

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA
Y CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**Optimización del diseño de redes de distribución de agua potable
usando el algoritmo de búsqueda tabú**

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Civil

Presentado por:

Bach. Elvis Jhoel Sosa Lozano

Asesor:

MSC. Ing. Jaime Leonardo Bendezú Prado

Ayacucho - Perú

2024

Resumen

La presente investigación se basa en la optimización de una red de distribución de agua potable, mediante el algoritmo de Búsqueda Tabú, para encontrar la mejor solución óptima con respecto costo total de las tuberías sujeto a restricciones. El Algoritmo Búsqueda Tabú es una técnica metaheurística para resolver problemas planteados en forma combinatoria, se basa en el proceso de la memoria humana y utiliza un procedimiento iterativo de búsqueda de soluciones.

La esquematización de la red propuesta se realizará en EPANET¹, para luego realizar la optimización con el Algoritmo Búsqueda Tabú mediante un API² desarrollado en el Matlab³.

Para la validación del algoritmo se ha realizado la optimización del diseño de la red de distribución de la Localidad de San Martín (Socos -Ayacucho). Los resultados demuestran la utilidad del algoritmo de búsqueda tabú para resolver este tipo de problemas de optimización.

Palabras clave: Optimización, redes de distribución de agua, Búsqueda Tabú, metaheurística.

Abstract

The present research is based on the optimization of a drinking water distribution network, using the Tabu Search algorithm, to find the best optimal solution with respect to the total cost of the pipelines subject to constraints. The Tabu Search Algorithm is a metaheuristic technique to solve combinatorial problems, it is based on the human memory process and uses an iterative procedure to search for solutions.

The schematization of the proposed network will be carried out in EPANET⁴, to then perform the optimization with the Tabu Search Algorithm by means of an API⁵ developed in Matlab⁶.

For the validation of the algorithm, the optimization of the design of the distribution network of the locality of San Martín (Socos -Ayacucho) has been carried out. The results demonstrate the usefulness of the tabu search algorithm to solve this type of optimization problems.

Keywords : Optimization, water distribution networks, Tabu Search, metaheuristics.

¹Software orientado al análisis del comportamiento de los sistemas de distribución de agua

²Interfaz de Programación de Aplicaciones

³Herramienta de Programación (Software Matemático)

⁴Software oriented to the analysis of the behavior of water distribution systems

⁵Application Programming Interface

⁶Programming Tool (Mathematical Software)

Introducción

La optimización de redes de agua es una tarea crucial en ingeniería civil, ya que busca encontrar la configuración más eficiente y económica para el suministro de agua en una red de distribución. Los sistemas de agua potable y distribución deben ser diseñados de manera que se minimicen los costos operativos, se maximice la eficiencia hidráulica y se cumplan con las demandas de los usuarios.

En este contexto, el Algoritmo de Búsqueda Tabú ha demostrado ser una herramienta poderosa para abordar problemas complejos de optimización, como la configuración de redes de agua. Un algoritmo de búsqueda tabú es una técnica metaheurística que se inspira en la forma en que las personas evitan ciertas acciones durante un tiempo determinado para evitar caer en mínimos locales en la búsqueda de soluciones óptimas. Esta estrategia permite explorar de manera efectiva el espacio de soluciones y escapar de soluciones subóptimas atrapadas.

En este trabajo, exploraremos cómo el Algoritmo de búsqueda tabú puede aplicarse a la optimización de redes de agua. Analizaremos cómo este algoritmo puede manejar la complejidad de las redes de tuberías, las restricciones de flujo y presión y los costos asociados con la construcción, así como las demandas cambiantes de los usuarios. Abordaremos el desafío de encontrar un equilibrio entre minimizar los costos y garantizar un suministro confiable y de alta calidad.

A lo largo de este estudio, examinaremos casos de prueba y compararemos los resultados obtenidos mediante la aplicación de algoritmo de búsqueda tabú con otras técnicas de optimización tradicionales. Además, destacaremos las ventajas y desafíos de utilizar algoritmos de búsqueda tabú en esta área específica y cómo pueden ser estos una herramienta valiosa para los ingenieros que buscan soluciones óptimas en redes de agua.

Del proyecto "Mejoramiento y rehabilitación del sistema de saneamiento básico del barrio San Martín, Distrito de Socos- Huamanga- Ayacucho" se obtuvo la información necesaria de la red de distribución de agua potable a optimizar. Si bien esta información fue obtenida del Expediente Técnico del proyecto en mención, el procedimiento y análisis que se desarrolló en la presente tesis es útil para cualquier red de distribución de agua que se quiera analizar.

El procedimiento del presente trabajo de investigación es realizar el modelamiento hidráulico de la solución inicial (Red propuesta) en EPANET, consecuentemente realizar la optimización usando el Algoritmo Búsqueda Tabú en el API realizado en Matlab; para así encontrar la red del más bajo costo que puedan satisfacer las restricciones de la normativa existente.

Finalmente se realizará la comparación de los resultados obtenidos, con el Algoritmo Búsqueda Tabú; con la solución de la red inicial.

Dedicatoria

A DIOS por iluminar y bendecir mi camino. A mis padres, Plácido Sosa Llamocca y Alejandra Lozano Yachapa, quienes me apoyaron de manera incondicional durante mi formación académica; gracias a ustedes por apostar siempre en la educación. A mis hermanos Danny, Yaneth y Blanca por su indomable esfuerzo, sabios consejos y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, mi alma mater y orgullo de Ayacucho, donde recibí mi formación académica.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Civil, que compartieron sus conocimientos haciendo posible adquirir conceptos que contribuyeron a la presente investigación.

Al Msc. Ing. Cristian Castro Pérez, por su gran aporte en el planteamiento del tema central y base de inspiración de la presente tesis.

Al Msc. Ing. Jaime Leonardo Bendezú Prado, por sus pautas en el desarrollo de esta tesis.

A los creadores del Latex, EPANET y Matlab.

A mis amigos y compañeros de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y otros que contribuyeron en el desarrollo de este trabajo.

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
AYACUCHO, AGOSTO DE 2023

Sosa Lozano, Elvis Jhoel

Índice general

Resumen	I
Introducción	II
Agradecimientos	IV
Índice general	V
Índice de tablas	IX
Índice de figuras	XI
Índice de acrónimos	XIII
Índice de símbolos	XIV
Capítulo I: Planteamiento del Problema	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Delimitación del problema	2
1.2.1. Espacial	2
1.2.2. Temporal	2
1.2.3. Temática y unidad de análisis	2
1.3. Formulación del problema	2
1.3.1. Problema general	2
1.3.2. Problemas específicos	2
1.4. Justificación e importancia	3
1.4.1. Valor teórico	3
1.4.2. Relevancia social	4
1.4.3. Implicaciones prácticas	4
1.4.4. Tecnológica	4
1.5. Limitaciones de la investigación	4
1.5.1. Objetivo general	5

