoi.	47
Tabla 5. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Hanoi usando Lenhsnet.	48
Tabla 6. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Hanoi usando WaterGEMS.	49
Tabla 7. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Hanoi optimizado usando HS.	50
Tabla 8. Costo de la red de Hanoi optimizado.	51
Tabla 9. Costo de la red de Hanoi optimizado por otros autores.	51
Tabla 10. Demanda y cota de los nodos de la red de Two-Loops.....	53
Tabla 11. Diámetros y costo de las tuberías para la red de Two-Loops.....	53
Tabla 12. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Two-Loops usando Lenhsnet. ..	54
Tabla 13. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Two-Loops usando WaterGEMS.	54
Tabla 14. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Two-Loops optimizado usando HS.....	55
Tabla 15. Costo de la red de Two-Loops ya optimizada.	55
Tabla 16. Costo de la red de Two Loops optimizada por otros autores	56
Tabla 17. Demanda y cota de los nodos de la red de Go-Yang.	58
Tabla 18. Diámetros y costo de las tuberías para la red de Go-Yang.	58
Tabla 19. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Go-Yang usando Lenhsnet.	59

Tabla 20. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Go-Yang usando WaterGEMS.	60
Tabla 21. Diámetros optimizados de las tuberías para la de red de Go-Yang optimizado usando HS.....	61
Tabla 22. Costo de la red de Go-Yang ya optimizada.....	62
Tabla 23. Costo de la red de Go-Yang optimizada por otros autores.	62
Tabla 24. Diámetros y costo de las tuberías para la red de Balerna.....	64
Tabla 25. Costo de la red de Balerna ya optimizada.	64
Tabla 26. Costo de la red de Balerna optimizada por otros autores.....	65
Tabla 27. Demanda y cota de los nodos de la red R9 de Joao Pessoa Brasil.	67
Tabla 28. Diámetros y costo de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil.....	68
Tabla 29. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil usando Lenhsnet.	68
Tabla 30. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil usando WaterGEMS.	70
Tabla 31. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil optimizado usando HS.	73
Tabla 32. Costo de la red R9 de Joao Pessoa Brasil ya optimizada.	75
Tabla 33. Costo de la red R9 de Joao Pessoa Brasil optimizada por otros autores.....	75
Tabla 34. Demanda y cota de los nodos de la red de El Palmo.....	79
Tabla 35. Longitud y diámetros de las tuberías de la red de El Palmo.	79
Tabla 36. Diámetros y costo de las tuberías para la red de El Palmo.	80
Tabla 37. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de El Palmo usando Lenhsnet.	81

Tabla 38. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de El Palmo usando WaterGEMS.	81
Tabla 39. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de El Palmo optimizado usando HS.	82
Tabla 40. Costo de la red de El Palmo optimizado.	82
Tabla 41. Demanda y cota de los nodos de la red de la Urbanización Don Luis.	87
Tabla 42. Longitud y diámetros de las tuberías de la red de la Urbanización Don Luis.	87
Tabla 43. Diámetros y costo de las tuberías para la red de la Urbanización Don Luis.	89
Tabla 44. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de la Urbanización Don Luis usando Lenhsnet.	90
Tabla 45. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de la Urbanización Don Luis usando WaterGEMS.	91
Tabla 46. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de la Urbanización Don Luis usando optimizado usando HS.	93
Tabla 47. Costo de la red de la Urbanización Don Luis optimizado.	94
Tabla 48. Diámetros en mm optimizados y costo de la red de Hanoi por los tres métodos.	110
Tabla 49. Velocidades en m/s obtenidas en la red de Hanoi optimizada por los tres métodos.	111
Tabla 50. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de Hanoi obtenida por los tres métodos.	112
Tabla 51. Diámetros en mm optimizados y costo de la red de Two-Loops por los tres métodos.	115
Tabla 52. Velocidades en m/s obtenidas de la red de Two-Loops por los tres métodos.	115

Tabla 53. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de Two-Loops obtenida por los tres métodos.....	115
Tabla 54. Diámetros en mm optimizados y costo de la red de Go-Yang por los tres métodos. .	118
Tabla 55. Velocidades en m/s obtenidas de la red de Go-Yang por los tres métodos.	119
Tabla 56. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de Go-Yang obtenida por los tres métodos.....	120
Tabla 57. Diámetros en mm optimizados de la red Balerna por dos métodos.....	122
Tabla 58. Velocidades en m/s obtenidas de la red de Balerna por los tres métodos.....	129
Tabla 59. Número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de Balerna obtenida por dos métodos.	133
Tabla 60. Diámetros en mm optimizados y costo de la red R9 de Joao Pessoa por los tres métodos.....	136
Tabla 61. Velocidades en m/s obtenidas de la red R9 de Joao Pessoa por los tres métodos.	138
Tabla 62. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red R9 de Joao Pessoa obtenida por los tres métodos.....	139
Tabla 63. Diámetros en mm optimizados y costo de la red de New York por los tres métodos.	142
Tabla 64. Velocidades en m/s obtenidas de la red de New York por los tres métodos.....	143
Tabla 65. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de New York obtenida por los tres métodos.....	143
Tabla 66. Diámetros en mm optimizados y costo de la Red 67 Tubos por los tres métodos.....	146
Tabla 67. Velocidades en m/s obtenidas de la Red 67 Tubos por los tres métodos.....	147

Tabla 68. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red Red 67 Tubos obtenida por los tres métodos.....	148
Tabla 69. Diámetros en mm optimizados y costo de la Red de El Palmo por los tres métodos.	150
Tabla 70. Velocidades en m/s obtenidas de la Red de El Palmo por los tres métodos.	150
Tabla 71. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de El Palmo obtenida por los tres métodos.....	151
Tabla 72. Diámetros en mm optimizados y costo de la red de la Urbanización Don Luis por los tres métodos.....	153
Tabla 73. Velocidades en m/s obtenidas de la red de la Urbanización Don Luis por los tres métodos.	154
Tabla 74. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de la Urbanización Don Luis obtenida por los tres métodos.	154

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de un algoritmo genético.....	17
Figura 2. Diagrama general de Recocido Simulado.....	19
Figura 3. Analogía entre improvisación musical y optimización ingenieril	20
Figura 4. Flujograma Algoritmo HS aplicado al diseño óptimo de redes de agua	21
Figura 5. Sector El Palmo	28
Figura 6. Flujograma de actividades para la recolección de datos.....	30
Figura 7. Red de Hanoi	46
Figura 8. Red de Two Loops.....	52
Figura 9. Red de Go-Yang	57
Figura 10. Red de Balerna.....	63
Figura 11. Red R9 de Joao Pessoa Brasil.....	66
Figura 12. Red de El Palmo	77
Figura 13. Red de El Palmo modificada	78
Figura 14. Aprobación de dotación para la Urbanización Don Luis.....	84
Figura 15. Urbanización Don Luis.....	85
Figura 16. Red de la Urbanización Don Luis montada en Epanet con imagen de fondo	85
Figura 17. Red de la Urbanización Don Luis montada en Epanet	86
Figura 18. Red de Hanoi en HS	107
Figura 19. Red de Hanoi en resultado con Lenhsnet	107
Figura 20. Red de Hanoi en Epanet Brasil, con resultado de presión y caudal	108
Figura 21. Red de Hanoi en Epanet Brasil, presión y velocidades	108

Figura 22. Red de Hanoi en WaterGEMS.....	109
Figura 23. Red de Two-Loops en HS.....	112
Figura 24. Costo de la Red de Two-Loops con HS.....	113
Figura 25. Red de Two-Loops con Lenhsnet.....	113
Figura 26. Costo de la Red de Two-Loops con Lenhsnet.....	114
Figura 27. Red de Go-Yang en HS	116
Figura 28. Costo de la Red de Go-Yang en con HS.....	116
Figura 29. Red de Go-Yang con Lenhsnet.....	117
Figura 30. Costo de la Red de Go-Yang con Lenhsnet.....	117
Figura 31. Red de Balerna en HS.....	120
Figura 32. Red de Balerna con Lenhsnet	121
Figura 33. Red R9 de Joao Pessoa	134
Figura 34. Costo de la Red R9 de Joao Pessoa	134
Figura 35. Red R9 de Joao Pessoa con Lenhsnet.....	135
Figura 36. Costo de la Red R9 de Joao Pessoa con Lenhsnet.....	135
Figura 37. Red de New York en HS	139
Figura 38. Costo de la Red de New York con HS	140
Figura 39. Red de New York con Lenhsnet.....	140
Figura 40. Costo de la Red de New York con Lenhsnet.....	141
Figura 41. Red 67 Tubos en HS	144
Figura 42. Costo de la Red 67 Tubos con HS	144
Figura 43. Red 67 Tubos con Lenhsnet	145

Figura 44. Costo de la Red 67 Tubos con Lenhsnet	145
Figura 45. Red El Palmo en HS	148
Figura 46. Costo de la Red El Palmo con HS	149
Figura 47. Costo de la Red El Palmo con Lenhsnet.....	149
Figura 48. Red de la Urbanización Don Luis en HS	151
Figura 49. Costo de la red de la Urbanización Don Luis con HS	152
Figura 50. Costo de la red de la Urbanización Don Luis con Lenhsnet.....	152
Figura 51. Nueva improvisación en el algoritmo de la nueva búsqueda armónica global (NGHS).	156
Figura 52. Descripción de los subprocesos de la metodología OPUS.	165

www.bdigital.ula.ve

NOMENCLATURA

RAAP = redes de abastecimiento de agua potable.

RDAP = redes de distribución de agua potable.

SDAP = sistema de distribución de agua potable.

mca = metros en columnas de agua.

msnm = metros sobre nivel del mar.

PTAR = planta de tratamiento de aguas residuales

mm = milímetros

h = hora

s = segundos

kw = kilovatios

hab/d = habitante por día

l/s = litros por segundo

l/d = litros día

l/hab/d = litros por habitante por día

m³ = metros cúbicos

m/s = metros por segundo

% = porcentaje

in = pulgadas

PVC = poli-Vinilo Cloruro

PEAD = polietileno de alta densidad

PEBD = polietileno de baja densidad

PSI = libra por pulgada cuadrada

\$/m = dólares por metro

C = coeficiente de Hazen-Williams

e = coeficiente de Darcy-Weisbach

ANN: red neuronal artificial (del inglés: Artificial neural network).

www.bdigital.ula.ve

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO
E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y TERRITORIAL
MAESTRÍA EN DESARROLLO DE LOS RECURSOS AGUAS Y TIERRAS MENCIÓN
OBRAS HIDRÁULICAS

MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Autor: Dario Alberto Hernández Hernández

Tutor: Dr: Luis Mora

RESUMEN

La optimización de redes de agua potable es fundamental para mejorar la eficiencia en la distribución y reducir costos de construcción y operativos. En este contexto, se destacan tres métodos: el recocido simulado, el algoritmo genético y el Harmony Search. Este trabajo se centra en la optimización de varias redes sintéticas, así como de dos redes de agua potable en el municipio Campo Elías, específicamente la red de El Palmo y en la red de la Urbanización Don Luis. Para llevar a cabo esta optimización, se utilizaron herramientas de simulación y diseño como Epanet Brasil, WaterGEMS y Harmony Search. El proceso comenzó con la optimización de redes ampliamente estudiadas, lo que permitió comparar los resultados obtenidos con los reportados por otros autores, tras verificar la confiabilidad de los resultados se aplicaron los tres métodos a las redes reales del sector El Palmo y la Urbanización Don Luis. Los hallazgos revelaron que: si estas redes se hubieran diseñado utilizando los métodos optimizadores, se habría logrado: una reducción significativa en los costos de la red del Palmo de un 76.4% así como también se habrían evitado presiones elevadas en gran parte de la red, lo que contribuiría a un mejor funcionamiento del sistema, por otro lado, la reducción de costo para la red de la Urbanización Don Luis fuese de un 62.8%. Finalmente, se propone la implementación de estos métodos optimizadores en el diseño de nuevas redes de abastecimiento de agua potable y en su rehabilitación. Esto no solo permitiría un manejo más eficiente de los recursos hídricos, sino que también garantizaría un suministro más sostenible del vital líquido. La adopción de estas técnicas puede transformar la gestión del agua, promoviendo una distribución más equitativa y eficiente en las comunidades, reduciendo igualmente los costos de inversión.

Palabras Clave: Algoritmo, optimizar, software, eficiencia, costo, comparar.

INTRODUCCIÓN

La optimización de redes de abastecimiento de agua potable es un problema complejo que involucra múltiples variables y restricciones. El objetivo principal es encontrar la configuración óptima de la red que minimice los costos de operación, maximice la calidad del servicio y asegure la continuidad del suministro. Tradicionalmente, este problema se ha abordado mediante métodos de optimización clásicos, pero en las últimas décadas, las técnicas metaheurísticas han ganado popularidad debido a su capacidad para encontrar soluciones de alta calidad en problemas complejos y de gran escala.

Entre las metaheurísticas más utilizadas en la optimización de redes de agua se encuentran el recocido simulado, los algoritmos genéticos y el harmony search. Estas técnicas, inspiradas en procesos naturales como la metalurgia, la evolución biológica y la improvisación musical, respectivamente, ofrecen una alternativa eficaz a los métodos tradicionales.

Epanet Brasil, simula este proceso mediante la generación de soluciones aleatorias y la aceptación de soluciones (mejores o peores) con una cierta probabilidad, lo que permite escapar de mínimos locales y encontrar la solución global.

WaterGEMS es una herramienta que usa algoritmos genéticos. En este método, se crea una población inicial de soluciones (individuos) y se evalúa su aptitud. A través de operaciones como selección, entrecruce y mutación, se crean nuevas generaciones de soluciones, buscando mejorar la aptitud de la población.

Harmony Search, es una metaheurística inspirada en el proceso de improvisación musical. En este método, se crea una armonía inicial (solución) y se generan nuevas armonías mediante la combinación de notas (variables) existentes y la improvisación de nuevas notas. La mejor armonía se selecciona y se actualiza la memoria de la búsqueda para mejorar las soluciones en las siguientes interacciones.

En este trabajo, se explorará la aplicación de estas tres metaheurísticas en la optimización de redes de abastecimiento de agua potable. Se presentarán los fundamentos teóricos de cada método, se describirán las implementaciones realizadas y se compararán los resultados obtenidos.

El propósito general del presente trabajo de investigación, se dirige a realizar el diseño óptimo de diferentes redes sintéticas para luego aplicar los tres modelos optimizadores a dos redes reales del municipio Campo Elías. Se proyecta analizar y hacer el diseño óptimo de la red de El Palmo y la red de la Urbanización Don Luis.

Con el uso de herramientas informáticas es posible conocer las respuestas dinámicas de los elementos que conforman un sistema de distribución de agua, unos ejemplos son los softwares “EPANET Brasil, WaterGEMS y HS”, los cuales serán utilizados en esta investigación, ya que estos programas permiten modelar y optimizar redes de distribución de agua potable.

CAPÍTULO 1

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Dentro del contexto mundial, el agua es uno de los recursos más valioso del planeta, este elemento es indispensable para la vida del ser humano, por ello, es necesario optimizar su distribución, lo cual se explica como la tendencia responsable de hacer una buena gestión y control de su uso, igualmente se debe asegurar que su regreso al medio ambiente sea en las mejores condiciones. Al hablar de optimizar se hace referencia a encontrar formas de usar el agua de manera más eficiente y que se pueda aprovechar hasta la última gota sin permitir el desperdicio.

La población mundial crece sin parar y de una manera cada vez más rápida, este factor demográfico aunado a los diferentes cambios climáticos constituye otro elemento de riesgo para el recurso “agua” que se volverá cada vez más escaso, específicamente en las regiones más pobladas, donde inclusive llega a contaminarse, o perder su potabilidad y no ser apta para el consumo. Es por ello, que se debe evitar el desperdicio del agua, reparar las zonas de escape, fuga o evaporación en tuberías, el uso de sistemas de limpieza en seco, reutilizar el agua residual con ayuda de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Arroyo (2022) expresa que una gestión integrada del agua y optimizar su uso son las claves para garantizar su sostenibilidad. Cada día hay más evidencia sobre el cambio climático en el mundo. Los principales y más llamativos son el aumento de la temperatura media de la tierra; el incremento del nivel del mar y de su temperatura; la frecuencia, cada vez mayor, y la

intensidad, de los fenómenos meteorológicos extremos; los cambios que se producen en los ecosistemas, tales como la desertización, el auge del número de especies en extinción; las continuas sequías; y los efectos sobre el medio ambiente y el ser humano.

Tomando en cuenta la importancia del agua para los seres humanos se realiza esta investigación, la cual consiste en comparar métodos de optimización basados en metaheurística para redes de abastecimiento de agua potable, la finalidad de las redes es proporcionar agua para consumo doméstico, público, comercial, industrial y para condiciones extraordinarias como extinguir incendios. La red proporciona este servicio todo el tiempo. Esto no sólo ayuda a preservar los ecosistemas naturales, sino que también garantiza la disponibilidad de agua para las futuras generaciones

Una metaheurística es un método general de resolución de problemas, especialmente útil para abordar aquellos que son complejos y no tienen una solución exacta conocida. En lugar de seguir un algoritmo estricto, las metaheurísticas emplean estrategias de búsqueda inteligentes para explorar un espacio de soluciones de manera eficiente, buscando así una solución óptima o cercana a ella.

Es importante destacar que la investigación se fundamenta en las estrategias que proporcionan las líneas de investigación del Centro Interamericano de Desarrollo e investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT) ULA; cuya finalidad es la enseñanza del conocimiento en torno al aprovechamiento sustentable del agua, la tierra y los recursos naturales asociados y el ambiente, basados en un programa de asistencia técnica, asesoría, elaboración de estudios y proyectos de investigación. El CIDIAT incorpora la dimensión integral para la

planificación, aprovechamiento, manejo y administración del agua y demás recursos naturales asociados, en donde la cuenca hidrográfica figura como principal unidad de análisis sobre los cambios climáticos y los riesgos naturales.

En la ingeniería civil, un método habitual en el diseño de un sistema de abastecimiento de agua es el ensayo y error. Un ingeniero selecciona diseños alternativos y los simula utilizando un analizador de redes. A causa de las complejas interacciones entre componentes, puede ser difícil identificar los cambios para mejorar un diseño, incluso en sistemas de tamaño mediano. Adicionalmente, esta aproximación no proporciona la seguridad de que se haya determinado una buena y mucho menos óptima solución. Por ello, se ha realizado un esfuerzo significativo en desarrollar aproximaciones para encontrar el diseño óptimo de un sistema de distribución con cierto éxito. Sin embargo, dada la complejidad del problema y las limitaciones de las herramientas matemáticas de programación, el problema complejo no ha sido aún resuelto (Mays, 2002).

Por eso cuando se diseña o rehabilita un sistema de abastecimiento de agua, usando ensayo y error o con herramientas formales de optimización, deben considerarse diferentes temas. El costo suele ser el problema principal, que incluye los costos de construcción, operación y mantenimiento. Las restricciones principales son que las demandas deseadas sean suministradas con la presión adecuada (Mays, 2002).

1.2 Formulación del problema

Tomando en cuenta lo planteado surge la siguiente interrogante:

¿Cómo comparar el rendimiento de los métodos optimizadores para obtener resultados confiables y precisos?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar y comparar la efectividad de tres métodos de optimización: Recocido Simulado (Lenhsnet), Algoritmo Genético (WaterGEMS) y Búsqueda de la Armonía (HS), para diferentes redes sintéticas de abastecimiento de agua potable y dos redes de la ciudad de Ejido, estado Mérida.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la red de distribución o abastecimiento de agua potable
- Implementar y evaluar los modelos de simulación
- Comparar el rendimiento de los tres métodos
- Comparar los resultados de cada método optimizador en función al costo total de la red
- Proponer mejoras para la simulación operativa de una red de abastecimiento de agua potable específica

1.4 Justificación de la investigación

Esta investigación responde a la necesidad de comparar métodos optimizadores basados en metaheurística de una red de abastecimiento de agua potable para el sector El Palmo y la Urbanización Don Luis en Ejido, estado Mérida, lo cual conlleva a establecer un conocimiento

técnico de las variables que inciden en el logro de la calidad y correcta utilización del agua potable. Cabe destacar que estos métodos servirán como base de control para satisfacer el nivel de servicio exigido por la población, de igual manera se tomará en cuenta los elementos que intervienen en la tarea compleja del recorrido del agua (tuberías, válvulas, tanques, depósitos, estaciones de bombeo).

En este orden de ideas se explica “para qué” se realiza la investigación, haciendo énfasis en lo que se quiere lograr: Maximización del agua potable a través de métodos optimizadores basados en metaheurística, como forma de resolver un problema a través de diseños y procedimientos que dan origen a un alto rendimiento del propósito a ejecutar. En tal sentido, se puede señalar que el desarrollo de la investigación se fundamenta en los dos tipos de relevancia, indispensables en todo proyecto de investigación, escrito por Carlino, (2021): “La relevancia teórica o epistémica atañe al aporte de conocimiento que un estudio podrá hacer respecto de los que otros investigadores están debatiendo sobre el tema. La relevancia practica o aplicada, se refiere a la contribución que eventualmente (y de forma indirecta) podrá hacer la investigación a algún ámbito de prácticas por parte de los investigadores” (p.2).

En la relevancia de la investigación es de gran importancia tomar en cuenta la participación activa de todos los involucrados (investigador (es), comunidad, entes gubernamentales, autoridades competentes y todos los partícipes a quienes concierne la solución a la problemática existente), bien para beneficio propio como de toda la población afectada. Este paso implica varias acciones: reuniones, entrevistas, encuestas, visitas a los organismos públicos y a todos los representantes de la comunidad afectada, con el fin de realizar un trabajo óptimo con base

firme, mientras más se sumen a colaborar de manera consciente, mejor se desarrollará la investigación y sus resultados serán más efectivos.

1.5 Sistema de hipótesis

Para la ejecución de estudios y aplicaciones en ingeniería es útil realizar una comparación de métodos optimizadores basados en metaheurística para una red de abastecimiento de agua potable.

1.6 Limitaciones

El presente trabajo se limita a la comparación de métodos optimizadores basados en metaheurística de una red de abastecimiento de agua potable tomando como función objetivo, solo la reducción de costos de inversión, en un periodo comprendido entre marzo 2024 a septiembre 2024. El estudio se ubica en la línea de investigación descriptiva. Entre los teóricos manejados se pueden citar: Arroyo (2022), Carlino (2021), Arias (2012), Hernández et al. (2014), Becker y Ulrich (2000). La investigación se enmarca dentro de la optimización de las redes abastecimiento de agua potable mediante la comparación de tres métodos de optimización: Recocido Simulado, Algoritmo Genético y Búsqueda Armónica.

1.7 Alcance

Verificar qué método de optimización da mejores resultados en una red de abastecimiento de agua potable, que será hallado de forma experimental a través de métodos optimizadores.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Para Arias (2012) el marco teórico o referencial “es el producto de la revisión documental-bibliográfica, y consiste en una recopilación de ideas, posturas de autores, conceptos y definiciones que sirven de base a la investigación por realizar” (p. 106). El marco teórico amplía la descripción del problema ya que integra la teoría con la investigación, lo cual permite precisar y organizar los elementos contenidos en los objetivos y el planteamiento del problema, de tal forma que puedan ser manejados y convertidos en acciones concretas que conlleven a dar solución al problema de investigación. El marco teórico, generalmente se estructura en tres secciones: Antecedentes de la investigación, bases teóricas y definición de términos básicos.

2.1 Antecedentes de la investigación

Según Arias (2012) “los antecedentes se refieren a los estudios previos: trabajo y tesis de grado, trabajos de ascenso, artículos e informes científicos relacionados con el problema planteado, es decir, investigaciones realizadas anteriormente y que guardan alguna vinculación con nuestro proyecto, por lo que no deben confundirse con la historia del objeto en cuestión” (p. 106).

Establecer los antecedentes del problema no es hacer un recuento histórico del problema, o presentar fuentes bibliográficas que se van a utilizar, se trata de hacer una síntesis conceptual de las investigaciones o trabajos realizados que guardan relación con el problema formulado con el fin de determinar el enfoque metodológico de la misma investigación. Es importante que en la presentación de antecedentes se busque aprovechar las teorías existentes sobre el problema para estructurar de manera más concreta el marco teórico en función del problema y ser un

medio seguro para lograr los objetivos del mismo. A continuación, se toman como antecedentes algunas investigaciones similares al caso de estudio.

Castillo et al (2014) en su investigación titulada “Optimización de la distribución de agua potable rural mediante el uso de la programación lineal”, tuvieron como objetivo desarrollar una investigación de aplicación para determinar un plan óptimo de distribución de agua potable a los habitantes de comunidades rurales de la comuna de Combarbalá en Chile, con el uso de camiones aljibes (cisternas). Basado en técnicas de investigación de operaciones, cuya función objetivo es de minimizar el número de viajes para disminuir los costos asociados al traslado del agua, se consideran las condiciones que presenta la comuna en estudio. Se establece un modelo lineal que minimiza el número de viajes permitiendo generar un ahorro del 20% en los costos de operación con la solución propuesta, y asegura la distribución de agua a toda la población de la comuna.

Esta investigación es de vital importancia, ya que enfatiza la necesidad de optimizar la distribución de agua potable a los habitantes de comunidades rurales, es por ello que existe relación con la investigación en cuestión, dada la similitud del objetivo que se requiere alcanzar con el desarrollo de ésta para beneficio de los sectores favorecidos con la optimización del agua, una vez que se desarrolle en su totalidad los objetivos propuestos para lograr la efectividad de la labor ejecutada.

Soler (2016) en su tesis Doctoral “Optimización en tiempo real del modo de operación de un abastecimiento de agua mediante técnicas metaheurísticas, aplicación a la red de suministro a Valencia y su área metropolitana”, utilizó una metodología de operación óptima en tiempo real de una red hidráulica basada en el desarrollo de una plataforma que permite la integración de

modelos de simulación, los modelos de predicción y los algoritmos de optimización con los sistemas de supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA).

Con vistas a realizar una optimización en tiempo real lo más ajustada a la realidad, Soler (2016) adoptó un modelo de previsión de demanda basado en patrones históricos procedentes de los datos de consumos obtenidos a través del propio sistema SCADA. Finalmente, desarrolló un módulo de optimización para minimizar los costos energéticos del sistema de bombeo, el cual consta básicamente de dos bloques. En el primer bloque utilizó una metodología de operación óptima en tiempo real de una red hidráulica basada en el desarrollo de una plataforma que permite la integración de modelos de simulación, los modelos de predicción y los algoritmos de optimización con los sistemas SCADA.

Con miras a realizar una optimización en tiempo real, lo más ajustada a la realidad, Soler (2016) adoptó un modelo de previsión de demanda en patrones básicos procedentes de los datos de consumo. La tesis Doctoral presenta unos resultados que prueban la efectividad del modelo propuesto en la búsqueda de estrategias de operación viables para ser aplicado sobre un sistema de distribución de agua real compuesto por dos estaciones de bombeo, varios depósitos y diversas válvulas de regulación motorizadas, en la que se ha podido omitir muchos de los componentes físicos del sistema mediante el uso de una arquitectura ANN (red neuronal artificial, del inglés: Artificial neural network), pero sin perder de vista los puntos críticos donde se han establecido las restricciones de presión. La reducción del consumo eléctrico alcanzado pone de manifiesto la importancia del modelo de optimización como instrumento de mejora de la eficiencia energética del sistema.

Pereyra et al. (2016) realizaron un trabajo de investigación en la Universidad Nacional de la Patagonia Austral, titulado “Diseño y optimización de redes de distribución de agua utilizando algoritmos genéticos”, en el cual tuvieron como objetivo principal minimizar el costo de la red cumpliendo ciertas restricciones como: presión mínima, caudal, velocidad del agua, entre otros, mediante la aplicación de Algoritmo Genético para demostrar la eficacia en cuanto a buena aproximación, calidad y tiempo de cómputo, al resolver este tipo de problema de optimización que por sus características pertenece a un problema NP-Duro (es un desafío computacional significativo). El diseño de una red de distribución de agua, se rige por ecuaciones lineales y no lineales que se resuelven por Algoritmos Genéticos. Obtuvieron resultados satisfactorios y de gran calidad en cuanto a los algoritmos propuestos.

Desde el punto de vista de relación entre los antecedentes citados y la investigación a realizar se enfatiza la importancia de las redes de distribución de agua y sus requerimientos de optimización, a través de la correcta distribución de ésta mediante el cuidado, control y supervisión del recorrido que realiza desde el punto de salida hasta los hogares para su consumo en óptimas condiciones.

2.2 Bases teóricas

De acuerdo con Arias (2012) “Las bases teóricas implican un desarrollo amplio de los conceptos y proposiciones que conforman el punto de vista o enfoque adoptado, para sustentar o explicar el problema planteado” (p. 107). Estas bases teóricas o conceptuales tienen como propósito dar a la investigación un sistema coordinado y coherente de conceptos y proposiciones que permitirán situar al problema dentro de un conjunto de conocimientos, lo más sólidos posibles, de tal modo que conduzcan a orientar una clara búsqueda y ofrezcan la

conceptualización adecuada de los términos utilizados, que ubiquen el punto de partida para desarrollar el contenido previo del problema abordado, así como también las enseñanzas extraídas de la revisión bibliográfica. Entre las bases teóricas que se abordan en esta investigación se mencionan:

2.2.1 Optimización

Según Ramos et al. (2010) “La optimización consiste en la selección de una alternativa mejor, en algún sentido, que las demás alternativas posibles” (p. 5).

Los diferentes métodos de optimización que plantea la investigación operativa son clave fundamental para la toma de decisiones, ya que ayuda a darle solución a los diversos problemas que se presentan dentro de una empresa y/o organización.

2.2.2 Modelo de optimización del uso del agua

Este modelo fue creado por Fisher y colaboradores (2000), asigna los recursos hídricos de modo que, dadas las limitaciones, se maximiza el beneficio neto de todos los consumidores. Cuando existe una o más limitaciones se emplean “valores sombra” para encontrar la solución. El valor sombra de una determinada limitación equivale al beneficio neto adicional que se obtiene si dicha limitación se reduce.

El precio sombra o precio social o precio cuenta, es el precio de referencia que tendría un bien en condiciones de competencia perfecta, incluyendo los costos sociales además de los privados, representa el “costo oportunidad de producir.”

2.2.3 Modelo de optimización de redes de distribución de agua

Una red de distribución de agua generalmente está representada por un grafo en el cual las tuberías están representadas por un conjunto de arcos E , y un conjunto de nodos V , que representan la demanda, suministro de reservorios y las conexiones entre dos o más tuberías. Para una tipología dada, con tuberías y puntos de demanda dados, el diseño óptimo de una red de distribución de agua, representada por un grafo, consiste en encontrar la combinación comercial de diámetros de tuberías, lo cual representa el costo mínimo de la red, sujeto a determinadas restricciones hidráulicas.

El grafo en matemáticas y computación constituye el conjunto de vértices o nodos unidos por enlaces llamados aristas o arcos que permiten representar relaciones binarias entre los elementos de un conjunto.

2.2.4 Modelo de programación lineal

Este modelo es uno de los más utilizados en la investigación de operaciones, el cual tiene la característica de que todas las expresiones que lo componen son lineales. Cuenta con una función objetivo, la cual se pretende optimizar, y una serie de expresiones matemáticas que representan las restricciones que deben satisfacer para que la solución obtenida sea óptima y factible.

Este proceso significa que la solución del modelo matemático sea lo más clara y concreta posible para que se pueda implementar en la realidad con la finalidad de obtener resultados óptimos en el proceso que se está desarrollando.

2.2.5 Red de distribución de agua potable (RDAP)

Una red de distribución o abastecimiento de agua potable, según Mora (2012), “no es más que una serie de componentes que, conectados de modo adecuado entre sí, suministran la cantidad de agua demandada a la presión establecida. Estos componentes son tuberías, válvulas, bomba, depósitos, etc.” (p. 1).

Estos sistemas permiten preservar la calidad y la cantidad de agua, así como mantener las presiones suficientes en la distribución de ésta; básicamente está compuesto por una red de tuberías, válvulas y otros componentes.

2.2.6 Metaheurística

Según Hillier y Liberman (2010), una metaheurística “es un método de solución general que proporciona tanto una estructura general como criterios estratégicos para desarrollar un tipo particular de problema” (p. 563). En pocas palabras las metaheurísticas son estrategias fundamentales para la solución de problemas de optimización.

2.2.7 Algoritmo Genético

Según Pereyra et al. (2016):

“Los Algoritmos Genéticos (AG), son una clase de algoritmos evolutivos. Utilizan una población inicial de individuos, donde su esencia está basada en la supervivencia del más apto, que representa según la filosofía Neo-Darwiniana, la evolución natural de la población como un conjunto de procesos estocásticos: reproducción, mutación, competencia y selección.

Un AG aplica operadores de cruce a dos individuos que poseen mejores aptitudes, de esta manera la población actual es reemplazada por la nueva población, producto de la reproducción de los más aptos. Si un individuo no posee una determinada aptitud, luego de varias generaciones será descartado.

Además, un operador adicional de mutación, modifica aleatoriamente a un individuo para promover la diversidad en la población.

En un AG, la aptitud de un individuo está dada por el valor de la función objetivo, la cual es la función a optimizar, dependiendo del problema. En este caso, para las redes de distribución de agua, se pretende minimizar la función de costo de la red dada por la ecuación ($Minimizar f(D_j) = \sum_{j=i}^E C_j * (D_j, L_j)$). Aunque el resultado final del AG no garantiza el individuo óptimo, esto es debido a su carácter aleatorio, la exploración del espacio de búsqueda permite encontrar “buenas” soluciones muy cercanas al mismo.

Un AG posee los siguientes componentes:

Representación: Un AG utiliza generalmente representación binaria, aunque existen otros tipos de representación como la numérica. La representación de la solución se denomina cromosoma, y está compuesta por unidades denominadas genes.

Inicialización de la población: Generación aleatoria de individuos que representan el conjunto inicial de soluciones.

Función objetivo: Permite determinar la aptitud o el fitness de cada individuo, el cual lo considera más o menos apto.

Selección probabilística: Permite seleccionar aleatoriamente los individuos que se utilizarán para la reproducción. Está determinada por una probabilidad para cada individuo. Existen diferentes estrategias de selección, por ejemplo: por torneo, proporcional, o basada en ranking.

Operador genético: El operador genético de reproducción, dependiendo del tipo de estrategia puede variar. Los padres de la población son seleccionados para reproducirse utilizando diferentes estrategias. La mutación es otro operador genético, en un AG canónico el ratio de mutación se mantiene bajo, esto permite añadir más diversidad a la población.

Reemplazo: Luego del operador genético de reproducción, la población padre es reemplazada por la población hija. Los hijos compiten con los padres para ocupar un lugar en la siguiente generación.

Criterio de terminación: Por último, se establece un criterio de terminación, que generalmente consiste en un número fijo de generaciones” (pp. 44-45).

En la Figura 1 se presenta el ciclo de un algoritmo genético.

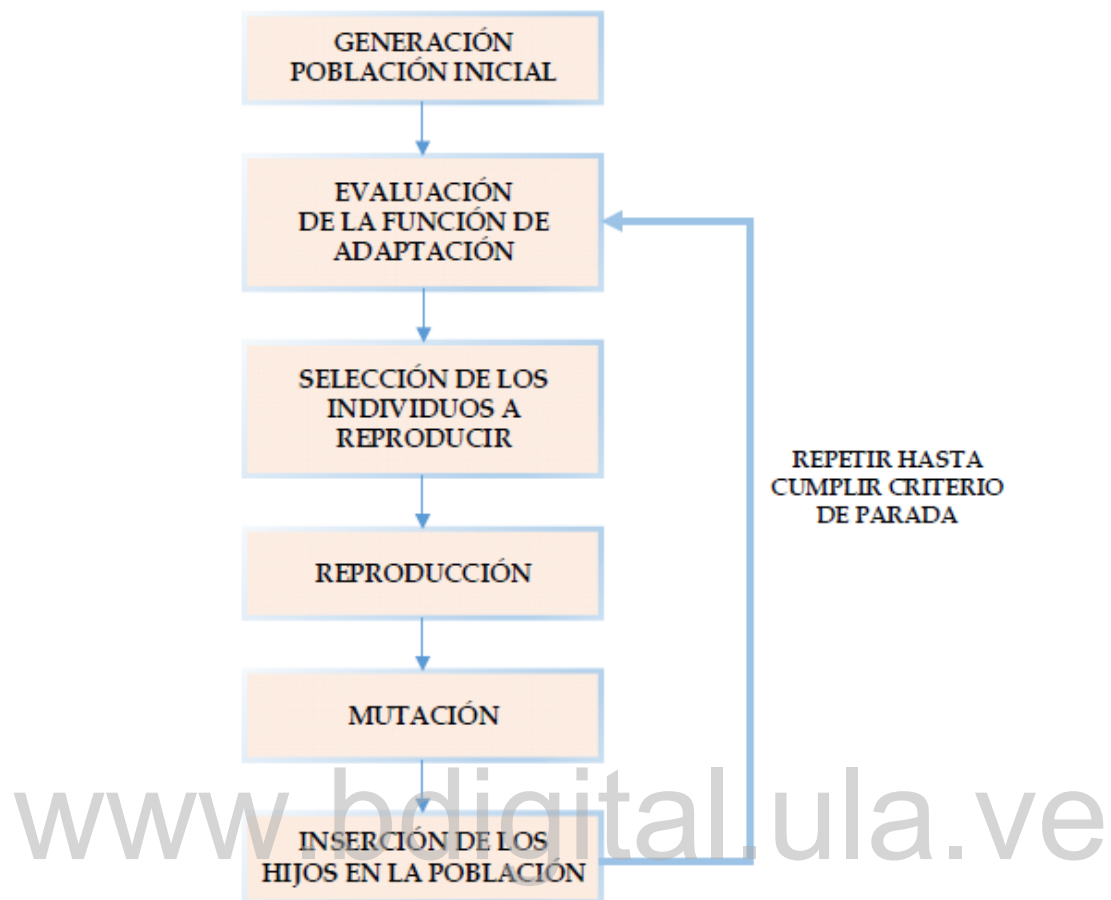


Figura 1. Ciclo de un algoritmo genético.

Fuente: Soler (2016)

2.2.8 Recocido Simulado

Según Millet (2014), en su trabajo indica que:

“El recocido simulado (Simulated annealing, SA): Algoritmo evolutivo. Imita el proceso de enfriamiento de un metal tras ser fundido, por el cual sus partículas se ordenan en una estructura cristalina de mínima energía, lo que le confiere mayor resistencia. En general, cualquier sistema de la naturaleza busca alcanzar un estado de mínima energía.

Parte de una única solución que evoluciona a lo largo del proceso de búsqueda donde el parámetro básico de guía es la temperatura. Al principio, un alto valor de la temperatura confiere una mayor flexibilidad al algoritmo para moverse a través del espacio de búsqueda. El enfriamiento avanza, la temperatura desciende y la capacidad de búsqueda disminuye, lo que puede llevar a quedar atrapado en un óptimo local. El algoritmo marca las reglas para el descenso de temperatura porque si el enfriamiento es muy lento la búsqueda resulta ineficiente y si es demasiado rápido puede llevar a soluciones no óptimas.

Esta técnica se puede aplicar a problemas no lineales, con múltiples óptimos locales y muchas restricciones. Es robusta y en muchas ocasiones permite encontrar el óptimo global, aunque no está garantizado.

Los inputs del algoritmo son una configuración inicial x_1 de la RDA, una temperatura inicial T_1 , una temperatura de parada T_f y una función de costo $C(x)$ para obtener el costo de cada configuración x . El output del algoritmo es una aproximación al óptimo global.” (p. 27).

En la Figura 2 se presenta el diagrama general de recocido simulado.