1.5.2. Objetivos específicos	5
Capítulo II: Marco Teórico.	6
2.1. Antecedentes	6
2.1.1. Investigaciones internacionales	7
2.1.2. Investigaciones nacionales	9
2.2. Bases teóricas	10
2.2.1. Ingeniería de tuberías	11
2.2.1.1. Flujo en tuberías	11
2.2.1.1.1. Definición de tubería:	11
2.2.1.1.2. Tipos de tuberías:	11
2.2.1.1.3. Importancia de la tuberías:	12
2.2.1.1.4. Ecuaciones gobernantes:	13
2.2.2. Redes de abastecimiento de agua	13
2.2.3. Métodos de optimización metaheurística	16
2.2.4. Algoritmo de Búsqueda Tabu	16
2.2.4.1. Fundamentos del algoritmo Búsqueda Tabu	16
2.2.4.2. Características del algoritmo Búsqueda Tabú	19
2.2.5. Búsqueda Tabu en los recursos hídricos	20
2.2.6. Modelo matemático de la búsqueda tabu	20
Capítulo III: Método de la Investigación	23
3.1. Enfoque	23
3.2. Alcance	23
3.3. Diseño de investigación	23
3.4. Población y muestra	24
3.4.1. Población.	24
3.4.1.1. Unidad de muestreo	24
3.4.1.2. Unidad de análisis.	24
3.4.1.3. Delimitación de la población	25
3.4.2. Muestra del estudio	25
3.4.2.1. Método de selección de la muestra	26
3.4.2.2. Tamaño de muestra	26
3.5. Hipótesis	27
3.5.1. Hipótesis general	27
3.5.2. Hipótesis específicas	27
3.6. Operacionalización de variables	27
3.6.1. Variables	27
3.6.2. Indicadores	28
3.7. Técnicas e instrumentos	29

3.7.1.	Equipos	29
3.7.2.	Aplicaciones Utilizadas	29
3.8.	Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información	30
3.9.	Desarrollo del trabajo de tesis	30
3.9.1.	Formulación del modelo de optimización	30
3.9.1.1.	Función objetivo	30
3.9.2.	Modelación hidráulica	31
3.9.2.1.	Conservación de Energía	31
3.9.2.2.	Conservación de Masa (Continuidad)	33
3.9.3.	Restricciones	34
3.9.3.1.	Restricciones físicas	34
3.9.3.2.	Restricciones técnicas	34
3.9.4.	Construcción del modelo	36
3.9.5.	Particularización del Modelo	44
3.9.6.	Optimización mediante el Algoritmo de Búsqueda Tabu	53
3.9.6.0.1.	Generación del vecindario	54
3.9.6.0.2.	Lista tabú	54
3.9.6.0.3.	Criterio de aspiración	54
3.9.6.0.4.	Estrategia de intensificación	55
3.9.6.0.5.	Estrategia de diversificación	55
3.9.6.0.6.	Criterios de parada	55
Capítulo IV: Resultados		57
4.1.	Condiciones iniciales de la red asignada	57
4.1.1.	Diseño inicial A:	58
4.1.2.	Diseño inicial B:	61
4.2.	Análisis de resultados	64
4.2.1.	Hipótesis general	64
4.2.1.1.	Optimización del diseño de redes de distribución de agua mediante el Algoritmo Búsqueda Tabú	64
4.2.1.2.	Optimización del diseño inicial A	67
4.2.1.3.	Optimización del diseño inicial B	70
4.2.2.	Hipótesis específico 01	72
4.2.2.1.	Costos óptimos de la red inicial A	72
4.2.2.2.	Costos óptimos de la red inicial B	73
4.2.3.	Hipótesis específico 02	75
4.2.3.1.	Lista tabú del diseño A	75
4.2.3.2.	Lista tabú del diseño B	76
4.2.3.3.	Relación entre el criterio de parada y lista tabú	76

4.2.4. Hipótesis específico 03	77
4.2.4.1. Evaluación de los resultados obtenidos del diseño A y B	77
4.2.4.2. Evaluación de los costos del diseño A y B	77
Capítulo V: Conclusiones	79
Conclusiones	79
Recomendaciones	79
Trabajos futuros	80
Referencias	81
Referencias	81
Metodología de la Investigación	81
Ingeniería de tuberías	81
Inteligencia Artificial	81
Metaheurística	82
Búsqueda Tabú	82
Optimización de redes de distribución de agua	83
Anexo A. Resultados de cada iteración (Optimización mediante Algoritmo Búsqueda Tabú - API Matlab)	85
A.1. Diseño inicial A	86
A.1.1. Resultados de cada iteración (Costos optimos, presiones y velocidades)	86
A.2. Diseño inicial B	90
A.2.1. Resultados de cada iteración (Costos optimos, presiones y velocidades)	90
Anexo B. Código Fuente del API elaborado en Matlab	102
Anexo C. Planos	114

Índice de tablas

2.3. Revision de la literatura	7
3.4. Variables e Indicadores	28
3.5. Principales ecuaciones de carga	32
3.6. Longitud de las tuberías	45
3.7. Datos y notación de los Nodos	46
3.8. Diámetros comerciales	47
3.9. Coeficientes de Hazem-Williams para la red de San Martín	49
4.10. Diámetros y costos del Diseño Inicial A	58
4.11. Diámetros y costos del diseño Inicial B	61
4.12. Costos óptimos en cada iteración de la Red inicial A	72
4.13. Costos óptimos en cada iteración de la Red inicial B	74
4.14. Relación entre el número máximo de iteraciones y Lista Tabú	76
4.15. Costos iniciales y óptimos de Diseño A y B	77
5.16. Costos iniciales y óptimos de Diseño A y B	79
A.1. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 01)	86
A.2. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 02)	87
A.3. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 03)	88
A.4. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 04 al N° 15)	89
A.5. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 01)	90
A.6. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 02)	91
A.7. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 03)	92
A.8. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 04)	93
A.9. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 05)	94
A.10. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 06)	95
A.11. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 07)	96
A.12. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 08)	97
A.13. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 09)	98
A.14. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 10)	99
A.15. Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 11)	100

A.16.Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 12 al 15)	101
---	-----

Índice de figuras

2.1. Diferencia de presiones en una red de tuberías de agua potable	12
2.2. Redes hidráulicas	14
2.3. Esquema de una red de tuberías	14
2.4. Redes abiertas. 6 tuberías, 7 nodos	15
2.5. Redes cerradas. 12 tuberías, 9 nodos	15
2.6. Diseño del algoritmo de Búsqueda Tabú	17
2.7. Superficie de función objetivo de un problema de optimización combinatoria usada en la Búsqueda Tabú	18
2.8. Representación de búsqueda del mínimo global	18
2.9. Entradas y Salidas de la Búsqueda Tabú	19
2.10. Aplicación de búsqueda tabu y Optimización por enjambre de partículas . .	21
3.11. Unidades de muestreo de la red agua potable de la Localidad de San Martín	25
3.12. Toma de Datos de la Localidad de San Martin - Socos.	26
3.13. Conservación de energía	32
3.14. EGL y HGL	33
3.15. Red de distribución de agua	36
3.16. Red de distribución de agua	44
3.17. Diagrama de flujo de la búsqueda tabú	56
4.18. Esquema de la Red de Distribución de San Martin en el API	57
4.19. Diámetros del diseño inicial A	59
4.20. Velocidades del diseño inicial A	59
4.21. Presiones del diseño inicial A	60
4.22. Diámetros del diseño inicial B	62
4.23. Velocidades del diseño inicial B	62
4.24. Presiones del diseño inicial B	63
4.25. Interfaz del API en MatLab	64
4.26. Interfaz del API (Solución Inicial)	65
4.27. Interfaz del API (Solución Óptima)	66
4.28. Costo óptimo del diseño A (Interfaz del API)	67
4.29. Cumplimiento de restricciones (Interfaz del API)	67

4.30. Diámetros óptimos del Diseño A	68
4.31. Velocidades óptimas del Diseño A	68
4.32. Presiones óptimas del Diseño A	69
4.33. Costo óptimo del Diseño B (Interfaz del API)	70
4.34. Cumplimiento de restricciones (Interfaz del API)	70
4.35. Diámetros óptimos del Diseño B	71
4.36. Velocidades óptimas del Diseño B	71
4.37. Presiones óptimas del Diseño B	72
4.38. Gráfica de los costo óptimos de la Red Inicial A	73
4.39. Gráfica de los costo óptimos de la Red Inicial B	74
4.40. Lista Tabú(Interfaz del API)	75
4.41. Lista Tabú(Interfaz del API)	76
4.42. Gráfico de costos óptimos del Diseño A y B	77
4.43. Gráfico de costos del Diseño A y B	78
A.1. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 01)	86
A.2. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 02)	87
A.3. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 03)	88
A.4. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 04 al N° 15)	89
A.5. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 01)	90
A.6. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 02)	91
A.7. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 03)	92
A.8. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 04)	93
A.9. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 05)	94
A.10. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 06)	95
A.11. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 07)	96
A.12. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 08)	97
A.13. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 09)	98
A.14. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 10)	99
A.15. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 11)	100
A.16. Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 12 al 15)	101

Índice de acrónimos

- LBMS* — Sistema de gestión basado en la localización (Location Based Management System).
- RNA* — Redes neuronales artificiales (Artificial Neural Network).
- CPM* — Método de la ruta crítica (Critical Path Method).
- PERT* — Técnicas de Revisión y Evaluación de Proyectos (Project Evaluation and Review Techniques).
- PMBOK* — Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Project Management Body of Knowledge) .
- GA* — Algoritmos genéticos (Genetic Algorithm).
- MSE* — Error medio cuadrático (Mean Squared Error).
- AE* — Error absoluto (Absolut Error).
- SD* — Desviación estándar (Standard deviation).
- SCT* — Suma de cuadrados total.
- SCE* — Suma de cuadrados explicada.
- SCR* — Suma de cuadrados residual.

Índice de símbolos

R	—	Coeficiente de correlación lineal.
p_i^{norm}	—	Dato normalizado.
p_i	—	Dato original.
TP	—	Tiempo previsto.
TR	—	Tiempo real.
α	—	Porcentaje de confiabilidad.
n	—	es el Número de muestras.
k	—	es el Número de variables.
$q_{i+1,i+1}$	—	Elementos de la diagonal principal de $[X'X]^{-1}$.
S_R	—	Varianza del error aleatorio.
t	—	t-Student.
F	—	F de Snedecor.

Capítulo I: Planteamiento del Problema

1.1. Descripción del problema

Muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza y dentro del campo de la hidráulica son tan complejos que no es fácil tratarlos únicamente con métodos matemáticos. Por lo anterior es conveniente recurrir al empleo de técnicas numéricas y de inteligencia artificial como herramienta en la obtención de soluciones prácticas aplicadas a problemas de infraestructuras urbanas muy importantes como son las redes de distribución de agua cuya construcción requiere grandes inversiones para minimizar los costos y maximizar la sostenibilidad de la infraestructura y ayudar a encontrar las mejores decisiones con respecto a su disposición, diseño y funcionamiento.

El agua que transcurre por una tubería es un medio continuo constituido por un número casi infinito de partículas. Determinar el diámetro óptimo que permita el pase de este flujo es un desafío. El diseño óptimo de redes de distribución de agua potable depende de la solución de ecuaciones que tiene una relación no lineal entre el flujo, pérdidas de carga, diámetros comerciales y los costos de las tuberías, y debido a su complejidad es un problema del tipo NP-hard y en la actualidad el diseño de sistemas de distribución de agua se realiza utilizando métodos basados en “Ensayo y Error”, un método que no tiene ningún criterio de optimización económica, lo cual conlleva a diseños funcionales desde el punto de vista hidráulico con unos costos bastante elevados, además el tiempo computacional requerido puede ser demasiado alto hasta encontrar una solución adecuada que cumpla con los rangos permisibles de presión y velocidades de acuerdo a la norma peruana.

En consecuencia, se trata de un problema no lineal de enteros mixtos cuya solución no es trivial. Para este tipo de problemas, las metaheurísticas son métodos de resolución adecuados debido a su capacidad para explorar el espacio de búsqueda con el fin de encontrar una solución óptima. En el presente trabajo de investigación, para abordar el problema de diseño óptimo de redes de distribución de agua de costo mínimo, bajo las restricciones impuestas se utilizará la búsqueda tabú, que es una metaheurística que guía un procedimiento heurístico de búsqueda local en la búsqueda de un óptimo global.

1.2. Delimitación del problema

El proceso de optimización se lleva a cabo generalmente a partir de un sistema de distribución de agua potable de tipo cerrada o mallada.

1.2.1. Espacial

La red de distribución de agua considerado para la aplicación del presente trabajo de investigación corresponde al proyecto "Mejoramiento y rehabilitación del sistema de saneamiento básico del barrio San Martín, Distrito de Socos- Huamanga- Ayacucho", que se encuentra ubicado es el Distrito de Socos, Provincia de Huamanga, Región Ayacucho.

1.2.2. Temporal

Los datos que serán considerados para la realización del trabajo de investigación están enmarcados dentro del periodo actual (2023).

Para la elaboración del estudio factibilidad del proyecto del sistema de agua potable fue necesario hacer el Cálculo de población futura de la localidad de San Martín hacia el 2043 (periodo de diseño de 20 años).

1.2.3. Temática y unidad de análisis

Temática: Optimización de sistema de distribución de agua potable.

Unidad de análisis: Costo mínimo del sistema de agua potable; así también el cumplimiento de las propiedades hidráulicas según las restricciones del Reglamento Nacional de Edificaciones (OS.050⁷)

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Es posible optimizar el diseño de una red de distribución de agua potable, empleando el algoritmo de Búsqueda Tabú en el Matlab, cumpliendo con las restricciones técnicas y normativas existentes?

1.3.2. Problemas específicos

1. ¿Habrá diferencia significativa en la comparación de resultados de costos de una red de distribución de agua potable sin optimización y una red optimizada con el algoritmo

⁷OS.050 Redes de distribución de agua para consumo humano

de Búsqueda Tabú?

2. ¿Habrá una relación entre el criterio de parada(número máximo de iteraciones) y la Lista Tabú?
3. ¿Cómo influye la elección de un diseño inicial en la optimización con el Algoritmo Búsqueda Tabú?

1.4. Justificación e importancia

La gestión del agua, en todos los países del mundo, precisa de una gran dosis de innovación. Con los avances actuales y desarrollos tecnológicos las empresas del sector de agua potable y saneamiento básico y en especial aquellas dedicadas a la producción y distribución de agua potable deben utilizar metodologías sofisticadas y disponer de modelos hidráulicos lo suficientemente eficientes y confiables como para poder tomar decisiones a partir de las simulaciones de estos. Durante los últimos treinta años, gran parte de la atención de los ingenieros hidráulicos se ha centrado en el desarrollo de técnicas de diseño y análisis de redes de distribución de agua, tanto de una nueva red de distribución como de ampliaciones de redes ya existentes, que implica importantes costos de inversión y mantenimiento, lo que obliga a cuidar con atención su diseño (configuración y dimensionamiento) así como las condiciones de operación. A través del tiempo se han desarrollado metodologías, técnicas y diferentes algoritmos para minimizar los costos de diseño de un sistema de abastecimiento de agua utilizando técnicas matemáticas tales como la programación lineal y no lineal y la programación dinámica entre otros, sin embargo estas técnicas de programación matemática han ido perdiendo importancia frente a un nuevo conjunto de técnicas metaheurísticas. Con el interés de desarrollar métodos alternativos y automatizados que sirvan para diseñar sistemas de agua potable, se ha escogido como método principal de solución del problema abordado en esta tesis al Algoritmo de Búsqueda Tabu, bajo un compromiso de innovación, dado que el diseño y la optimización son dos de los pilares de la ingeniería, y la madurez que han alcanzado ambas tecnologías permite que los ingenieros puedan abordar en la actualidad problemas cada vez más complejos.

Además la investigación se justifica porque se considera un aporte en los siguientes aspectos:

1.4.1. Valor teórico

Se desarrollará un modelo de optimización metaheurística de sistemas de redes de agua potable usando el algoritmo de búsqueda tabú para redes complejas con el fin de promover su implementación computacional y matemática en la ingeniería hidráulica.