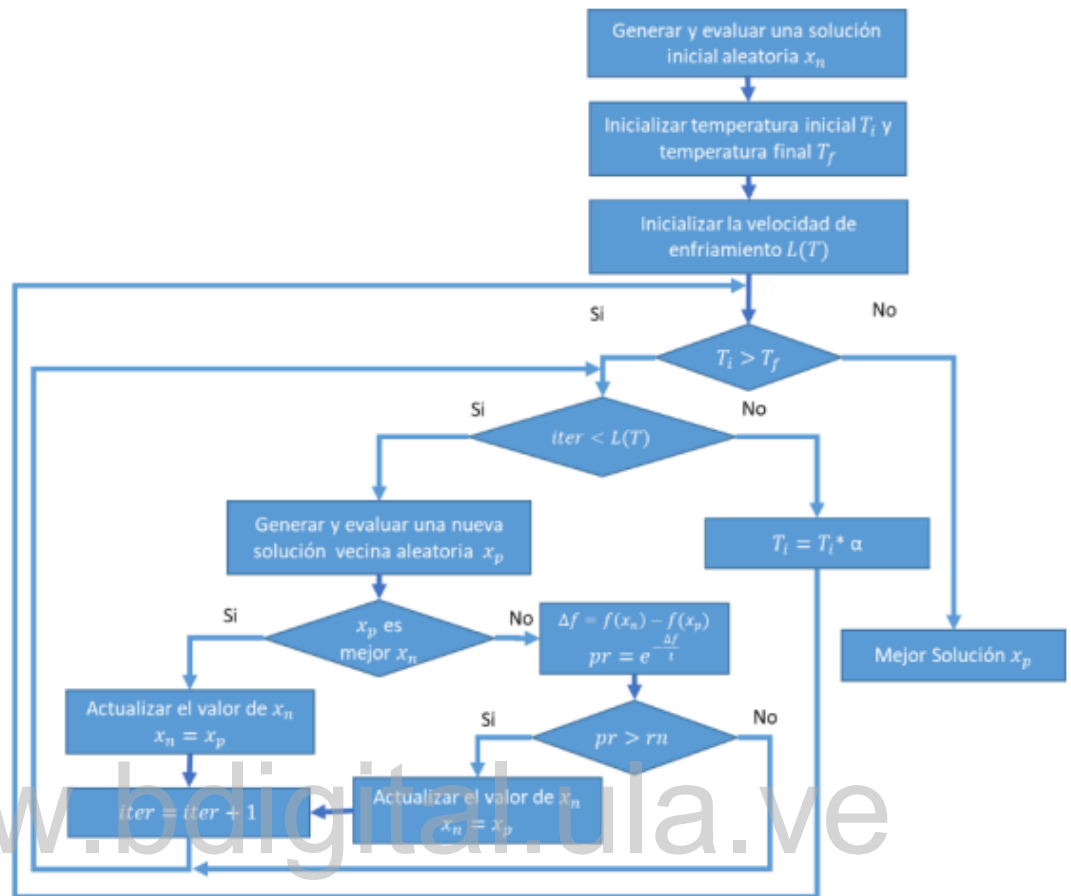


Figura 2. Diagrama general de Recocido Simulado.

Fuente: Meléndez (2020)

2.2.9 Harmony Search HS (Búsqueda de la armonía)

Según Mora (2012), en su trabajo indica:

“La optimización Harmony Search es una técnica de búsqueda que trata de imitar la improvisación que sigue una banda de música cuando busca una melodía perfecta. Este tipo de optimización, propuesta por Geem (2001), ha sido utilizada con éxito en distintos problemas de optimización, y su aplicación al diseño de redes de distribución de agua es la que se trata en este trabajo.

Del mismo modo que en el resto de métodos basados en técnicas heurísticas, el carácter aleatorio del método no permite garantizar con absoluta certeza el mínimo absoluto del sistema, pero sí garantiza la obtención de un conjunto de buenas soluciones que mejoran poco a poco.

El método trata de encontrar cada vez una mejor melodía, que viene representada por una función objetivo que hay que minimizar. Las notas de cada instrumento musical determinan la calidad estética de la melodía y el valor de la función objetivo viene dado por la combinación de todas estas notas musicales, que conforman una partitura y que tratará de ser mejorada en cada iteración. Una nota musical representa una variable de decisión y una partitura completa representa una solución del problema. La Figura 3 trata de representar la analogía entre improvisación musical y optimización ingenieril.

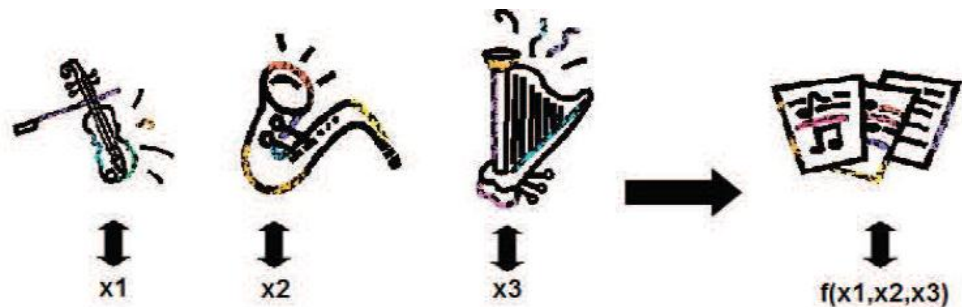


Figura 3. Analogía entre improvisación musical y optimización ingenieril

Fuente: Mora (2012)

Considerando un grupo de instrumentos musicales compuestos por un violín, un saxofón y un arpa. Cada uno de estos instrumentos podrá tocar una serie de notas. Esta serie de notas puede ser diferente para cada instrumento o puede ser la misma para todos ellos. En el caso de la aplicación al diseño de redes de agua, todos los instrumentos tocarán las mismas notas, puesto que éstas representarán el diámetro elegido.

Las notas tocadas por cada instrumento se unen para formar una partitura, que tiene una determinada aptitud. Si la partitura creada es mejor que la peor partitura guardada en la memoria, ésta será incluida con las demás, mientras que la partitura peor es excluida. Este proceso se repite hasta que se cumplan las condiciones de finalización impuestas en el método.

HS es una técnica de optimización concebida para el cálculo con variables discretas. La técnica utilizada en el cálculo de optimización tiene la misma base que el resto de técnicas heurísticas, es decir.

Minimizar $F(X)$ donde $X^i \in x_i, i = 1, 2, \dots, N$

donde $F(X)$ representa la función objetivo que el método trata de minimizar; N es el conjunto de todas las variables de decisión; N_{VD} es el número de variables de decisión que tiene el problema, es decir, el número de instrumentos musicales que van a componer la partitura; x_i representa el rango de posibles valores que puede tomar cada variable de decisión, es decir donde $x^i = (X_1^i, X_2^i, \dots, X_K^i)$, donde todas estas variables son de tipo discreto; K es el número de valores que tiene el rango, o lo que es lo mismo, el número de notas que puede tocar cada instrumento, que en este caso concreto equivale al número de diámetros posibles para la conducción. La aplicación realizada para el diseño de redes de agua viene representada en forma de diagrama de flujo en la Figura 4.

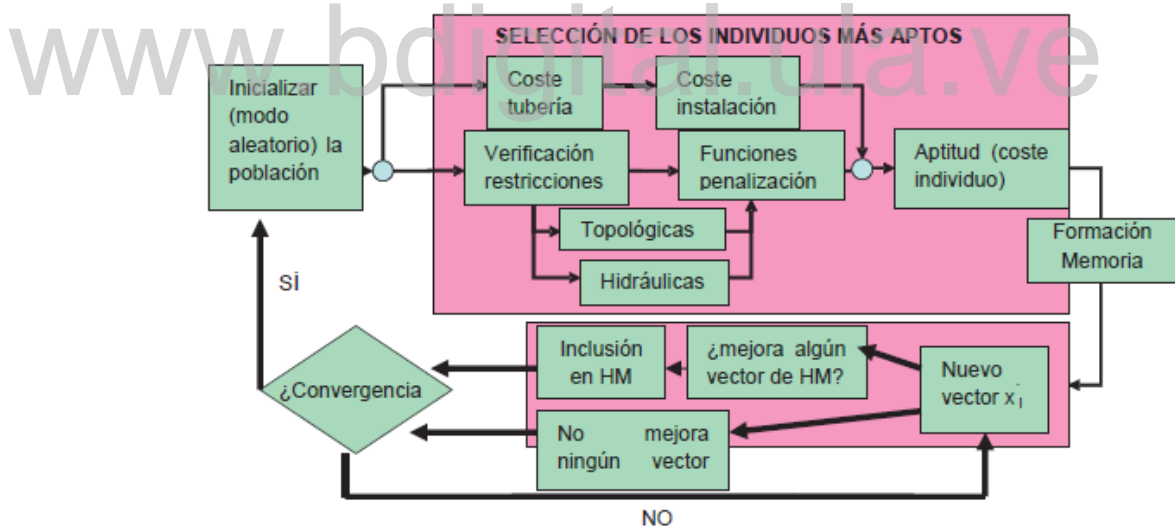


Figura 4. Flujograma Algoritmo HS aplicado al diseño óptimo de redes de agua

Fuente: Mora (2012)

El proceso de optimización HS sigue una serie de etapas, que son enumeradas a continuación:

Etapla 1. Definición de los parámetros del algoritmo

El primer paso a realizar antes de iniciar el cálculo es definir los parámetros con los que va a trabajar el algoritmo HS. Estos son el tamaño de la memoria (HMS), el ajuste del pitchrate (PAR), el ajuste de la memoria del algoritmo (HMCR) y el número de iteraciones que realizará el algoritmo (NI).

El significado del tamaño de memoria es similar al que siguen todos los algoritmos evolutivos cuando se habla de población del algoritmo. Así, el tamaño de la memoria representa el conjunto discreto de posibles soluciones con las que va a trabajar el algoritmo. La Memoria contiene tanto el conjunto de vectores solución del problema como el valor de la función objetivo. El resto de parámetros que requieren de un valor inicial al comenzar el proceso de optimización se abordan con mayor detalle en el 3.8.2.1.

Etapas 2. Inicializar la memoria (HM).

Del mismo modo que en cualquier algoritmo evolutivo, el cálculo comienza con la generación de una población aleatoria. La representación de esta población es similar a la que tienen otros algoritmos evolutivos, tales como los genéticos.

$$HM = \begin{bmatrix} X_1^1 & X_2^1 & \dots & X_{N-1}^1 & X_N^1 \\ X_1^2 & X_2^2 & \dots & X_{N-1}^2 & X_N^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^{HMS-1} & X_2^{HMS-1} & \dots & X_{N-1}^{HMS-1} & X_N^{HMS-1} \\ X_1^{HMS} & X_2^{HMS} & \dots & X_{N-1}^{HMS} & X_N^{HMS} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} F(X^1) \\ F(X^2) \\ \dots \\ F(X^{HMS-1}) \\ F(X^{HMS}) \end{matrix}$$

Etapas 3. Improvisación de una nueva partitura.

Un nuevo vector solución (partitura) se genera a partir de una serie de reglas, como son las consideraciones de memoria, el ajuste del PAR y una selección aleatoria.

Etapas 4. Definición de la nueva memoria

Si la aptitud (valor de la función objetivo) de la nueva partitura X'_i es mejor que la de la peor partitura almacenada en memoria, y no existe ningún vector idéntico almacenado, X'_i será incluida en HM mientras que la peor partitura existente hasta el momento es excluida.

Etapas 5. Criterio de convergencia

Las etapas 3 y 4 son repetidas hasta que se cumple el criterio de convergencia que se haya introducido en el algoritmo. En este punto existen varias opciones: una de ellas es elegir un número fijo de iteraciones y ejecutar el algoritmo un determinado número de veces, con lo que una vez realizadas todas las simulaciones programadas el algoritmo dará la mejor solución obtenida.” (pp. 60-63).

2.2.10 Velocidades

Según la norma sanitaria 4044 en el Artículo 301 “Para el cálculo de las tuberías de distribución se recomienda una velocidad mínima de 0,60 metros por segundo para asegurar el arrastre de partículas y una máxima de 3,00 metros por segundo, para evitar ruidos en las tuberías.” (p. 84).

Por otra parte, según CONAGUA (2007) en la Tabla 1 representa las velocidades permitidas en las tuberías dependiendo del material que están hechas.

Tabla 1. Velocidades máxima y mínima permisibles en tuberías.

MATERIAL DE LA TUBERÍA	VELOCIDAD (m/s)	
	MÁXIMA	MÍNIMA
Concreto simple hasta 45 cm de diámetro	3.00	0.30
Concreto reforzado de 60 cm de diámetro o mayores	3.50	0.30
Concreto presforzado	3.50	0.30
Acero con revestimiento	5.00	0.30
Acero sin revestimiento	5.00	0.30
Acero galvanizado	5.00	0.30
Asbesto cemento	5.00	0.30
Fierro fundido	5.00	0.30
Hierro dúctil	5.00	0.30
Polietileno de alta densidad	5.00	0.30
PVC (policloruro de vinilo)	5.00	0.30

Nota: Las velocidades altas incrementan la magnitud de los fenómenos transitorios. La velocidad máxima en la tabla es considerando que se han resuelto los problemas asociados a fenómenos transitorios. En el libro “Fenómenos transitorios en líneas de conducción” de este Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento” se explican los estudios correspondientes.

Fuente: Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (2007)

(http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1567/IMTA_068.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

CAPÍTULO 3

MARCO METODOLÓGICO

La metodología del proyecto según Arias (2012) “incluye el tipo de investigación, las técnicas y los instrumentos que serán utilizados para llevar a cabo la indagación. Es el “cómo” se realizará el estudio para responder al problema planteado” (p.110).

3.1 Nivel de investigación

Según los niveles de investigación planteados por Arias (2012), la investigación presente apunta al nivel descriptivo, ya que expone las características actuales de algunos sistemas de distribución de agua potable, describiendo las condiciones existentes.

Por otro lado, el estudio se clasifica particularmente como tipo comparativo especialmente cuantitativo, según condiciones enunciadas en los objetivos de la investigación, cuyo propósito es describir y detallar en forma específica la comparación de modelos optimizadores de una red de distribución de agua potable.

3.2 Diseño de la investigación

En el marco de la investigación planteada, referido a la “comparación de métodos optimizadores basados en metaheurística de una red de abastecimiento de agua potable”, utilizando métodos de simulación, el diseño de la investigación se define, en principio, dentro del contexto del estudio propuesto de tipo experimental, que permita orientar todo el proceso de investigación, desde la recolección de datos hasta el análisis e interpretación de los resultados.

Atendiendo a los objetivos delimitados, la investigación se centra en la revisión de los estudios previos realizados que definen las diferentes metodologías aplicadas para el análisis de

los modelos optimizadores, para poder así establecer la correlación entre las variables en estudio.

En este sentido, Balestrini (2006), menciona “los estudios experimentales como a través de los cuales se manipulan las variables independientes, en una situación controlada por el experimentador, a fin de detectar sus efectos sobre las variables dependientes”. En este sentido la investigación experimental queda definida “como un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento, para observar los efectos o reacciones que se producen”, (Arias, 2012).

Por lo antes mencionado, la velocidad y presión son las variables independientes, luego el diámetro y el costo figuran como las variables dependientes de esta investigación.

3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

El instrumento de recolección de datos definido por Arias (2012) “es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para registrar o almacenar información” (p.69). En el caso de estudio se utilizó una técnica cualitativa la cual es el análisis de documentos.

En este trabajo se usarán ejemplos sintéticos, los cuales son redes clásicas y por último dos redes reales, cuya información fue obtenida en la empresa Hidrológica Municipal Aguas de Ejido C.A.

3.4 Descripción del área de estudio

El Palmo Sector los Olivos se ubica en el municipio Campo Elías, Parroquia Matriz, estado bolivariano de Mérida; es una importante zona con alta densidad demográfica en la ciudad de Ejido, dependiente del sistema de abastecimiento de agua potable. Presenta los problemas comunes de una comunidad en crecimiento, ya existen deterioros puntuales en la red de distribución que desmejoran la prestación del servicio de suministro de agua en la localidad. Los daños existentes en la comunidad El Palmo, sector los Olivos, específicamente, en la calle N° 03, se relacionan con las altas presiones en el servicio hídrico; los daños han deteriorado el acceso de la vía y la ruptura de la tubería de 110mm, que ha afectado a la comunidad en general por la pérdida de tan valioso recurso.

La comunidad del Palmo, sector Los Olivos, se localiza en la Parroquia Matriz, municipio Campo Elías del estado bolivariano de Mérida. Su ubicación Geográfica con respecto al elipsoide utilizado en el WorldGeodesicSystem (WGS84), en la zona huso 19, es: por el Norte entre las coordenadas U.T.M. 946.340m y 946.620m y por el Este con las coordenadas U.T.M. 253.480m y 253.680m. En la Figura 5 se muestra la ubicación del sector.



Figura 5. Sector El Palmo

Fuente: Google Earth Pro, 2023.

3.5 Descripción general de la red de agua potable del sector El Palmo

El Sector El Palmo Los Olivos se encuentra distribuido por manzanas, que van desde la calle N°01 hasta la calle N°05 con sus respectivos transversales; es abastecido directamente de la Planta de Potabilización “General Eleazar López Contreras”, la tubería matriz que alimenta este sector corresponde al alimentador del estanque INREVI (denominado estanque D7).

La tubería que compone la red de distribución es PEAD de 110mm, los materiales para las tomas domiciliarias son característicos de los sistemas de riego que utilizan tubería PEBD de 80 PSI de 20mm para cada vivienda; el relleno utilizado en el banqueo es material procedente, en parte de la excavación y en parte de escombros, sin selección ni colocación de asiento granular para la fundación de la tubería.

La red de abastecimiento se conecta a la tubería matriz o alimentador del estanque INREVI en el borde izquierdo de la quebrada La Portuguesa en la cota 1218 msnm. La ruta se trazó en terrenos de propiedad privada que fueron objeto de invasiones, construyéndose ranchos y siembras en la servidumbre de la tubería. En la progresiva 0+340m se deriva la red de distribución hacia las calles N° 05, N° 04, N° 03 y N° 02.

La red de abastecimiento abastece a una población estimada en 1601 habitantes, según el censo realizado por los jefes de calle del sector en junio del año 2020; la población de la calle N° 03 es aproximadamente de 288 habitantes, cuenta con noventa y dos (92) viviendas de las cuales algunas poseen entre 2 y 3 plantas con un (01) local comercial; la hidrológica cuenta con un total de 92 suscriptores en dicha calle.

Anteriormente, en los años 2008 – 2009 se realizaron trabajos de sustitución de tubería de la red y tomas domiciliarias en las calles N° 02, N° 04 y N° 05, por lo que la calle N° 03 quedó pendiente por sustituir la tubería existente, por esta razón, actualmente se presentan continuas fugas en la red de distribución y en mayor medida en la calle N°03 siendo reparadas por la cuadrilla de la Hidrológica Municipal Aguas de Ejido C.A.

3.6 Recopilación de datos

Para realizar la recopilación de datos, fue necesario ejecutar una serie de actividades, las cuales se encuentran de forma resumida en el flujograma de la Figura 6.

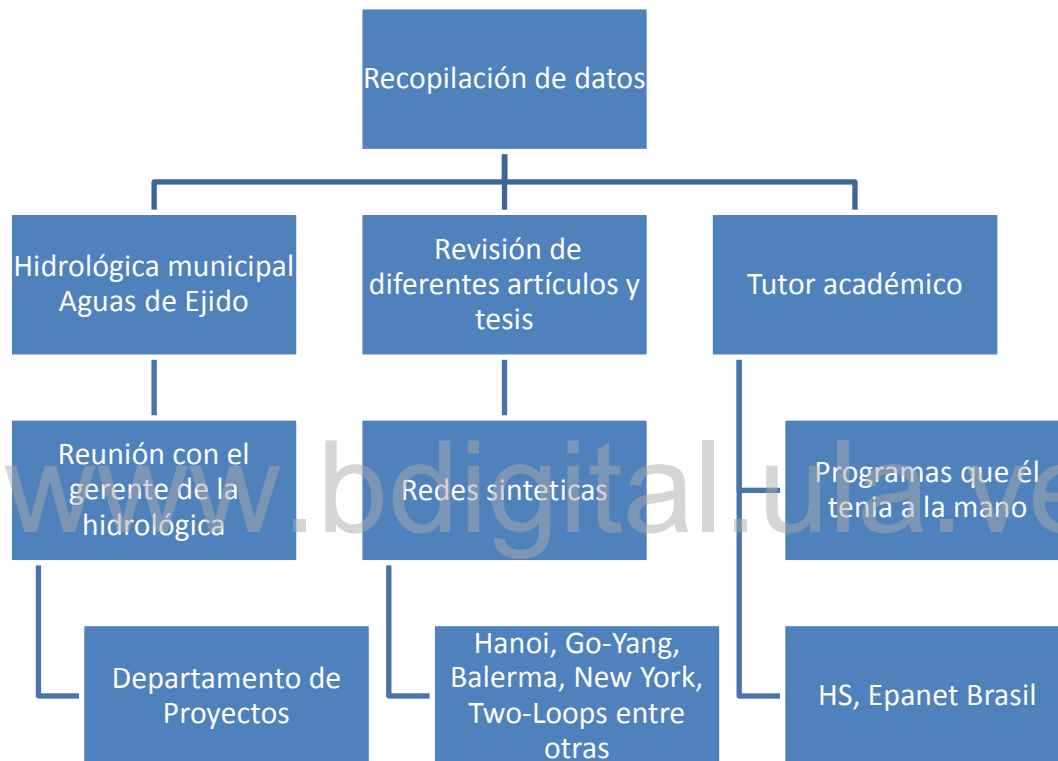


Figura 6. Flujograma de actividades para la recolección de datos

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Modelación de las redes de abastecimiento de agua

Para realizar la modelación de las redes de abastecimiento de agua que no estaban directamente modeladas en Epanet, fue necesario ejecutar una serie de actividades en dicho software, el cual fue elegido por ser de uso libre y de fácil entendimiento, para luego ser importadas a los otros dos programas de optimización que se estudian en el presente trabajo.

Epanet es una herramienta poderosa y ampliamente utilizada para modelar y simular el comportamiento hidráulico de redes de abastecimiento de agua. A continuación, se presenta un resumen general de los pasos involucrados en este proceso:

3.7.1 Recopilación de información

Todos los datos necesarios para crear la red son los siguientes:

- **Topografía:** Alturas de los nodos de la red (reservorios, tanques, puntos de demanda).
- **Geometría:** Diámetros y longitudes de las tuberías.
- **Material de las tuberías:** Para determinar los coeficientes de rugosidad.
- **Demandas:** Caudal de agua requerido en cada punto de demanda.
- **Características de las bombas:** Curva característica: relación entre el caudal y altura de elevación, o potencia de la bomba
- **Características de los reservorios:** Nivel mínimo y máximo de agua.

3.7.2. Creación del modelo en Epanet

La interfaz gráfica de Epanet cuenta con una interfaz intuitiva que permite crear nodos, tuberías, bombas, válvulas y reservorios de manera visual, luego se procede a definir las propiedades como lo son: asignar a cada elemento las propiedades correspondientes (diámetro, longitud, altura, demanda, entre otros.), después se configura la red en la cual se debe establecer las condiciones iniciales de la red, como el nivel de agua en los reservorios y las demandas.

3.7.3. Simulación hidráulica

En la ejecución de la simulación, Epanet resolverá las ecuaciones de continuidad y energía para determinar las presiones y caudales en todos los puntos de la red.

3.7.4. Análisis de resultados

Los resultados de la simulación, Epanet permite visualizarlos en forma de mapas de isobaras, gráficas de tiempo, de presiones, caudales, y tablas de datos.

Dependiendo de la red que se estudie se procede a la validación del modelo que es comparar los resultados de la simulación con datos reales (presiones medidas, caudales) para verificar la precisión del modelo.

Por último, se procede a la optimización de las redes para mejorar su desempeño con ayuda del modelo de optimización llamado Lenhsnet, al igual que con los otros dos métodos aplicados en este trabajo.

3.7.5. Aplicaciones típicas de Epanet

Por lo general se aplica en el diseño de nuevas redes, para evaluar diferentes alternativas de diseño y seleccionar la más adecuada. También en el análisis de redes existentes, en las cuales se identifican los problemas como lo pueden ser presiones bajas, fugas, sobrecargas de bomba, entre otros. Y para la planificación de expansiones de redes, donde se evalúa el impacto de futuras conexiones en la red y además en la optimización de la operación, ya sea para minimizar costos de bombeo o maximizar la presión en los puntos de demanda.

Modelar una red de agua en Epanet implica un proceso iterativo que va desde la recopilación de datos hasta la optimización del sistema. Es una herramienta valiosa para ingenieros civiles que trabajan en el diseño, operación y mantenimiento de sistemas de distribución de agua potable.

3.8 Implementación de los métodos optimizadores

Finalmente, se procede a comparar los diferentes métodos optimizadores estudiados en este trabajo, tanto en las redes sintéticas como en las redes reales, evaluando al mismo tiempo, la factibilidad que dichos resultados, estos métodos se describen de modo más detallado junto con su funcionamiento en los siguientes párrafos.

3.8.1. Epanet Brasil

Con respecto a Epanet Brasil, Gomes et al (2009a) desarrollan otro modelo de optimización llamado Lenhsnet, que se introduce en el código fuente del programa de análisis de redes Epanet (Rossman, 1997). Lenhsnet es un algoritmo iterativo basado en programación dinámica, usa el método del recocido simulado, y optimiza el diseño de redes de agua a presión.

Lenhsnet es un módulo complementario del software Epanet, específicamente desarrollado para la versión brasileña del programa. Este módulo se enfoca en la optimización económica de sistemas de abastecimiento de agua, complementando las capacidades de simulación hidráulica que ofrece Epanet.

3.8.1.1. Funciones principales

- **Dimensionamiento óptimo:** Lenhsnet permite determinar el diámetro óptimo de las tuberías de una red de abastecimiento, considerando criterios como: costo de instalación de las tuberías, presión mínima requerida en los nodos y velocidad máxima permitida en las tuberías.
- **Selección de materiales:** Ayuda a seleccionar el material más adecuado para las tuberías, evaluando aspectos como: costo del material, durabilidad y resistencia a la corrosión.
- **Análisis de costo-beneficio:** Permite realizar un análisis económico detallado de diferentes alternativas de diseño, considerando los costos de inversión y operación a lo largo del tiempo.
- **Integración con Epanet:** Lenhsnet se integra de manera vinculada con Epanet, utilizando los resultados de las simulaciones hidráulicas para realizar los cálculos de optimización.

3.8.1.2. ¿Cómo funciona Lenhsnet?

Primero se crea un modelo detallado de la red de distribución en Epanet, incluyendo todos los componentes relevantes (tuberías, nodos, bombas, válvulas, etc.). Luego se realiza una simulación hidráulica en Epanet para determinar las presiones y caudales en todos los puntos de la red. Se procede a optimizar los resultados de la simulación y se

pasan a Lenhsnet, que utiliza algoritmos de optimización para determinar el diámetro óptimo de las tuberías y la selección de materiales, considerando las restricciones técnicas y económicas. Por último, se analizan los resultados; Lenhsnet presenta los resultados de la optimización, incluyendo el costo total del sistema, los diámetros seleccionados y las presiones y caudales resultantes.

3.8.1.3. Beneficios del uso de Lenhsnet

- Reducción de costos: Permite diseñar sistemas de abastecimiento de agua más económicos, optimizando el uso de materiales y energía.
- Mejora del desempeño: Garantiza que el sistema de abastecimiento opere de manera eficiente, cumpliendo con los requisitos de presión y caudal.
- Facilidad de uso: La integración con Epanet facilita su uso y permite a los ingenieros realizar análisis más completos y precisos.

3.8.1.4. Aplicaciones típicas

- Diseño de nuevas redes de abastecimiento.
- Rehabilitación de redes existentes.
- Expansión de sistemas de abastecimiento.
- Análisis de diferentes escenarios de demanda.

En resumen, Lenhsnet es una herramienta valiosa para ingenieros hidráulicos y civiles que buscan optimizar el diseño y operación de sistemas de distribución de agua. Al combinar las

capacidades de simulación de Epanet con la optimización económica de Lenhsnet, es posible obtener diseños más eficientes y sostenibles.

Debido a todo lo mencionado, Lenhsnet ha sido uno de los métodos de programación dinámica que se han elegido para comparar los resultados obtenidos con las distintas técnicas heurísticas estudiadas en el presente trabajo.

3.8.2. Harmony Search (HS)

Esta técnica de optimización que se incluye en este trabajo es también la más reciente de todas ellas. El algoritmo de Búsqueda Armónica (HS) es una metaheurística inspirada en el proceso de improvisación musical. Fue propuesto por primera vez en 2001 por Z. W. Geem como una alternativa a otros métodos de optimización. La idea central es simular el proceso creativo de un músico que busca la combinación perfecta de notas para crear una armonía agradable.

El algoritmo de Búsqueda Armónica (HS) es una herramienta poderosa para resolver problemas de optimización. Su inspiración en la música y su estructura simple lo convierten en una opción atractiva para investigadores y practicantes. Sin embargo, como cualquier metaheurística, su éxito depende de una cuidadosa configuración y adaptación al problema específico.

¿Cómo funciona Harmony Search (HS)?

Su funcionamiento empieza con la creación de una armonía inicial, se genera un conjunto inicial de soluciones aleatorias, cada una de ellas representando una "armonía". Luego se almacena la mejor armonía encontrada hasta el momento, procede a crear nuevas armonías

mediante una combinación de las armonías existentes. Esta combinación puede incluir:

- Selección aleatoria. Se eligen valores de las variables de las armonías existentes al azar.
- Memoria. Se utilizan valores de la mejor armonía encontrada. Y -Pitch adjustment. Se realizan pequeñas modificaciones a los valores seleccionados para explorar nuevas regiones del espacio de búsqueda. En la Evaluación se evalúa cada nueva armonía y se compara con la mejor armonía encontrada hasta el momento. -Se actualiza. Si una nueva armonía es mejor que la anterior, se reemplaza en la memoria. Se repiten los pasos hasta alcanzar un criterio de parada (número máximo de iteraciones, mejora mínima, entre otras.). Las ventajas del HS son

- Simple de entender e implementar: Su base conceptual es intuitiva y fácil de traducir a código.
- Versátil: Se puede aplicar a una gran variedad de problemas de optimización.
- Robusto: Suele encontrar soluciones de buena calidad incluso en problemas complejos.

Las aplicaciones que se le pueden dar en general al HS son: en Ingeniería: sirve para el diseño de estructuras, optimización de procesos industriales, optimización de redes de distribución de agua entre otras, en Economía: para modelos financieros, predicción de series temporales, entre otras. En planificación: a rutas de vehículos, asignación de recursos, entre muchas aplicaciones más.

Es por esto que el Harmony Search es una herramienta poderosa y flexible para resolver problemas de optimización. Su inspiración en la música le otorga una elegancia y eficiencia que lo han convertido en un método popular en diversas áreas de la investigación y la ingeniería.

3.8.2.1. Los operadores de HS

En el trabajo de Mora (2012) se observa que “HS trabaja con dos operadores propios de esta técnica de optimización. El primero de ellos realiza un ajuste de la memoria del algoritmo y es conocido como Harmony Memory Considering Rate (en adelante HMCR). El segundo de ellos se denomina Pitch Adjustment Rate (en adelante PAR). Además, el ajuste de los distintos parámetros debe incluir el número de individuos iniciales que debe tener la memoria del algoritmo, así como la condición de convergencia para el proceso de optimización.

- HMCR

Cuando se forma una nueva partitura, la programación del algoritmo hace que el valor de cada variable de decisión sea elegido de entre los que esa misma variable de decisión ya tiene en otras partituras de la memoria. Matemáticamente esto quiere decir que el valor de cada X'_1 es seleccionado de entre todos los valores que contiene el rango ($X'_1 = (X^1_1, \dots, X^{HMS}_1)$).

Este tipo de programación podría provocar caídas tempranas en óptimos locales, provocadas por una mala primera generación aleatoria. HMCR se puede definir como un parámetro que trata de controlar el balance entre la memoria del algoritmo y una exploración aleatoria que permita salir de esos mínimos locales.

HMCR puede variar entre 0 y 1, y representa la probabilidad de elegir un valor para la variable de entre los almacenados en la memoria. Del mismo modo, la diferencia $1 - \text{HMCR}$ representa la probabilidad de elegir un valor de modo aleatorio de entre todos los valores que puede tener la variable.

$$X'_i \leftarrow \begin{cases} X_i \in \{X^1_i, X^2_i, \dots, X^{HMS}_i\} & \text{con probabilidad HMCR} \\ X_i \in x_i & \text{con probabilidad } (1 - \text{HMCR}) \end{cases}$$

Por ejemplo, $\text{HMCR} = 0.9$ indica que el algoritmo escogerá el valor de la variable de decisión de entre los valores almacenados en la memoria con un 90% de probabilidad, mientras que en el restante 10% el algoritmo elegirá el valor de modo aleatorio de entre todas las posibilidades de la gama.

- PAR (Pitch Adjustment Rate)

Una vez obtenida la nueva partitura $X'_1 = (X'_1, \dots, X'_N)$ se examina cada componente de este vector para determinar si debe ser sometido a un cierto ajuste o no. Esta operación tiene cierta semejanza con la mutación en AG y recibe el nombre de ajuste del PAR. La probabilidad de que un cierto componente del vector solución deba ser sometido a ajuste viene dado por:

$$\text{Probabilidad de ajuste para } X'_i \leftarrow \begin{cases} \text{Si con probabilidad } PAR \\ \text{No con probabilidad } (1 - PAR) \end{cases}$$

Si una variable de decisión X'_i debe ser ajustada, ésta es reemplazada por otra variable $X'_1(k) \in x_i$, pero no de un modo aleatorio, sino por otra variable vecina X'_1 , de modo que: $X'_1 \leftarrow X_1(k + bw)$, donde bw representa un ancho de banda, que delimita los valores entre los que se va a mover la variable. De este modo, un PAR de 0,15 indica que cada variable de decisión tendrá una probabilidad del 15% de ser cambiada por una variable que se encuentre dentro del ancho de banda disponible.

En el algoritmo adaptado para diseño de redes de agua, $bw \in (-1,1)$, lo que quiere decir que el ajuste realizado en este caso será de una unidad hacia arriba o hacia abajo en la gama de diámetros disponible. El limitar el salto a un único diámetro permite potenciar la búsqueda local del algoritmo, puesto que saltos demasiado grandes provocan la convergencia del algoritmo hacia los extremos del espacio de soluciones.” (pp. 63-64).

¿Cómo se usa el método Harmony Search (HS)?

El método Harmony Search (HS) usado en este trabajo es para el optimizado de redes de abastecimiento de agua potable. Para ser usado necesita tres archivos: uno es .dat, donde van los datos de los diámetros comerciales y los costos de las tuberías, otro archivo .para, donde van tanto la presión mínima, el tamaño de la muestra, el máximo número de iteraciones, el costo promedio esperado de la red entre otros y, un último, el archivo .inp, que es la red, el cual es un archivo que se puede exportar de Epanet. Luego se ejecuta el programa y arroja los resultados tanto de presión en cada nodo como los diámetros de cada tubería y el costo optimizado de la red.

3.8.3. WaterGEMS

WaterGEMS es un software de modelado hidráulico ampliamente utilizado en la industria del agua, ofrece una variedad de funcionalidades y herramientas como lo es *Darwin Designer*, el cual es el que permite la optimización de red y dará los resultados para compararlos con los otros dos métodos.

WaterGEMS y *Darwin Designer* son herramientas poderosas utilizadas en la industria del agua para el diseño, análisis y optimización de sistemas de abastecimiento de agua. Aunque cada una tiene sus propias características y enfoques, a menudo se complementan para ofrecer soluciones integrales y eficientes.

WaterGEMS es un software especializado en el modelado hidráulico de redes de abastecimiento de agua. Permite simular el flujo de agua en una red, considerando factores como: topografía, demandas, tuberías y otros elementos como: bombas, válvulas, reservorios, entre otros.

Al modelar la red, WaterGEMS puede calcular presiones, caudales y velocidades en cada punto de la red, lo que permite identificar problemas como baja presión, fugas o sobrecargas.

Darwin Designer es una plataforma que tiene WaterGEMS de optimización que utiliza algoritmos genéticos y otras técnicas de inteligencia artificial para encontrar la mejor solución a un problema. En el contexto de las redes de agua, *Darwin Designer* puede ser utilizado para:

Optimización de redes: Encontrar la configuración óptima de una red de agua, considerando criterios como el costo de construcción, la eficiencia energética y la calidad del servicio.

Calibración de modelos: Ajustar los parámetros de un modelo hidráulico para que se ajuste lo mejor posible a los datos reales.

Diseño de escenarios futuros: Simular diferentes escenarios de crecimiento o cambio en la demanda de agua.

¿Cómo funcionan juntos?

WaterGEMS y *Darwin Designer* se complementan de la siguiente manera:

Modelado en WaterGEMS: Se crea un modelo detallado de la red de agua en WaterGEMS.

Definición de objetivos: Se establecen los objetivos de la optimización, por ejemplo, minimizar el costo total de la red, maximizar la presión en ciertos puntos o minimizar las pérdidas de agua.

Optimización en *Darwin Designer*: El modelo de WaterGEMS se exporta a *Darwin Designer*, que utiliza algoritmos genéticos para explorar diferentes configuraciones de la red y encontrar la que mejor cumple con los objetivos establecidos.

Evaluación de resultados: Los resultados de la optimización se importan nuevamente a WaterGEMS para su evaluación y análisis. Los beneficios de utilizar WaterGEMS y *Darwin Designer* juntos son:

Diseño óptimo de redes: Se pueden obtener redes de agua más eficientes y económicas.

Mayor precisión en los modelos: La calibración de los modelos mejora la confiabilidad de los resultados.

Capacidad de analizar múltiples escenarios: Se pueden evaluar diferentes escenarios futuros y tomar decisiones más informadas.

Automatización de tareas: La combinación de ambas herramientas permite automatizar muchas de las tareas de diseño y análisis.

Por lo que WaterGEMS y *Darwin Designer* forman una poderosa combinación para el diseño y la optimización de sistemas de abastecimiento de agua. Al combinar la capacidad de modelado detallado de WaterGEMS con los algoritmos de optimización de *Darwin Designer*, es posible obtener soluciones más eficientes y sostenibles.

Debido a todo lo mencionado WaterGEMS y *Darwin Designer* han sido otros de los métodos de programación dinámica que se han elegido para comparar los resultados obtenidos con las distintas técnicas heurísticas estudiadas en el presente trabajo.

3.8.4. Otros métodos optimizadores

Existen muchos más métodos de optimización, que han sido estudiados por otros autores, con los cuales se hará una comparación de resultados con los obtenidos en este trabajo. Se hará por lo cual se dará una breve descripción en el Anexo 10 de alguno de ellos ya que este trabajo se centra en comparar los tres métodos mencionados y detallados anteriormente.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de llevar a cabo los procedimientos metodológicos descritos en el capítulo anterior, se presenta en este apartado el análisis de la información obtenida, y de los resultados, puntualizando y analizando cada una de las respuestas a los objetivos de la investigación.

En este sentido, se realiza el análisis de las condiciones de los sistemas de redes sintéticas estudiadas y de las redes de agua potable del sector El Palmo y la Urbanización Don Luis, para luego comparar los resultados arrojados por las técnicas de optimización que se estudiaron en este trabajo.

Las redes sintéticas usadas son ampliamente conocidas en la bibliografía, cuyo estudio de diseño ya ha sido abordado previamente por otros investigadores. Este tipo de red de distribución permite la comparación entre los resultados proporcionados por otros autores y los propios de este trabajo, de esta manera es la forma de calibrar los métodos usados.

La red de Hanoi es una de las redes más populares en el diseño de redes de agua, siendo muchos los resultados existentes en la bibliografía para el mejor diseño de ellas; en cambio las redes de Two-Loops y la de Balerna no son tan populares, pero si existen varias bibliografías que las optimizaron y por eso se escogieron. Este trabajo aplica los distintos métodos de optimización desarrollados para el diseño óptimo de dichas redes y de algunas más. El objetivo al realizar el diseño con diferentes métodos es ver la mejora producida con la utilización de uno o de otro método heurístico.

Adicional a las redes mencionadas, existen otras no tan conocidas en la bibliografía, pero de las que también se tiene un patrón de comparación con otros autores, como son la red de Go-Yang (Geem, 2001) o la red R9 de Joao Pessoa, cuyo diseño óptimo es abordado por Gomes et al. 2009b. En ambos casos, el problema de diseño planteado se aborda con la aplicación de los distintos modelos de optimización heurísticos presentados y desarrollados en este trabajo, por lo cual es posible comparar los resultados con los que proporcionan esos autores.

Cada uno de los métodos heurísticos permite el ajuste de una serie de parámetros para el cálculo, cuyo rango de cálculo óptimo es desconocido, en cada caso, excepto el de Lenhsnet que no permite modificar sus parámetros internos. Es por ello que inicialmente, la rutina de cálculo empleada para abordar el diseño óptimo de una determinada red es la misma, independientemente de la metodología de optimización empleada. Así, la única forma de proceder cuando se desconoce el mejor ajuste en los parámetros es la realización de un alto número de simulaciones que abarque un barrido de posibilidades lo suficientemente grande para cada uno de los parámetros de ajuste.

4.1 Redes sintéticas estudiadas

En este trabajo se consultó gran variedad de bibliografía para obtener redes ya conocidas y optimizadas por otros autores para comparar con los resultados aquí obtenidos, como lo son las redes de Hanoi, Two-Loops, Go-yang, Balerna, Red R 9 de Joao Pessoa, NewYork, entre otras más.

4.1.1 Red de Hanoi

La red de Hanoi fue presentada por primera vez por Fujiwara y Khang (1990), la cual se ha convertido en una de las más conocidas y utilizadas en las redes de abastecimiento de agua potable (RAAP) para el problema de diseño y optimización. La ecuación de pérdidas por fricción típicamente utilizada es la de Hazen-Williams con un $C = 130$. La presión mínima requerida en todos los nodos es de 30 m de columna de agua y los costos por unidad de longitud de cada diámetro está calculado por la Ecuación 1.

$$\frac{\$}{m} = 1.1 D^{1.5} \quad (1)$$

donde

$\$/m$: costo en dólares por metro lineal

D : Diámetro de la tubería en pulgadas

El problema de diseño propuesto por esta red ha sido estudiado ampliamente por distintos investigadores, por lo que existe un gran número de soluciones en la bibliografía. Esto permite la comparación de resultados obtenidos anteriormente con los resultados de los distintos modelos de diseño obtenidos en este trabajo. El problema de diseño que se plantea en la red de Hanoi contiene un depósito, 31 nodos de demanda y 34 tuberías, el cual se presenta en la Figura 7. Una de las principales restricciones es que se debe cumplir con una presión mínima en todos los nodos de 30 mca. En las Tablas 2, 3 y 4 se presentan todos los datos necesarios para el diseño de la red de Hanoi.

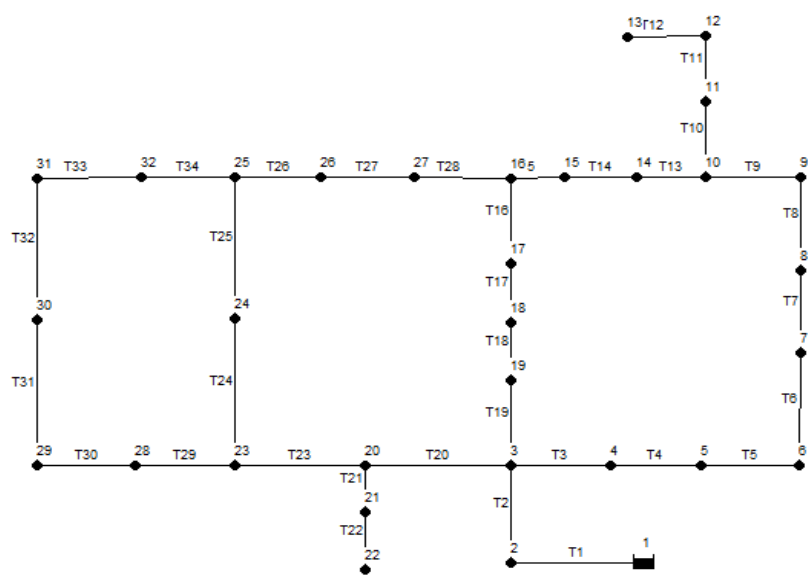


Figura 7. Red de Hanoi

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Demanda y cota de los nodos de la red de Hanoi.

ID nodo	Cota (m)	Demanda (l/s)	ID nodo	Cota (m)	Demanda (l/s)
1	100	-5538,9	17	0	240,28
2	0	247,22	18	0	373,61
3	0	236,11	19	0	16,67
4	0	36,11	20	0	354,17
5	0	201,39	21	0	258,33
6	0	279,17	22	0	134,72
7	0	375	23	0	290,28
8	0	152,78	24	0	227,78
9	0	145,83	25	0	47,22
10	0	145,83	26	0	250
11	0	138,89	27	0	102,78
12	0	155,56	28	0	80,56
13	0	261,11	29	0	100
14	0	170,83	30	0	100
15	0	77,78	31	0	29,17
16	0	86,11	32	0	223,61

Fuente: Adaptado de Fernández (2004).

Tabla 3. Longitud de las tuberías de la red de Hanoi.

ID Tubería	Nodo Inicial	Nodo Final	Longitud (m)	ID Tubería	Nodo Inicial	Nodo Final	Longitud (m)
T1	1	2	100	T18	18	19	800
T2	2	3	1350	T19	3	19	400
T3	3	4	900	T20	3	20	2200
T4	4	5	1150	T21	20	21	1500
T5	5	6	1450	T22	21	22	500
T6	6	7	450	T23	20	23	2650
T7	7	8	850	T24	23	24	1230
T8	8	9	850	T25	24	25	1300
T9	9	10	800	T26	25	26	850
T10	10	11	950	T27	26	27	300
T11	11	12	1200	T28	16	27	750
T12	12	13	3500	T29	23	28	1500
T13	13	14	800	T30	28	29	2000
T14	14	15	500	T31	29	30	1600
T15	15	16	550	T32	30	31	150
T16	16	17	2730	T33	31	32	860
T17	17	18	1750	T34	25	32	950

Fuente: Adaptado de Fernández (2004).

Uno de los aspectos que ayuda a conseguir la solución óptima de las redes es la lista de diámetros disponibles para ser utilizados. Para el diseño realizado en este trabajo se usó la tabla de diámetros usada por Fernández (2004), ver Tabla 4.

Tabla 4. Diámetros y costo de las tuberías para la red de Hanoi.

D(in)	D (mm)	\$/m
12	304,8	45,726
16	406,4	70,400
20	508	98,378
24	609,6	129,333
30	762	180,748
40	1016	278,28

Fuente: Adaptado de Fernández (2004).

Luego de crear la red en Epanet, se procedió a optimizarla usando los tres métodos que se estudiaron. Los resultados se presentan en las Tablas 5, 6 y 7.

Tabla 5. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Hanoi usando Lenhsnet.

Tubería	Diámetro (mm)	Diámetro (in)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)
T1	1016	40	100	2	247,22	97,14
T2	1016	40	1350	3	236,11	61,67
T3	1016	40	900	4	36,11	56,28
T4	1016	40	1150	5	201,39	49,59
T5	1016	40	1450	6	279,17	42,45
T6	1016	40	450	7	375	40,73
T7	1016	40	850	8	152,78	38,6
T8	1016	40	850	9	145,83	36,85
T9	1016	40	800	10	145,83	35,53
T10	1016	40	950	11	138,89	35,14
T11	1016	40	1200	12	155,56	34,86
T12	609,6	24	3500	13	261,11	30,65
T13	609,6	24	800	14	170,83	32,45
T14	609,6	24	500	15	77,78	31,58
T15	609,6	24	550	16	86,11	31,01
T16	304,8	12	2730	17	240,28	31,02
T17	406,4	16	1750	18	373,61	44,21
T18	508	20	800	19	16,67	55,66
T19	508	20	400	20	354,17	51,76
T20	1016	40	2200	21	258,33	42,41
T21	508	20	1500	22	134,72	37,24
T22	304,8	12	500	23	290,28	46,62
T23	1016	40	2650	24	227,78	42,36
T24	762	30	1230	25	47,22	34,97
T25	609,6	24	1300	26	250	30,62
T26	406,4	16	850	27	102,78	30,67
T27	508	20	300	28	80,56	40,57
T28	609,6	24	750	29	100	30,31
T29	406,4	16	1500	30	100	30,39
T30	304,8	12	2000	31	29,17	30,64
T31	304,8	12	1600	32	223,61	32,89
T32	406,4	16	150	1	-5538,9	0
T33	406,4	16	860			
T34	609,6	24	950			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Hanoi usando WaterGEMS.

Tubería	Diámetro (mm)	Diámetro (in)	Longitud(m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)
T1	1016	40	100	2	247,22	97
T2	1016	40	1350	3	236,11	62
T3	1016	40	900	4	36,11	57
T4	1016	40	1150	5	201,39	52
T5	1016	40	1450	6	279,17	46
T6	1016	40	450	7	375	45
T7	1016	40	850	8	152,78	43
T8	762	30	850	9	145,83	38
T9	1016	40	800	10	145,83	37
T10	762	30	950	11	138,89	36
T11	762	30	1200	12	155,56	34
T12	609,6	24	3500	13	261,11	30
T13	508	20	800	14	170,83	35
T14	304,8	12	500	15	77,78	32
T15	304,8	12	550	16	86,11	32
T16	508	20	2730	17	240,28	44
T17	609,6	24	1750	18	373,61	53
T18	762	30	800	19	16,67	56
T19	609,6	24	400	20	354,17	53
T20	1016	40	2200	21	258,33	43
T21	508	20	1500	22	134,72	38
T22	304,8	12	500	23	290,28	48
T23	1016	40	2650	24	227,78	45
T24	762	30	1230	25	47,22	36
T25	508	20	1300	26	250	30
T26	304,8	12	850	27	102,78	30
T27	508	20	300	28	80,56	44
T28	508	20	750	29	100	36
T29	508	20	1500	30	100	31
T30	406,4	16	2000	31	29,17	31
T31	304,8	12	1600	32	223,61	32
T32	304,8	12	150	1	-5538,9	0
T33	304,8	12	860			
T34	508	20	950			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Hanoi optimizado usando HS.

Tubería	Diámetro (mm)	Diámetro (in)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)
T1	1016	40	100	2	247,22	97,1408
T2	1016	40	1350	3	236,11	61,6711
T3	1016	40	900	4	36,11	57,1095
T4	1016	40	1150	5	201,39	51,4586
T5	1016	40	1450	6	279,17	45,5253
T6	1016	40	450	7	375	44,1446
T7	1016	40	850	8	152,78	42,5217
T8	1016	40	850	9	145,83	41,2381
T9	1016	40	800	10	145,83	37,4384
T10	762	30	950	11	138,89	35,8789
T11	609,6	24	1200	12	155,56	34,7227
T12	609,6	24	3500	13	261,11	30,5147
T13	508	20	800	14	170,83	34,6962
T14	406,4	16	500	15	77,78	30,9193
T15	304,8	12	550	16	86,11	30,4263
T16	304,8	12	2730	17	240,28	38,0435
T17	406,4	16	1750	18	373,61	44,9341
T18	609,6	24	800	19	16,67	58,7076
T19	508	20	400	20	354,17	50,4634
T20	1016	40	2200	21	258,33	41,1146
T21	508	20	1500	22	134,72	35,9499
T22	304,8	12	500	23	290,28	44,2518
T23	1016	40	2650	24	227,78	38,9487
T24	762	30	1230	25	47,22	35,6051
T25	762	30	1300	26	250	31,6331
T26	508	20	850	27	102,78	30,2706
T27	304,8	12	300	28	80,56	35,6461
T28	304,8	12	750	29	100	30,9889
T29	406,4	16	1500	30	100	30,062
T30	304,8	12	2000	31	29,17	30,1802
T31	304,8	12	1600	32	223,61	31,4571
T32	406,4	16	150	1	-5538,9	0
T33	406,4	16	860			
T34	609,6	24	950			

Fuente: Elaboración propia

Los costos para la red de Hanoi ya optimizada con los diferentes métodos se presentan en la Tabla 8; para dicha red el costo mínimo fue obtenido con el método HS y en la Tabla 9 se presentan los resultados que obtuvieron otros autores. A comparar los resultados de este trabajo con los de otros autores se logra observar que dieron muy parecidos, lo cual indica que se aplicaron bien los métodos.

Tabla 8. Costo de la red de Hanoi optimizado.

Método	Lenhsnet	WaterGEMS	HS
Costo \$	6.415.809,17	6.288.368,30	6.081.086,97

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Costo de la red de Hanoi optimizado por otros autores.

Año	Algoritmo	Autor	Costo (miles)	Simulaciones
2003	Salto mezclado de la rana	Eusuff y Lansey	6.073	26.987
2004	Evolución compleja mezclada	Liong y Atiquzzaman	6.220	25.402
2005	Optimización evolutiva restringida	Farmani y otros	6.069	24.100
2006	Algoritmo genético	Reca y otros	6.173	26.457
2006	Colonia de hormigas	Zecchin y otros	6.134	35.433
2006	Búsqueda de armonía	Geem	6.081	27.721
2006	Algoritmo genético	Reca y Martínez	6.081	50.000
2007	Recocido simulado con búsqueda tabú	Reca y otros	6.353	26.457
2007	Recocido simulado	Reca y otros	6.333	26.457
2007	Búsqueda local con recocido simulado	Reca y otros	6.308	26.457
2007	Entropía cruzada	Perelman y Ostfeld	6.081	97.000
2007	Búsqueda dispersa	Lin y otros	6.081	43.149
2007	Búsqueda tabú	Sung y otros	6.081	40.200
2009	SOGH	Ochoa	6.337	94
2009	Búsqueda de armonía con enjambre de partículas	Geem	6.081	17.980
2010	Algoritmo genético	Bolognesi y otros	6.081	16.600
2010	OPUS	Saldarriaga y otros	6.148	83

Fuente: Tomado de *diseño optimizado de sistemas de distribución de agua: una nueva perspectiva*, por Saldarriaga, et al (2010), (https://www.researchgate.net/publication/320331618_Diseño_optimizado_de_sistemas_de_distribucion_de_agua_Una_nueva_perspectiva/).

4.1.2 Red de Two-Loops

El esquema de esta red se presenta en la Figura 8. La red está compuesta de dos circuitos conformados por 8 tuberías, 6 nodos de demanda que tienen diferentes elevaciones y un embalse con una altura piezométrica de 210 m. Todas las tuberías tienen una misma longitud de 1000 m y la presión mínima que se debe cumplir en todos los nodos debe ser de 30 mca. En la Tabla 10 se dispone de las demandas en cada nodo de la red y se disponen de 14 diámetros comerciales, cuyo costo se debe calcular utilizando la Tabla 11, que refleja precios por unidad de longitud. Las pruebas que se han reportado en la literatura las realizaron utilizando la ecuación de Hazen-Williams con un $C=130$.

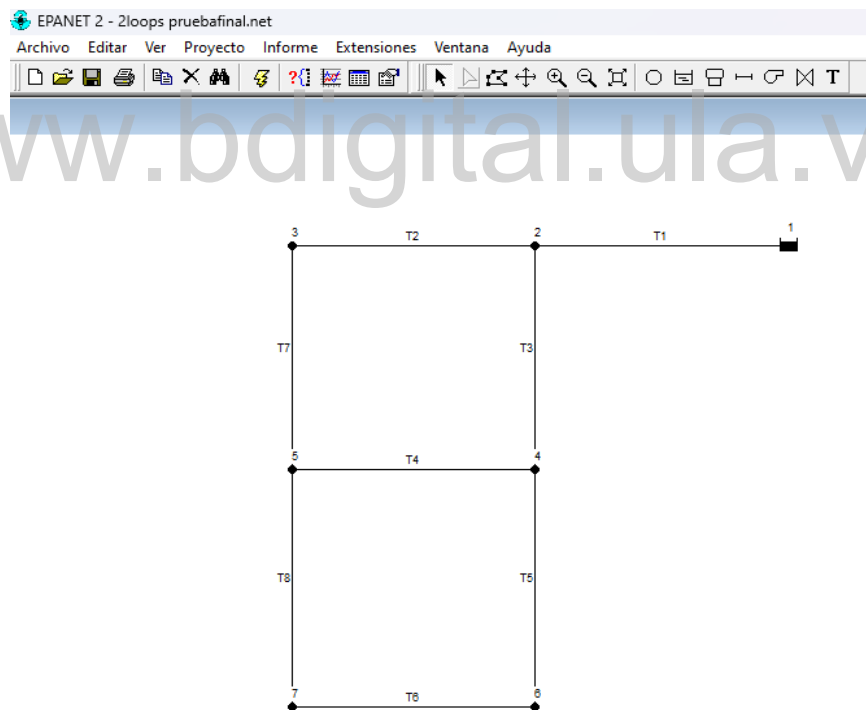


Figura 8. Red de Two Loops

Fuente: Adaptado de Alperovits y Shamir (1977).

Tabla 10. Demanda y cota de los nodos de la red de Two-Loops.

ID nudo	Cota (m)	Demanda (l/s)
2	150	27,78
3	160	27,78
4	155	33,33
5	150	75
6	165	91,67
7	160	55,56
E1	210	-311,12

Fuente: Adaptado de Alperovits y Shamir (1977).

Tabla 11. Diámetros y costo de las tuberías para la red de Two-Loops.

Diámetro (in)	Diámetro (mm)	Costo (\$/m)	Rugosidad (C)
1	25,4	2	130
2	50,8	5	130
3	76,2	8	130
4	101,6	11	130
6	152,4	16	130
8	203,2	23	130
10	254	32	130
12	304,8	50	130
14	355,6	60	130
16	406,4	90	130
18	457,2	130	130
20	508	170	130
22	558,8	300	130
24	609,6	550	130

Fuente: Adaptado de Alperovits y Shamir (1977).

Luego de crear la red en Epanet se procedió, al igual que en la red de Hanoi, a optimizarla usando los tres métodos que se estudiaron. Los resultados se presentan en las Tablas 12, 13 y 14.

Tabla 12. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Two-Loops usando Lenhsnet.

Tubería	Diámetro (mm)	Diámetro (in)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T1	457,2	18,00	1000	2	27,78	53,25	203,25	150
T2	203,2	8,00	1000	3	27,78	39,19	199,19	160
T3	457,2	18,00	1000	4	33,33	43,56	198,56	155
T4	254	10,00	1000	5	75	40,11	190,11	150
T5	406,4	16,00	1000	6	91,67	30,56	195,56	165
T6	254	10,00	1000	7	55,56	30,7	190,7	160
T7	25,4	1,00	1000	E1	-311,12	0	210	210
T8	25,4	1,00	1000					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Two-Loops usando WaterGEMS.

Tubería	Diámetro (mm)	Diámetro (in)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T1	457,2	18,00	1000	2	27,78	53	203,25	150
T2	254	10,00	1000	3	27,78	30	190,46	160
T3	406,4	16,00	1000	4	33,33	43	198,45	155
T4	101,6	4,00	1000	5	75	34	183,8	150
T5	406,4	16,00	1000	6	91,67	30	195,44	165
T6	254	10,00	1000	7	55,56	31	190,55	160
T7	254	10,00	1000	E1	-311,12	0	210	210
T8	25,4	1,00	1000					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Two-Loops optimizado usando HS.

Tubería	Diámetro (mm)	Diámetro (in)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T1	457,2	18,00	1000	2	27,78	53,2464	203,25	150
T2	254	10,00	1000	3	27,78	30,463	190,46	160
T3	406,4	16,00	1000	4	33,33	43,4485	198,45	155
T4	101,6	4,00	1000	5	75	33,8049	183,8	150
T5	406,4	16,00	1000	6	91,67	30,4439	195,44	165
T6	254	10,00	1000	7	55,56	30,5498	190,55	160
T7	254	10,00	1000	E1	-311,12	0	210	210
T8	25,4	1,00	1000					

Fuente: Elaboración propia.

Los costos para la red de Two-Loops ya optimizada con los diferentes métodos, se presentan en la Tabla 15. Para dicha red el costo mínimo fue obtenido tanto con el método HS como con WaterGEMS, mientras que por Lenhsnet se obtuvo un valor mayor. En la Tabla 16 se presentan los resultados que obtuvieron otros autores.

Tabla 15. Costo de la red de Two-Loops ya optimizada.

Método	Lenhsnet	WaterGEMS	HS
Costo \$	441.000,00	419.000,00	419.000,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Costo de la red de Two Loops optimizada por otros autores

Año	Algoritmo	Autor	Costo	Simulaciones
1999	Recocido simulado	Cunha y Sousa	419.000	25.000
2003	Salto mezclado de la rana	Eusuff y Lansey	419.000	11.155
2004	Evolución compleja mezclada	Liong y Atiquzzaman	419.000	1.091
2006	Algoritmo genético	Reca y Martinez	419.000	10.000
2006	Búsqueda de armonía	Geem	419.000	1.121
2007	Entropía cruzada	Perelman y Ostfeld	419.000	35.000
2007	Búsqueda dispersa	Lin y otros	419.000	3.215
2009	Búsqueda de armonía con enjambre de partículas	Geem	419.000	204
2009	SOGH	Ochoa	419.000	48
2010	Algoritmo genético	Bolognesi y otros	419.000	1.100

Fuente: Tomado de *diseño optimizado de sistemas de distribución de agua: una nueva perspectiva*, por Saldarriaga et al. (2010), (https://www.researchgate.net/publication/320331618_Diseño_optimizado_de_sistemas_de_distribución_de_agua_Una_nueva_perspectiva/).

Como se puede observar en las Tablas 15 y 16, se logra llegar alcanzar el costo mínimo reportado por otros autores, lo cual indica que es factible aplicar los métodos, y la ventaja de aplicar los tres métodos a la misma red es que por lo menos uno de ellos puede llegar al diseño más económico.

4.1.3 Red de Go-Yang

La red de Go-Yang fue presentada por primera vez por Kim et al. (1994) está compuesta por 22 nodos y 30 tuberías, formando un total de 9 mallas. La alimentación del sistema se realiza desde un depósito de cota fija de 71m, que contiene una bomba de 4,52kW. El problema se reduce a realizar el dimensionamiento óptimo de la red; en la Figura 9 se presenta el esquema de dicha red, de modo que cumpla las restricciones impuestas. En este caso, la restricción principal es el cumplimiento de una presión mínima de 15 mca para todos los nodos y el coeficiente de Hazen Williams utilizado para el cálculo de las pérdidas de carga es de 100. Se dispone de todos los datos de entrada de la red, en las Tablas 17, y 18.

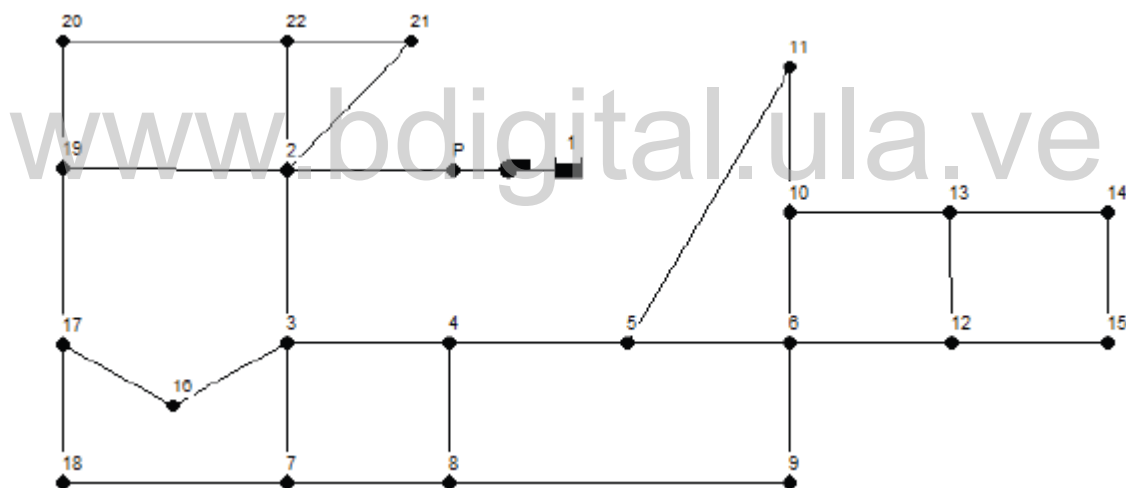


Figura 9. Red de Go-Yang

Fuente: Tomado de *Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia*, por Mora (2012).

Tabla 17. Demanda y cota de los nodos de la red de Go-Yang.

ID nudo	Cota (m)	Demanda (l/s)	ID nudo	Cota (m)	Demanda (l/s)
1	71	0	12	58,6	0,43
2	56,4	1,77	13	59,3	0,43
3	53,8	0,82	14	59,8	0,73
4	54,9	0,68	15	59,2	5,16
5	56	0,87	16	53,6	1,25
6	57	0,78	17	54,8	0,92
7	53,9	0,73	18	55,1	0,64
8	54,5	0,56	19	54,2	1,37
9	57,9	0,49	20	54,5	1,44
10	62,1	0,35	21	62,6	0,37
11	62,8	0,49	22	61,8	9,25

Fuente: Adaptado de Mora (2012).

Tabla 18. Diámetros y costo de las tuberías para la red de Go-Yang.

D (mm)	\$/m	D (mm)	\$/m
80	37890,1	200	47624
100	38933	250	54125,3
125	40562,6	300	62109
150	42554,3	350	71524,3

Fuente: Adaptado de Mora (2012).

Luego de crear la red en Epanet se procedió al igual que en las redes anteriores a optimizarla usando los tres métodos que se estudiaron. Los resultados se presentan en las Tablas 19, 20 y 21.

Tabla 19. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Go-Yang usando Lenhsnet.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)
T1	200	165	1	0	15,62	86,62
T2	150	124	2	1,77	28,93	85,33
T3	125	118	3	0,82	30,24	84,04
T4	100	81	4	0,68	28,05	82,95
T5	80	134	5	0,87	25,67	81,67
T6	100	135	6	0,78	22,91	79,91
T7	80	202	7	0,73	29,04	82,94
T8	80	135	8	0,56	28,1	82,6
T9	80	170	9	0,49	22,6	80,5
T10	80	113	10	0,35	17,75	79,85
T11	80	335	11	0,49	17,57	80,37
T12	80	115	12	0,43	20,43	79,03
T13	80	345	13	0,43	19,66	78,96
T14	80	114	14	0,73	17,56	77,36
T15	80	103	15	5,16	17,72	76,92
T16	80	261	16	1,25	29,6	83,2
T17	80	72	17	0,92	27,73	82,53
T18	80	373	18	0,64	27,44	82,54
T19	80	98	19	1,37	28,24	82,44
T20	80	110	20	1,44	27,32	81,82
T21	80	98	21	0,37	20,01	82,91
T22	80	246	22	9,25	19,78	81,58
T23	80	174	30	-29,51	0	71
T24	80	102				
T25	80	92				
T26	80	100				
T27	80	130				
T28	80	90				
T29	80	185				
T30	80	90				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de Go-Yang usando WaterGEMS.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)
T1	150	165	1	0	16	86,63
T2	150	124	2	1,77	25	81,36
T3	125	118	3	0,82	26	80,07
T4	125	81	4	0,68	24	78,93
T5	100	134	5	0,87	22	78,39
T6	80	135	6	0,78	21	77,58
T7	80	202	7	0,73	25	79,06
T8	80	135	8	0,56	24	78,8
T9	80	170	9	0,49	20	77,81
T10	80	113	10	0,35	15	77,19
T11	80	335	11	0,49	15	77,85
T12	80	115	12	0,43	18	76,41
T13	80	345	13	0,43	17	76,47
T14	80	114	14	0,73	15	74,82
T15	80	103	15	5,16	15	74,36
T16	80	261	16	1,25	26	79,25
T17	80	72	17	0,92	24	78,6
T18	80	373	18	0,64	24	78,61
T19	80	98	19	1,37	24	78,5
T20	80	110	20	1,44	23	77,87
T21	80	98	21	0,37	16	78,95
T22	80	246	22	9,25	16	77,63
T23	100	174	30	-29,51	0	71
T24	80	102				
T25	80	92				
T26	80	100				
T27	100	130				
T28	80	90				
T29	80	185				
T30	80	90				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Diámetros optimizados de las tuberías para la de red de Go-Yang optimizado usando HS.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Cota (m)	Carga Hidráulica (m)
T1	200	165	1	0	15,6241	71	86,6241
T2	125	124	2	1,77	28,928	56,4	85,328
T3	125	118	3	0,82	28,7288	53,8	82,5288
T4	100	81	4	0,68	26,581	54,9	81,481
T5	80	134	5	0,87	24,2016	56	80,2016
T6	80	135	6	0,78	21,51	57	78,51
T7	80	202	7	0,73	27,7217	53,9	81,6217
T8	80	135	8	0,56	26,7023	54,5	81,2023
T9	80	170	9	0,49	21,2061	57,9	79,1061
T10	80	113	10	0,35	16,1728	62,1	78,2728
T11	80	335	11	0,49	16,0272	62,8	78,8272
T12	80	115	12	0,43	18,1593	58,6	76,7593
T13	80	345	13	0,43	17,4594	59,3	76,7594
T14	80	114	14	0,73	15,3332	59,8	75,1332
T15	80	103	15	5,16	15,4788	59,2	74,6788
T16	80	261	16	1,25	28,313	53,6	81,913
T17	80	72	17	0,92	26,7522	54,8	81,5522
T18	80	373	18	0,64	26,4441	55,1	81,5441
T19	80	98	19	1,37	27,3567	54,2	81,5567
T20	80	110	20	1,44	26,6833	54,5	81,1833
T21	80	98	21	0,37	19,7447	62,6	82,3447
T22	80	246	22	9,25	19,3605	61,8	81,1605
T23	80	174	30	-29,51	0	71	71
T24	80	102					
T25	80	92					
T26	80	100					
T27	80	130					
T28	80	90					
T29	80	185					
T30	80	90					

Fuente: Elaboración propia.

Los costos para la red de Go-Yang ya optimizada con los diferentes métodos se presentan en la Tabla 22. Para dicha red el costo mínimo fue obtenido con el método usando WaterGEMS en cambio con el método de Lenhsnet se encontró un valor mayor. En la Tabla 23 se presentan los resultados obtenidos por otros autores y se compararon para ver el costo mínimo con los tres métodos y así conocer cuál entregaba la solución más económica.

Tabla 22. Costo de la red de Go-Yang ya optimizada.

Metodo	Lenhsnet	WaterGEMS	HS
Costo \$	177.398.436,70	177.009.904,00	177.010.672,36

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Costo de la red de Go-Yang optimizada por otros autores.

Diámetros originales (Costo \$)	Solución NLP proporcionada por Geem (2001). (Costo \$)	Solución obtenida Geem con algoritmo basado en HS. (Costo \$)	Solución obtenida en el trabajo de Mora (2012) Leaping Algorithm, Particle Swarm Optimization (Costo \$)
179.428.600,00	179.142.700,00	177.135.800,00	177.009.555,00

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Mora (2012).

Los costos para la red de Go-Yang ya optimizada por otros autores arrojan que para dicha red el costo mínimo fue obtenido con el método presentado en el trabajo de Mora (2012), el cual fue de 177.009.555,00\$, mejor que el resultado presentado en este trabajo, pero por muy poca diferencia de precio.

4.1.4 Red de Balerma

La red de Balerma es el sistema de distribución de un distrito de riego en Almería, España. Está conformada por 454 tubos y 443 nodos de consumo con demandas uniformes. Dichos nodos se alimentan por 4 embalses de altura fija. Las tuberías que se pueden emplear en este diseño son de PVC, con un coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach de $e = 0,0025$ mm, y se disponen de 10 diámetros comerciales. La presión mínima requerida para este diseño en todos los nodos es de 20 mca. En la Figura 10 se presenta el esquema de la red y en la Tabla 24, los costos de las tuberías comerciales disponibles para el diseño.



Figura 10. Red de Balerma

Fuente: Tomado de *diseño optimizado de sistemas de distribución de agua: una nueva perspectiva*, por Saldarriaga et al. (2010), (https://www.researchgate.net/publication/320331618_Diseño_optimizado_de_sistemas_de_distribucion_de_agua_Una_nueva_perspectiva/)

Tabla 24. Diámetros y costo de las tuberías para la red de Balerma.

ID Diámetro	Diámetro (mm)	Costo (\$/m)
1	113	7,22
2	126,6	9,1
3	144,6	11,92
4	162,8	14,84
5	180,8	18,38
6	226,2	28,6
7	285	45,39
8	361,8	76,32
9	452,2	124,64
10	581,8	215,85

Fuente: Elaboración propia, adaptado del material facilitado por Mora (2024).

Como la red ya se tenía montada en Epanet, gracias a los archivos que facilitó el profesor Luis Mora, se procedió al igual que en las redes anteriores a optimizarla usando los tres métodos que se estudiaron. En este apartado solo se presentan los resultados de los costos obtenidos y en detalle se incorporan en los anexos, debido a que la red es muy grande. Por otro lado, no se dispone de resultados por el método de Lenhsnet, ya que no fue posible optimizar la red, debido a que arrojaba errores que no se pudieron solucionar.

Los costos para la red de Balerma ya optimizada son los que aparecen en la Tabla 25. Para esta red el costo mínimo fue obtenido con el método HS.

Tabla 25. Costo de la red de Balerma ya optimizada.

Metodo	WaterGEMS	HS
Costo \$	2.978.463,25	2.013.173,09

Fuente: Elaboración propia.

Otros autores han utilizado diversos métodos para optimizar la red de Balerna, obteniendo diferentes costos, como se observa en la Tabla 26. El costo mínimo registrado para esta red fue de 2.018.000,00 \$ obtenido por Geem (2006), cifra que se aproxima al resultado obtenido en este estudio, que fue de 2.013.173,09 \$. Es interesante destacar que ambos trabajos emplearon el mismo método; la diferencia en los costos podría atribuirse al tipo de computadora utilizada en cada análisis.

Tabla 26. Costo de la red de Balerna optimizada por otros autores.

Año	Algoritmo	Autor	Costo (€ millones)	Simulaciones
2006	Algoritmo genético	Reca y Martinez	2.302	10.000.000
2007	Algoritmo genético	Reca y otros	3.738	45.400
2007	Recocido simulado	Reca y otros	3.476	45.400
2007	Recocido simulado con búsqueda tabú	Reca y otros	3.298	45.400
2007	Búsqueda local con recocido simulado	Reca y otros	4.310	45.400
2006	Búsqueda de armonía	Geem	2.601	45.400
2006	Búsqueda de armonía	Geem	2.018	10.000.000
2009	Búsqueda de armonía con enjambre de partículas	Geem	2.633	45.400
2009	SOGH	Ochoa	2.100	1.779
2010	Algoritmo genético	Bolognesi y otros	2.178	45.400
2010	OPUS	Saldarriaga y otros	2.508	1.857

Fuente: Tomado de *diseño optimizado de sistemas de distribución de agua: una nueva perspectiva*, por Saldarriaga et al. (2010), (https://www.researchgate.net/publication/320331618_Disenio_optimizado_de_sistemas_de_distribucion_de_agua_Una_nueva_perspectiva/).

4.1.5 Red R 9 de Joao Pessoa

La red R 9 de Joao Pessoa es una red de trazado real ubicada en la ciudad de Joao Pessoa (Brasil). Su construcción data de 1982 y consta de 61 nodos de consumo, conectados entre sí a través de 72 conductos, considerando como alimentación del sistema un depósito de cabecera de altura fija. El esquema de la red se representa en la Figura 11. Todos los datos necesarios para el dimensionamiento se tomaron del trabajo de Formiga (2005).

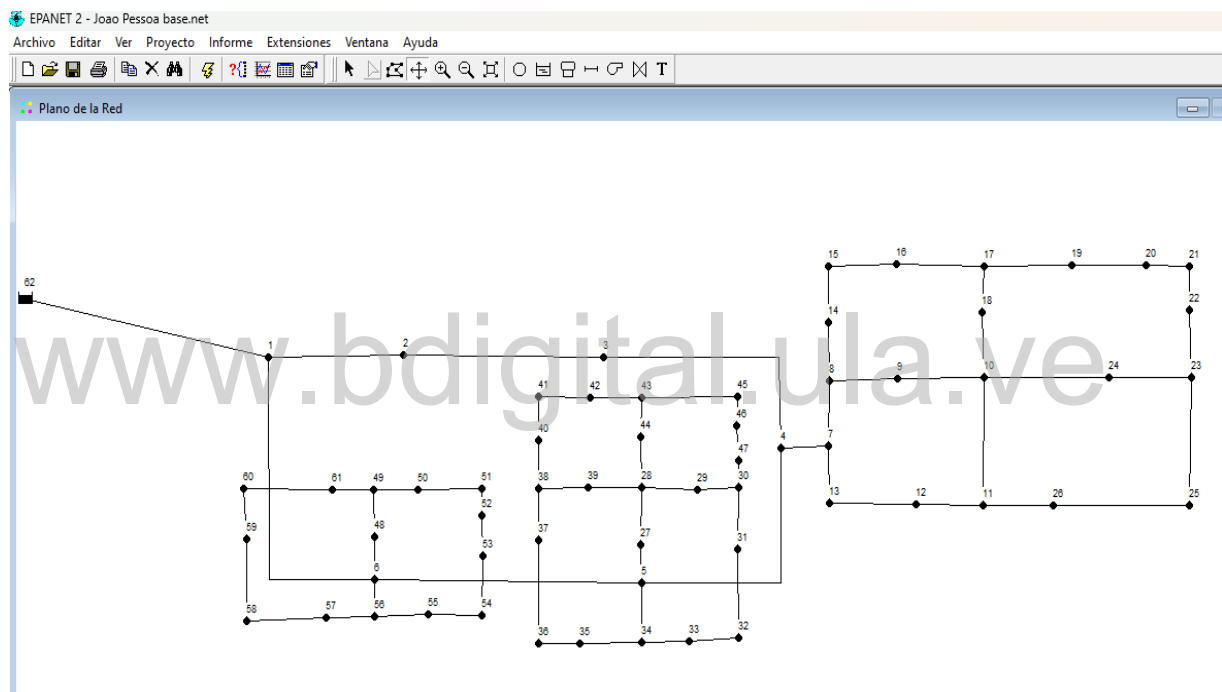


Figura 11. Red R9 de Joao Pessoa Brasil

Fuente: Tomado de Mora (2012).

El objetivo del problema es dimensionar los conductos de la red de modo que se cumpla una serie de condiciones para su correcto funcionamiento. En este caso, la restricción principal

es el cumplimiento de una presión mínima de 15 mca para todos los nodos. Para esto se dispone de todos los datos de entrada de la red, los cuales están mostrados en las Tablas 27 y 28.

Tabla 27. Demanda y cota de los nodos de la red R9 de Joao Pessoa Brasil.