1.4.2. Relevancia social

Los resultados de la investigación ayudará a planificar, diseñar y gestionar los sistemas de agua potable a las empresas, instituciones publicas y privadas dedicadas a la formulación y ejecución de proyectos de abastecimiento de agua y los recursos hídricos. por lo tanto la presente investigación se justifica porque contribuye con el bienestar de la sociedad en su conjunto a largo plazo.

1.4.3. Implicaciones prácticas

Con la aplicación del modelo de optimización metaheurística basado en el algoritmo de búsqueda tabu se tendrá sistemas de agua potable de costo mínimo con diámetro óptimos de las tuberías, así mismo los parámetros hidráulicos como las presiones y velocidades estarán dentro de los rangos permisibles exigidos cumpliendo con las exigencias de las normas. Esto permitirá gestionar adecuadamente sobre el recurso agua y contribuirá al desarrollo sostenible.

1.4.4. Tecnológica

A nivel matemático y computacional en la presente tesis se utilizará una herramienta tecnológica con pocas aplicaciones en la ingeniería hidráulica denominado algoritmo de búsqueda tabu, por lo tanto, sera un aporte importante sobre la moderación y simulación de sistemas de agua potable utilizando inteligencia artificial.

1.5. Limitaciones de la investigación

Las limitaciones que tiene este trabajo de investigación, en cuanto a espacio, tiempo, contenido y alcances para el desarrollo del mismo, son los que se citan a continuación.

- El tamaño de la muestra corresponde a un sistema de agua potable de la zona de aplicación.
- La optimización con el Algoritmo Búsqueda Tabú solo se realizará en tipo de redes cerradas.
- La optimización del sistema de agua potable solamente se considera minimizar el costo de las tuberías.
- La optimización del sistema solo es para tuberías de material PVC de clase 10.
- No se tendrá en consideración la presencia de válvulas ni bombas en el sistema de agua a optimizar.

- Escasez bibliográfica sobre el Algoritmo de Búsqueda Tabú aplicado en la optimización de redes de distribución de agua potable.

1.5.1. Objetivo general

Optimizar el diseño de una red de distribución de agua potable empleando el algoritmo de Búsqueda Tabú en el Matlab, cumpliendo con las restricciones técnicas y normativas existentes.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Comparar los resultados de costos de una red de distribución de agua potable sin optimización y una red optimizada con el algoritmo de Búsqueda Tabú.
2. Determinar la relación entre el Criterio de Parada (número máximo de iteraciones) y la Lista Tabú.
3. Evaluar la influencia de la elección de un diseño inicial en la optimización de red distribución de agua potable con el Algoritmo Búsqueda Tabú.

Capítulo II: Marco Teórico.

2.1. Antecedentes

La era de la optimización comenzó con Pitágoras de Samos (569AC a 475AC), un filósofo griego que hizo importantes desarrollos en las matemáticas, la astronomía y la teoría de la música. A menudo se lo describe como el primer matemático puro. Desde el principio la Optimización ha sido considerado como una disciplina matemática referido al hallazgo de los extremos (mínimos y máximos) de números, funciones o sistemas. Los grandes filósofos y matemáticos antiguos crearon sus fundamentos al definir el óptimo (como extremo, máximo o mínimo) sobre varios dominios fundamentales, como números, formas geométricas, óptica, física, astronomía, la calidad de la vida humana y el estado (Kiranyaz et al., 2014).

Desde tiempos inmemoriales se sabe que el ser humano por naturaleza somos optimizadores, ya que todos tomamos decisiones con el único propósito de maximizar nuestra calidad de vida, la productividad en el tiempo, así como nuestro bienestar de una manera u otra. Dado que esta es una lucha constante para crear el mejor diseño posible entre muchos inferiores, la optimización fue, es y siempre será el requisito básico de la vida humana y este hecho produce el desarrollo de una gran cantidad de técnicas en esta área, comenzando desde tempranas edades de la civilización hasta ahora (Kiranyaz et al., 2014).

Los métodos analíticos para el diseño y la planificación operativa de los sistemas de abastecimiento de agua tienen una larga historia impulsada por el desarrollo de la potencia informática del siglo XX, la investigación centrada en el desarrollo y el uso de métodos de análisis de sistemas relacionados con las redes de distribución de agua ha crecido rápidamente. Este trabajo de investigación no pretende proporcionar una revisión detallada de un número tan grande de publicaciones de optimización, ya que se pueden encontrar fácilmente en la literatura. En la Tabla 2.3 se resalta cronológicamente algunos desarrollos importantes a lo largo del tiempo.

Tabla 2.3: Revision de la literatura

Autor(es), Año	Titulo	Periodo de tiempo
Shamir (1974)	Diseño óptimo y operación de los sistemas de distribución de agua	1961-1972
Shamir (1979)	Optimización en ingeniería de sistemas de distribución de agua	1963-1977
Walski (1985)	Estado del arte de la optimizacion de redes de tuberías	1931-1939 1968-1985
Lansey y Mays (1989)	Modelos de optimización para el diseño de sistemas de distribución de agua	1939, 1961-1988
Walters (1992)	Una revisión de las técnicas de optimización de redes de tuberías	1966-1991
Goulter (1992)	Análisis de sistemas en el diseño de redes de distribución de agua. De la teoría a la práctica	1969-1991
Walters y Cembrowicz (1993)	Diseño óptimo de redes de distribución de agua	1966-1992
Dandy et al. (1993)	Una revisión de las técnicas de optimización de redes de tuberías	1936, 1963–1992
Ostfeld y Shamir (1993)	Incorporación de confiabilidad en el diseño óptimo de redes de distribución de agua: revisión y nuevos conceptos	1972-1992
Ormsbee y Lansey (1994)	Control óptimo del sistema de bombeo de suministro de agua	1968-1994
Simpson et al. (1994)	Los algoritmos genéticos comparados con otras técnicas de optimización de tuberías	1973-1992
Engelhardt et al. (2000)	Estrategias de rehabilitación para redes de distribución de agua: una revisión de la literatura con una perspectiva del Reino Unido	1972-1999
Lansey (2008)	La evolución de la aplicacion a la optimización de sistemas de distribución de agua	1939, 1961–2006
Savic et al. (2009)	¿Calibración del modelo de distribución de agua de Quo vadis?	1974-2008
Mala-Jetmarova et al. (2017)	¿Perdido en la optimización de los sistemas de distribución de agua? Una revisión de la literatura sobre el funcionamiento del sistema.	1969-2016

Fuente: Adaptado de Savić, Mala-Jetmarova et al. (2018)

2.1.1. Investigaciones internacionales

Da Conceicao Cunha y Ribeiro (2004), propusieron un algoritmo de búsqueda tabú para encontrar el diseño de menor costo de las redes de distribución de agua cerrada. El modelo propuesto fue aplicado a la red Hanoi y otras redes teóricas de carácter académico y clásicas

que aparecen en la literatura y manifiestan que el ajuste suave de sus parámetros permite lograr soluciones de alta calidad y los resultados obtenidos revelan la capacidad del algoritmo para hacer frente a las características combinatorias de este problema. Así mismo indican algunas mejoras en los resultados obtenidos con los algoritmos de búsqueda tabú. Por otro lado, presentaron las características esenciales del algoritmo y los resultados son muy prometedores y demuestran la utilidad de los algoritmos de búsqueda tabú para resolver este tipo de problema de optimización.