ID nodo	Cota (m)	Demanda (l/s)	ID nodo	Cota (m)	Demanda (l/s)	ID nodo	Cota (m)	Demanda (l/s)
1	5	2.51	22	3	5.46	43	4	3.61
2	5	44.07	23	3.5	62.45	44	4	5.17
3	4	41.24	24	6	8.19	45	4	6.48
4	4.5	1.04	25	3.5	58.87	46	4.5	4.91
5	4.5	0.86	26	3.5	3.26	47	4	6.5
6	4.5	1.32	27	4.3	4.36	48	4.5	4.97
7	4.5	1.35	28	4	4.25	49	3	2.97
8	5	8.59	29	2.5	4.56	50	5	1.8
9	4.5	6.4	30	2.5	8.32	51	4	2.96
10	5	6.07	31	3.5	4.94	52	3	4.66
11	3.5	4.95	32	4.5	4.09	53	4.5	4.54
12	3.5	8.38	33	5	3.68	54	4.5	8.8
13	3.5	11.7	34	5	4.04	55	4.5	4.26
14	5	5.63	35	6	3.22	56	5	2.98
15	6	5.57	36	4.5	2.53	57	5	3.91
16	6	6.3	37	4.5	2.31	58	4.7	3.7
17	6	3.26	38	4	2.5	59	5	1.86
18	6	3.6	39	4	2.89	60	5	3.12
19	6	4.83	40	4	2.48	61	4.5	3.52
20	6	4.5	41	4	4.61	62	54	-456,17
21	5	2.8	42	4	3.47			

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Mora (2012).

Tabla 28. Diámetros y costo de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil.

Diámetro (mm)	Costo (\$/m)	Diámetro (mm)	Costo (\$/m)
100	1629	350	11012
150	4054	400	12397
200	5769	450	15501
250	7718	500	17686
300	9237	600	23132

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Mora (2012).

Luego de crear la red en Epanet, se procedió al igual que en las redes anteriores a optimizarla usando los tres métodos que se estudiaron. Los resultados se presentan en las Tablas 29, 30 y 31.

Tabla 29. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil usando Lenhsnet.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T1	600	2540	1	2,51	39,73	44,73	5
T2	600	350	2	44,07	38,75	43,75	5
T3	600	1140	3	41,24	37,2	41,2	4
T4	500	1430	4	1,04	30,53	35,03	4,5
T5	300	1020	5	0,86	25,57	30,07	4,5
T6	100	1430	6	1,32	30,12	34,62	4,5
T7	250	1710	7	1,35	29	33,5	4,5
T8	400	220	8	8,59	26,85	31,85	5
T9	200	190	9	6,4	21,77	26,27	4,5
T10	100	295	10	6,07	20,17	25,17	5
T11	100	390	11	4,95	27,02	30,52	3,5
T12	100	370	12	8,38	27,74	31,24	3,5
T13	400	190	13	11,7	29,03	32,53	3,5
T14	400	310	14	5,63	23,38	28,38	5
T15	400	205	15	5,57	20,44	26,44	6
T16	150	305	16	6,3	19,53	25,53	6
T17	150	295	17	3,26	18,27	24,27	6
T18	150	300	18	3,6	18,27	24,27	6
T19	100	290	19	4,83	18,16	24,16	6

Tabla 29. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil usando Lenhsnet.
(continuación)

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T20	100	180	20	4,5	19,02	25,02	6
T21	100	315	21	2,8	20,41	25,41	5
T22	100	300	22	5,46	22,84	25,84	3
T23	100	295	23	62,45	22,7	26,2	3,5
T24	150	215	24	8,19	18,74	24,74	6
T25	150	140	25	58,87	24,11	27,61	3,5
T26	200	220	26	3,26	25,97	29,47	3,5
T27	100	220	27	4,36	25,43	29,73	4,3
T28	100	285	28	4,25	23,86	27,86	4
T29	300	300	29	4,56	24,37	26,87	2,5
T30	350	315	30	8,32	21,82	24,32	2,5
T31	350	170	31	4,94	19,94	23,44	3,5
T32	300	110	32	4,09	18,95	23,45	4,5
T33	250	280	33	3,68	19,32	24,32	5
T34	200	225	34	4,04	22,38	27,38	5
T35	150	200	35	3,22	20,61	26,61	6
T36	100	190	36	2,53	20,1	24,6	4,5
T37	100	285	37	2,31	19,45	23,95	4,5
T38	100	210	38	2,5	19,89	23,89	4
T39	100	240	39	2,89	21,07	25,07	4
T40	150	250	40	2,48	19,09	23,09	4
T41	150	340	41	4,61	19,05	23,05	4
T42	100	270	42	3,47	20,27	24,27	4
T43	100	240	43	3,61	20,51	24,51	4
T44	100	160	44	5,17	23,19	27,19	4
T45	100	260	45	6,48	18,85	22,85	4
T46	100	250	46	4,91	18,28	22,78	4,5
T47	100	330	47	6,5	19,66	23,66	4
T48	100	230	48	4,97	28,38	32,88	4,5
T49	100	385	49	2,97	28,05	31,05	3
T50	150	160	50	1,8	23,77	28,77	5
T51	150	330	51	2,96	22,43	26,43	4
T52	200	210	52	4,66	22,69	25,69	3
T53	100	150	53	4,54	21,19	25,69	4,5
T54	100	255	54	8,8	22,45	26,95	4,5
T55	100	260	55	4,26	23,4	27,9	4,5

Tabla 29. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil usando Lenhsnet.
(continuación)

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T56	150	230	56	2,98	24,87	29,87	5
T57	150	115	57	3,91	21,72	26,72	5
T58	150	180	58	3,7	21,08	25,78	4,7
T59	100	140	59	1,86	20,78	25,78	5
T60	100	215	60	3,12	20,93	25,93	5
T61	100	175	61	3,52	23,01	27,51	4,5
T62	100	180	62	-456,17	0	54	54
T63	100	260					
T64	150	205					
T65	150	255					
T66	150	260					
T67	100	275					
T68	100	315					
T69	100	200					
T70	100	175					
T71	100	300					
T72	100	250					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil usando WaterGEMS.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T1	600	2540	1	2,51	40	44,73	5
T2	300	350	2	44,07	38	42,98	5
T3	200	1140	3	41,24	28	31,79	4
T4	100	1430	4	1,04	26	30,37	4,5
T5	450	1020	5	0,86	30	34,33	4,5
T6	500	1430	6	1,32	36	40,57	4,5
T7	600	1710	7	1,35	24	28,85	4,5
T8	400	220	8	8,59	23	27,98	5
T9	300	190	9	6,4	23	27,22	4,5
T10	300	295	10	6,07	21	26,4	5
T11	300	390	11	4,95	21	24,07	3,5

Tabla 30. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil usando WaterGEMS.
(continuación)

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T12	100	370	12	8,38	22	25,72	3,5
T13	300	190	13	11,7	23	26,47	3,5
T14	400	310	14	5,63	22	26,53	5
T15	300	205	15	5,57	17	22,73	6
T16	150	305	16	6,3	16	22,28	6
T17	100	295	17	3,26	17	23,19	6
T18	100	300	18	3,6	19	25,24	6
T19	100	290	19	4,83	17	22,78	6
T20	150	180	20	4,5	16	21,99	6
T21	200	315	21	2,8	16	20,59	5
T22	200	300	22	5,46	17	20,34	3
T23	150	295	23	62,45	17	20,7	3,5
T24	100	215	24	8,19	18	24,3	6
T25	100	140	25	58,87	18	21,36	3,5
T26	100	220	26	3,26	19	22,59	3,5
T27	100	220	27	4,36	27	31,44	4,3
T28	150	285	28	4,25	25	29,22	4
T29	300	300	29	4,56	26	28,11	2,5
T30	350	315	30	8,32	23	25,17	2,5
T31	300	170	31	4,94	19	22,98	3,5
T32	200	110	32	4,09	18	22,51	4,5
T33	250	280	33	3,68	18	22,62	5
T34	200	225	34	4,04	19	23,94	5
T35	150	200	35	3,22	15	21,35	6
T36	100	190	36	2,53	16	20,83	4,5
T37	100	285	37	2,31	16	20,83	4,5
T38	100	210	38	2,5	17	20,98	4
T39	100	240	39	2,89	20	23,98	4
T40	100	250	40	2,48	16	20,23	4
T41	100	340	41	4,61	16	20,19	4
T42	100	270	42	3,47	17	21,49	4
T43	100	240	43	3,61	19	23,23	4
T44	100	160	44	5,17	22	26,25	4

Tabla 30. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 Joao de Pessoa Brasil usando WaterGEMS.
(continuación)

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T45	100	260	45	6,48	17	21,09	4
T46	100	250	46	4,91	16	20,83	4,5
T47	100	330	47	6,5	17	21,31	4
T48	100	230	48	4,97	36	40,16	4,5
T49	100	385	49	2,97	25	27,54	3
T50	100	160	50	1,8	22	27,02	5
T51	150	330	51	2,96	19	22,76	4
T52	150	210	52	4,66	18	20,93	3
T53	100	150	53	4,54	16	20,65	4,5
T54	100	255	54	8,8	16	20,89	4,5
T55	100	260	55	4,26	21	25,36	4,5
T56	100	230	56	2,98	31	35,67	5
T57	200	115	57	3,91	25	29,54	5
T58	100	180	58	3,7	22	26,46	4,7
T59	150	140	59	1,86	21	25,98	5
T60	100	215	60	3,12	21	25,89	5
T61	100	175	61	3,52	22	26,11	4,5
T62	100	180	62	-456,17	0	54	54
T63	100	260					
T64	100	205					
T65	100	255					
T66	150	260					
T67	100	275					
T68	100	315					
T69	100	200					
T70	100	175					
T71	100	300					
T72	100	250					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil optimizado usando HS.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T1	600	2540	1	2,51	39,7281	44,7281	5
T2	500	350	2	44,07	38,1892	43,1892	5
T3	450	1140	3	41,24	32,8717	36,8717	4
T4	450	1430	4	1,04	26,5551	31,0551	4,5
T5	100	1020	5	0,86	23,4185	27,9185	4,5
T6	300	1430	6	1,32	30,3751	34,8751	4,5
T7	350	1710	7	1,35	25,0281	29,5281	4,5
T8	400	220	8	8,59	23,8846	28,8846	5
T9	450	190	9	6,4	23,5464	28,0464	4,5
T10	450	295	10	6,07	21,2025	26,2025	5
T11	400	390	11	4,95	17,5983	21,0983	3,5
T12	100	370	12	8,38	16,6518	20,1518	3,5
T13	100	190	13	11,7	17,5114	21,0114	3,5
T14	100	310	14	5,63	18,0511	23,0511	5
T15	100	205	15	5,57	15,8273	21,8273	6
T16	100	305	16	6,3	15,9364	21,9364	6
T17	100	295	17	3,26	19,1638	25,1638	6
T18	100	300	18	3,6	19,4585	25,4585	6
T19	100	290	19	4,83	17,138	23,138	6
T20	200	180	20	4,5	17,0754	23,0754	6
T21	200	315	21	2,8	18,699	23,699	5
T22	100	300	22	5,46	20,8618	23,8618	3
T23	100	295	23	62,45	21,1619	24,6619	3,5
T24	100	215	24	8,19	19,2929	25,2929	6
T25	150	140	25	58,87	19,1397	22,6397	3,5
T26	150	220	26	3,26	17,6827	21,1827	3,5
T27	400	220	27	4,36	23,2788	27,5788	4,3
T28	400	285	28	4,25	21,7224	25,7224	4
T29	250	300	29	4,56	19,9101	22,4101	2,5
T30	100	315	30	8,32	17,8735	20,3735	2,5
T31	100	170	31	4,94	16,339	19,839	3,5
T32	300	110	32	4,09	15,4778	19,9778	4,5

Tabla 31. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil optimizado usando HS. (continuación)

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T33	250	280	33	3,68	16,2871	21,2871	5
T34	150	225	34	4,04	20,167	25,167	5
T35	150	200	35	3,22	18,515	24,515	6
T36	100	190	36	2,53	18,489	22,989	4,5
T37	100	285	37	2,31	18,0958	22,5958	4,5
T38	100	210	38	2,5	18,5898	22,5898	4
T39	100	240	39	2,89	21,0861	25,0861	4
T40	150	250	40	2,48	17,0029	21,0029	4
T41	150	340	41	4,61	16,7205	20,7205	4
T42	100	270	42	3,47	17,2167	21,2167	4
T43	100	240	43	3,61	18,3303	22,3303	4
T44	100	160	44	5,17	21,0494	25,0494	4
T45	100	260	45	6,48	15,9507	19,9507	4
T46	150	250	46	4,91	15,056	19,556	4,5
T47	100	330	47	6,5	15,8903	19,8903	4
T48	100	330	48	4,97	20,9524	25,4524	4,5
T49	100	385	49	2,97	21,1793	24,1793	3
T50	100	160	50	1,8	19,093	24,093	5
T51	150	330	51	2,96	17,4388	21,4388	4
T52	200	210	52	4,66	17,532	20,532	3
T53	100	150	53	4,54	16,0273	20,5273	4,5
T54	100	255	54	8,8	16,1682	20,6682	4,5
T55	100	260	55	4,26	22,5628	27,0628	4,5
T56	150	230	56	2,98	23,9253	28,9253	5
T57	100	115	57	3,91	22,9405	27,9405	5
T58	150	180	58	3,7	19,389	24,089	4,7
T59	200	140	59	1,86	18,3348	23,3348	5
T60	100	215	60	3,12	18,1138	23,1138	5
T61	100	175	61	3,52	18,6683	23,1683	4,5
T62	100	180	62	-456,17	0	54	54
T63	150	260					
T64	100	205					

Tabla 31. Diámetros optimizados de las tuberías para la red R9 de Joao Pessoa Brasil optimizado usando HS.
(continuación)

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)
T65	150	255
T66	150	260
T67	150	275
T68	100	315
T69	100	200
T70	100	175
T71	100	300
T72	100	250

Fuente: Elaboración propia.

Los costos para la red R9 de Joao Pessoa Brasil ya optimizada con los diferentes métodos se presentan en la Tabla 32. Para dicha red el costo mínimo fue obtenido con el método HS, mientras que con WaterGEMS resultó un valor mayor. En la Tabla 33 se presenta el resultado obtenido por Mora (2012), que como se logra observar obtuvo un costo más económico y uno más caro, que los valores obtenidos en este trabajo.

Tabla 32. Costo de la red R9 de Joao Pessoa Brasil ya optimizada.

Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS
Costo \$	201.306.170,00	210.757.920,00	199.210.500,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Costo de la red R9 de Joao Pessoa Brasil optimizada por otros autores.

Costo (\$)	(1) 199.390.000,00	(2) 192.366.000,00
(1) Solución obtenida por Lenhsnet		
(2) Solución obtenida en el trabajo de Mora (2012) con los algoritmos Pseudogenético, Harmony Search, Frog Shuffled Leaping Algorithm, Particle Swarm Optimization		

Fuente: Adatad de *Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia*, por Mora (2012).

Las demás redes sintéticas analizadas se presentan en los anexos, como lo son la red de New York y la red 67 Tubos.

4.2 Redes del municipio Campo Elías

En este trabajo se contó con la ayuda de personal de la Hidrológica Municipal Aguas de Ejido C.A, quienes colaboraron con la mayoría de la información para estudiar las redes del sector El Palmo y de la Urbanización Don Luis. La información faltante se obtuvo de los planos que se disponen en los archivos de la Alcaldía. Con todo el trabajo ya realizado con las redes sintéticas se está en la capacidad de aplicar lo ya aprendido para optimizar estas dos redes con los tres métodos estudiados.

4.2.1 Red de El Palmo

La red del sector El Palmo, Los Olivos es una red ramificada que se encuentra distribuida por calles que van desde la N° 01 hasta la calle N° 05 con sus respectivas transversales; es abastecida directamente de la Planta de Potabilización “General Eleazar López Contreras”. La tubería matriz que alimenta este sector corresponde al estanque D7, la tubería que compone la Red de Distribución es PEAD. de 110mm, los materiales para las tomas domiciliarias son característicos de los sistemas de riego que utilizan tubería PEBD de 80 PSI de 20mm para cada vivienda.

La red de distribución se conecta a la tubería matriz del estanque D7. Esta red es un problema continuo para la Hidrológica, ya que se reportan muchas fugas en la calle N° 03, por lo que continuamente son reparadas por el personal de redes, razón lo cual fue escogida para

optimizarla en este trabajo, en el cual se obtiene cuál debería haber sido su mejor diseño inicialmente. En la Figura 12 se muestra la red montada en Epanet.

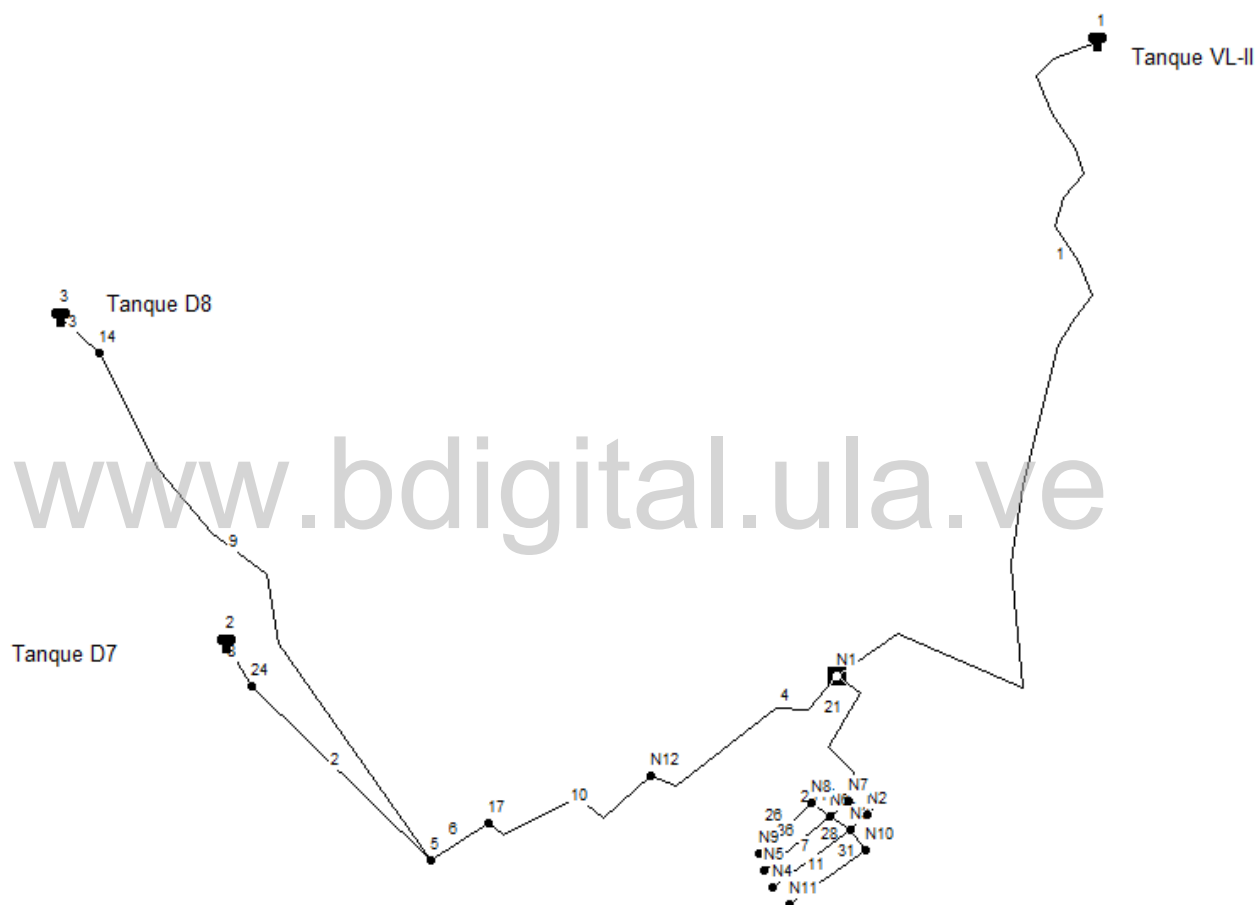


Figura 12. Red de El Palmo

Fuente: Departamento de Proyectos de la Hidrológica Municipal Aguas de Ejido C.A. (2024).

En la Figura 13 se muestra la red modificada en Epanet para solo trabajar con el sector El Palmo y no con la tubería alimentadora que viene del estanque E7. Para ello, se cortó la red

desde el nodo N1 y se colocó un embalse con la misma carga hidráulica que tenía la red en ese nodo para no alterar las condiciones aguas abajo.

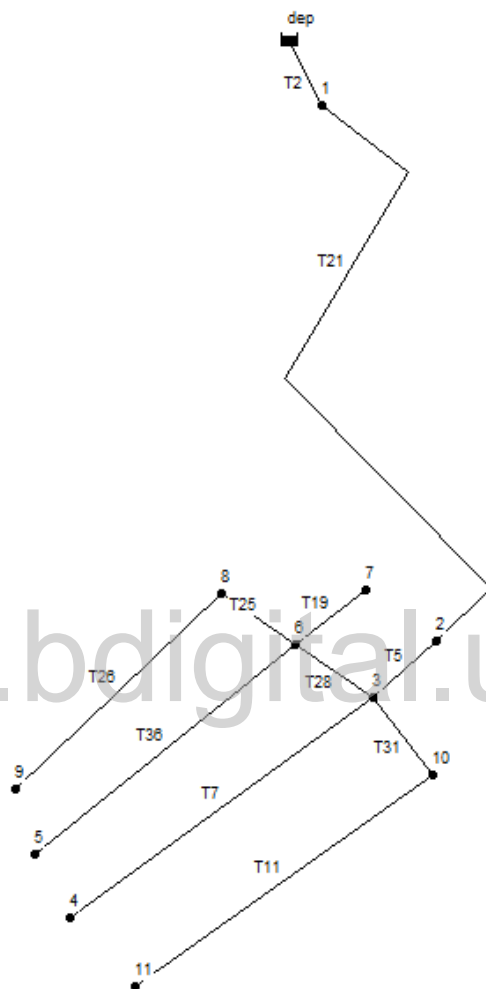


Figura 13. Red de El Palmo modificada

Fuente: Elaboración propia, adaptado del Departamento de Proyectos de la Hidrológica Municipal Aguas de Ejido C.A. (2024).

Los datos bases de la red se presentan en las Tablas 34 y 35. Con respecto a los costos de las tuberías se trabajó con valores facilitados por la sala de proyectos de la alcaldía del municipio

Campo Elías, con el fin de tener valores lo más reales posibles, los cuales son tomados del programa Maprex.

Tabla 34. Demanda y cota de los nodos de la red de El Palmo.

ID nudo	Cota (m)	Demanda (l/s)
N1	1218	1,47
N2	1204	1,98
N3	1198	2,19
N4	1182	1,14
N5	1182	1,14
N6	1199	2,03
N7	1201	0,28
N8	1198	1,34
N9	1184	1,05
N10	1198	1,4
N11	1182	1,2
dep	1348	-15,22

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35. Longitud y diámetros de las tuberías de la red de El Palmo.

Tubería	Nodo Inicial	Nodo Final	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Rugosidad (e=mm)
T2	dep	1	1	110	0,014
T5	2	3	94,95	110	0,014
T7	3	4	245,97	110	0,014
T11	10	11	223,39	110	0,014
T19	6	7	1000	110	0,014
T21	1	2	275,3	110	0,014
T25	6	8	53,29	110	0,014
T26	8	9	196,26	110	0,014
T28	6	3	56	110	0,014
T31	3	10	25,42	110	0,014
T36	6	5	212,55	110	0,014

Fuente: Elaboración propia.

Uno de los aspectos que ayuda a conseguir la solución óptima de las redes es la lista de diámetros disponibles para ser utilizados. En la Tabla 36 se presentan los costos de las tuberías y sus diámetros.

Tabla 36. Diámetros y costo de las tuberías para la red de El Palmo.

D (mm) Nominal	Material	Rugosidad (e=mm)	D (mm) Interno	Costo (\$/m)
20	PEAD	0,014	13,2	3,98
32	PEAD	0,014	21,2	8,16
40	PEAD	0,014	26,6	11,20
50	PEAD	0,014	33,4	16,45
63	PEAD	0,014	42	25,51
75	PEAD	0,014	54	29,91
90	PEAD	0,014	65	44,10
110	PEAD	0,014	77,2	71,60
160	PEAD	0,014	120,4	128,51

Fuente: Elaboración propia.

Luego de modificar la red en Epanet se procedió a usar cada uno de los tres métodos optimizadores que se estudiaron. Las tuberías que se pueden emplear en este diseño son de PEAD, con un coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach de $e = 0,014$ mm, y se disponen de 9 diámetros comerciales. La presión mínima requerida para este diseño en todos los nodos es de 30 mca. Los resultados se presentan en las Tablas 37, 38 y 39.

Tabla 37. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de El Palmo usando Lenhsnet.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T2	65	1	N1	1,47	129,73	1347,73	1218
T5	65	94,95	N2	1,98	82,05	1286,05	1204
T7	26,6	245,97	N3	2,19	72,18	1270,18	1198
T11	26,6	223,39	N4	1,14	43,78	1225,78	1182
T19	26,6	1000	N5	1,14	43,47	1225,47	1182
T21	65	275,3	N6	2,03	64,84	1263,84	1199
T25	33,4	53,29	N7	0,28	47,88	1248,88	1201
T26	26,6	196,26	N8	1,34	53,54	1251,54	1198
T28	54	56	N9	1,05	36,93	1220,93	1184
T31	33,4	25,42	N10	1,4	65,32	1263,32	1198
T36	26,6	212,55	N11	1,2	37,15	1219,15	1182
dep				-15,22	0	1348,00	1348

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 38. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de El Palmo usando WaterGEMS.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T2	65	1	N1	1,47	130	1347,73	1218,00
T5	77,2	95	N2	1,98	82	1286,05	1204,00
T7	26,6	246	N3	2,19	81	1279,27	1198,00
T11	26,6	223	N4	1,14	53	1234,88	1182,00
T19	21,2	1.000	N5	1,14	56	1238,37	1182,00
T21	65	275	N6	2,03	78	1276,73	1199,00
T25	33,4	53	N7	0,28	31	1232,17	1201,00
T26	26,6	196	N8	1,34	66	1264,43	1198,00
T28	65	56	N9	1,05	50	1233,82	1184,00
T31	42	25	N10	1,4	79	1277,06	1198,00
T36	26,6	213	N11	1,2	51	1232,88	1182,00
dep				-15,22	0	1348,00	1348,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de El Palmo optimizado usando HS.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T2	42	1	N1	1,47	127,5502	1345,5502	1218
T5	65	94,95	N2	1,98	79,8683	1283,8683	1204
T7	26,6	245,97	N3	2,19	69,9992	1267,9992	1198
T11	26,6	223,39	N4	1,14	41,6043	1223,6043	1182
T19	26,6	1000	N5	1,14	41,2951	1223,2951	1182
T21	65	275,3	N6	2,03	62,658	1261,658	1199
T25	33,4	53,29	N7	0,28	45,7015	1246,7015	1201
T26	26,6	196,26	N8	1,34	51,3598	1249,3598	1198
T28	54	56	N9	1,05	34,7481	1218,7481	1184
T31	33,4	25,42	N10	1,4	63,1468	1261,1468	1198
T36	26,6	212,55	N11	1,2	34,9672	1216,9672	1182
dep				-15,22	0	1348	1348

Fuente: Elaboración propia.

Los costos para la red de El Palmo ya optimizada con los diferentes métodos se presentan en la Tabla 40. Para dicha red el costo mínimo fue obtenido con el método HS; debido a que es una red relativamente sencilla los costos obtenidos con los otros métodos son muy cercanos al mínimo.

Tabla 40. Costo de la red de El Palmo optimizado.

Método	Lenhsnet	WaterGems	HS
Costo \$	40.377,37	40.973,44	40.358,78

Fuente: Elaboración propia.

El costo al día de hoy si se realizara la red que está construida en el Palmo con tubería de 110mm tendría un valor de 170.703,71\$, lo cual si se compara con los valores obtenidos anteriormente es una reducción significativa de 76,4% del costo, lo cual indica que es recomendable diseñar las redes con sus valores optimizados usando los métodos presentados en

este trabajo y así lograr una reducción significativa en el costo final de construcción. Por otro lado, con este diseño presentado no se han obtenido grandes presiones en la red como las que actualmente se presentan. Esto hubiese sido útil al momento de construir la red, pero ya que la red está construida no es viable desde el punto de vista económico remover la red actual para colocar una nueva. La solución para este caso ya la tiene la sala de proyectos de la Hidrológica Municipal Aguas de Ejido C.A, la cual es colocar una válvula reductora de presión en las cercanías del nodo 1 para así tener presiones normales en la red de El Palmo y de este modo reducir o eliminar las pérdidas del vital líquido, debido a las fugas que constantemente se reportan en el sector.

4.2.2 Red de la Urbanización Don Luis

La red de la Urbanización Don Luis cuenta con un estanque de 600.000 litros de capacidad ubicado en una meseta adyacente a la Urbanización, a una cota de 1119,63 msnm y una altura desde su base de 3m. La red original, según los planos sacados de los archivos de la alcaldía donde reposa el proyecto, se construyó con tubería PVC de 150 mm y 100 mm. La información sobre la red fue facilitada por la Hidrológica Municipal Aguas de Ejido C.A. Luego, se adaptó a los planos consultados para usar la red inicial y analizar si su diseño era el más económico o se pudo haber realizado uno mejor. Para ello se utilizarán los métodos de optimización estudiados en este trabajo.

Para el momento de la construcción de la urbanización en su proyecto, se le permitió una dotación de 1.130.796 l/d o de 13,09 l/s, como se muestra en la Figura 14. En la facilitada por la empresa Aguas de Ejido, el consumo actual es de 20.14 l/s, lo cual se deduce que aumentó

debido a que la urbanización desde su construcción fue creciendo o pasando de casas unifamiliares a casas multifamiliares. Sabiendo esto y que la principal restricción para el diseño será la de presión mínima de 29 mca, debido a que por topografía el nodo 33 es un punto crítico, se procedió a modelarla y optimizarla.

05388

- 2 -

CCA-2000

3º) Dotaciones en función de la zonificación y parcelamiento:

Nº Parcelas	Áreas en m ² .	U s o	Dotación l/d/p.
621	100 - 200	Unifamiliar	1.500
8	201 - 300	Unifamiliar	1.700
1	301 - 400	Unifamiliar	1.900
1	8.573,00	Educacional	30.100
1	1.697,50	Educacional (Kinder)	4.300
1	2.750,00	Educacional (Kinder)	4.800
1	5.680,00	Comercio Vecinal	68.896
1	2.170,00	Comercio Local	22.700
1	1.200,00	Comercio Local	12.400
1	5.666,00	Social	18.000
1	12.077,00	Deportiva	12.600
1	62.100,00	Recreacional y Parques	10.000

NOTA: Las dotaciones antes indicadas, son las correspondientes al proyecto de abastecimiento de agua que se aprueba. Las dotaciones definitivas de agua que requieran las construcciones serán las fijadas por el Servicio de Control de Calidad Ambiental de la Zona XVIII de Malariología y Saneamiento Ambiental, en la oportunidad en que les sean solicitados los respectivos permisos de construcción.

3.1 De acuerdo con las cifras anteriores la dotación total de agua calculada para la Urbanización Don Luis, será de - 1.130.796 lts/día, o sea 13.09 lts/seg.

3.1.42) FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA:

4.1 El agua para la Urbanización Don Luis será suministrada por los Acueductos de Ejido propiedad del Concejo Municipal del Distrito Campo Elías, de acuerdo con la comunicación Nº IN-162 de fecha 10 de Octubre de 1983.

.../...

Figura 14. Aprobación de dotación para la Urbanización Don Luis

Fuente: Archivos de la Alcaldía del municipio Campo Elías (2024).

En la Figura 15 se muestra la Urbanización Don Luis con todas sus calles y avenidas. Luego se observa en las Figuras 16 y 17 la red montada en Epanet. Posteriormente, se procedió a optimizarla por los tres métodos ya trabajados anteriormente.



Figura 15. Urbanización Don Luis

Fuente: Google Earth Pro (2024).



Figura 16. Red de la Urbanización Don Luis montada en Epanet con imagen de fondo

Fuente: Elaboración propia, adaptada. Departamento de Proyectos, Hidrológica Municipal Aguas de Ejido C.A. (2024).

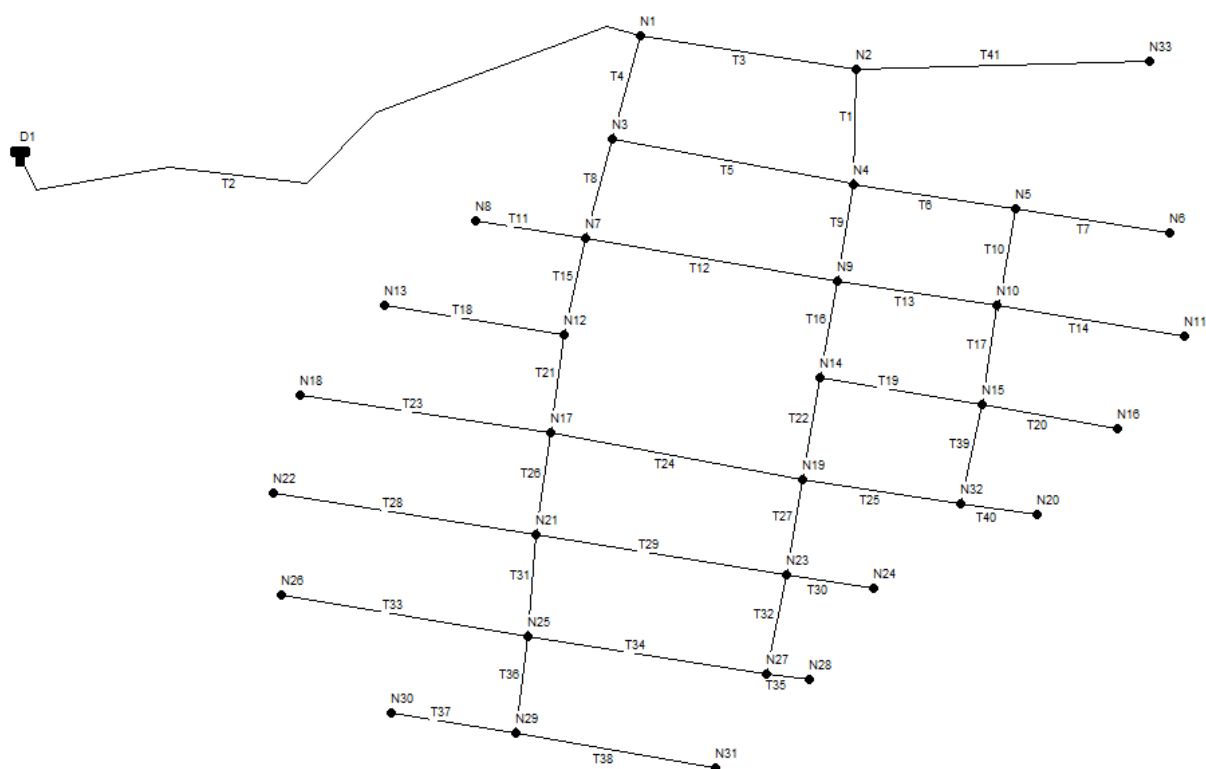


Figura 17. Red de la Urbanización Don Luis montada en Epanet

Fuente: Elaboración propia, adaptada. Departamento de Proyectos, Hidrológica Municipal Aguas de Ejido

C.A. (2024).

Todos los datos base de la red se presentan en las Tablas 41 y 42. Con respecto a los costos de las tuberías se trabajó con los facilitados por la sala de proyectos de la alcaldía del municipio Campo Elías para tener valores lo más reales posibles, los cuales son tomados del programa Maprex.

Tabla 41. Demanda y cota de los nodos de la red de la Urbanización Don Luis.

ID nodo	Cota (m)	Demanda (l/s)	ID nodo	Cota (m)	Demanda (l/s)	ID nodo	Cota (m)	Demanda (l/s)
N1	1085,08	1,949	N13	1068,2	0,219	N23	1062,32	0,65
N2	1088,4	0,269	N12	1071,26	0,458	N24	1062,5	0,106
N3	1080,72	0,557	N14	1072,36	0,439	N26	1054,2	0,299
N4	1082,48	0,62	N15	1070,25	0,484	N25	1057,52	0,831
N5	1078,3	0,512	N16	1063,7	0,166	N27	1058,87	0,465
N6	1072,9	0,188	N18	1062	0,305	N28	1058,87	0,052
N8	1074,2	0,133	N17	1066,73	0,856	N30	1051,8	0,243
N7	1075,98	0,683	N19	1067,27	0,831	N29	1053,28	0,514
N9	1077,49	0,738	N20	1064,27	0,283	N31	1055,7	0,152
N10	1074,27	0,671	N22	1058,7	0,32	N32	1065,1	0,1
N11	1068,35	0,228	N21	1062,1	0,871	N33	1088,4	0,3
						D1	1119,63	-15,492

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42. Longitud y diámetros de las tuberías de la red de la Urbanización Don Luis.

Tubería	Nodo Inicial	Nodo Final	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Rugosidad e(mm)
T1	N2	N4	60	130	0,015
T2	D1	N1	466	130	0,015
T3	N1	N2	134	130	0,015
T4	N1	N3	68	130	0,015
T5	N3	N4	140	96,8	0,015
T6	N4	N5	95	96,8	0,015
T7	N5	N6	99	96,8	0,015
T8	N3	N7	57	130	0,015
T9	N4	N9	56	96,8	0,015
T10	N5	N10	56	96,8	0,015
T11	N7	N8	85	96,8	0,015
T12	N7	N9	147	96,8	0,015
T13	N9	N10	96,05	96,8	0,015
T14	N10	N11	115	96,8	0,015
T15	N7	N12	62	130	0,015
T16	N9	N14	62	96,8	0,015

Tabla 42 Longitud y diámetros de las tuberías de la red de la Urbanización Don Luis.
(continuación)

Tubería	Nodo Inicial	Nodo Final	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Rugosidad e(mm)
T17	N10	N15	62	96,8	0,015
T18	N12	N13	122	96,8	0,015
T19	N15	N14	96	96,8	0,015
T20	N15	N16	110,5	96,8	0,015
T21	N12	N17	63	130	0,015
T22	N14	N19	63	96,8	0,015
T23	N17	N18	161,5	96,8	0,015
T24	N17	N19	150	96,8	0,015
T25	N19	N32	95,5	96,8	0,015
T26	N17	N21	56	130	0,015
T27	N19	N23	59	96,8	0,015
T28	N21	N22	161,5	96,8	0,015
T29	N23	N21	147	96,8	0,015
T30	N23	N24	65	96,8	0,015
T31	N21	N25	62	96,8	0,015
T32	N23	N27	62	96,8	0,015
T33	N25	N26	148	96,8	0,015
T34	N27	N25	146	96,8	0,015
T35	N27	N28	2	96,8	0,015
T36	N25	N29	60	96,8	0,015
T37	N29	N30	86	96,8	0,015
T38	N29	N31	105	96,8	0,015
T39	N15	N32	63	96,8	0,015
T40	N32	N20	35,2	96,8	0,015
T41	N2	N33	155	96,8	0,015

Fuente: Elaboración propia.

Uno de los aspectos que ayuda a conseguir la solución óptima de las redes es la lista de diámetros disponibles para ser utilizados. En la Tabla 43 se presentan los costos de las tuberías y sus diferentes diámetros.

Tabla 43. Diámetros y costo de las tuberías para la red de la Urbanización Don Luis.

D (mm) Nominal	Material	D (mm) Interno	Costo \$
20	PEAD	13,2	3,98
32	PEAD	21,2	8,16
40	PEAD	26,6	11,20
50	PEAD	33,4	16,45
63	PEAD	42	25,51
75	PEAD	54	29,91
90	PEAD	65	44,10
110	PEAD	77,2	71,60
160	PEAD	120,4	128,51
200	PEAD	141	150

Fuente: Elaboración propia.

Se procedió a optimizar la red con cada uno de los tres métodos que se estudiaron. Las tuberías que se pueden emplear en este diseño son de PEAD, con un coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach, de $e = 0,015$ mm, y se disponen de 10 diámetros comerciales. Los resultados se presentan en las Tablas 44, 45 y 46.

Tabla 44. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de la Urbanización Don Luis usando Lenhsnet.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T1	65	60	N1	2,53	32,66	1117,74	1085,08
T2	141	466	N2	0,35	29,07	1117,47	1088,4
T3	141	134	N3	0,72	33,89	1114,61	1080,72
T4	77,2	68	N4	0,81	30,53	1113,01	1082,48
T5	13,2	140	N5	0,67	32,95	1111,25	1078,3
T6	54	95	N6	0,24	34,98	1107,88	1072,9
T7	21,2	99	N8	0,17	33,61	1107,81	1074,2
T8	65	57	N7	0,89	33,4	1109,38	1075,98
T9	54	56	N9	0,96	31,32	1108,81	1077,49
T10	33,4	56	N10	0,87	32,96	1107,23	1074,27
T11	21,2	85	N11	0,3	33,37	1101,72	1068,35
T12	54	147	N13	0,28	35,87	1104,07	1068,2
T13	33,4	96,05	N12	0,6	34,64	1105,9	1071,26
T14	21,2	115	N14	0,57	32,86	1105,22	1072,36
T15	65	62	N15	0,63	32,95	1103,2	1070,25
T16	54	62	N16	0,22	36,48	1100,18	1063,7
T17	26,6	62	N18	0,4	32,79	1094,79	1062
T18	26,6	122	N17	1,11	32,41	1099,14	1066,73
T19	33,4	96	N19	1,08	36,05	1103,32	1067,27
T20	21,2	110,5	N20	0,37	36,02	1100,29	1064,27
T21	54	63	N22	0,42	32,23	1090,93	1058,7
T22	54	63	N21	1,13	33,57	1095,67	1062,1
T23	26,6	161,5	N23	0,85	34,1	1096,42	1062,32
T24	13,2	150	N24	0,14	33,11	1095,61	1062,5
T25	13,2	95,5	N26	0,39	35,93	1090,13	1054,2
T26	54	56	N25	1,08	36,46	1093,98	1057,52
T27	33,4	59	N27	0,6	33,65	1092,52	1058,87
T28	26,6	161,5	N28	0,07	33,58	1092,45	1058,87
T29	13,2	147	N30	0,32	33,74	1085,54	1051,8
T30	21,2	65	N29	0,67	36,88	1090,16	1053,28
T31	54	62	N31	0,2	33,63	1089,33	1055,7
T32	26,6	62	N32	0,13	36,02	1101,12	1065,1
T33	26,6	148	N33	0,39	29,01	1117,41	1088,4

Tabla 44. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de la Urbanización Don Luis usando Lenhsnet.
(continuación)

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T34	13,2	146	D1	-20,14	2,8	1122,43	1119,63
T35	13,2	2					
T36	33,4	60					
T37	21,2	86					
T38	26,6	105					
T39	26,6	63					
T40	26,6	35,2					
T41	65	155					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de la Urbanización Don Luis usando WaterGEMS.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T1	54	60	N1	2,53	34	1119,53	1085,08
T2	141	466	N2	0,35	31	1119,28	1088,40
T3	120,4	134	N3	0,72	36	1116,95	1080,72
T4	77,2	68	N4	0,81	32	1114,86	1082,48
T5	13,2	140	N5	0,67	30	1108,06	1078,30
T6	21,2	95	N6	0,24	34	1107,34	1072,90
T7	26,6	99	N7	0,17	37	1112,55	1075,98
T8	65	57	N8	0,89	37	1111,55	1074,20
T9	65	56	N9	0,96	36	1113,77	1077,49
T10	33,4	56	N10	0,87	34	1108,42	1074,27
T11	21,2	85	N11	0,3	37	1104,96	1068,35
T12	13,2	147	N12	0,28	37	1108,62	1071,26
T13	42	96	N13	0,6	37	1105,20	1068,20
T14	21,2	115	N14	0,57	34	1106,86	1072,36
T15	65	62	N15	0,63	32	1102,53	1070,25
T16	26,6	62	N16	0,22	37	1100,62	1063,70
T17	26,6	62	N17	0,4	34	1100,36	1066,73
T18	21,2	122	N18	1,11	30	1092,21	1062,00
T19	21,2	96	N19	1,08	31	1098,36	1067,27

Tabla 45. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de la Urbanización Don Luis usando WaterGEMS. (continuación)

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T20	21,2	111	N20	0,37	36	1100,00	1064,27
T21	54	63	N21	0,42	36	1098,12	1062,10
T22	13,2	63	N22	1,13	31	1089,24	1058,70
T23	21,2	162	N23	0,85	35	1097,12	1062,32
T24	54	150	N24	0,14	30	1092,17	1062,50
T25	13,2	96	N25	0,39	37	1094,45	1057,52
T26	54	56	N26	1,08	33	1087,24	1054,20
T27	42	59	N27	0,6	32	1090,59	1058,87
T28	21,2	162	N28	0,07	32	1090,55	1058,87
T29	13,2	147	N29	0,32	34	1087,24	1053,28
T30	13,2	65	N30	0,67	33	1084,34	1051,80
T31	42	62	N31	0,2	30	1085,69	1055,70
T32	21,2	62	N32	0,13	35	1100,52	1065,10
T33	21,2	148	N33	0,39	31	1119,00	1088,40
T34	13,2	146	D1	-20,14	2,8	1122,43	1119,63
T35	13,2	2					
T36	26,6	60					
T37	21,2	86					
T38	21,2	105					
T39	26,6	63					
T40	26,6	35					
T41	42	155					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de la Urbanización Don Luis usando optimizado usando HS.

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T1	13,2	60	N1	2,53	32,6598	1117,7398	1085,08
T2	141	466	N2	0,35	29,1465	1117,5465	1088,4
T3	65	134	N3	0,72	36,5318	1117,2518	1080,72
T4	141	68	N4	0,81	29,707	1112,187	1082,48
T5	77,2	140	N5	0,67	29,8449	1108,1449	1078,3
T6	33,4	95	N6	0,24	31,8766	1104,7766	1072,9
T7	21,2	99	N8	0,17	36,9332	1111,1332	1074,2
T8	65	57	N7	0,89	36,7243	1112,7043	1075,98
T9	65	56	N9	0,96	31,5817	1109,0717	1077,49
T10	13,2	56	N10	0,87	33,2827	1107,5527	1074,27
T11	21,2	85	N11	0,3	33,6885	1102,0385	1068,35
T12	13,2	147	N13	0,28	35,3328	1103,5328	1068,2
T13	54	96,05	N12	0,6	37,7173	1108,9773	1071,26
T14	21,2	115	N14	0,57	33,8195	1106,1795	1072,36
T15	65	62	N15	0,63	30,6018	1100,8518	1070,25
T16	54	62	N16	0,22	34,1353	1097,8353	1063,7
T17	26,6	62	N18	0,4	31,0029	1093,0029	1062
T18	21,2	122	N17	1,11	39,3192	1106,0492	1066,73
T19	13,2	96	N19	1,08	36,8796	1104,1496	1067,27
T20	21,2	110,5	N20	0,37	29,674	1093,944	1064,27
T21	65	63	N22	0,42	29,4342	1088,1342	1058,7
T22	54	63	N21	1,13	40,26	1102,36	1062,1
T23	21,2	161,5	N23	0,85	35,9735	1098,2935	1062,32
T24	13,2	150	N24	0,14	34,9852	1097,4852	1062,5
T25	21,2	95,5	N26	0,39	30,6277	1084,8277	1054,2
T26	54	56	N25	1,08	38,8433	1096,3633	1057,52
T27	33,4	59	N27	0,6	29,3421	1088,2121	1058,87
T28	21,2	161,5	N28	0,07	29,3348	1088,2048	1058,87
T29	13,2	147	N30	0,32	36,1216	1087,9216	1051,8
T30	21,2	65	N29	0,67	39,2623	1092,5423	1053,28
T31	42	62	N31	0,2	34,3885	1090,0885	1055,7
T32	21,2	62	N32	0,13	31,3293	1096,4293	1065,1

Tabla 46. Diámetros optimizados de las tuberías para la red de la Urbanización Don Luis usando optimizado usando HS. (continuación)

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Nodo	Demanda (l/s)	Presión (mca)	Carga Hidráulica (m)	Cota (m)
T33	21,2	148	N33	0,39	29,0093	1117,4093	1088,4
T34	13,2	146	D1	-20,14	2,8	1122,43	1119,63
T35	21,2	2					
T36	33,4	60					
T37	21,2	86					
T38	21,2	105					
T39	13,2	63					
T40	21,2	466					
T41	54	63					

Fuente: Elaboración propia.

Los costos para la red de la Urbanización Don Luis ya optimizada con los diferentes métodos, se presentan en la Tabla 47. Para dicha red el costo mínimo fue obtenido con el método que usa el programa WaterGEMS y el costo más elevado fue arrojado por el programa Lenhsnet.

Tabla 47. Costo de la red de la Urbanización Don Luis optimizado.

Método	Lenhsnet	WaterGems	HS
Costo \$	151.290,12	138.430,16	140548,947

Fuente: Elaboración propia.

El costo al día de hoy si se realizara la red que se proyectó y construyó con tuberías de 150mm y 100mm tendría un valor aproximado de 371.746,70\$, el cual si se compara con el valor obtenido anteriormente corresponde a una reducción de cerca el 63% del costo, valor muy significativo, lo cual indica que es recomendable diseñar las redes con los valores optimizados usando los métodos presentados en este trabajo y así lograr un costo final de construcción mucho menor.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Las redes de distribución de agua potable que requieren los diferentes urbanismos de nuestra ciudad, deben cumplir y garantizar la presión y la demanda de los usuarios; Así, la simulación digital con las herramientas tecnológica Epanet, WaterGEMS y HS, permitió evaluar, determinar, analizar y optimizar el comportamiento hidráulico de la red, del análisis de los ejemplos estudiados puede establecerse una serie de conclusiones generales relativos a la comparación entre los resultados de diseño obtenidos por los distintos métodos que ensaya este trabajo.

Por tal razón, el capítulo 4 de este trabajo aborda la resolución de distintos problemas de diseño en redes de agua tanto sintéticas como reales. Algunos de estos problemas de optimización son muy populares en la bibliografía, habiendo sido abordados con anterioridad por otros investigadores, por lo que hay suficientes criterios de comparación con metodologías basadas en algoritmos evolutivos y heurísticos de otros autores. Este es el caso de los problemas de diseño de la red de Hanoi y red Go-Yang.

Además de estas dos redes, el capítulo 4 aborda el diseño de las redes de Balerna y Joao Pessoa, que, si bien no tienen tantas referencias en la bibliografía, también se tiene cierto patrón de comparación con los autores que las presentan. También se abordan dos redes del municipio Campo Elías como lo son la red de El Palmo y La red de la Urbanización Don Luis. Del análisis de diseño óptimo en estas redes se toman las siguientes conclusiones generales:

- Cualquiera de las metodologías ensayadas obtiene en todas las redes al menos una solución que mejora económicamente el diseño. Todas las soluciones de diseño obtenidas por cualquier metodología cumplen una serie de restricciones de diseño, ya sea de presión mínima, velocidad mínima, entre otras.
- La mejora obtenida no es un parámetro fijo, sino que depende sobre todo de la tipología de la red. Normalmente, cuanto más grande y complejo es el diseño de la red mayor es la diferencia económica entre diseñar con uno u otros diferentes métodos. Así, por ejemplo, en el caso de la red de El Palmo, el ahorro obtenido utilizando el programa HS (Harmony Search) frente al diseño que actualmente tiene la red es de un 76,4%, lo cual supone un ahorro de 130.344,93\$. Como también en la red de la Don Luis el ahorro obtenido utilizando un algoritmo evolutivo que usa WaterGems frente al diseño que actualmente tiene la red es de un 62,76%, lo cual supone un ahorro de 233.316,54\$. De los análisis realizados puede concluirse que para las dos redes reales Hs y WaterGEMS dieron la solución más económica.
- En las redes de Hanoi, Go-Yang, Balerna, R9 de Joao Pessoa, El Palmo y Don Luis todos los modelos de optimización desarrollados en este trabajo alcanzan una solución óptima a excepción del algoritmo de optimización basado en el recocido simulado que usa Epanet (Lenhsnet) que en la red de Balerna da error y no logra optimizarla.
- El diseño de redes mediante algoritmos evolutivos y heurísticos no sólo permite la obtención de mínimas soluciones, sino que permite obtener un conjunto de posibles soluciones del problema que en ocasiones se encuentran muy cercanas al óptimo.

La única desventaja de los algoritmos evolutivos frente a otras metodologías de diseño es la necesidad de tener ciertos conocimientos previos que permitan ajustar correctamente los distintos parámetros de cada una de estas técnicas, para así reducir en lo posible el factor aleatorio que arrastra de forma intrínseca la propia formulación de estos modelos de optimización.

La colaboración conjunta entre la Hidrológica Municipal Aguas de Ejido C.A, y el CIDIAT, con el aporte resultante de este trabajo en cuanto a la optimización de las redes de agua potable, servirá para el desarrollo y avances de futuras investigaciones relacionadas.

5.2 RECOMENDACIONES

- Ampliar este estudio a otras redes reales ya sea en el municipio Libertador o Campo Elías.
- Desarrollar otras investigaciones en base a este trabajo, pero ahora tomando como base la rehabilitación o sustitución de las tuberías en las redes.
- Usar como velocidad máxima 3 m/s en los algoritmos utilizados.
- Hacer el respectivo análisis de que tan factible sería, al momento de cursar las materias del postgrado, tomar como ejemplos redes reales para optimizarlas y resolver los problemas que presenten.
- Se recomienda actualizar y extender los documentos correspondientes en general a las redes tanto de El Palmo como a la de la Urbanización Don Luis, llevando a cabo un proyecto de organización y reconocimiento de datos faltantes, para luego realizar el diseño y levantamiento de los mismos, de manera que quede un registro que esté

disponibles y al alcance del público, para estudios e investigación futuras que puede beneficiar o favorecer el desarrollo de la Hidrológica Municipal Aguas de Ejido C.A.

- Considerando la importancia que tiene incorporar una buena optimización al diseño de obras de ingeniería, se recomienda al estado y al ente correspondiente, la actualización de los datos de las redes en la ciudad, para poder desarrollar estudios y obras más certeras para las condiciones de hoy en día.
- Realizar el constante y necesario mantenimiento a las redes de agua potable y sus micro mediciones para lograr un mejor desempeño en las redes.
- Buscar motivar a los profesores de pregrado a usar los distintos softwares que existen para modelado y optimización de redes de agua potable, ya que son una herramienta poderosa.
- Agregar en el pensum del postgrado para cada semestre una materia que sea la de trabajo de grado y así poder ir guiando al profesional en el desarrollo de su tesis para que al momento de culminar las materias ya tenga un gran avance y así evitar el famoso (todo menos tesis).

REFERENCIAS

- Alperovits, E., & Shamir, U. (1997). Alperovits, E., & Design of optimal water distribution systems. *Water resources research*, 13(6), 885-900.
- Arias, F. (2012). *El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica*. Caracas: Editorial Episteme.
- Arroyo, M. (2022). *Una gestión integrada del agua y optimizar su uso, las claves para garantizar su sostenibilidad*. Retrieved from agua.es: <https://www.iagua.es/blogs/manuel-martin-arroyo/gestion-integrada-agua-y-optimizar-uso-claves-garantizar-sostenibilidad>
- Balestrini, M. (2006). *Como se elabora un proyecto de investigación*. Caracas: BI consultores asociados. Retrieved from [https://luisdoubtrontg.school.blog/wp-content/uploads/2023/12/balestrini como se elabora un proyecto de inve.pdf](https://luisdoubtrontg.school.blog/wp-content/uploads/2023/12/balestrini_como_se_elabora_un_proyecto_de_inve.pdf)
- Becker, B., & Ulrich, D. (2000). *El cuadro de mando de RRHH vinculando las personas, la estrategia y el rendimiento de la empresa*. Gestion 2000.
- Carlino, P. (2021). *El apartado Relevancia en los proyectos de investigación. Algunas observaciones a partir de la revisión de proyectos de tesis en curso*.
- Castillo-Vergara, M., Homero Cortes, F., Vigorena Merino, C. I., Diaz Gomez, R. A., & Espindola Arellano, C. (2010). Optimización de la distribución de agua potable rural mediante el uso de la programación lineal. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=215045726002>

- Cobos, C., Pérez, J., & Estupiñan, D. (2011, Junio). Una revisión de la búsqueda armónica. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 8(2), 67-80. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/1331/133119867007.pdf>
- CONAGUA. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Retrieved from http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1567/IMTA_068.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Dexuan, Z., Liqun, G., Jianhua, W., Steven, L., & Yang, L. (2010). A novel global harmony search algorithm for reliability problems. *Computers & Industrial Engineering*, 58(2), 307-316. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.11.003>
- Fernández, G. (2004). *Algoritmos de optimización Combinatoria aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable (Tesis de Maestría)*. Universidad De los Andes, Bogotá (Colombia). Retrieved from <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/247cfc18-4249-4051-a9df-e511864b0f56/content>
- Fisher, F. M., & Askari, H. (2001). Optimización de la gestión del agua en el Oriente Medio. *Finanzas y desarrollo: publicación trimestral del Fondo Monetario Internacional y del Banco Mundial*, 38(3), 52-56. Retrieved from <https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/spa/2001/09/pdf/fisher.pdf>
- Formiga, K. (2005). *Optimización multiobjetivo de proyectos de redes de distribución de agua. (Tesis de Doctorado)*. Universidad de Sao Paulo, Brasil. Retrieved from

https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-29012016-125410/publico/Tese_Formiga_KlebbberTM.pdf

Geem, Z. W. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *simulation*, 76(2), 60-68.

Geem, Z. W. (2001). Optimal cost design of water distribution networks using harmony. *Environmental Planning and Management Program*. John Hopkins University.

Gomes, H., Oliveira, P., Soares, R., de Andrade, L., Arnaud, S., Marques, S., . . . da Silva, A. (2009). *Brasil, Epanet 2.0*. Retrieved from <http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/menu/assuntos/epanet>

Hernández, R., Fernández, C., & Batista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.

Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (Vol. 9). McGraw-Hill Interamericana. Retrieved from <https://isae.metabiblioteca.org/cgi-bin/koha/opac-retrieve-file.pl?id=af3de615a7a15513b2751a9208fee6f1>

Marcos, G. (n.d.). *Introducción a los Algoritmos Genéticos*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/237812449_Introduccion_a_los_Algoritmos_Geneticos

Mays, L. w. (2002). *Manual de sistemas de distribución de agua*. Madrid: McGraw-Hill.

Meléndez, N. (2020). Recocido simulado y el algoritmo de selección clonal aplicados al problema del agente viajero. *Research in Computing Science*, 1211–1226. Retrieved

from

https://rcc.cic.ipn.mx/2020_149_8/Recocido%20simulado%20y%20el%20algoritmo%20de%20seleccion%20clonal%20aplicados%20al%20problema%20del%20agente%20viajero.pdf

Millet, M. (2014). *Diseño óptimo de una red de distribución de agua con objetivos múltiples utilizando métodos heurísticos (Algoritmos Genéticos). (Trabajo de Maestría)*. Universitat Politècnica de València. Retrieved from <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/52565/TFM%20DISE%C3%91O%20%C3%93PTIMO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mora, D. (2012). *Diseño de redes de distribución. (Tesis de Doctorado)*. Universitat Politècnica de València. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16803/tesisUPV3875.pdf;jsessionid=744C51A67B887DB1866D13EC2B69E002?sequence=1>

Mora, L. (2024, marzo 25). Material facilitado de algunos metodos de optimización. (D. Hernández, Interviewer)

Norma Sanitaria Gaceta 4044. (1988). Retrieved from <https://mauricioravanal.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/01/norma-sanitaria-gaceta-4044.pdf>

Pereyra, G., Pandolfi, D., & Villagra, A. (2016, Noviembre). Diseño y optimización de redes de distribución de agua utilizando algoritmos genéticos. *ICT-UNPA*, 37-63. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5919083.pdf>

- Pimentel, H., Marques, S. d., Carvalho, P. S., & Salvino, M. M. (2009). Optimal dimensioning model of water distribution systems. *Water SA*, 421-431. Retrieved from <https://journals.co.za/doi/epdf/10.10520/EJC116639>
- Ramos, A., Sánchez, P., José, F., Barquín, J., & Linares, P. (2010). *Modelos matemáticos de optimización*. Universidad Pontificia Comillas, Madrid. Retrieved from Modelos matemáticos de optimización: <http://biblioteca.esucomex.cl/RCA/Modelos%20matem%C3%A1ticos%20de%20optimizaci%C3%B3n.pdf>
- Rossman. (1997). *Epanet 2 manual del usuario*. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Martinez-Alzamora/publication/330524804_EPANET_20_en_Espanol_MANUAL_DEL_USUARIO_Version_20008/links/5c465ce9299bf12be3d9eb58/EPANET-20-en-Espanol-MANUAL-DEL-USUARIO-Version-20008.pdf
- Saldarriaga, J., Hernández, F., Escovar, M., & Páez, D. (2012, Septiembre). superficie de uso óptimo de potencia para el diseño de redes de distribución de agua potable. *XXV Congreso latinoamericano de hidráulica*. Retrieved from <https://pavcowavin.com.co/superficie-de-uso-optimo-para-el-diseno-de-redes>
- Saldarriaga, J., Takahashi, S., Hernández, F., & Escovar, M. (2017). seño optimizado de sistemas de distribución de agua: Una nueva perspectiva. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/320331618_Disenio_optimizado_de_sistemas_de_distribucion_de_agua_Una_nueva_perspectiva

Soler, V. (2016, mayo). *Optimización en tiempo real del modo de operación de un abastecimiento de agua mediante técnicas metaheurísticas. aplicación a la red de suministro a valencia y su área metropolitana. (Tesis de Doctorado)*. Universitat Politècnica de València, Valencia. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/62692/BOU%20-%20Optimizaci%F3n%20en%20tiempo%20real%20del%20modo%20de%20operaci%F3n%20de%20un%20abastecimiento%20de%20agua%20mediante%20t%E9c....pdf;jsessionid=838C1B546ED39AD4737935CB6944AF60?sequence=1>

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

ANEXOS

ANEXO 1. Resultados de la red de Hanoi

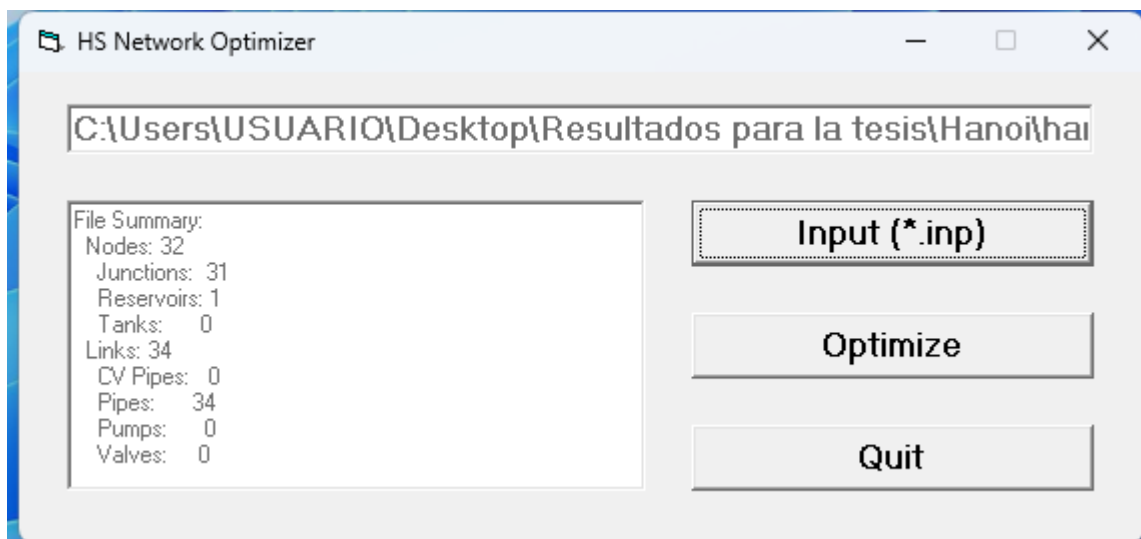


Figura 18. Red de Hanoi en HS

Fuente: Programa HS

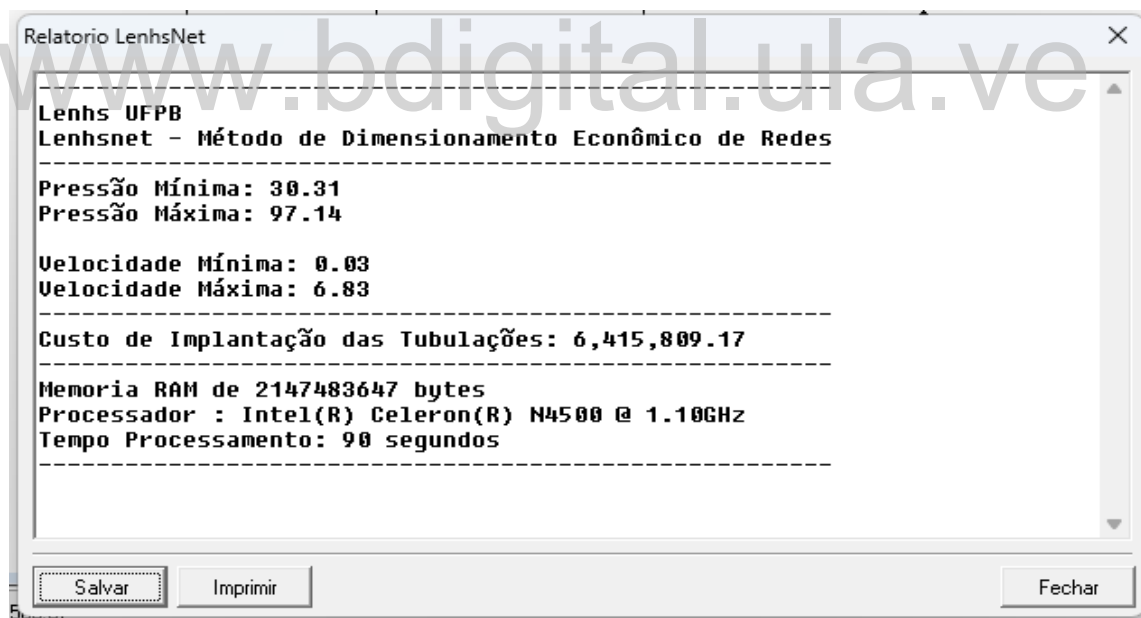


Figura 19. Red de Hanoi en resultado con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

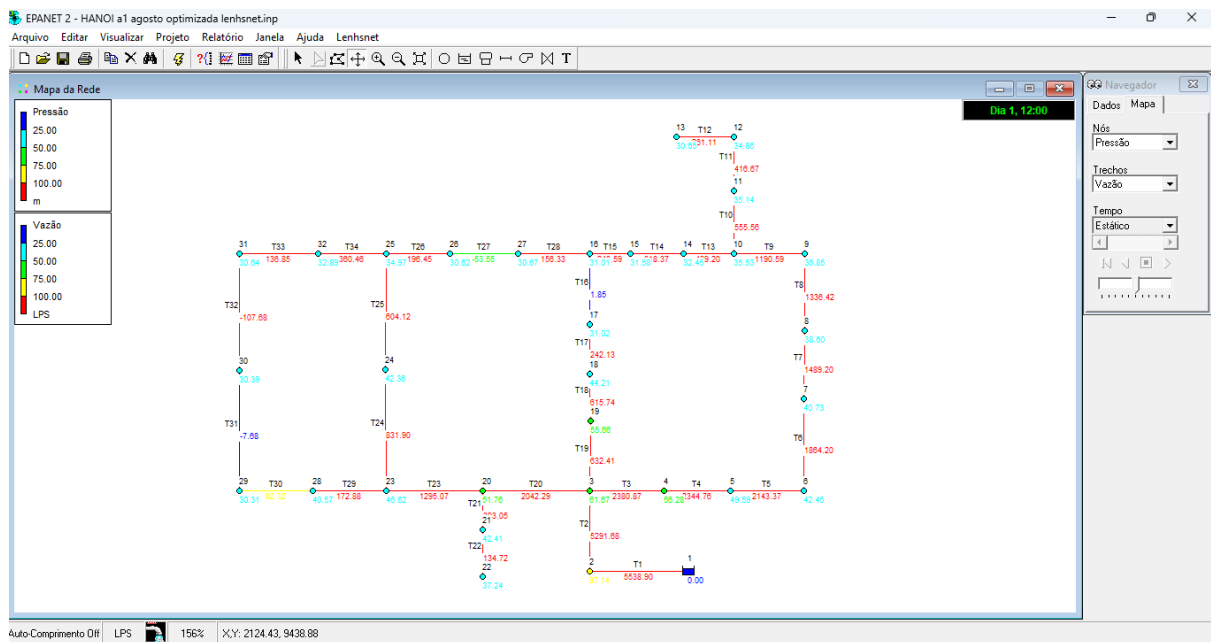


Figura 20. Red de Hanoi en Epanet Brasil, con resultado de presión y caudal

Fuente: Epanet 2.0 Brasil

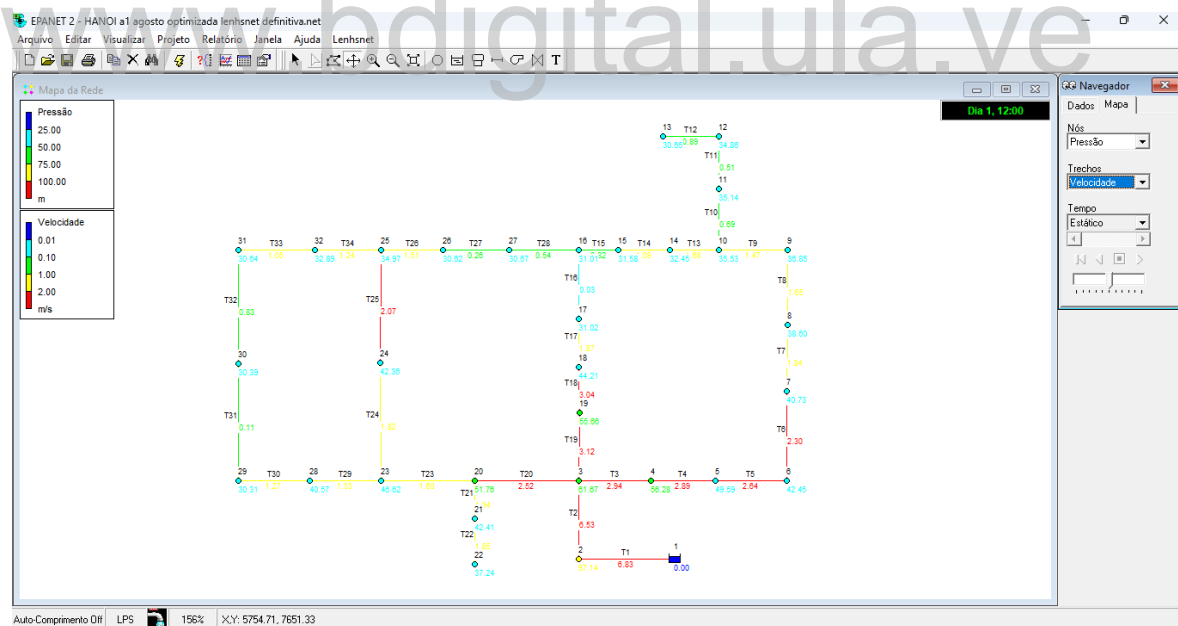


Figura 21. Red de Hanoi en Epanet Brasil, presión y velocidades

Fuente: Epanet 2.0 Brasil

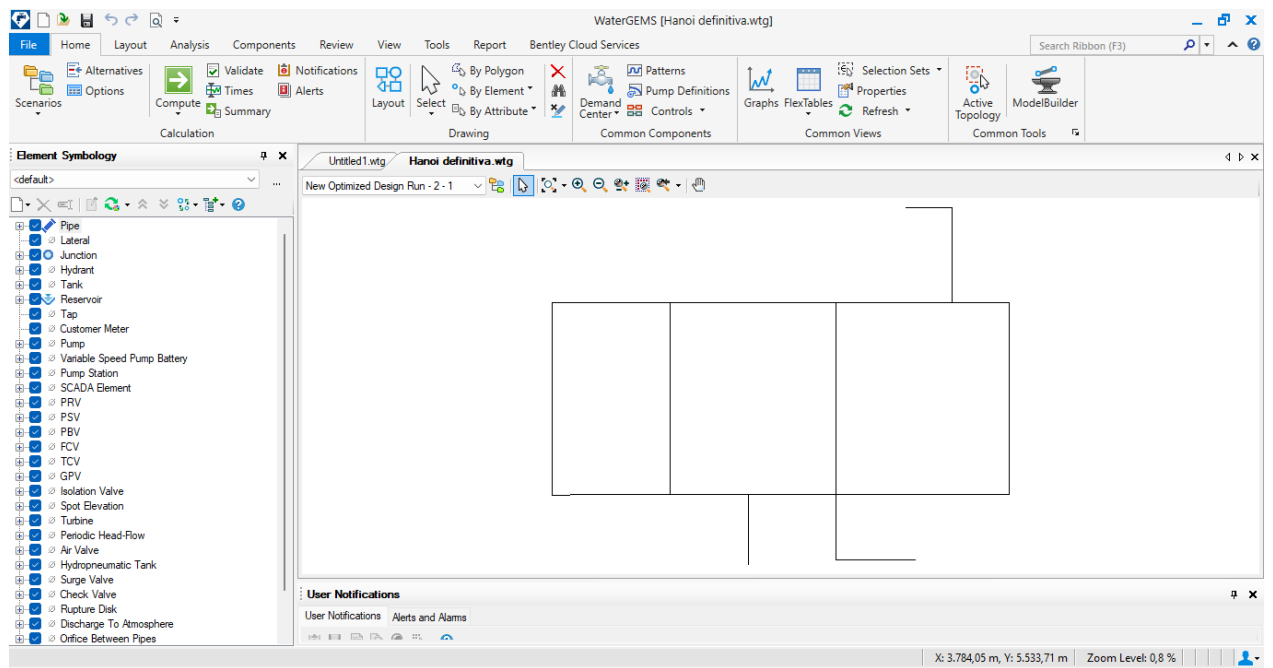


Figura 22. Red de Hanoi en WaterGEMS.

Fuente: WaterGEMS

www.bdigital.ula.ve

Tabla 48. Diámetros en mm optimizados y costo de la red de Hanoi por los tres métodos.

Tubería	HS	Lenhsnet	WaterGems
T1	1016	1016	1016
T2	1016	1016	1016
T3	1016	1016	1016
T4	1016	1016	1016
T5	1016	1016	1016
T6	1016	1016	1016
T7	1016	1016	1016
T8	1016	1016	762
T9	1016	1016	1016
T10	762	1016	762
T11	609,6	1016	762
T12	609,6	609,6	609,6
T13	508	609,6	508
T14	406,4	609,6	304,8
T15	304,8	609,6	304,8
T16	304,8	304,8	508
T17	406,4	406,4	609,6
T18	609,6	508	762
T19	508	508	609,6
T20	1016	1016	1016
T21	508	508	508
T22	304,8	304,8	304,8
T23	1016	1016	1016
T24	762	762	762
T25	762	609,6	508
T26	508	406,4	304,8
T27	304,8	508	508
T28	304,8	609,6	508
T29	406,4	406,4	508
T30	304,8	304,8	406,4
T31	304,8	304,8	304,8
T32	406,4	406,4	304,8
T33	406,4	406,4	304,8
T34	609,6	609,6	508
Costo \$	6.081.086,97	6.415.809,17	6.288.368,34

Fuente: Elaboración propia

Tabla 49. Velocidades en m/s obtenidas en la red de Hanoi optimizada por los tres métodos.

Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS
T1	6,83	6,83	6,83
T2	6,53	6,53	6,53
T3	2,94	2,65	2,74
T4	2,89	2,61	2,7
T5	2,64	2,36	2,45
T6	2,3	2,02	2,11
T7	1,84	1,55	1,64
T8	1,65	2,43	1,46
T9	1,47	1,19	1,28
T10	0,69	1,22	1,22
T11	0,51	0,91	1,43
T12	0,89	0,89	0,89
T13	1,68	1,28	1,65
T14	1,09	1,21	1,25
T15	0,82	0,15	1,16
T16	0,03	1,59	0,45
T17	1,87	1,93	2,11
T18	3,04	2,05	2,22
T19	3,12	3,27	3,27
T20	2,52	2,41	2,67
T21	1,94	1,94	1,94
T22	1,85	1,85	1,85
T23	1,6	1,48	1,75
T24	1,82	1,45	2,11
T25	2,07	2,13	1,61
T26	1,51	1,44	1,58
T27	0,26	0,71	0,97
T28	0,54	1,22	0,44
T29	1,33	1,25	1,28
T30	1,27	1,33	1,16
T31	0,11	1	0,21
T32	0,83	0,37	0,89
T33	1,05	0,77	1,11
T34	1,24	1,38	1,26

Fuente: Elaboración propia

Tabla 50. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de Hanoi obtenida por los tres métodos.