Fanni et al. (2000), desarrollaron una técnica de optimización de Tabu Search para diseñar, planificar y mantener los sistemas de distribución de agua. Para abordar el problema establecieron una gran cantidad de variables, como la ubicación y los diámetros de las nuevas tuberías, las operaciones en las tuberías existentes, teniendo en consideración que las variables es de naturaleza discreta, debido al hecho de que las tuberías están disponibles con dimensiones enteras. Así mismo, consideraron una función objetivo a minimizar, es decir, el costo total de la planta, de naturaleza no lineal, no diferenciable, que presenta una gran cantidad de mínimos locales. Los resultados de esta investigación muestran una flexibilidad y eficacia del algoritmo de Búsqueda Tabu para el diseño de sistemas de distribución de agua y demostrar.

Gao y Gao (2013), han propuesto un método de partición de grafos basado en la coordinación y optimización del algoritmo de partición de grafos constructivo y el algoritmo de búsqueda tabú y obtienen unos algoritmos de partición de grafos de buena eficiencia y calidad. En la parte experimental del problema de partición de la red de distribución óptica se transforma en un modelo de partición de gráficos. Los resultados experimentales muestran que la eficiencia y la calidad del método de partición son aceptables en la división de la red de distribución óptica.

Sung et al. (2007), afirman que la optimización de las redes de distribución de agua son problemas complejos, multimodales y de variables discretas que no se pueden resolver fácilmente con los algoritmos de optimización convencionales. En su trabajo de investigación adoptan el algoritmo de búsqueda tabú (TS), que es un método evolutivo basado en sistemas de memoria explícita y varias estrategias de búsqueda diseñadas para evitar las trampas de las soluciones locales, para obtener los diseños de menor costo de redes de distribución de agua cerrada. También utilizaron como estudios de caso a dos problemas de optimización de la red de distribución de agua referenciales bien conocidos (redes de Hanoi y Nueva York), así como un diseño mucho más complicado (red de Taichung). Al comparar los resultados de este estudio con datos de la literatura relevante sugieren que TS es una técnica atractiva para optimizar los diseños de redes de distribución de agua, ya que puede lograr soluciones óptimas con una alta tasa de éxito.

Robles-Velasco et al. (2018), aseveran que el diseño óptimo de un sistema de suministro de

agua es fundamental para minimizar los costos y maximizar la sostenibilidad de la infraestructura. Además, refieren que la mayoría de los problemas futuros relacionados con su funcionamiento y posibles extensiones pueden reducirse significativamente en la etapa de diseño. Según los autores el rendimiento de la red está sujeto a las leyes de equilibrio de flujo y conservación de energía, que representan restricciones no lineales. Además, los diámetros de las tuberías, que deben elegirse de un catálogo comercial, son variables discretas. En consecuencia, se trata de un problema no lineal de enteros mixtos cuya resolución no es trivial. Finalmente utilizaron el algoritmo de búsqueda tabú para diseñar la conocida red de Alperovits y Shamir. Aunque no determinaron el óptimo global, la eficacia del método propuesto está plenamente demostrada. Los resultados son similares a los obtenidos por otras metaheurísticas y los tiempos de resolución son considerablemente más cortos.

Robles (2018), en su trabajo de fin de Máster desarrollo un método de optimización que permite resolver el problema de diseño y planificación de redes hidráulicas de distribución. Implementó un algoritmo de búsqueda tabú ajustando los parámetros a la problemática de estudio. Para la validación del algoritmo ha resuelto el problema de diseño de redes de distribución aplicado a la red de Alperovits. Esta red ha sido utilizada por muchos autores en la literatura, que permitió la comparación de los resultados obtenidos en su trabajo con aquellos que obtuvieron otros autores aplicando otras técnicas de resolución. La ejecución del algoritmo realizó usando el lenguaje de programación Python y, en concreto, una de sus librerías, WNTR, que permite la generación y simulación de redes hidráulicas.

Cabe señalar que la mayoría de las investigaciones encontradas en la literatura están referidas a la solución de problemas académicos y no a problemas reales.

2.1.2. Investigaciones nacionales

Rejas Cano (2014), implementó un algoritmo de Búsqueda Tabú (Tabu Search) de tres fases (Básica, Intensificación y Diversificación) que optimice las utilidades de un portafolio de proyectos de Tecnologías de Información. Para tener la certeza de que la solución obtenida era buena, contrastó con otro algoritmo de relativa complejidad (GRASP construcción) mediante métodos estadísticos, teniendo como resultado que la media del algoritmo de Búsqueda Tabú es mayor y por tanto mejor que la del GRASP. Finalmente, demostró que la solución propuesta, un algoritmo de Búsqueda Tabú para la selección de proyectos de Tecnología de Información, es una opción a tomar en cuenta para la toma de decisiones al momento de armar un portafolio de proyectos que permita a la empresa generar utilidades y ventaja competitiva.

Baba Yamakawa (2015), presenta la metaheurística de Búsqueda Tabú como alternativa de solución para la selección de acciones para formar un portafolio de inversión. Para medir el desempeño del algoritmo Búsqueda Tabú, implementó un algoritmo genético que atacaba el

mismo problema y comparó las soluciones producidas por ambos algoritmos mediante una experimentación numérica. Observó que el algoritmo búsqueda tabú tuvo mejor desempeño que el algoritmo genético produciendo soluciones con mayor rentabilidad esperada y menor riesgo.

Suárez et al. (2010), manifiesta de que el problema de la generación de horarios consiste en la asignación de horas, profesores y aulas para el dictado de las clases, teniendo en consideración diferentes factores como son: disponibilidad de profesores, disponibilidad de aulas, planes de estudio para los diferentes semestres académicos, cruces de horas de dictado entre los diferentes cursos, entre otros. Existe una gran variedad de algoritmos que permiten resolver esta clase de problema. Por las características que presenta la generación de horarios de la Pontificia Universidad Católica del Perú, el autor decidió emplear algoritmos heurísticos en su solución con el objetivo de comparar sus resultados obtenidos luego de emplear la heurística GRASP y la mejora del mismo con la Búsqueda Tabú. Para la prueba de los mismos, diseñó el sistema SchedulePowerSoft, que provee una interfaz para el ingreso de los datos requeridos por los algoritmos y la visualización de los resultados generados.

Mendoza Apaza (2017), aborda una variante del problema de optimización combinatoria del área de Investigación de Operaciones y que también es estudiada por la Inteligencia Artificial; famoso por ser sencillo de enunciar, pero complejo de resolver: “el problema del agente viajero”. En consecuencia, la solución planteada a la planificación de viajes turísticos, fue diseñar e implementar la metaheurística Búsqueda Tabú contemplando las variables propias del lugar de ejecución. Para el desarrollo de la aplicación integrado con el algoritmo adoptó la metodología ágil XP, y para la implementación de la metaheurística utilizó el procedimiento de método TS. El algoritmo lo validó utilizando cinco instancias artificiales definidas en el ámbito científico contrastando con sus mejores resultados obtenidos hasta la fecha; logrando igualar al 60 % de las mejores soluciones. También utilizó información recopilada de los atractivos turísticos ubicados en el distrito de Juli región Puno, y posteriormente en dos sesiones los actores directos del Turismo Rural Comunitario pudieron validar la aplicación web desplegada en un servidor de aplicación.

2.2. Bases teóricas

En la literatura (y principalmente en Internet) es posible identificar varias técnicas de optimización matemática y metaheurística. A lo largo de la historia de la humanidad estas técnicas fueron evolucionando y han sido aplicados a diferentes tipos de problemas de optimización en hidráulica de tuberías. A pesar de su naturaleza nueva y omnipresente, la implementación de los algoritmos de optimización basados en inteligencia computacional es de hecho una técnica relativamente nueva, aunque es difícil precisar cuándo comenzó la historia completa. En consecuencia, Alan Turing fue quizás la primera persona en implementar los algoritmos

de optimización basados en inteligencia computacional. Evidentemente, durante la Segunda Guerra Mundial, al intentar romper la máquina de encriptación de diseño alemán llamada Enigma, Turing desarrolló una técnica de optimización que luego denominó búsqueda heurística, ya que se podía esperar que funcionara la mayoría de las veces, mientras que no había ninguna garantía real para un desempeño exitoso en cada prueba.