Método	Lenhsnet	WaterGems	HS
Número de iteraciones o tiempo en segundos	13s	500.000 iteraciones	100.000 iteraciones

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2. Resultados de la red de Two-Loops

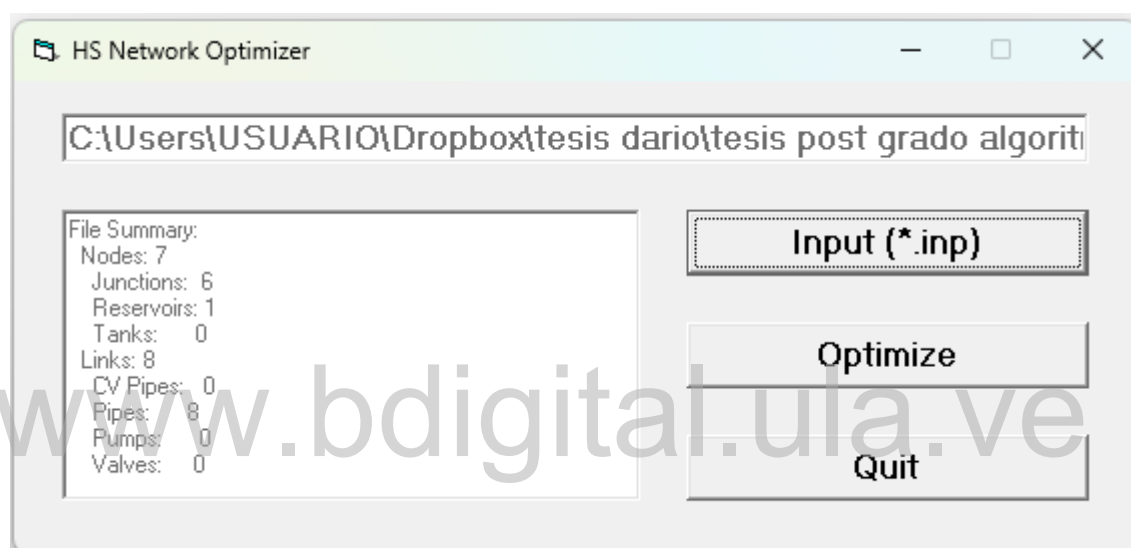


Figura 23. Red de Two-Loops en HS

Fuente: Programa HS

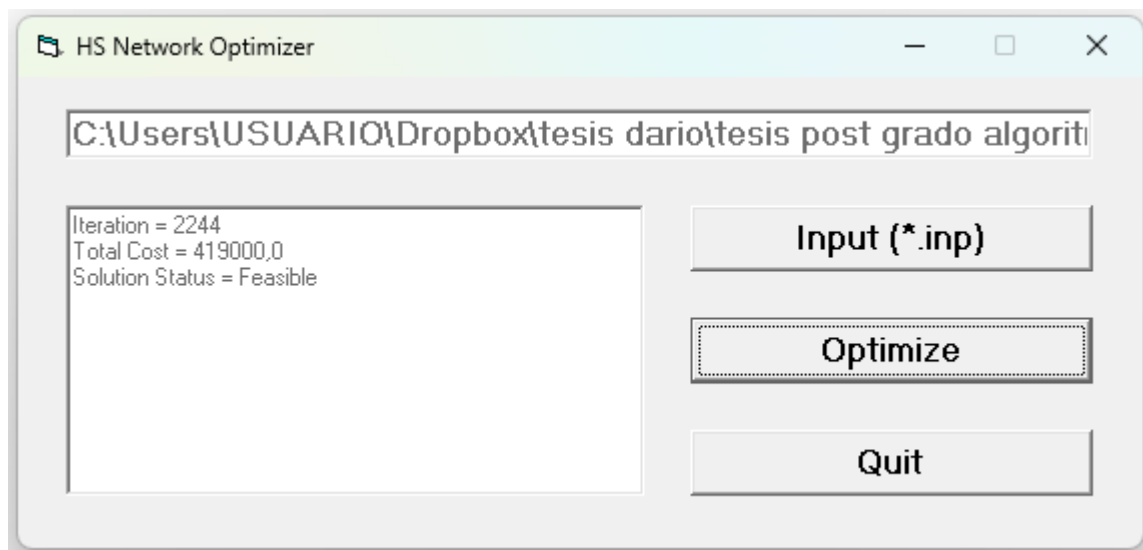


Figura 24. Costo de la Red de Two-Loops con HS

Fuente: Programa HS

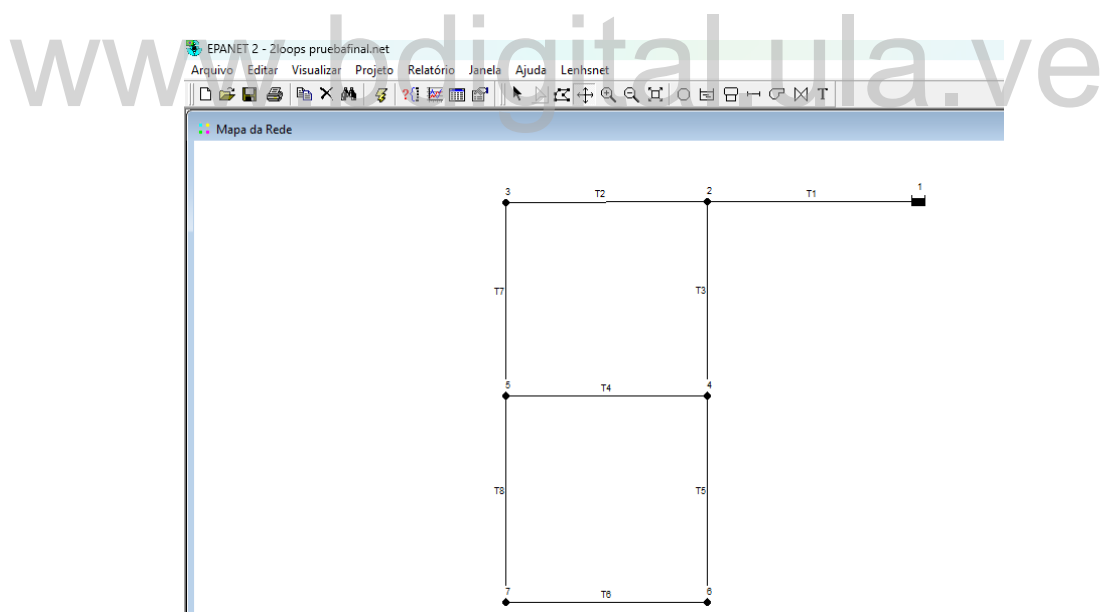


Figura 25. Red de Two-Loops con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

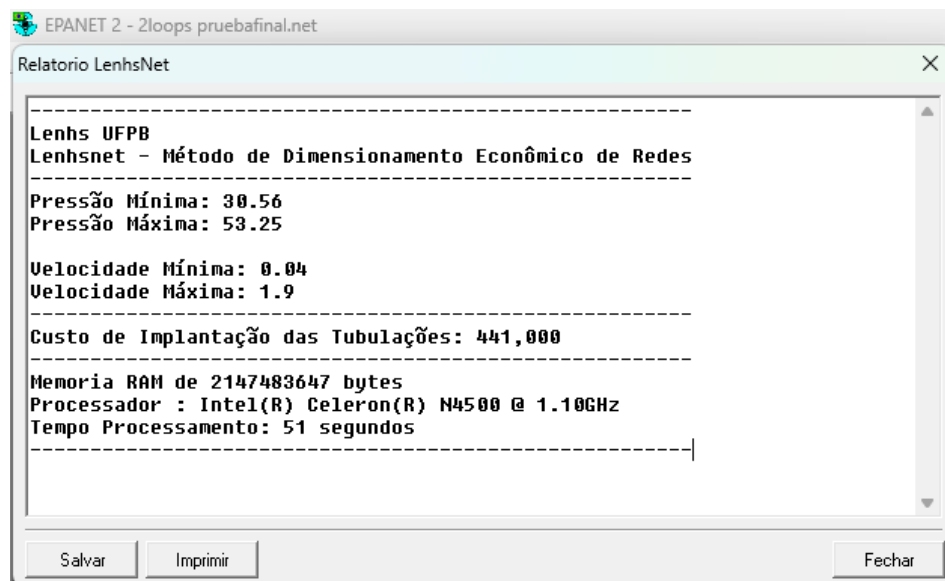


Figura 26. Costo de la Red de Two-Loops con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

www.bdigital.ula.ve

Tabla 51. Diámetros en mm optimizados y costo de la red de Two-Loops por los tres métodos.

Tubería	HS	Lenhsnet	WaterGems
T1	457,2	457,2	457,2
T2	254	203,2	254
T3	406,4	457,2	406,4
T4	101,6	254	101,6
T5	406,4	406,4	406,4
T6	254	254	254
T7	254	25,4	254
T8	25,4	25,4	25,4
Costo Total \$	419.000,00	441.000,00	419.000,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52. Velocidades en m/s obtenidas de la red de Two-Loops por los tres métodos.

Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS
T1	1,9	1,9	1,9
T2	0,86	1,85	1,85
T3	1,56	1,46	1,46
T4	1,48	1,12	1,12
T5	1,13	1,14	1,14
T6	1,1	1,1	1,1
T7	0,4	1,3	1,3
T8	0,04	0,32	0,32

Fuente: Elaboración propia

Tabla 53. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de Two-Loops obtenida por los tres métodos.

Método	Lenhsnet	WaterGems	HS
Número de iteraciones o tiempo en segundos	51s	500.000 iteraciones	500 iteraciones

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3. Resultados de la red de Go-Yang

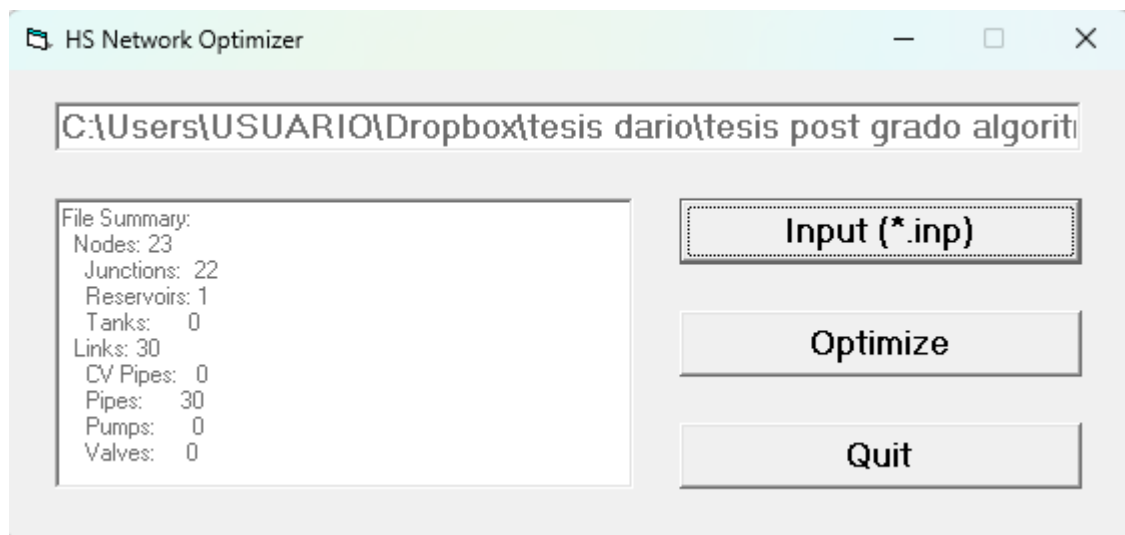


Figura 27. Red de Go-Yang en HS

Fuente: Programa HS

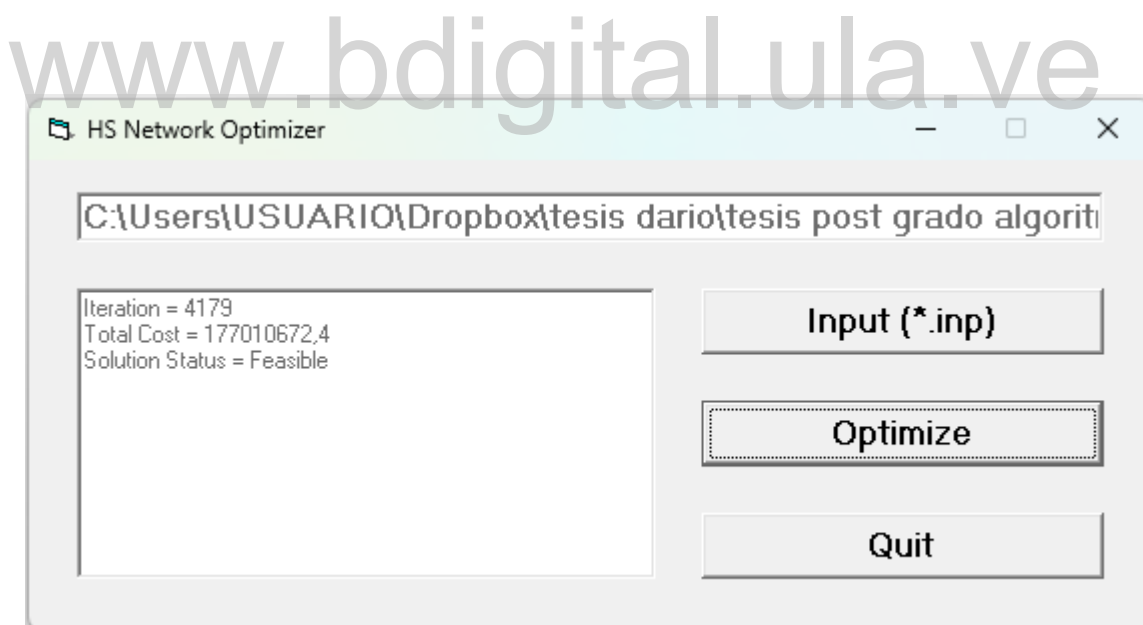


Figura 28. Costo de la Red de Go-Yang en con HS

Fuente: Programa HS

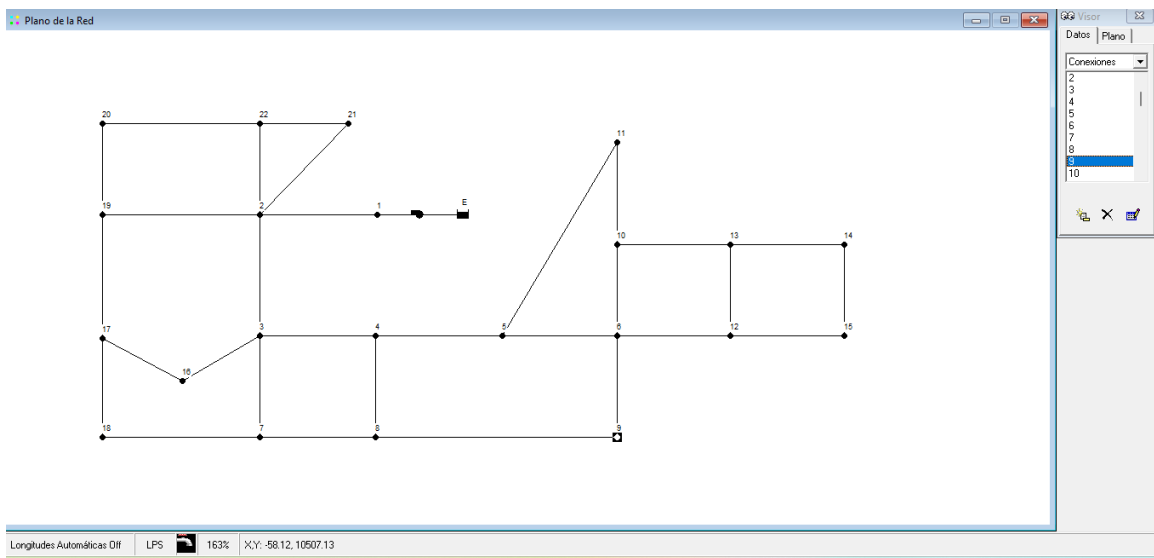


Figura 29. Red de Go-Yang con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

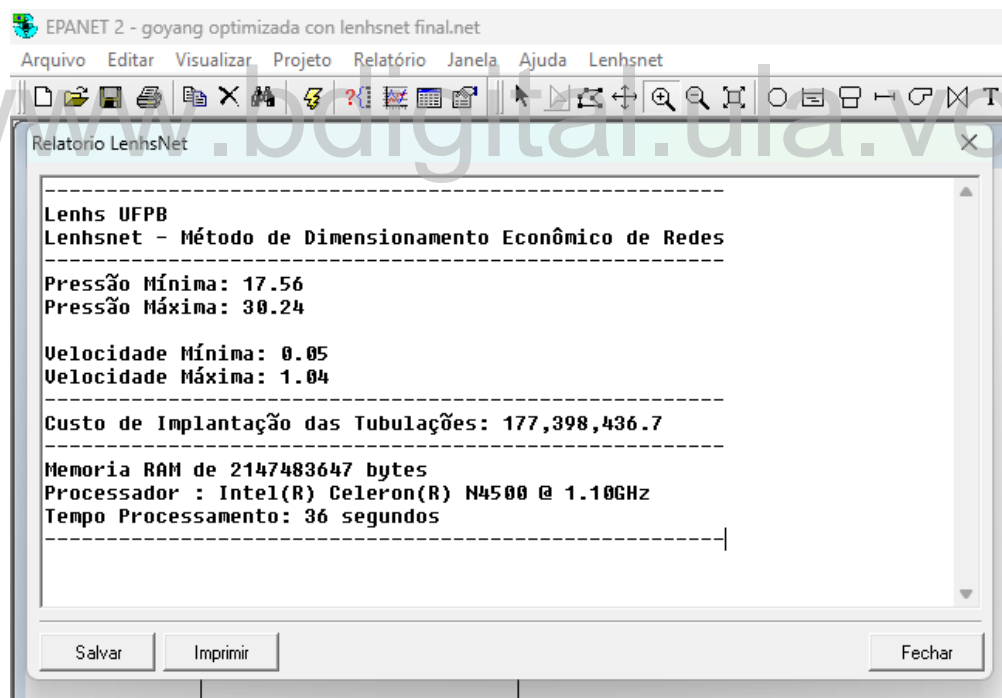


Figura 30. Costo de la Red de Go-Yang con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

Tabla 54. Diámetros en mm optimizados y costo de la red de Go-Yang por los tres métodos.

Tubería	HS	Lenhsnet	WaterGems
T1	200	200	200
T2	200	150	200
T3	150	125	150
T4	150	100	150
T5	150	80	150
T6	100	100	100
T7	80	80	80
T8	100	80	100
T9	80	80	80
T10	80	80	80
T11	80	80	80
T12	80	80	80
T13	80	80	80
T14	80	80	80
T15	100	80	100
T16	80	80	80
T17	80	80	80
T18	80	80	80
T19	80	80	80
T20	80	80	80
T21	80	80	80
T22	80	80	80
T23	80	80	80
T24	80	80	80
T25	80	80	80
T26	80	80	80
T27	80	80	80
T28	80	80	80
T29	80	80	80
T30	80	80	80
Costo \$	177.010.672,36	177.398.436,70	177.009.904,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55. Velocidades en m/s obtenidas de la red de Go-Yang por los tres métodos.

Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS
T1	0,94	1,67	0,94
T2	0,91	0,91	1,24
T3	0,76	0,78	0,75
T4	0,89	0,64	0,89
T5	0,7	0,53	0,68
T6	0,55	0,56	0,69
T7	0,62	0,61	0,61
T8	1,04	1,04	1,1
T9	0,73	0,73	0,77
T10	0,65	0,65	0,7
T11	0,14	0,15	0,04
T12	0,43	0,43	0,33
T13	0,55	0,54	0,63
T14	0,16	0,16	0,03
T15	0,54	0,53	0,46
T16	0,29	0,28	0,21
T17	0,05	0,06	0,05
T18	0,18	0,19	0,07
T19	0,64	0,61	0,58
T20	0,32	0,27	0,36
T21	0,34	0,2	0,3
T22	0,55	0,37	0,55
T23	0,51	0,37	0,53
T24	0,42	0,48	0,43
T25	0,14	0,38	0,29
T26	0,45	0,27	0,45
T27	0,49	0,5	0,65
T28	0,15	0,14	0,01
T29	0,56	0,56	0,56
T30	0,41	0,42	0,42

Fuente: Elaboración propia

Tabla 56. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de Go-Yang obtenida por los tres métodos.

Método	Lenhsnet	WaterGems	HS
Número de iteraciones o tiempo en segundos	36s	500.000 iteraciones	1.000 iteraciones

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4. Resultados de la red de Balerma

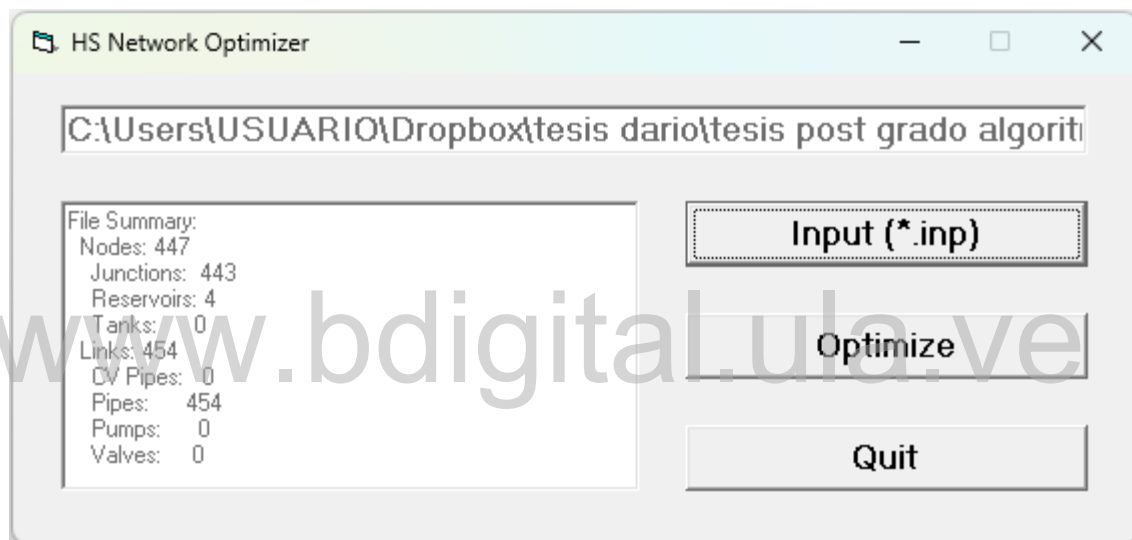


Figura 31. Red de Balerma en HS

Fuente: Programa HS

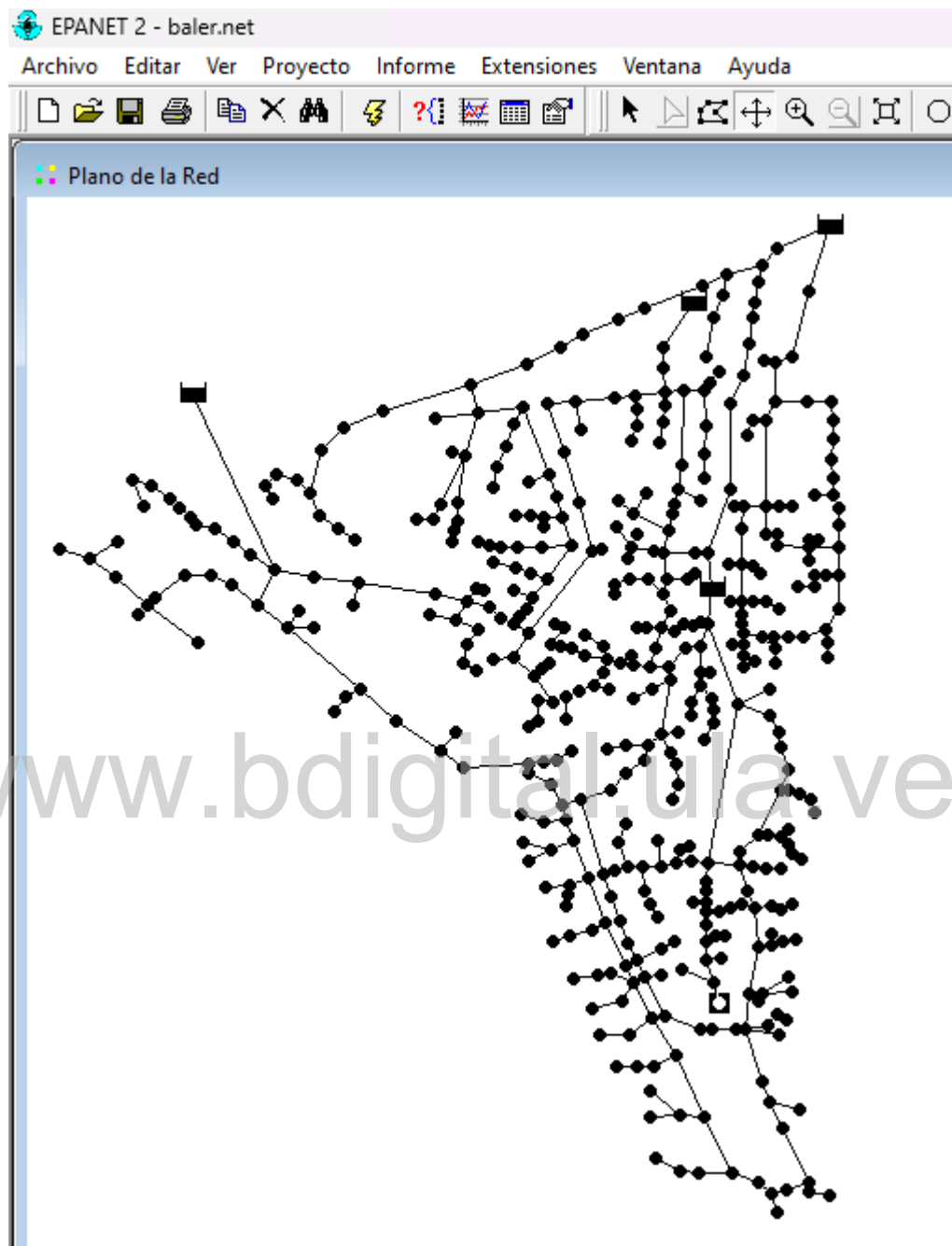


Figura 32. Red de Balerna con Lenhsnet

Fuente: Programa Lenhsnet

Tabla 57. Diámetros en mm optimizados de la red Balerna por dos métodos.

Tubería	WaterGems	HS	Tubería	WaterGems	HS
207	285	144,6	231	162,8	126,6
291	162,8	113	230	180,8	126,6
289	285	113	229	126,6	113
288	226,2	285	228	162,8	144,6
284	144,6	162,8	227	285	126,6
282	226,2	144,6	226	285	113
280	126,6	144,6	224	126,6	113
279	126,6	113	220	285	113
278	361,8	162,8	212	126,6	126,6
277	126,6	113	208	113	113
276	144,6	126,6	204	285	126,6
275	144,6	126,6	202	226,2	113
274	226,2	126,6	201	113	113
273	126,6	113	200	162,8	113
272	113	126,6	199	180,8	126,6
271	113	126,6	198	162,8	126,6
269	361,8	126,6	193	144,6	126,6
268	285	113	192	113	113
265	180,8	113	191	180,8	180,8
263	180,8	113	107	162,8	180,8
262	162,8	113	90	226,2	180,8
261	180,8	285	176	162,8	113
260	144,6	113	175	144,6	126,6
259	285	113	174	162,8	113
258	144,6	285	173	180,8	162,8
257	126,6	113	172	180,8	113
256	285	113	171	180,8	126,6
255	144,6	113	170	162,8	113
254	361,8	113	169	361,8	162,8
251	452,2	226,2	167	180,8	113
249	162,8	113	164	162,8	113
247	180,8	113	159	162,8	162,8
246	180,8	113	157	226,2	144,6
245	126,6	113	155	226,2	113
244	144,6	113	154	285	113

Tabla 57. Diámetros en mm optimizados de la red Balerna por dos métodos. (continuación)

Tubería	WaterGems	HS	Tubería	WaterGems	HS
153	126,6	113	105	113	113
152	180,8	113	104	162,8	113
151	113	113	103	113	180,8
150	126,6	113	102	226,2	180,8
149	180,8	113	101	113	113
148	180,8	113	99	126,6	113
147	113	126,6	98	162,8	126,6
146	126,6	113	97	226,2	113
144	113	113	96	113	226,2
143	113	113	95	180,8	113
142	126,6	113	94	126,6	113
141	144,6	180,8	92	126,6	113
140	126,6	180,8	91	113	226,2
139	113	180,8	89	180,8	226,2
138	180,8	113	88	162,8	226,2
137	113	113	87	361,8	113
136	144,6	126,6	86	113	113
134	144,6	113	84	285	226,2
133	226,2	162,8	83	126,6	113
132	144,6	113	53	144,6	113
128	285	162,8	52	162,8	113
127	180,8	162,8	49	180,8	226,2
126	180,8	113	39	361,8	113
125	144,6	113	38	226,2	113
123	180,8	113	82	126,6	113
122	144,6	126,6	81	180,8	113
121	180,8	126,6	78	226,2	113
118	126,6	126,6	77	162,8	113
116	180,8	144,6	74	226,2	126,6
115	180,8	113	73	180,8	113
114	226,2	113	71	113	126,6
113	180,8	113	70	180,8	285
112	126,6	113	69	180,8	126,6
110	126,6	113	68	126,6	113
108	180,8	113	67	162,8	113

Tabla 57. Diámetros en mm optimizados de la red Balerna por dos métodos. (continuación)

Tubería	WaterGems	HS	Tubería	WaterGems	HS
65	162,8	126,6	11	285	113
63	126,6	126,6	10	144,6	113
62	180,8	126,6	8	144,6	144,6
61	226,2	113	4	361,8	113
59	113	113	3	113	126,6
58	180,8	113	2	180,8	162,8
57	162,8	126,6	1	361,8	285
56	180,8	113	5	126,6	285
50	162,8	113	248	180,8	113
47	144,6	162,8	232	452,2	113
46	126,6	113	221	285	180,8
44	113	126,6	218	180,8	226,2
43	361,8	361,8	209	113	126,6
42	113	144,6	166	180,8	113
41	180,8	126,6	51	361,8	113
40	126,6	126,6	190	144,6	126,6
35	113	113	433	361,8	113
34	285	126,6	402	162,8	113
33	126,6	144,6	399	162,8	126,6
32	113	113	398	113	361,8
30	285	113	185	144,6	361,8
28	285	113	145	285	180,8
27	162,8	126,6	383	126,6	144,6
26	126,6	226,2	370	452,2	144,6
23	126,6	226,2	368	226,2	126,6
22	285	285	321	452,2	361,8
21	226,2	162,8	197	226,2	113
20	285	113	186	162,8	285
19	180,8	126,6	182	144,6	113
18	162,8	162,8	168	113	113
17	285	113	290	162,8	113
16	113	113	223	452,2	361,8
15	126,6	126,6	188	361,8	113
13	180,8	285	216	226,2	113
12	285	126,6	206	162,8	126,6

Tabla 57. Diámetros en mm optimizados de la red Balerna por dos métodos. (continuación)

Tubería	WaterGems	HS	Tubería	WaterGems	HS
183	162,8	126,6	119	180,8	126,6
106	113	144,6	400	144,6	126,6
64	113	452,2	393	361,8	126,6
194	452,2	113	392	285	113
165	361,8	113	390	180,8	113
349	452,2	126,6	331	113	113
345	180,8	126,6	298	113	113
344	162,8	113	24	452,2	113
267	226,2	113	161	113	126,6
243	285	126,6	160	361,8	113
222	162,8	162,8	601	113	113
219	126,6	113	600	285	113
179	113	144,6	593	361,8	126,6
337	144,6	144,6	620	126,6	144,6
330	180,8	113	618	180,8	452,2
329	180,8	180,8	617	162,8	361,8
266	162,8	162,8	616	162,8	361,8
240	285	113	615	113	113
239	126,6	126,6	614	180,8	113
238	144,6	180,8	613	162,8	113
237	452,2	180,8	612	162,8	113
236	180,8	180,8	611	285	113
235	144,6	285	610	113	113
234	226,2	180,8	609	126,6	113
131	162,8	113	608	144,6	113
214	285	113	607	126,6	113
213	113	113	606	162,8	113
196	361,8	180,8	605	452,2	113
187	113	162,8	590	162,8	113
184	285	144,6	589	226,2	113
181	126,6	113	588	180,8	113
75	113	126,6	581	162,8	113
177	126,6	144,6	580	162,8	113
124	113	113	579	126,6	113
120	285	113	578	162,8	226,2

Tabla 57. Diámetros en mm optimizados de la red Balerna por dos métodos. (continuación)

Tubería	WaterGems	HS	Tubería	WaterGems	HS
576	180,8	162,8	521	144,6	285
575	226,2	144,6	520	162,8	113
571	162,8	126,6	519	285	113
568	180,8	126,6	517	226,2	113
567	162,8	113	515	126,6	113
565	144,6	126,6	514	226,2	113
564	162,8	126,6	513	162,8	285
563	126,6	113	512	285	126,6
558	361,8	113	511	285	113
557	180,8	113	510	285	126,6
555	126,6	113	509	361,8	126,6
554	144,6	226,2	508	361,8	113
552	180,8	113	506	361,8	162,8
550	162,8	113	503	144,6	113
549	285	144,6	501	180,8	113
548	162,8	113	500	113	126,6
547	126,6	226,2	499	113	113
546	126,6	180,8	498	285	113
545	144,6	162,8	497	285	113
544	226,2	162,8	496	113	113
543	180,8	144,6	492	126,6	126,6
542	285	113	490	285	162,8
540	180,8	126,6	489	180,8	113
539	126,6	113	487	226,2	113
538	180,8	113	486	162,8	113
537	162,8	113	485	113	113
536	126,6	113	482	113	126,6
535	361,8	144,6	481	162,8	180,8
532	162,8	285	480	113	226,2
530	162,8	285	479	285	126,6
526	361,8	361,8	477	180,8	113
525	361,8	285	476	162,8	113
524	113	285	474	144,6	113
523	144,6	285	473	226,2	113
522	361,8	162,8	472	285	113

Tabla 57. Diámetros en mm optimizados de la red Balerna por dos métodos. (continuación)

Tubería	WaterGems	HS	Tubería	WaterGems	HS
471	285	126,6	406	113	113
469	226,2	113	405	180,8	126,6
468	285	113	404	126,6	361,8
467	285	126,6	401	126,6	361,8
465	226,2	113	397	180,8	113
464	126,6	113	394	162,8	126,6
460	162,8	144,6	386	162,8	144,6
459	113	126,6	385	113	113
458	113	126,6	382	162,8	113
457	180,8	144,6	381	162,8	113
450	144,6	144,6	380	113	113
446	113	113	379	126,6	180,8
443	113	113	376	180,8	113
442	361,8	226,2	375	162,8	226,2
441	180,8	226,2	374	180,8	144,6
439	113	113	373	361,8	226,2
438	113	126,6	369	361,8	113
435	361,8	144,6	367	180,8	162,8
434	126,6	144,6	366	285	162,8
430	126,6	144,6	365	180,8	180,8
429	162,8	113	364	180,8	162,8
428	180,8	113	363	144,6	113
424	361,8	113	362	126,6	113
423	113	113	361	144,6	113
422	285	113	359	226,2	144,6
421	452,2	126,6	358	113	126,6
419	361,8	113	357	226,2	162,8
418	144,6	113	356	180,8	126,6
417	180,8	285	355	162,8	113
416	113	126,6	354	113	113
415	126,6	126,6	353	144,6	113
414	126,6	126,6	352	180,8	226,2
409	226,2	113	351	162,8	226,2
408	285	361,8	350	126,6	226,2
407	113	113	348	581,8	226,2

Tabla 57. Diámetros en mm optimizados de la red Balerna por dos métodos. (continuación)

Tubería	WaterGems	HS	Tubería	WaterGems	HS
346	113	452,2	315	113	285
343	162,8	361,8	313	162,8	113
342	361,8	361,8	312	226,2	144,6
338	581,8	126,6	311	285	126,6
336	285	113	308	452,2	113
335	180,8	144,6	307	144,6	113
334	113	113	306	113	113
333	126,6	180,8	304	162,8	361,8
332	113	285	302	285	113
328	361,8	361,8	301	144,6	285
325	113	113	300	144,6	144,6
324	126,6	126,6	299	285	126,6
323	144,6	113	297	126,6	226,2
322	361,8	113	296	180,8	180,8
318	113	162,8	295	180,8	144,6
317	361,8	113	294	113	180,8
316	361,8	113	292	285	113

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58. Velocidades en m/s obtenidas de la red de Balerna por los tres métodos.

Tubería	WaterGEMS	HS	Tubería	WaterGEMS	HS	Tubería	WaterGEMS	HS
T1	0,02	0,15	T46	0,2	0,25	T91	0,5	0,5
T2	0,19	0,5	T47	0,15	0,25	T92	0,2	0,25
T3	0,75	0,75	T49	2,44	2,05	T94	3,18	1,44
T4	1,62	2,25	T50	0,12	0,25	T95	1,46	1,68
T5	0,08	0,14	T51	1,35	1,81	T96	1,31	1,3
T8	2,59	2,04	T52	0,12	0,25	T97	0,27	1,05
T10	2,43	2,43	T53	0,3	0,4	T98	0,39	0,81
T11	0,59	2,28	T56	0,29	0,75	T99	0,45	0,56
T12	0,04	0,25	T57	0,24	0,4	T101	0,5	0,5
T13	1,26	1,56	T58	0,1	0,2	T102	0,06	0,25
T15	0,6	0,75	T59	0,25	0,25	T103	0,18	0,19
T16	0,5	0,4	T61	0,42	1,03	T104	0,12	0,25
T17	0,35	1,79	T62	0,56	1,14	T105	0,68	0,55
T18	0,96	1,59	T63	0,94	1,19	T106	0,14	0,22
T19	0,19	0,5	T64	1	0,79	T107	0,48	1
T20	0,04	0,2	T65	1,09	1,69	T108	0,75	0,21
T21	0,31	0,99	T67	0,97	1,44	T110	0,6	0,75
T22	0,12	0,6	T68	1,19	1,19	T112	0,2	0,25
T23	0,2	0,25	T69	0,49	1,25	T113	0,1	0,25
T24	1,77	2,44	T70	0,1	0,2	T114	1,66	1,93
T26	0,2	0,25	T71	0,75	0,75	T115	2,5	1,83
T27	0,12	0,25	T73	0,19	0,5	T116	2,31	1,64
T28	0,04	0,25	T74	0,06	0,25	T118	0,2	0,25
T30	2,09	1,82	T75	0,28	0,31	T119	1,14	0,96
T32	0,5	0,5	T77	0,48	0,79	T120	0,61	1,34
T33	0,2	0,25	T78	0,19	0,6	T121	0,29	0,75
T34	1,9	1,63	T81	0,1	0,2	T122	0,3	0,4
T35	0,25	0,25	T82	0,4	0,5	T123	0,1	0,25
T38	1,81	2,43	T83	0,2	0,25	T124	0,75	0,75
T39	0,68	2,34	T84	0,9	2,28	T125	2,54	1,18
T40	0,79	1	T86	0,75	0,75	T126	0,1	0,25
T41	0,19	0,5	T87	0,05	0,4	T127	1,82	1,42
T42	0,25	0,25	T88	0,12	0,25	T128	0,77	1,54
T43	1,05	2,27	T89	1,85	1,8	T131	0,45	0,94
T44	1	1	T90	1,5	2,56	T132	0,46	0,75

Tabla 58. Velocidades en m/s obtenidas de la red de Balerna por los tres métodos. (continuación)

Tubería	WaterGEMS	HS	Tubería	WaterGEMS	HS	Tubería	WaterGEMS	HS
T133	0,12	0,5	T171	0,19	0,5	T212	0,2	0,25
T134	0,15	0,25	T172	0,1	0,25	T213	1,71	1,11
T136	0,3	0,4	T173	2,52	2,42	T214	0,78	1,24
T137	0,25	0,2	T174	0,32	2,2	T216	0,55	1,21
T138	0,36	0,63	T175	0,25	1,95	T218	3,74	1,96
T139	0,17	0,94	T176	0,08	1,7	T219	0,4	0,5
T140	0,4	0,5	T177	0,67	0,7	T220	0,04	0,25
T141	0,15	0,25	T179	2,24	2,24	T221	0,89	1,54
T142	0,6	0,75	T181	0,32	0,13	T222	0,24	0,5
T143	0,5	0,5	T182	0,3	0,5	T223	1	1,55
T144	0,25	0,25	T183	0,46	1,13	T224	1,39	1,39
T145	0,12	0,46	T184	0,57	1,2	T226	0,08	0,4
T146	0,6	0,75	T185	0,91	1,19	T227	0,04	0,2
T147	0,5	0,5	T186	0,12	0,25	T228	0,48	1
T148	0,1	0,25	T187	0,53	0,19	T229	0,6	0,75
T149	0,61	1,28	T188	1	1,72	T230	0,19	0,5
T150	2,04	1,67	T190	0,63	0,31	T231	0,12	0,2
T151	1	1	T191	0,29	0,75	T232	0,1	0,45
T152	0,19	0,5	T192	0,5	0,5	T234	0,77	1,76
T153	0,2	0,2	T193	0,15	0,25	T235	1,57	1,52
T154	0,04	0,25	T194	1,06	1,64	T236	0,91	1,14
T155	0,95	1,38	T196	0,41	1,06	T237	0,13	1,28
T157	0,19	0,75	T197	0,33	1,46	T238	0,15	0,25
T159	0,12	0,25	T198	0,12	0,25	T239	0,53	0,07
T160	0,02	0,2	T199	0,38	1,55	T240	0,22	0,82
T161	0,39	0,03	T200	0,59	1,43	T243	0,83	2,37
T164	1,05	1,19	T201	1,47	2,05	T244	0,15	0,25
T165	1,29	1,29	T202	0,43	1,83	T245	0,6	0,75
T166	2,47	2,92	T204	1,18	1,85	T246	0,1	0,12
T167	1,77	2,19	T206	0,12	0,25	T247	0,1	0,25
T168	0,75	0,6	T207	1,12	1,04	T248	1,3	1,53
T169	0,47	1,63	T208	0,25	0,2	T249	0,6	0,99
T170	2,68	1,81	T209	1,96	2,03	T251	1,32	2,48

Tabla 58. Velocidades en m/s obtenidas de la red de Balerna por los tres métodos. (continuación)

Tubería	WaterGEMS	HS	Tubería	WaterGEMS	HS	Tubería	WaterGEMS	HS
T254	0,28	1,44	T297	1,96	0,83	T344	2,3	2,25
T255	1,31	1,28	T298	0,35	0,11	T345	3,23	3,12
T256	0,08	0,4	T299	0,1	0,22	T346	1,25	0,99
T257	0,2	0,25	T300	0,15	0,25	T348	0,01	0,2
T258	1,15	1,09	T301	0,69	0,78	T349	1,92	1,75
T259	0,26	0,68	T302	0,22	0,82	T350	0,2	0,25
T260	0,85	0,86	T304	0,79	1,28	T351	0,24	0,5
T261	0,25	0,12	T306	0,5	0,5	T352	0,29	0,6
T262	0,24	0,5	T307	0,15	0,2	T353	0,74	0,93
T263	0,1	0,2	T308	0,71	1,14	T354	0,25	0,25
T265	1,71	0,96	T311	1,9	1,21	T355	0,83	1,48
T266	1,08	1,37	T312	0,66	0,89	T356	0,77	1,63
T267	1,25	2,31	T313	1,15	1,24	T357	0,06	0,25
T268	0,73	1,02	T315	2,13	1,08	T358	2,46	1,24
T269	0,48	0,68	T316	0,18	1,22	T359	0,68	1,65
T271	1	0,48	T317	1,46	1,46	T361	0,3	0,5
T272	0,75	0,75	T318	0,25	0,25	T362	0,2	0,2
T273	0,4	0,4	T321	0,03	0,5	T363	3,02	2,21
T274	0,06	0,12	T322	0,77	1,15	T364	2,13	2,41
T275	0,46	0,75	T323	0,15	0,25	T365	2,23	2,5
T276	0,3	0,5	T324	0,48	0,36	T366	1,55	1,57
T277	0,2	0,2	T325	0,85	0,61	T367	1,52	1,29
T278	0,6	0,88	T328	1,51	1,51	T368	0,06	0,25
T279	0,4	0,4	T329	0,39	0,79	T369	0,02	0,25
T280	0,2	0,25	T330	0,78	0,96	T370	0,82	1,79
T282	0,06	0,25	T331	0,25	0,25	T373	0,05	0,5
T284	0,52	0,84	T332	0,25	0,25	T374	0,1	0,25
T288	0,06	0,25	T333	0,79	1	T375	1,4	0,9
T289	0,08	0,4	T334	0,25	0,2	T376	1,04	1
T290	0,12	0,25	T335	0,19	0,4	T379	0,79	0,61
T291	0,94	1,37	T336	0,12	0,46	T380	0,75	0,75
T292	1,16	1,08	T337	0,46	0,6	T381	0,24	0,4
T294	0,5	0,5	T338	2	3,42	T382	0,12	0,15
T295	0,1	0,25	T342	0,05	0,5	T383	0,6	0,75
T296	1,06	1,4	T343	0,12	0,25	T385	0,25	0,25

Tabla 58. Velocidades en m/s obtenidas de la red de Balerna por los tres métodos. (continuación)

Tubería	WaterGEMS	HS	Tubería	WaterGEMS	HS	Tubería	WaterGEMS	HS
T386	0,12	0,25	T438	1,49	1,49	T497	0,12	0,6
T390	0,1	0,2	T439	1,25	1,25	T498	0,08	0,5
T392	2,89	2,22	T441	0,19	0,5	T499	0,25	0,25
T393	1,81	2,24	T442	0,02	0,25	T500	0,75	0,75
T394	0,52	1,33	T443	0,25	0,25	T501	0,19	0,5
T397	0,1	0,2	T446	0,25	0,25	T503	0,15	0,15
T398	0,5	0,5	T450	0,15	0,25	T506	0,98	1,68
T399	0,48	1	T457	0,22	0,25	T508	1,26	2,04
T400	0,14	0,93	T458	0,5	0,5	T509	1,24	1,24
T401	0,2	0,2	T459	0,25	0,25	T510	1,96	1,96
T402	0,36	0,75	T460	1,44	0,75	T511	1,92	1,92
T404	0,6	0,75	T464	0,99	0,6	T512	1,88	1,88
T405	0,19	0,5	T465	0,25	0,61	T513	1,32	1,32
T406	0,25	0,25	T467	0,12	0,6	T514	2,24	1,41
T407	0,5	0,5	T468	0,08	0,4	T515	0,2	0,25
T408	0,04	0,25	T469	0,06	0,25	T517	0,56	2,24
T409	0,37	1,19	T471	0,08	0,4	T519	0,04	0,25
T414	0,87	0,86	T472	0,04	0,2	T520	0,48	1
T415	1,07	1,11	T473	0,25	1	T521	0,46	0,75
T416	1,59	1,36	T474	0,15	0,25	T522	0,61	0,98
T417	0,72	1,28	T476	0,24	0,5	T523	0,61	0,79
T418	1,28	1,13	T477	0,1	0,25	T524	0,75	0,75
T419	1,64	1,03	T479	0,7	1,12	T525	0,05	0,4
T421	0,9	1,41	T480	0,71	0,81	T526	0,02	0,2
T422	2,11	1,31	T481	0,58	1,31	T530	0,12	0,25
T423	0,75	0,75	T482	1,46	0,95	T532	1,2	1,2
T424	0,05	0,5	T485	0,25	0,25	T535	0,07	0,75
T428	0,42	0,46	T486	2,44	1,41	T536	0,4	0,5
T429	0,76	0,04	T487	0,92	1,49	T537	0,12	0,2
T430	1,46	0,29	T489	1,06	1,35	T538	0,19	0,5
T433	1,53	1,53	T490	0,39	1,23	T539	0,2	0,25
T434	0,4	0,5	T492	1,56	1,26	T540	0,51	0,49
T435	0,02	0,25	T496	0,25	0,25	T542	0,28	0,99

Tabla 58. Velocidades en m/s obtenidas de la red de Balerna por los tres métodos. (continuación)

Tubería	WaterGEMS	HS	Tubería	WaterGEMS	HS	Tubería	WaterGEMS	HS
T543	0,19	0,4	T567	0,24	0,5	T606	2,31	0,99
T544	0,06	0,12	T568	0,1	0,25	T607	1,98	2,49
T545	0,91	1,49	T571	0,12	0,2	T608	1,37	1,79
T546	0,79	1	T575	0,64	1,04	T609	1,59	1,22
T547	0,6	0,75	T576	1,3	1,79	T610	1,74	1,06
T548	0,24	0,5	T578	1,2	1,52	T611	0,23	0,91
T549	0,04	0,2	T579	1,79	1,79	T612	0,6	1,25
T550	1,95	1,26	T580	0,96	1,59	T613	0,48	1
T552	1,68	0,87	T581	0,84	1,06	T614	0,29	0,75
T554	0,15	0,2	T588	1,07	1,67	T615	0,5	0,5
T555	0,2	0,25	T589	0,06	0,25	T616	0,12	0,25
T557	0,19	0,5	T590	0,12	0,25	T617	0,36	0,6
T558	0,02	0,25	T593	0,95	1,64	T618	0,1	0,25
T563	0,6	0,75	T600	0,16	0,79	T620	0,2	0,25
T564	0,24	0,5	T601	0,25	0,2			
T565	0,15	0,2	T605	0,3	0,99			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 59. Número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de Balerna obtenida por dos métodos.

Método	WaterGems	HS
Número de iteraciones o tiempo en segundos	1.000.000 iteraciones	2.500.000 iteraciones

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5. Resultados de la red de R9 de Joao Pessoa

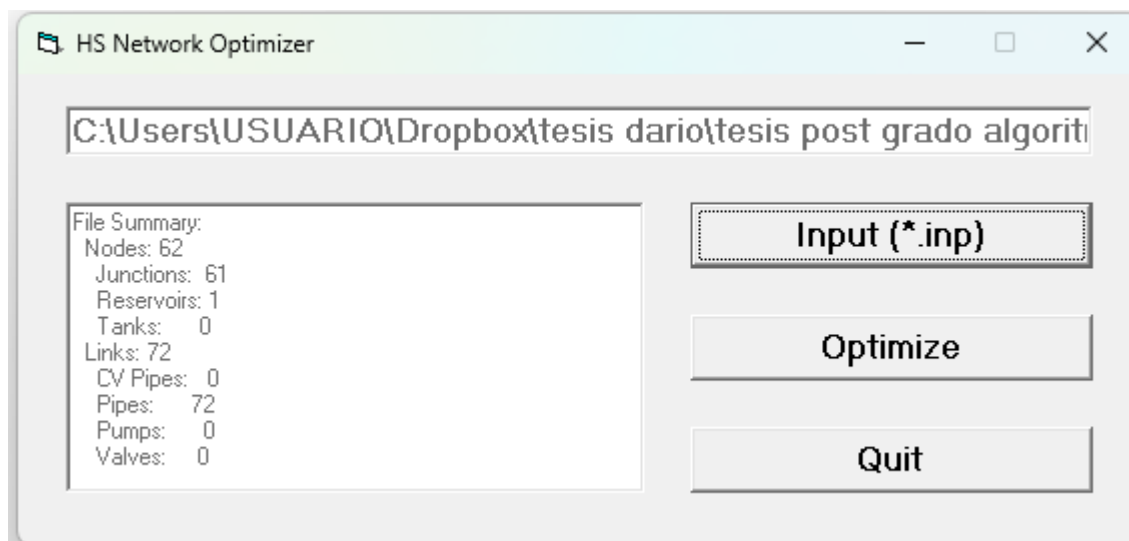


Figura 33. Red R9 de Joao Pessoa

Fuente: Programa HS

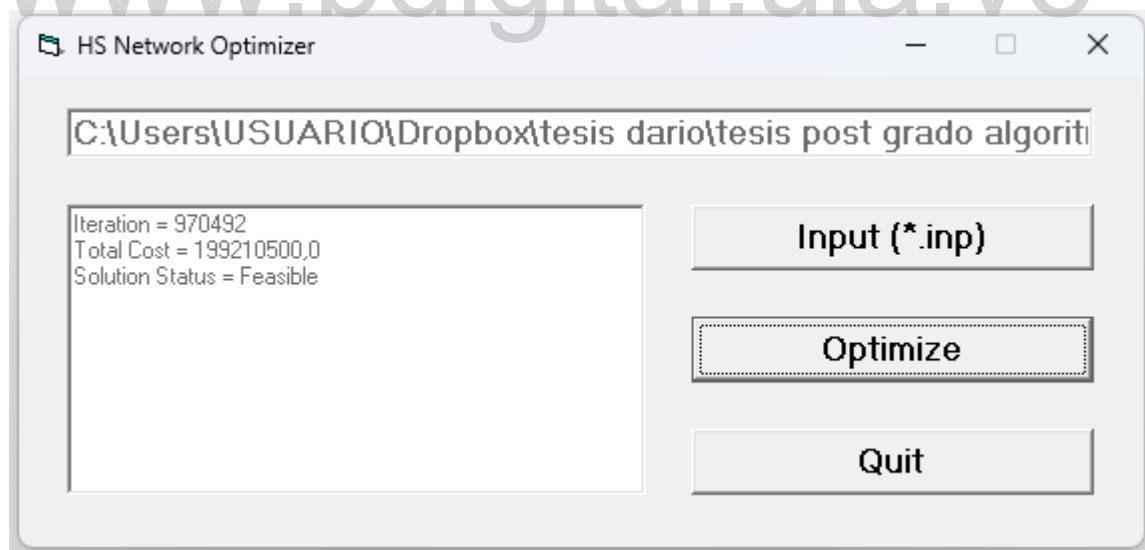


Figura 34. Costo de la Red R9 de Joao Pessoa

Fuente: Programa HS

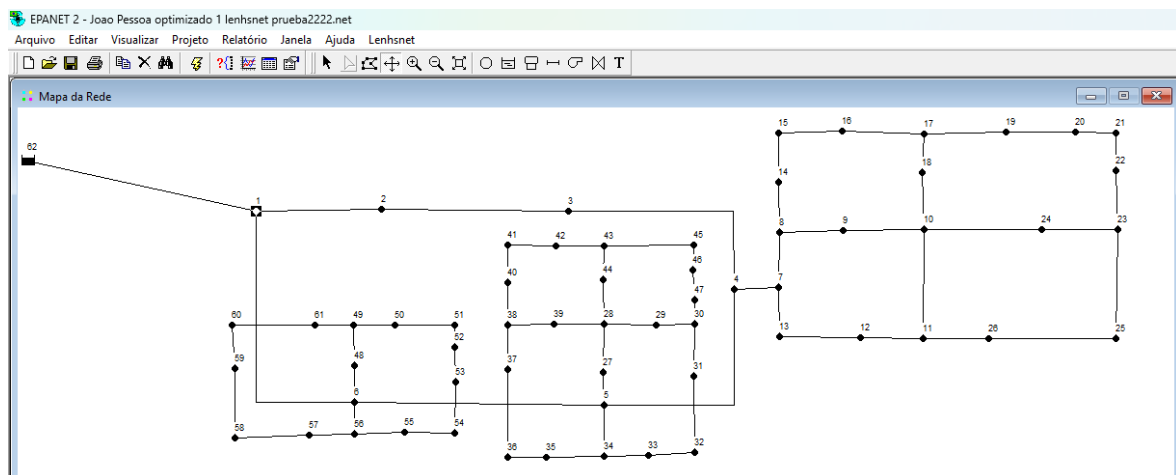


Figura 35. Red R9 de Joao Pessoa con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

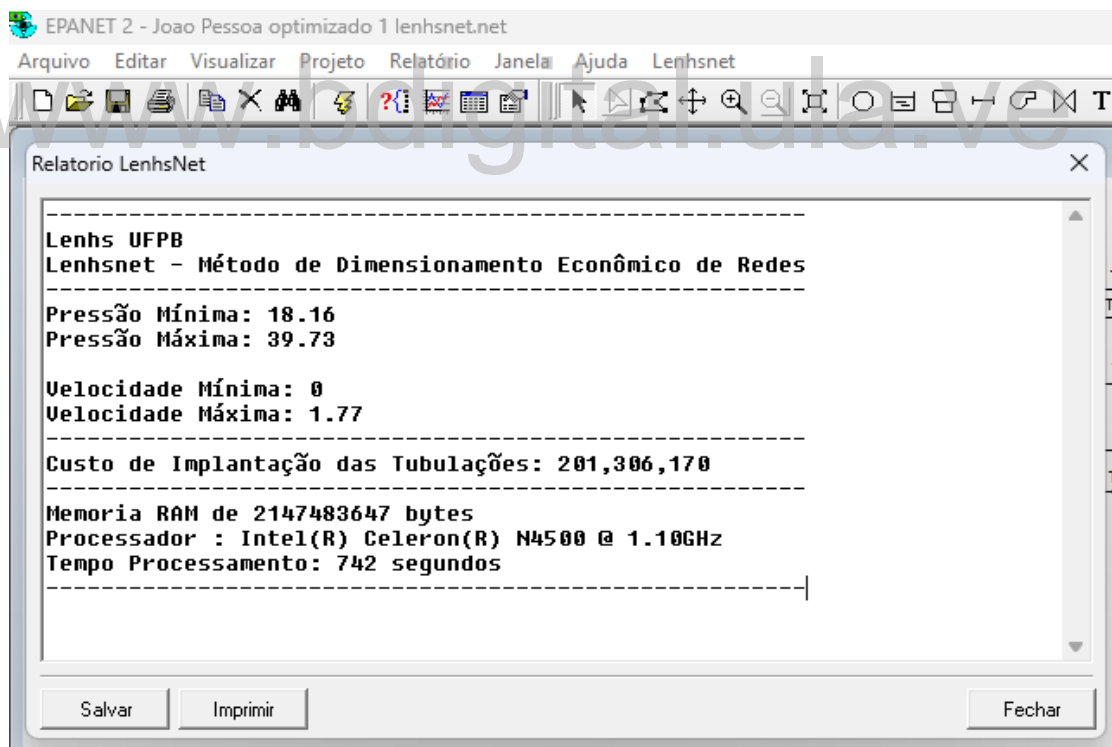


Figura 36. Costo de la Red R9 de Joao Pessoa con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

Tabla 60. Diámetros en mm optimizados y costo de la red R9 de Joao Pessoa por los tres métodos.

Tubería	HS	Lenhsnet	WaterGems
T1	600	600	600
T2	450	600	450
T3	450	500	400
T4	400	450	400
T5	100	300	100
T6	300	100	300
T7	350	250	350
T8	400	400	400
T9	200	200	450
T10	100	100	400
T11	150	100	400
T12	100	100	100
T13	350	400	250
T14	400	400	300
T15	400	400	300
T16	150	150	150
T17	150	150	100
T18	200	100	100
T19	100	100	100
T20	100	100	200
T21	100	100	150
T22	100	100	100
T23	100	100	100
T24	200	150	200
T25	150	150	150
T26	150	150	200
T27	100	100	250
T28	100	100	300
T29	300	300	100
T30	350	350	300
T31	400	350	300
T32	350	300	250
T33	300	250	250
T34	250	200	150
T35	150	150	100
T36	100	100	100
T37	100	100	100

Tabla 60. Diámetros en mm optimizados y costo de la red R9 de Joao Pessoa por los tres métodos. (continuación)

Tubería	HS	Lenhsnet	WaterGems
T38	100	100	100
T39	100	100	150
T40	100	150	200
T41	100	100	100
T42	100	100	100
T43	100	100	100
T44	100	100	100
T45	100	100	100
T46	100	100	100
T47	100	100	100
T48	100	100	100
T49	100	100	100
T50	100	100	100
T51	150	150	150
T52	150	150	150
T53	100	100	100
T54	100	100	100
T55	100	100	100
T56	100	150	150
T57	100	150	300
T58	150	150	250
T59	200	100	150
T60	100	100	100
T61	100	100	100
T62	100	100	100
T63	100	100	100
T64	150	150	100
T65	100	150	100
T66	200	150	100
T67	100	100	100
T68	100	100	100
T69	100	100	100
T70	100	100	100
T71	100	100	100
T72	100	100	100
Costo	190.999.400,00	189.295.730,00	193.343.637,50

Fuente: Elaboración propia

Tabla 61. Velocidades en m/s obtenidas de la red R9 de Joao Pessoa por los tres métodos.

Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS	Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS
T1	1,61	1,61	1,61	T37	0,04	0,34	0,18
T2	1,4	1,24	1,57	T38	0,56	0,18	0,7
T3	1,24	1,38	1,66	T39	1,03	0,65	1,17
T4	1,57	0,26	1,78	T40	1,21	1,94	1,24
T5	1,22	1,39	0,05	T41	0,52	0,78	1,1
T6	0,49	1,58	1,26	T42	0,77	0,37	0,69
T7	1,21	1,3	1,5	T43	0,44	0,04	0,37
T8	1,77	1,77	1,77	T44	0,15	0,25	0,07
T9	1,29	1,18	1,28	T45	0,59	0,97	0,94
T10	1,27	0,86	1,4	T46	0,95	1,34	1,31
T11	0,45	0,77	1,35	T47	0,42	0,4	0,7
T12	1,1	0,7	1,44	T48	0,1	0,09	0,38
T13	1,27	1,66	0,36	T49	0,48	0,5	0,2
T14	1,34	1	0,71	T50	0,41	0,94	0,65
T15	1,43	1,95	2,2	T51	1,04	1,11	1,54
T16	1,24	0,78	1,08	T52	0,75	1,4	0,55
T17	0,93	1,03	0,76	T53	0,95	1,09	0,43
T18	0,61	0,32	1,01	T54	0,12	0,26	0,39
T19	0,57	0,48	0,21	T55	0,5	0,36	1,02
T20	0	1,24	0,17	T56	0,59	1,19	0,46
T21	0,46	0,81	1,15	T57	1,45	0,8	1,31
T22	0,15	0,48	0,48	T58	1,17	2,57	2,31
T23	0,46	0,57	0,13	T59	1,17	0,68	0,63
T24	0,46	0,71	0,7	T60	0,94	1,3	1,18
T25	0,62	0,36	0,47	T61	0,56	0,92	0,81
T26	0,52	0,34	0,28	T62	0,03	0,33	0,21
T27	0,72	1,17	1,07	T63	0,61	0,25	0,36
T28	0,32	0,98	2,02	T64	0,77	1,37	1,49
T29	1,2	0,79	1,86	T65	1,01	1,91	2,03
T30	1,49	1,19	0,04	T66	1,61	1,63	0,44
T31	1,52	1,67	0,45	T67	0,97	1,39	1,53
T32	0,96	2,35	0,7	T68	0,47	0,89	1,03
T33	1,29	1,41	1,28	T69	0	0,42	0,56
T34	0,89	0,95	1,75	T70	0,24	0,18	0,32
T35	1,32	1,43	0,84	T71	0,64	0,22	0,07
T36	0,59	0,97	0,45	T72	1,08	0,67	0,52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 62. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red R9 de Joao Pessoa obtenida por los tres métodos.

Método	Lenhsnet	WaterGems	HS
Número de iteraciones o tiempo en segundos	742s	500.000 iteraciones	1.000.000 iteraciones

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 6. Resultados de la red de New York

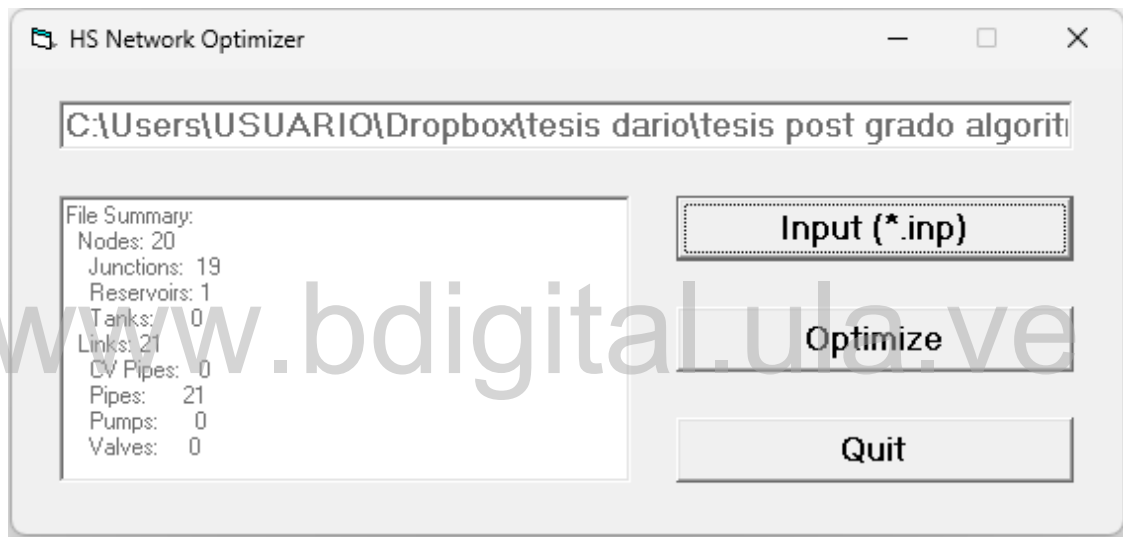


Figura 37. Red de New York en HS

Fuente: Programa HS

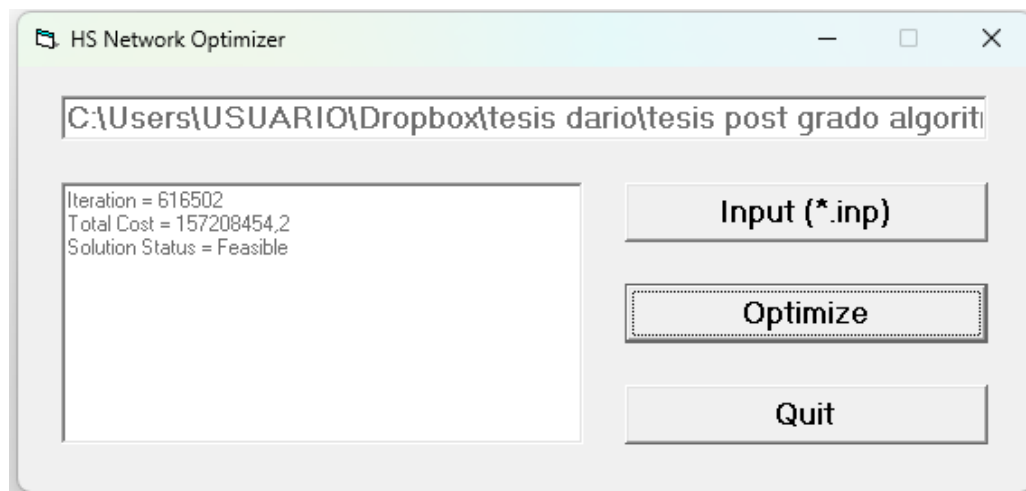


Figura 38. Costo de la Red de New York con HS

Fuente: Programa HS

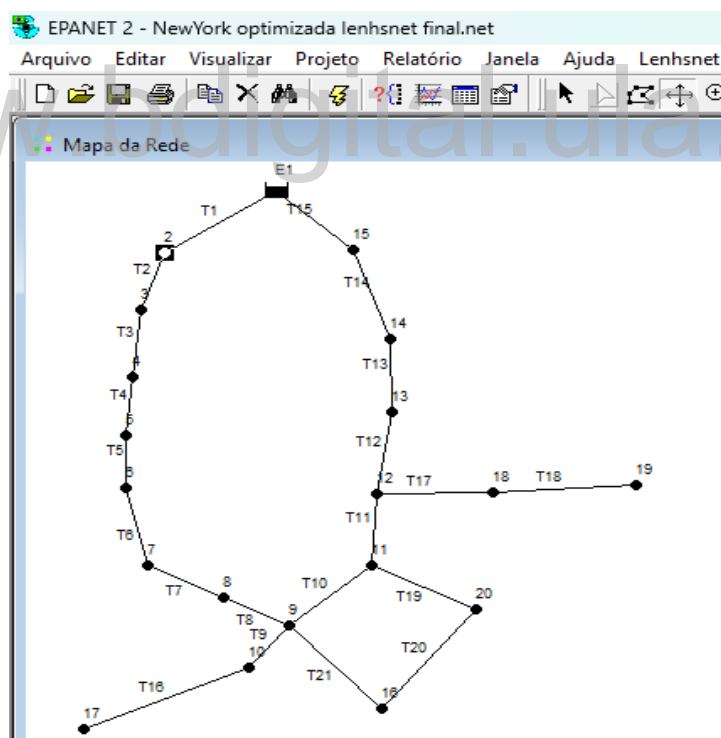


Figura 39. Red de New York con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

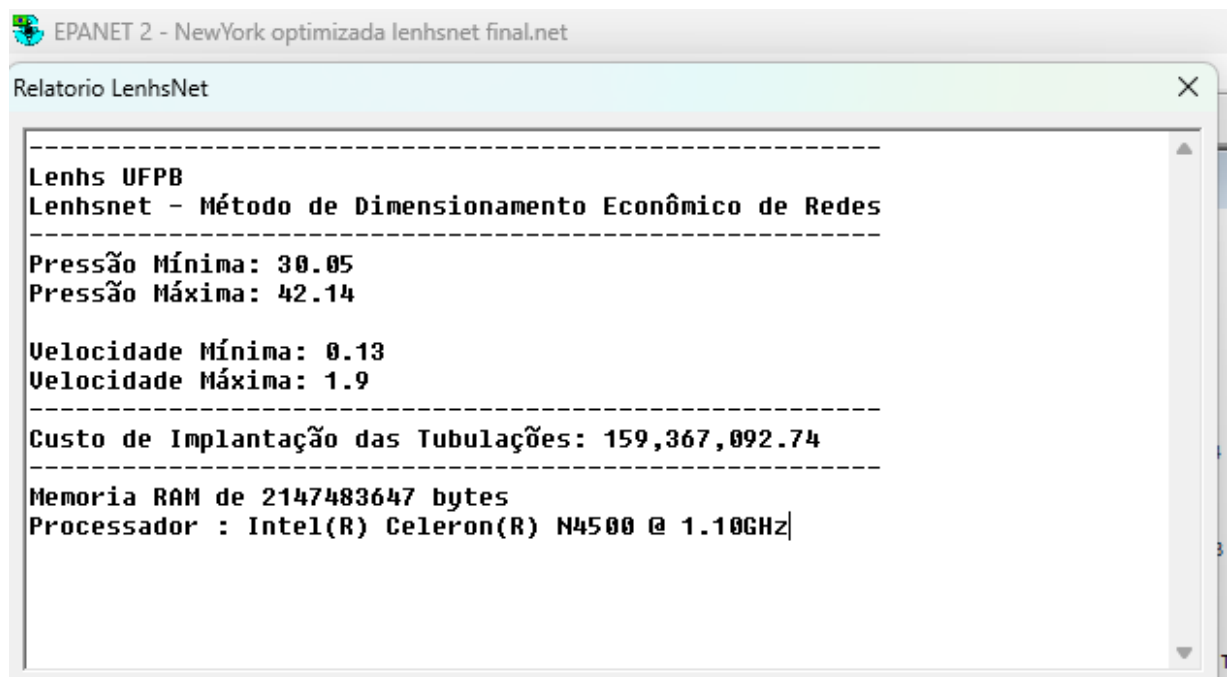


Figura 40. Custo de la Red de New York con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

www.bdigital.ula.ve

Tabla 63. Diámetros en mm optimizados y costo de la red de New York por los tres métodos.

Tubería	HS	Lenhsnet	WaterGems
T1	5181,6	3657,6	3962,40
T2	4876,8	3657,6	5181,60
T3	4876,8	3352,8	5181,60
T4	4572	3048	2743,20
T5	4267,2	2743,2	2743,20
T6	4267,2	2438,4	2438,40
T7	3962,4	1828,8	2743,20
T8	3657,6	2133,6	1219,20
T9	1828,8	2743,2	3657,60
T10	914,4	5181,6	4267,20
T11	2438,4	5181,6	4267,20
T12	3962,4	5181,6	5181,60
T13	4267,2	5181,6	5181,60
T14	4267,2	5181,6	5181,60
T15	4572	5181,6	5181,60
T16	2133,6	2743,2	3352,80
T17	2743,2	2743,2	2743,20
T18	2133,6	2133,6	2133,60
T19	2133,6	1828,8	3657,60
T20	914,4	914,4	2438,40
T21	2133,6	2133,6	1219,20
Costo Total \$	157.208.455,84	159.367.092,74	177.029.216,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 64. Velocidades en m/s obtenidas de la red de New York por los tres métodos.

Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS
T1	1,62	1,48	1,42
T2	1,37	0,74	1,47
T3	1,33	0,62	1,33
T4	1,27	1,79	1,36
T5	1,14	1,36	1,38
T6	0,91	1,19	1,21
T7	0,67	0,52	1,2
T8	0,21	0,48	1,17
T9	0,28	0,16	0,63
T10	0,57	0,47	1,16
T11	1,03	1,42	1,85
T12	1,5	1,44	1,51
T13	1,66	1,59	1,53
T14	1,78	1,72	1,72
T15	1,9	1,84	1,65
T16	0,28	0,18	0,46
T17	1,12	1,12	1,12
T18	0,93	0,93	0,93
T19	1,8	0,83	1,29
T20	0,13	0,85	0,33
T21	1,37	0,73	1,41

Fuente: Elaboración propia

Tabla 65. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de New York obtenida por los tres métodos.

Método	Lenhsnet	WaterGems	HS
Número de iteraciones o tiempo en segundos	96s	1.000.000 iteraciones	1.000.000 iteraciones

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 7. Resultados de la red 67 Tubos

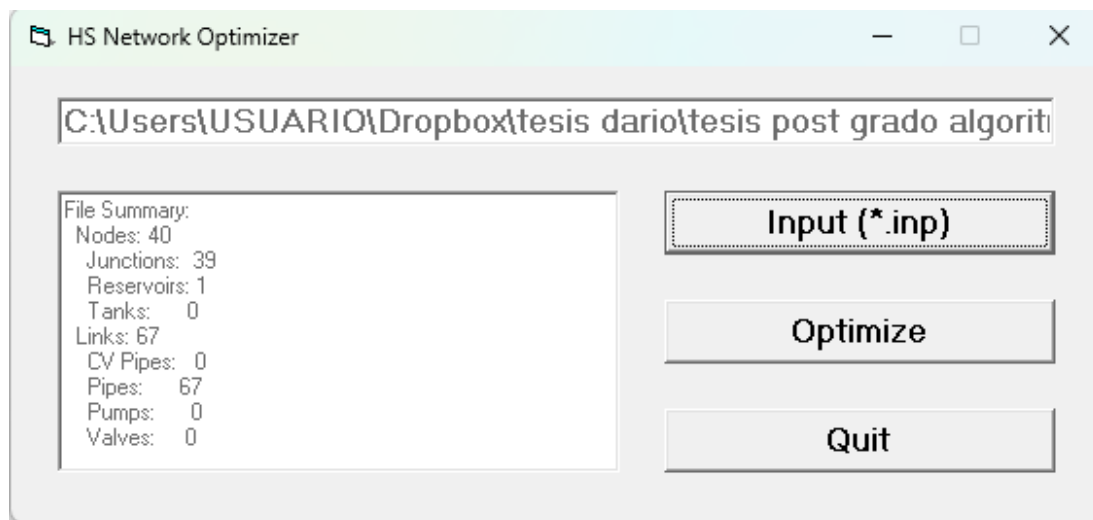


Figura 41. Red 67 Tubos en HS

Fuente: Programa HS

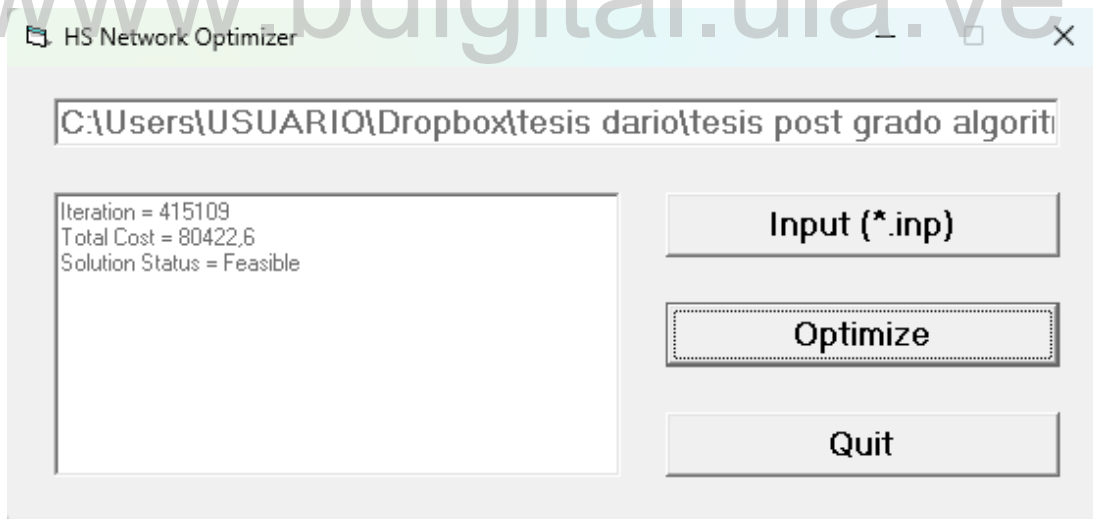


Figura 42. Costo de la Red 67 Tubos con HS

Fuente: Programa HS

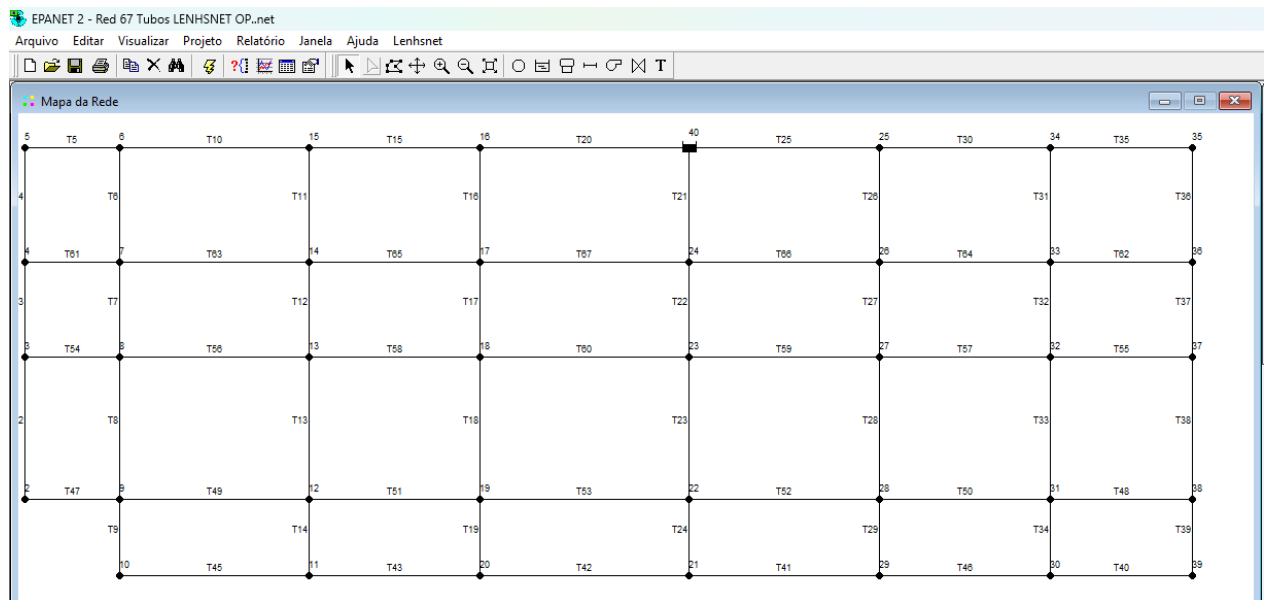


Figura 43. Red 67 Tubos con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

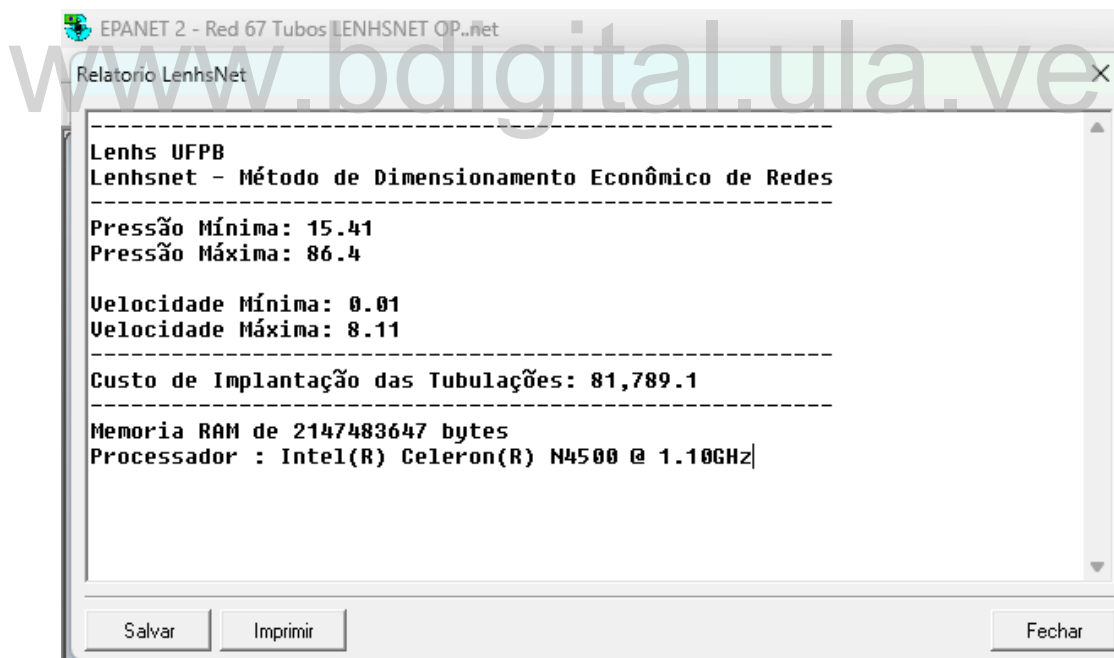


Figura 44. Costo de la Red 67 Tubos con Lenhsnet

Fuente: Programa HS

Tabla 66. Diámetros en mm optimizados y costo de la Red 67 Tubos por los tres métodos.