2.2.1. Ingeniería de tuberías

Segun Hopkins (2007), la Ingeniería de Tuberías está todavía en la infancia en términos de su corta historia. La primera gran explotación y comercialización mediante tuberías comenzó hace 150 años, y la construcción de tuberías de gran diámetro y larga distancia fue pionera en la década de 1940 . Con la demanda de energía en continuo aumento y la rápida expansión de la red mundial de tuberías, la ingeniería de tuberías surge como una disciplina específica en la década de 1970 (Hopkins, 2007). Al igual que las disciplinas de ingeniería convencionales, la ingeniería de tuberías prevé un número considerable de sub-especialidades, cada una de las cuales se enfoca en su área objetivo esencial y también a menudo se interconectan entre sí, constituye una disciplina de ingeniería diversa y en evolución con contenido sustantivo.

En términos generales, y en el caso específico de la industria del agua para consumo humano, la ingeniería de tuberías es una disciplina que se especializa en el diseño, construcción, operación, inspección, mantenimiento y gestión de la integridad de las tuberías, con el propósito de proporcionar un transporte seguro y confiable del recurso agua mientras se obtienen grandes ahorros económicos. La ingeniería de tuberías se ocupa no solo del transporte de energía mediante la operación de tuberías, sino también de la conservación del medio ambiente, el cambio climático y la seguridad nacional.

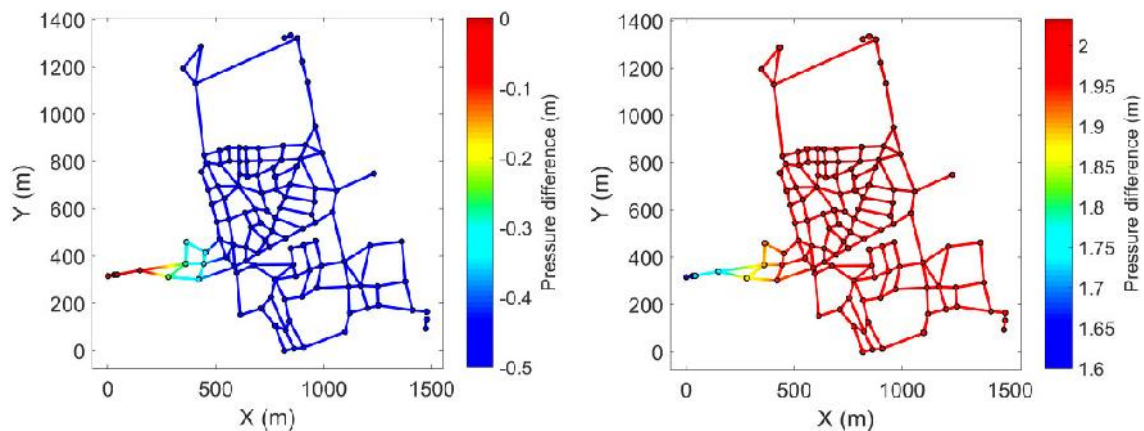
2.2.1.1. Flujo en tuberías

2.2.1.1.1. Definición de tubería: El término tubería Liu (2017), define como un conducto cerrado, generalmente de sección transversal circular. Puede estar hecho de cualquier material apropiado como acero o plástico. La tubería se refiere a una larga línea de segmentos de tubería conectados, con bombas, válvulas, dispositivos de control y otros equipos/instalaciones necesarios para operar el sistema. Está destinado al transporte de un fluido (líquido o gas), mezcla de fluidos, sólidos, mezcla fluido-sólido o cápsulas (recipientes cargados de mercancías o vehículos movidos por fluidos a través de una tubería). El término tubería también implica una tubería relativamente grande que abarca una gran distancia.

2.2.1.1.2. Tipos de tuberías: Las tuberías se pueden clasificar de muchas formas diferentes. Dependiendo del producto transportada, hay tuberías de agua, alcantarillado, tuberías de gas natural, tuberías de petróleo (para petróleo crudo), tuberías de productos (para productos refinados del petróleo como gasolina, diesel o combustible para aviones), tuberías

sólidas (tuberías de carga). para varios sólidos, etc. Liu (2017). Según la mecánica de fluidos los tipos de flujo encontrados, las tuberías se pueden clasificar de flujo incompresible monofásico (como tuberías de agua, oleoductos y alcantarillas), flujo compresible monofásico (tuberías de gas natural, tuberías de aire, etc.), flujo de dos fases de mezcla sólido-líquido (hidrotransporte), flujo de dos fases de mezcla de sólido-gas (neumotransporte), flujo de dos fases de mezcla de líquido-gas (oleoductos y gasoductos), fluidos no newtonianos, y finalmente, el flujo de cápsulas. Este tipo de clasificación es la mejor desde un punto de vista científico (analítico) ya que diferentes tuberías del mismo tipo de flujo están cubiertas por las mismas ecuaciones de mecánica de fluidos Liu (2017).

Figura 2.1: Diferencia de presiones en una red de tuberías de agua potable



Fuente: Adaptado de (Menapace et al., 2018)

2.2.1.1.3. Importancia de la tuberías: Las tuberías son el modo de transporte menos comprendido y menos apreciado. Las tuberías son poco conocidos por el público en general porque a menudo son subterráneos e invisibles, fuera de la vista. A pesar del bajo grado de reconocimiento por parte del público, las tuberías son de vital importancia para el bienestar económico y la seguridad de la mayoría de las naciones. Todas las naciones modernas dependen casi exclusivamente de las tuberías para transportar los siguientes productos básicos:

- Agua de plantas de tratamiento a viviendas individuales y otros edificios.
- Aguas residuales de viviendas a plantas de tratamiento
- Gas natural desde los pozos hasta los consumidores que pueden estar ubicados a más de mil millas de distancia, ya sea una casa, una fábrica, una escuela o una planta de energía.
- Petróleo crudo de campos petroleros a refinerías
- Productos de petróleo refinado (gasolina, diesel, combustible para aviones, combustible para calefacción, etc.) desde refinerías hasta varias ciudades a lo largo de cientos de millas

2.2.1.1.4. Ecuaciones gobernantes: Las leyes fundamentales que describen el flujo en tuberías están representadas por la ecuación de la dinámica y la ecuación de conservación de masa, las que acopladas forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales del tipo hiperbólico casilineal (Chaudhry, 1987). La Ecuación Dinámica (Movimiento) (2.1) y la ecuación de continuidad (2.2), son:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ |Q|}{2DA} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

Reorganizando y reescribiendo las ecuaciones (2.1) y (2.2) en función a la velocidad y re-presentando en forma matricial.

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial H}{\partial t} \\ \frac{\partial V}{\partial t} \end{array} \right\} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{a^2}{g} \\ g & 0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial H}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial x} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{fV|V|}{2D} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

Sin embargo en el presente trabajo de investigación solamente se abordara el flujo en regimen permanente mediante el algoritmo de Búsqueda Tabú, es decir se prescindira del termino temporal en las ecuaciones anteriores.