Tubería	HS	Lenhsnet	WaterGems	Tubería	HS	Lenhsnet	WaterGems
T1	254	50,8	254	T35	50,8	63,5	50,8
T2	63,5	63,5	63,5	T36	76,2	50,8	76,2
T3	152,4	50,8	152,4	T37	152,4	50,8	152,4
T4	76,2	50,8	76,2	T38	152,4	63,5	152,4
T5	152,4	50,8	152,4	T39	50,8	50,8	50,8
T6	50,8	63,5	50,8	T40	76,2	50,8	76,2
T7	76,2	76,2	76,2	T41	76,2	50,8	76,2
T8	50,8	152,4	50,8	T42	203,2	50,8	203,2
T9	152,4	76,2	152,4	T43	254	50,8	254
T10	50,8	76,2	50,8	T44	254	50,8	254
T11	76,2	76,2	76,2	T45	406,4	50,8	406,4
T12	50,8	203,2	50,8	T46	50,8	50,8	50,8
T13	76,2	101,6	76,2	T47	50,8	50,8	50,8
T14	76,2	76,2	76,2	T48	50,8	76,2	50,8
T15	50,8	101,6	50,8	T49	63,5	76,2	63,5
T16	50,8	203,2	50,8	T50	50,8	101,6	50,8
T17	50,8	101,6	50,8	T51	50,8	50,8	50,8
T18	50,8	101,6	50,8	T52	63,5	63,5	63,5
T19	76,2	63,5	76,2	T53	101,6	63,5	101,6
T20	152,4	254	152,4	T54	152,4	76,2	152,4
T21	50,8	254	50,8	T55	63,5	76,2	63,5
T22	50,8	203,2	50,8	T56	50,8	152,4	50,8
T23	50,8	101,6	50,8	T57	76,2	152,4	76,2
T24	50,8	63,5	50,8	T58	63,5	50,8	63,5
T25	203,2	101,6	203,2	T59	76,2	203,2	76,2
T26	50,8	50,8	50,8	T60	50,8	50,8	50,8
T27	50,8	76,2	50,8	T61	50,8	63,5	50,8
T28	50,8	152,4	50,8	T62	50,8	63,5	50,8
T29	50,8	63,5	50,8	T63	152,4	101,6	152,4
T30	50,8	76,2	50,8	T64	76,2	101,6	76,2
T31	63,5	50,8	63,5	T65	50,8	203,2	50,8
T32	101,6	63,5	101,6	T66	406,4	101,6	406,4
T33	50,8	76,2	50,8	T67	101,6	101,6	101,6
T34	101,6	63,5	101,6				
Costo \$	81.083,60	82.348,90	95.968,70				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 67. Velocidades en m/s obtenidas de la Red 67 Tubos por los tres métodos.

Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS	Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS
T1	0,42	2,03	0,71	T35	2,28	1,45	0,75
T2	1,24	4,76	1,32	T36	0,6	0,69	2,21
T3	0,15	1,98	1,2	T37	0,62	0,91	1,52
T4	0,01	3,27	0,82	T38	1,13	0,31	1,77
T5	1,98	1,3	3,25	T39	1,13	1,72	0,8
T6	0,07	3,81	0,1	T40	0,85	3,7	1,17
T7	0,47	4,78	3,38	T41	0,53	4,52	2,38
T8	2,21	3,4	3,75	T42	1,11	3,84	3,01
T9	2,4	0,94	2,18	T43	0,44	0,06	0,53
T10	3,56	0,81	4,12	T44	1,06	0,55	0,37
T11	2,1	6,05	6,17	T45	0,4	1,28	0,91
T12	4,38	5,17	4,41	T46	1,2	2,72	1,14
T13	4,3	6,1	5,35	T47	1,94	2,32	1,6
T14	2,21	3,94	2,36	T48	2,13	3,39	1,98
T15	5,04	1,24	4,62	T49	0,74	2,44	0,85
T16	7,45	6,04	5,65	T50	3,49	1,51	1,16
T17	6,68	7,16	3,27	T51	0,08	1,99	0,93
T18	3,65	2,21	3,4	T52	1,21	3,61	4,59
T19	2,17	1,15	0,76	T53	2,24	5,22	4,76
T20	6,05	4,56	5,99	T54	2,55	3,13	3,66
T21	7,26	5,28	5,49	T55	3,69	3,18	3,4
T22	8,12	5,92	4,72	T56	4,04	3,27	2,17
T23	5,73	4,67	5,43	T57	3,6	3,57	2,76
T24	3,85	5,09	5,56	T58	1,17	3,52	0,82
T25	5,62	5,77	4,87	T59	5,46	4,8	4,08
T26	2,19	2,46	4,14	T60	3	3,78	3,7
T27	1,44	1,07	6,21	T61	2,3	2,72	3,38
T28	4,04	3,96	2,24	T62	2,69	2,31	4,45
T29	4,27	4,76	1,64	T63	3,72	5,49	4,89
T30	3,97	3,18	2,72	T64	3,39	3,02	4,41
T31	1,05	1,52	4,45	T65	5,85	4,75	1,06
T32	2,27	3,46	4,92	T66	5,36	6,16	6,52
T33	3,22	2,15	4,87	T67	3,84	2,35	3,14
T34	2,61	4,09	1,99				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 68. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red Red 67 Tubos obtenida por los tres métodos.

Método	Lenhsnet	WaterGems	HS
Número de iteraciones o tiempo en segundos	302s	500.000 iteraciones	200.000 iteraciones

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 8. Resultados de la red El Palmo

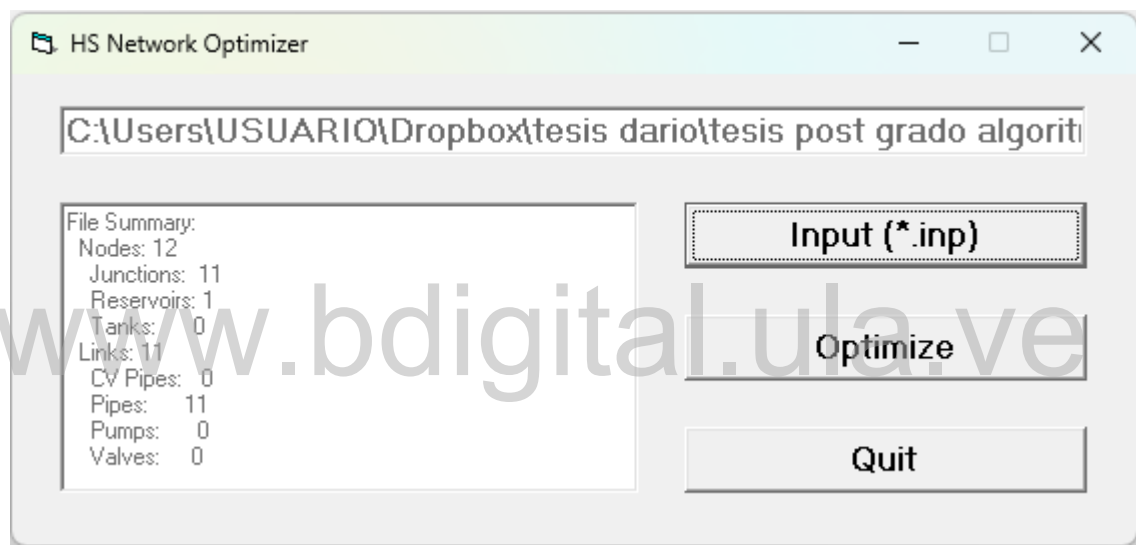


Figura 45. Red El Palmo en HS

Fuente: Programa HS

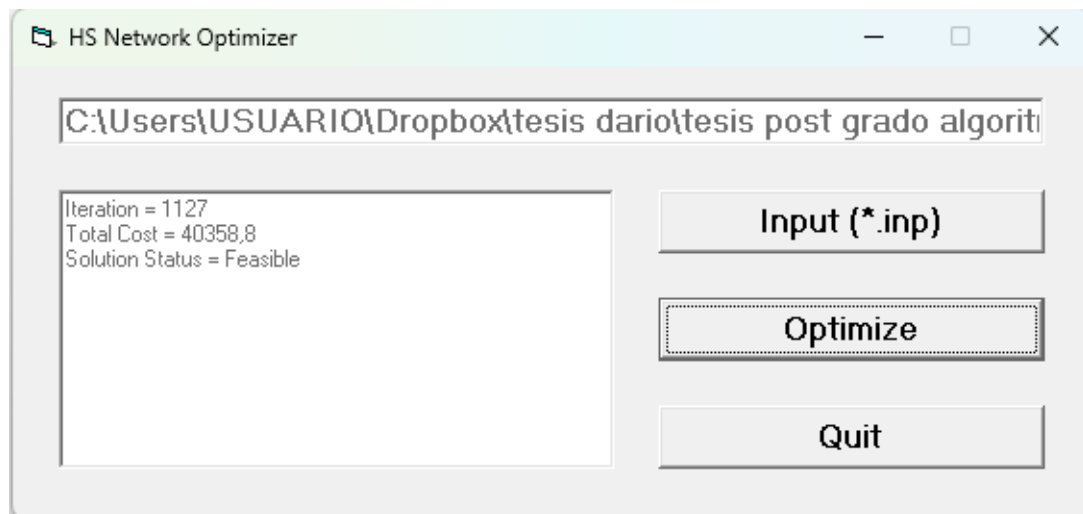


Figura 46. Costo de la Red El Palmo con HS

Fuente: Programa HS

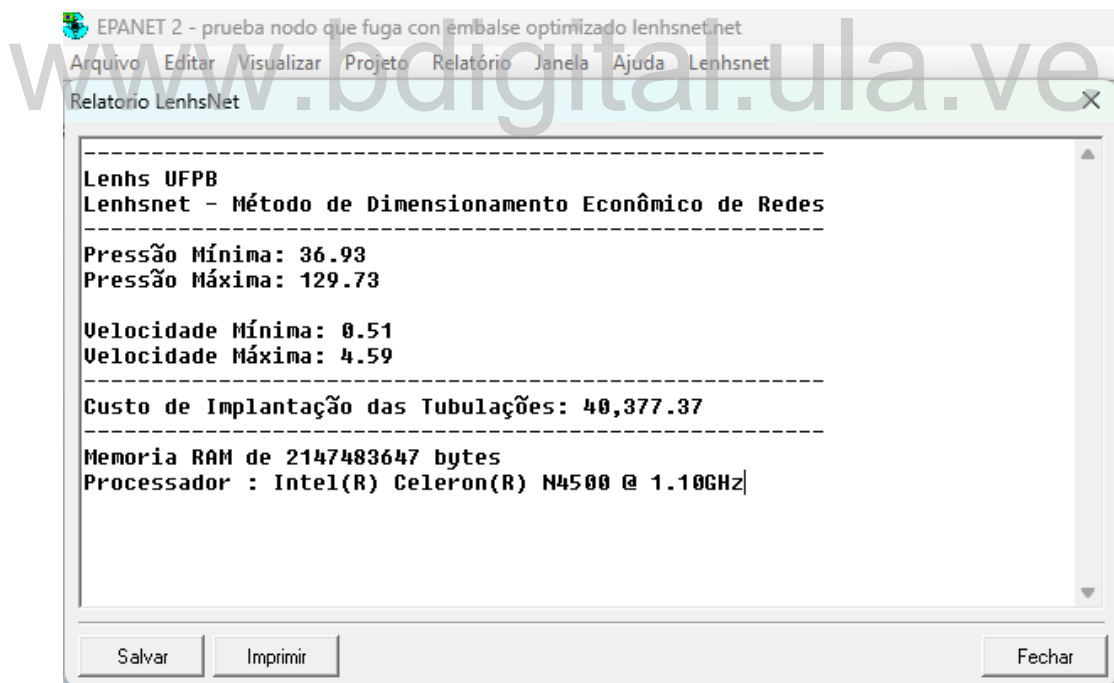


Figura 47. Costo de la Red El Palmo con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

Tabla 69. Diámetros en mm optimizados y costo de la Red de El Palmo por los tres métodos.

Tubería	HS	Lenhsnet	WaterGems
T2	42	65	65
T5	65	65	77,2
T7	26,6	26,6	26,6
T11	26,6	26,6	26,6
T19	26,6	26,6	21,2
T21	65	65	65
T25	33,4	33,4	33,4
T26	26,6	26,6	26,6
T28	54	54	65
T31	33,4	33,4	42
T36	26,6	26,6	26,6
Costo \$	40.358,78	40.377,37	40.973,44

Fuente: Elaboración propia

Tabla 70. Velocidades en m/s obtenidas de la Red de El Palmo por los tres métodos.

Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS
T2	4,59	17,37	10,98
T5	3,54	2,51	3,54
T7	2,05	2,05	2,05
T11	2,15	2,15	2,15
T19	0,51	0,81	0,51
T21	4,14	4,14	4,14
T25	2,72	1,72	2,72
T26	1,89	1,89	1,89
T28	2,55	2,55	2,55
T31	2,96	4,67	2,96
T36	2,05	2,05	2,05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 71. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de El Palmo obtenida por los tres métodos.

Método	Lenhsnet	WaterGems	HS
Número de iteraciones o tiempo en segundos	302s	500.000 iteraciones	200.000 iteraciones

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9. Resultados de la red de la Urbanización Don Luis.

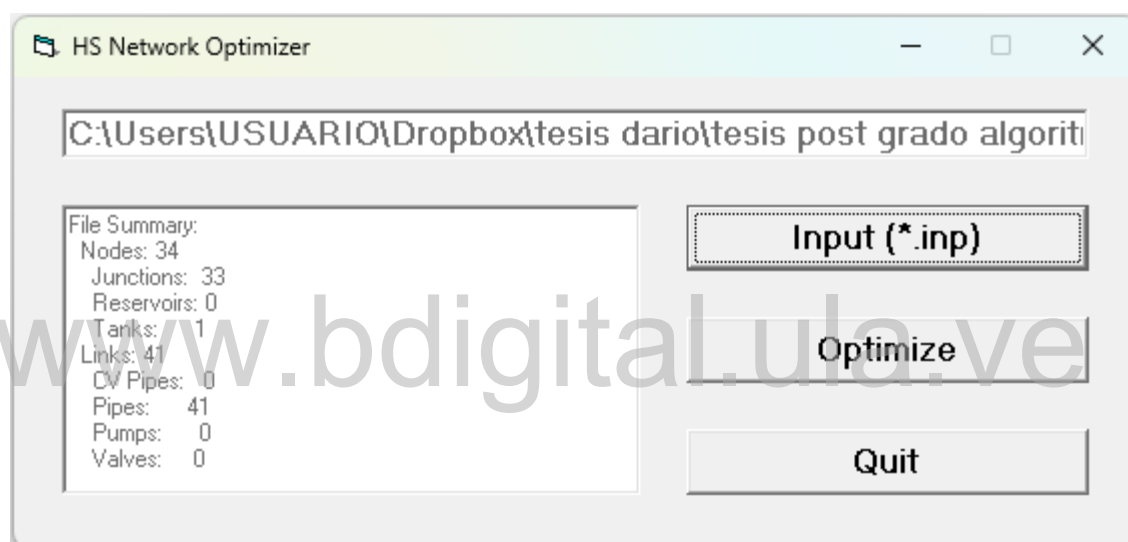


Figura 48. Red de la Urbanización Don Luis en HS

Fuente: Programa HS

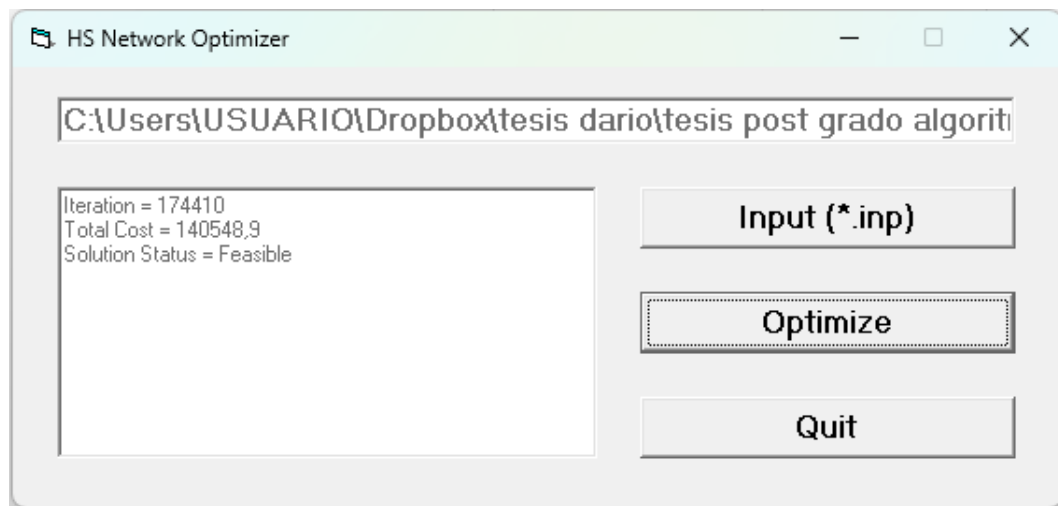


Figura 49. Costo de la red de la Urbanización Don Luis con HS

Fuente: Programa HS

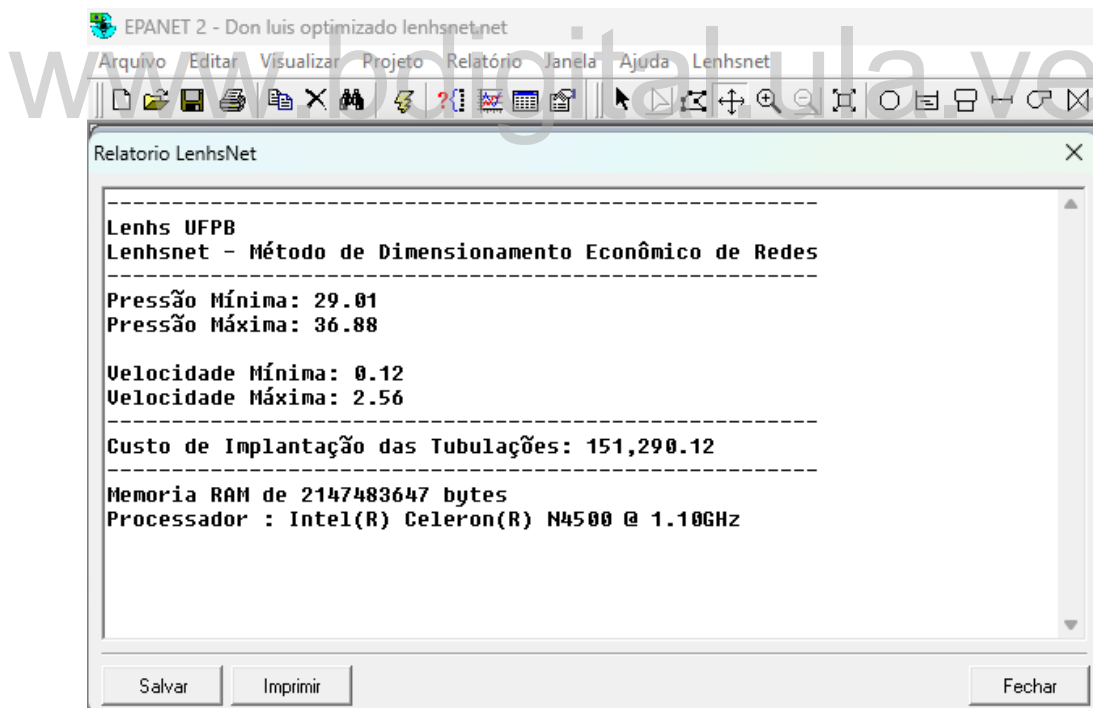


Figura 50. Costo de la red de la Urbanización Don Luis con Lenhsnet

Fuente: Epanet 2.0 Brasil.

Tabla 72. Diámetros en mm optimizados y costo de la red de la Urbanización Don Luis por los tres métodos.

Tubería	HS	Lenhsnet	WaterGems	Tubería	HS	Lenhsnet	WaterGems
T1	13,2	65	54	T22	54	54	13,2
T2	141	141	141	T23	21,2	26,6	21,2
T3	65	141	120,4	T24	13,2	13,2	54
T4	141	77,2	77,2	T25	21,2	13,2	13,2
T5	77,2	13,2	13,2	T26	54	54	54
T6	33,4	54	21,2	T27	33,4	33,4	42
T7	21,2	21,2	26,6	T28	21,2	26,6	21,2
T8	65	65	65	T29	13,2	13,2	13,2
T9	65	54	65	T30	21,2	21,2	13,2
T10	13,2	33,4	33,4	T31	42	54	42
T11	21,2	21,2	21,2	T32	21,2	26,6	21,2
T12	13,2	54	13,2	T33	21,2	26,6	21,2
T13	54	33,4	42	T34	13,2	13,2	13,2
T14	21,2	21,2	21,2	T35	21,2	13,2	13,2
T15	65	65	65	T36	33,4	33,4	26,6
T16	54	54	26,6	T37	21,2	21,2	21,2
T17	26,6	26,6	26,6	T38	21,2	26,6	21,2
T18	21,2	26,6	21,2	T39	13,2	26,6	26,6
T19	13,2	33,4	21,2	T40	21,2	26,6	26,6
T20	21,2	21,2	21,2	T41	54	65	42
T21	65	54	54				
Costo \$	140.548,95	151.290,12	138.430,16				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 73. Velocidades en m/s obtenidas de la red de la Urbanización Don Luis por los tres métodos.

Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS	Tubería	Lenhsnet	WaterGems	HS
T1	2,29	2,02	0,85	T22	1,24	1,07	1,29
T2	1,29	0,99	1,29	T23	0,71	0,86	1,12
T3	0,53	0,46	0,26	T24	0,44	0,79	0,28
T4	1,98	1,78	1,07	T25	0,39	0,39	1,12
T5	0,27	0,3	1,74	T26	1,84	1,45	1,9
T6	0,95	1,05	1,08	T27	1,88	0,85	1,72
T7	0,69	0,34	0,69	T28	0,75	0,91	1,18
T8	2,56	2,34	2,38	T29	0,21	0,23	0,44
T9	2,03	1,11	1,96	T30	0,39	0,77	0,39
T10	1,44	0,38	0,26	T31	1,17	1,51	1,98
T11	0,49	0,38	0,49	T32	1,15	1,3	1,65
T12	0,4	0,25	0,41	T33	0,7	0,85	1,1
T13	0,64	1,46	0,87	T34	0,26	0,42	0,65
T14	0,84	0,65	0,84	T35	0,49	0,38	0,19
T15	1,97	2,1	2,04	T36	1,35	1,64	1,35
T16	1,77	1,57	1,57	T37	0,89	0,69	0,89
T17	1,17	1,44	1,54	T38	0,36	0,43	0,56
T18	0,51	0,62	0,81	T39	0,8	0,78	0,74
T19	0,73	0,81	0,65	T40	0,66	0,51	1,04
T20	0,61	0,47	0,61	T41	0,12	0,22	0,17
T21	2,47	2,75	1,78				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 74. Tiempo o número de iteraciones necesarias para la optimización de la red de la Urbanización Don Luis obtenida por los tres métodos.

Método	Lenhsnet	WaterGems	HS
Número de iteraciones o tiempo en segundos	302s	500.000 iteraciones	200.000 iteraciones

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 10. Otros métodos Optimizadores.

- **Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA) “Algoritmo de salto de rana mezclado”**

Según (Mora D. , 2012).

La versatilidad que ofrecen los algoritmos evolutivos en la resolución de todo tipo de procesos de optimización es tal que incluso pueden desarrollarse técnicas híbridas que combinen las mejores características de distintas técnicas. Una de las más recientes la dan a conocer Eusuff y Lansey (2000), bajo el nombre de Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA). SFLA tiene un funcionamiento similar al resto de técnicas evolutivas, tratando de encontrar una solución óptima para un determinado problema a partir de la evolución de una población inicial aleatoria. Para ello realiza una búsqueda heurística que combina elementos de otros métodos de optimización, de modo que la búsqueda local realizada por SFL está basada en el algoritmo PSO, mientras que el intercambio global de información tiene su origen en una técnica conocida como Shuffled Complex Evolution (SCE).

Tras el primer trabajo presentado en el año 2000, Eusuff y Lansey han publicado distintos trabajos de aplicación de SFLA a problemas matemáticos complejos, como pueden ser funciones no derivables, diseño de RDA, gestión de proyectos, etc. Dentro del campo de estudio en el que se enmarca esta tesis el trabajo de más interés es el publicado en 2003, donde Eusuff y Lansey aplican el algoritmo SFL al diseño óptimo de distintas redes de agua ampliamente conocidas, como pueden ser la red de Hanoi, la red de Alperovits y Shamir o la red de Nueva York. (p. 44)

- **Búsqueda de armonía con enjambre de partículas (NGHS)**

Según (Cobos, Pérez, & Estupiñan, 2011)

NGHS propone una hibridación entre la búsqueda armónica, la optimización basada en enjambre y la mutación genética (Dexuan, Liqun, Jianhua, Steven, & Yang, 2010). Este algoritmo se propuso para resolver problemas de fiabilidad, término usado para indicar la probabilidad de que un sistema funcione correctamente (sea seguro y eficiente) sin violar ninguna restricción. De los diversos problemas de fiabilidad que existen se tomaron: los sistemas complejos (sistemas de programación no lineal entera y mixta), un sistema de protección de

exceso de velocidad para una turbina de gas y un problema de fiabilidad de un sistema a gran escala.

NGHS y HS son diferentes en tres aspectos: en el paso 1, la tasa de consideración de la memoria armónica (HMCR) y el rango de ajuste de tono (PAR) son excluidos, y se incluye la probabilidad de mutación genética (P_m); en el paso 3, se modifica el paso de la improvisación por completo de modo que la nueva armonía imite a la mejor armonía global en la memoria armónica (HM) como se muestra en la Figura 51; y en el paso 4, se reemplaza la peor armonía x^{worst} con la nueva armonía x' aun sí x' es peor que x^{worst}

Esta propuesta se ha probado en optimización de problemas discretos y muestra una mejor convergencia y una mayor capacidad de exploración del espacio de solución que el algoritmo de búsqueda armónica original (HS) y que la búsqueda armónica mejora (IHS).

```

001 para cada  $i \in [1, N]$  hacer
002    $x_R = 2 \times x_i^{best} - x_i^{worst}$ 
003   si  $x_R > x_{iU}$  entonces
004     inicio
005        $x_R = x_{iU}$ 
006     fin
007   sino
008     si  $x_R < x_{iL}$  entonces
009        $x_R = x_{iL}$ 
010     fin_si
011   fin_si
012    $x'_i = x_i^{worst} + r \times (x_R - x_i^{worst})$  // % actualización de la posición
013   si  $r \leq p_m$  entonces
014      $x'_i = x_{iL} + r \times (x_{iU} - x_{iL})$  // % mutación genética
015   fin_si
016 fin para

```

Figura 51. Nueva improvisación en el algoritmo de la nueva búsqueda armónica global (NGHS).

Fuente: Tomado de (Cobos, Pérez, & Estupiñan, 2011)

- **Algoritmo de Evolución Compleja Mezclada**

El algoritmo de evolución compleja mezclada (CEM, por sus siglas en inglés), propuesto por Liong y Atiquzzaman, es una metaheurística inspirada en los procesos evolutivos naturales y en la teoría de la complejidad. Este algoritmo combina elementos de los algoritmos genéticos tradicionales con conceptos de la teoría de redes complejas, buscando mejorar la eficiencia y la capacidad de exploración de los espacios de búsqueda complejos.

La idea central del CEM es que los individuos de una población no solo evolucionan a través de operadores genéticos tradicionales (como la cruce y la mutación), sino que también interactúan entre sí formando una red compleja. Esta red representa las relaciones entre los individuos y puede influir en su evolución.

- **Algoritmos de Optimización Evolutiva Restringida**

Los algoritmos de optimización evolutiva restringida son adaptaciones de las técnicas inspiradas en la evolución biológica, diseñadas específicamente para resolver problemas donde las soluciones deben cumplir con ciertas restricciones. Estos algoritmos han sido objeto de numerosas investigaciones, y Farmani y otros investigadores han realizado contribuciones significativas en este campo.

¿Por qué son importantes las restricciones?

En la mayoría de los problemas del mundo real, las soluciones óptimas no solo deben maximizar o minimizar una función objetivo, sino también cumplir con una serie de limitaciones o restricciones. Estas restricciones pueden ser de igualdad (por ejemplo, $x + y = 10$) o desigualdad (por ejemplo, $x > 0$), y definen un espacio de búsqueda factible más reducido.

- **Algoritmo de Recocido Simulado con Búsqueda Tabú**

La optimización de problemas complejos a menudo requiere el uso de metaheurísticas, algoritmos que buscan soluciones de alta calidad sin garantizar la optimalidad global. Dos de las metaheurísticas más populares son el **recocido simulado** y la **búsqueda tabú**. La combinación de ambas técnicas, propuesta por Reca y otros investigadores, ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la capacidad de exploración y explotación del espacio de búsqueda, evitando así quedar atrapados en óptimos locales.

Funcionamiento del Algoritmo

1. **Inicialización:** Se genera una solución inicial aleatoria y se establece una temperatura inicial alta para el recocido simulado. La lista tabú se inicializa como vacía.
2. **Generación de una solución vecina:** Se genera una nueva solución a partir de la solución actual, realizando un pequeño cambio.
3. **Evaluación:** Se calcula la calidad de la nueva solución utilizando la función objetivo.
4. **Aceptación de la solución:**
 - Si la nueva solución es mejor que la actual, se acepta.
 - Si la nueva solución es peor, se acepta con una probabilidad que depende de la diferencia de calidad entre ambas soluciones y de la temperatura actual.
 - Si la nueva solución es tabú, se rechaza.
5. **Actualización de la lista tabú:** Se añade la última solución aceptada a la lista tabú.
6. **Enfriamiento:** Se reduce la temperatura.

7. **Criterio de parada:** Se verifica si se ha alcanzado el criterio de parada (número máximo de iteraciones, temperatura mínima, etc.). Si no se ha alcanzado, se vuelve al paso 2.

- **Algoritmo de Búsqueda Local con Recocido Simulado:**

La combinación de la búsqueda local con el recocido simulado es una estrategia poderosa en el campo de la optimización. Ambas técnicas, por separado, ofrecen ventajas significativas, pero al unir las se logra un algoritmo híbrido que puede explorar el espacio de búsqueda de manera más exhaustiva y evitar quedar atrapado en óptimos locales.

Funcionamiento Básico

1. **Inicialización:** Se genera una solución inicial aleatoria.
2. **Generación de un vecino:** Se genera una nueva solución a partir de la actual, realizando un pequeño cambio.
3. **Evaluación:** Se calcula la calidad de la nueva solución.
4. **Aceptación:**
 - **Si la nueva solución es mejor:** Se acepta.
 - **Si la nueva solución es peor:** Se acepta con una probabilidad que depende de la diferencia de calidad y de la temperatura actual (parámetro del recocido simulado).
5. **Actualización:** La mejor solución encontrada hasta el momento se actualiza.
6. **Enfriamiento:** Se reduce la temperatura gradualmente.

7. **Criterio de parada:** Se verifica si se ha alcanzado el criterio de parada (número máximo de iteraciones, temperatura mínima, etc.). Si no, se vuelve al paso 2.

- **Algoritmo de Entropía Cruzada**

El algoritmo de entropía cruzada, desarrollado por Perelman y Ostfeld, es una técnica de optimización inspirada en conceptos de la teoría de la información. Se utiliza para resolver problemas de optimización combinatoria y continua, y se ha mostrado particularmente eficaz en problemas donde la función objetivo es ruidosa o presenta múltiples óptimos locales.

La idea central del algoritmo es aproximar la distribución de probabilidad de las soluciones óptimas. A medida que el algoritmo avanza, se van refinando estas estimaciones, concentrando la búsqueda en regiones del espacio de soluciones con mayor probabilidad de contener el óptimo global.

Funcionamiento General

1. **Inicialización:** Se define una distribución de probabilidad inicial sobre el espacio de soluciones.
2. **Muestreo:** Se generan un conjunto de soluciones aleatorias de acuerdo con la distribución de probabilidad actual.
3. **Evaluación:** Se evalúa la calidad de cada solución utilizando la función objetivo.
4. **Actualización de la distribución:** Se actualiza la distribución de probabilidad para favorecer las regiones del espacio de soluciones que contienen soluciones de alta calidad.

Esto se realiza minimizando la entropía cruzada entre la distribución actual y una distribución ideal que asigna una probabilidad alta a las mejores soluciones.

5. **Repetición:** Los pasos 2, 3 y 4 se repiten hasta alcanzar un criterio de parada (número máximo de iteraciones, mejora mínima en la función objetivo, etc.).

- **Algoritmo de Búsqueda Dispersa**

La búsqueda dispersa (Scatter Search en inglés) es una metaheurística poderosa y flexible diseñada para resolver una amplia variedad de problemas de optimización. Fue introducida por Fred Glover en la década de 1970 y ha sido refinada y extendida por numerosos investigadores, incluyendo a Lin y otros. Esta técnica se basa en la idea de combinar soluciones de alta calidad para generar nuevas y mejores soluciones, promoviendo así una exploración diversificada del espacio de búsqueda.

Funcionamiento Básico

El algoritmo de búsqueda dispersa opera sobre un conjunto de soluciones, denominado **conjunto de referencia**. Este conjunto se actualiza continuamente a medida que se encuentran nuevas soluciones de alta calidad. Los pasos básicos del algoritmo son los siguientes:

1. **Inicialización:** Se genera un conjunto inicial de soluciones de manera aleatoria o utilizando alguna heurística.
2. **Diversificación:** Se aplica un conjunto de operadores de diversificación para generar nuevas soluciones a partir del conjunto de referencia. Estos operadores pueden incluir mutaciones, cruces o combinaciones de ambas.

3. **Intensificación:** Se aplican operadores de intensificación para mejorar las soluciones generadas. Estos operadores pueden incluir búsquedas locales o técnicas de escalada.
4. **Actualización del conjunto de referencia:** Se seleccionan las mejores soluciones generadas y se añaden al conjunto de referencia, reemplazando las soluciones de menor calidad.
5. **Repetición:** Los pasos 2, 3 y 4 se repiten hasta alcanzar un criterio de parada (número máximo de iteraciones, mejora mínima en la función objetivo, etc.).

- **Algoritmo de Búsqueda Tabú:**

Es un algoritmo de optimización que utiliza una estructura de memoria para guiar la búsqueda hacia soluciones de alta calidad, evitando así quedar atrapado en óptimos locales. La idea principal es marcar ciertas soluciones como "tabú" (prohibidas) para evitar volver a explorar regiones del espacio de búsqueda ya visitadas.

Funcionamiento Básico

1. **Inicialización:** Se genera una solución inicial aleatoria.
2. **Vecindad:** Se define un conjunto de soluciones vecinas a la solución actual.
3. **Movimiento:** Se selecciona la mejor solución vecina que no esté en la lista tabú.
4. **Actualización de la lista tabú:** Se añade la solución actual a la lista tabú y se elimina la solución más antigua.

5. **Criterio de parada:** Se verifica si se ha alcanzado un criterio de parada (número máximo de iteraciones, mejora mínima en la función objetivo, etc.). Si no, se vuelve al paso 2.

- **Algoritmo de Búsqueda Armónica con Enjambre de Partículas:**

El algoritmo de Búsqueda Armónica con Enjambre de Partículas es una metaheurística híbrida que combina los principios de dos algoritmos de optimización altamente efectivos: la Búsqueda Armónica (HS) y la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO). Esta combinación sinérgica busca aprovechar las fortalezas de ambos enfoques para resolver problemas de optimización complejos.

Funcionamiento:

1. **Inicialización:**

- Se crea una población inicial de soluciones, al igual que en el HS y el PSO.
- Cada solución (o partícula) se representa como un vector en el espacio de búsqueda.

2. **Búsqueda Armónica:**

- **Memoria Armónica:** Se mantiene una memoria de las mejores soluciones encontradas hasta el momento.
- **Generación de nuevas soluciones:** Se generan nuevas soluciones a partir de la memoria armónica, utilizando operadores de búsqueda armónica similares a los

del HS original. Estos operadores permiten explorar el espacio de búsqueda de manera eficiente.

3. Optimización por Enjambre de Partículas:

- **Actualización de las partículas:** Cada partícula actualiza su posición en el espacio de búsqueda basándose en su propia mejor posición y en la mejor posición global encontrada hasta el momento, al igual que en el PSO.
- **Velocidad de las partículas:** Se calcula la velocidad de cada partícula para determinar su nuevo movimiento en el espacio de búsqueda.

4. Combinación de ambos enfoques:

- Se combina los pasos de búsqueda armónica y optimización por enjambre de partículas de forma iterativa.
- La búsqueda armónica proporciona una exploración más global del espacio de búsqueda, mientras que la optimización por enjambre de partículas permite una explotación más local de las regiones prometedoras.

- **Algoritmo de Superficie de Uso Óptimo de Potencia (OPUS por sus siglas en inglés):**

Según (Saldarriaga, Hernández, Escovar, & Páez, 2012)

En la Figura 52 se muestran los pasos o subprocesos de la metodología y el orden en que se realizan. El primer subproceso consiste en convertir la topología de la red, en una estructura de árbol o red abierta. Después se asigna a cada nodo, su altura piezométrica objetivo con base en la metodología desarrollada por Ochoa (2009), utilizando para ello, la estructura de árbol generada, y las características topológicas y de demanda de la red. A continuación, se realiza una distribución de caudales, de manera que para cada nodo se asigna el porcentaje de caudal demandado que provendrá de cada tubería conectada a dicho nodo. Posteriormente se realiza el diseño, encontrando diámetros continuos como resultado, y requiriendo que dichos diámetros sean aproximados a algún diámetro discreto disponible en el mercado. Finalmente se realizan una serie de ejecuciones hidráulicas con el objetivo de asegurar que no se viole la presión mínima en los nodos y buscando una reducción en los costos mediante reducción de algunos de los diámetros

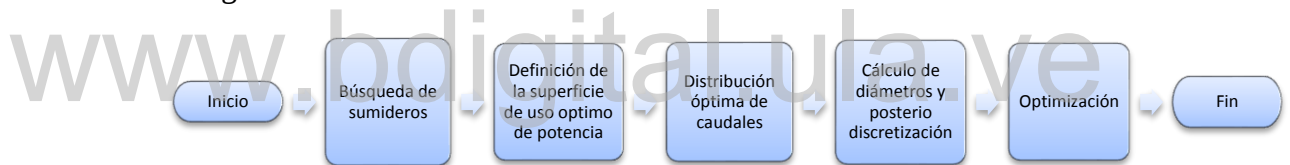


Figura 52. Descripción de los subprocesos de la metodología OPUS.

Fuente: Tomado de (Saldarriaga, Hernández, Escovar, & Páez, 2012)