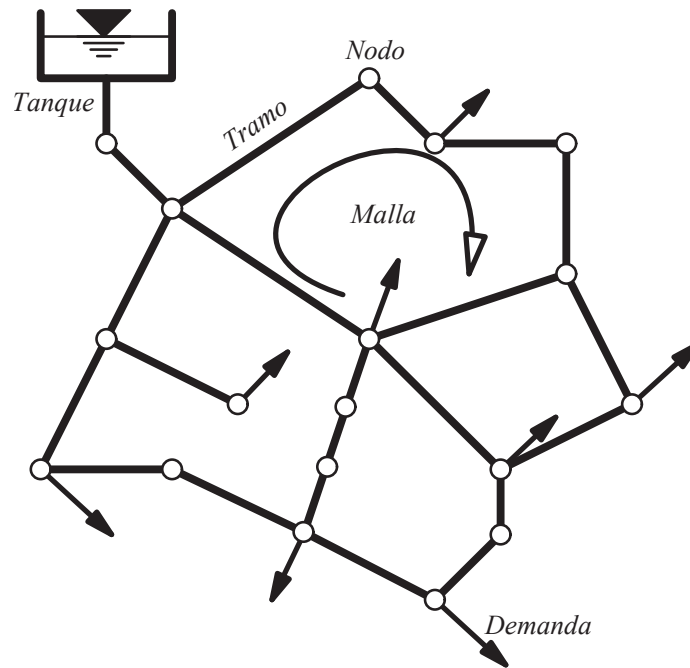
2.2.2. Redes de abastecimiento de agua

Una red de abastecimiento de agua es un sistema de tuberías, diferentes estructuras de control hidraulico lineales conectadas en nodos como se muestra en la Figura 2.2. La configuración de una red de abastecimiento de agua se define por datos topológicos, lo que requiere marcar todos los nodos y tuberias de la red con etiqueta numérica única, como se muestra en las Figura 2.3. Las redes de distribución de agua tienen principalmente los siguientes tres tipos de configuraciones:

- Redes abiertas y en forma de arbol
- Redes cerradas
- Redes mixtas

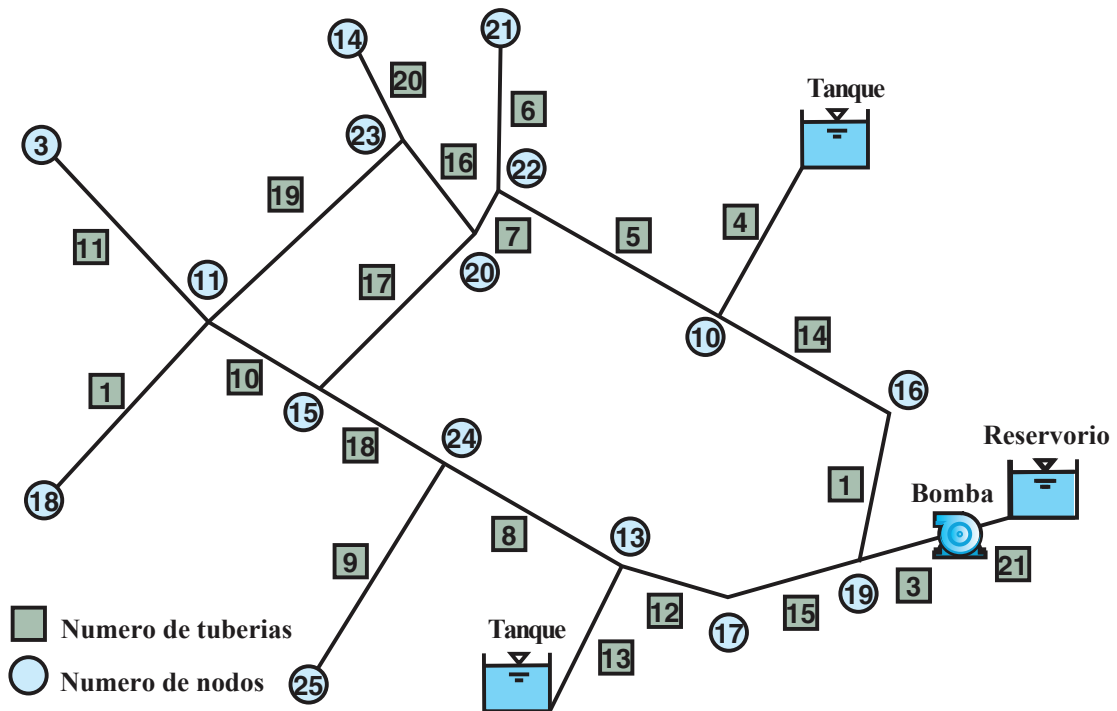
Una red abierta, o red ramificada, es un sistema de distribución que no tiene bucles. Tal red se usa comúnmente para el suministro de agua rural. La red ramificada más simple es una red radial que consta de varias líneas de distribución que emergen de un punto de entrada común como se ve en la Figura 2.4. Una red típica cerrada es la que se muestra en al Figura 2.5, que son las preferidas desde el punto de vista de la fiabilidad. En este tipo de redes, el agua

Figura 2.2: Redes hidráulicas



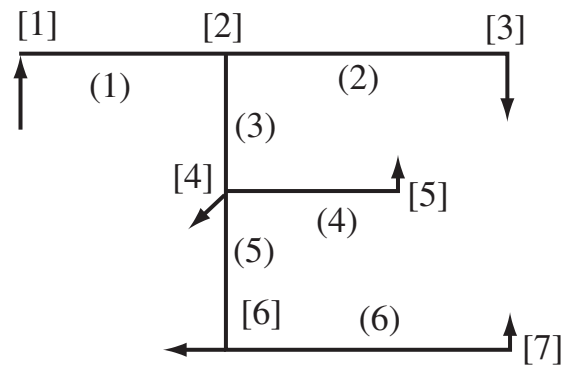
Fuente: Adaptado de (Jovic, 2013)

Figura 2.3: Esquema de una red de tuberías

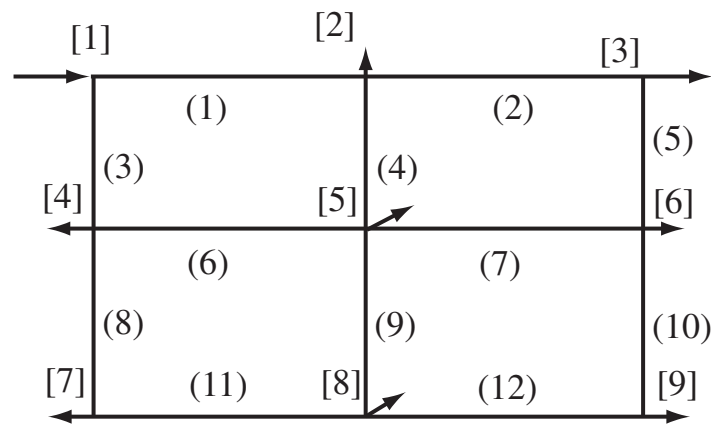


Fuente: Adaptado de (Boulos et al., 2005)

llega al consumidor por una ruta tortuosa que incurre en una mayor pérdida de carga. Esta característica está ausente en una red ramificada. Con el patrón de demanda cambiante, no solo cambian las magnitudes de los caudales sino también las direcciones de flujo en muchas tuberías. Por lo tanto, las direcciones de flujo van cambiando en las redes cerradas.

Figura 2.4: Redes abiertas. 6 tuberías, 7 nodos


Fuente: Adaptado de (Larock et al., 1999)

Figura 2.5: Redes cerradas. 12 tuberías, 9 nodos


Fuente: Adaptado de (Larock et al., 1999)

El análisis de una red de tuberías es uno de los problemas matemáticos más complejos que los ingenieros han enfrentado especialmente si la red es grande, como ocurre en los sistemas de distribución de agua incluso en ciudades muy pequeñas. Una fracción significativa del conjunto completo de ecuaciones consiste en ecuaciones no lineales, y una gran cantidad de estas ecuaciones deben resolverse simultáneamente. Antes de que las computadoras digitales se usaran ampliamente en la práctica de la ingeniería, simplemente no era práctico resolver tales problemas de redes de distribución y, en consecuencia, muchos sistemas de distribución de agua existentes han "crecido" con el tiempo, basándose principalmente en el mejor juicio profesional de los ingenieros, sin ningún análisis completo o detallado.

En cualquier problema de análisis de redes de distribución de agua se conocen todas las características físicas de la red, como longitudes y sus rugosidades, así como dónde se ubican los depósitos, bombas, válvulas reductoras de presión y demás accesorios, además en el análisis mediante los métodos tradicionales se conocen los diámetros de todas las tuberías y el proceso de solución trata de determinar el caudal en cada tubería y la presión, etc. en cada nodo de la red. Sin embargo, utilizando las técnicas de inteligencia artificial los diámetros no se ingresan sino se determinan.

2.2.3. Métodos de optimización metaheurística

Los métodos de optimización metaheurística adquirieron renombre desde la década de los ochenta (aunque algunas de sus ideas son más antiguas), pero no eran fácilmente traducibles en algoritmos útiles porque no se contaba con un potencial de cálculo como el actual. Estas técnicas, propias del ámbito de la inteligencia artificial, suelen inspirarse en procesos de optimización naturales, tales como la teoría de la evolución, el templado de metales o el comportamiento de las colonias de hormigas, entre otros.

Es importante destacar el hecho de que los algoritmos metaheurísticos (por sí solos) no garantizan la optimalidad global de la solución encontrada, sino que su propósito es encontrar una solución cercana al óptimo en un tiempo razonable (Martí, Moreno et al., 2000). Sin embargo, estos métodos están avalados por la gran cantidad de publicaciones en donde problemas de optimización combinatoria de gran dificultad son resueltos con gran rapidez (en muchos casos óptimamente).

El interés de los investigadores del área es el de diseñar métodos generales que sirvan para resolver clases o categorías de problemas. Debido a que estos métodos generales sirven para construir o guiar el diseño de métodos que resuelvan problemas específicos se les ha dado el nombre de metaheurísticos. Los profesores Osman y Kelly (1996) introducen la siguiente definición:

“Los procedimientos metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son ni efectivos ni eficientes. Los metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de: inteligencia artificial, evolución biológica y mecanismos estadísticos”.

2.2.4. Algoritmo de Búsqueda Tabu

La búsqueda Tabu es una metaheurística que guía un procedimiento de búsqueda heurística local para explorar el espacio de la solución más allá de la optimización local. Uno de los componentes principales de la Búsqueda Tabu es el uso de la memoria adaptativa, que crea un comportamiento de búsqueda más flexible. Las estrategias basadas en la memoria son, por lo tanto, el sello distintivo de los enfoques de búsqueda tabú, fundamentados en la búsqueda de “principios integradores”, mediante los cuales se combinan apropiadamente formas alternativas de memoria con estrategias efectivas para explotarla (Glover & Laguna, 1998).

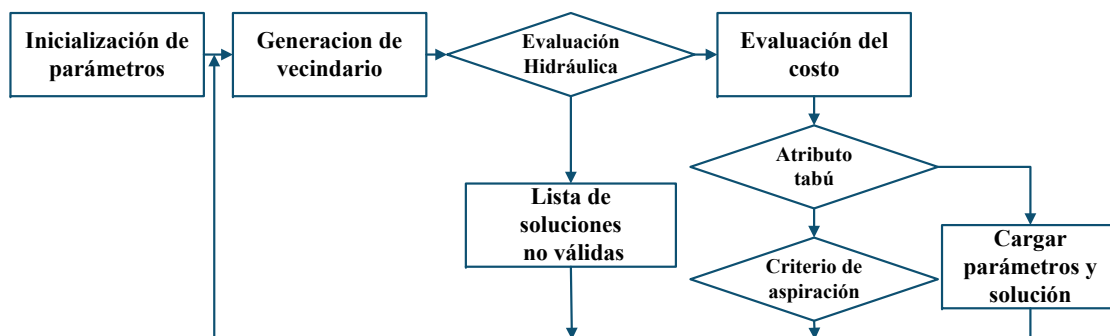
2.2.4.1. Fundamentos del algoritmo Búsqueda Tabu

La búsqueda tabú (TS) es una metaheurística introducida por primera vez por Glover (1986). La principal característica que lo diferencia de otras metaheurísticas es el uso de la memoria

a corto plazo. El espacio de búsqueda se crea por posibles cambios o movimientos de la solución actual. Cuando se logra una nueva solución, el movimiento que la provocó toma el atributo “tabú”, siendo un movimiento prohibido durante un cierto número de iteraciones. Este proceso intenta evitar que las soluciones queden atrapadas en los óptimos locales, que es uno de los mayores desafíos de la metaheurística, al permitir el empeoramiento temporal de las soluciones.

El algoritmo trabaja con soluciones en forma de listas. Cada elemento representa el diámetro asignado a cada arco. La estructura del vecindario se construye mediante la disminución de una unidad de diámetro a la siguiente en el catálogo comercial. También incluye la memoria a corto plazo y un criterio de aspiración que permite alcanzar una nueva solución a pesar de tomar un movimiento tabú si esta nueva solución mejora la mejor solución alcanzada. El problema a abordarse requiere dos funciones de evaluación diferentes. El primero realiza la simulación hidráulica de la red. Si una solución no es válida hidráulicamente, se rechaza y se guarda en una lista para evitar verificar la misma solución más de una vez. Adicionalmente, se incluye un mecanismo que genera nuevas soluciones cuando un vecindario se llena de soluciones no válidas.

Figura 2.6: Diseño del algoritmo de Búsqueda Tabú

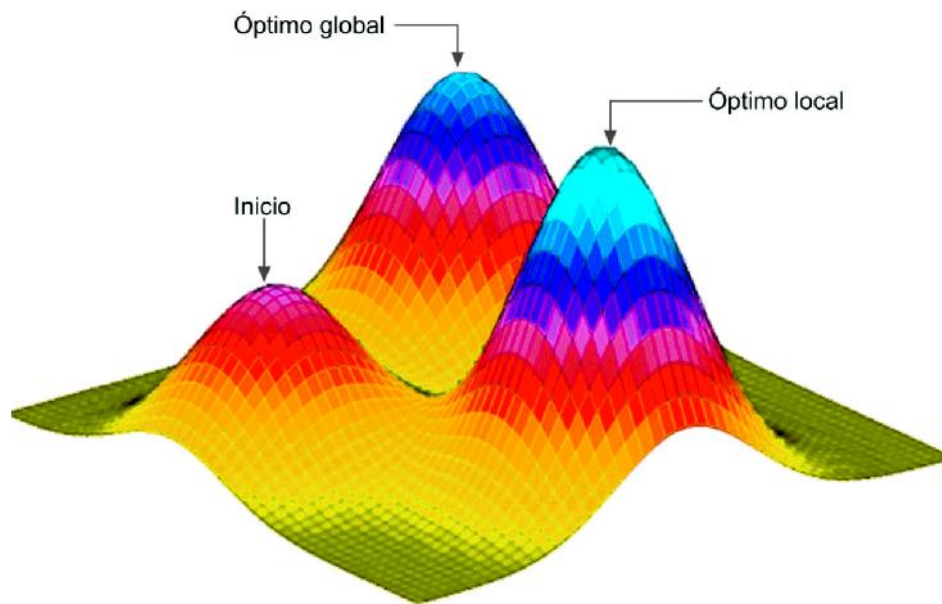


Fuente: Adaptado de (Robles-Velasco et al., 2018)

La segunda función evalúa el costo total de las soluciones hidráulicamente válidas. Todo el proceso se resume en la Figura 2.6, y el número de iteraciones del proceso se establece previamente al máximo.

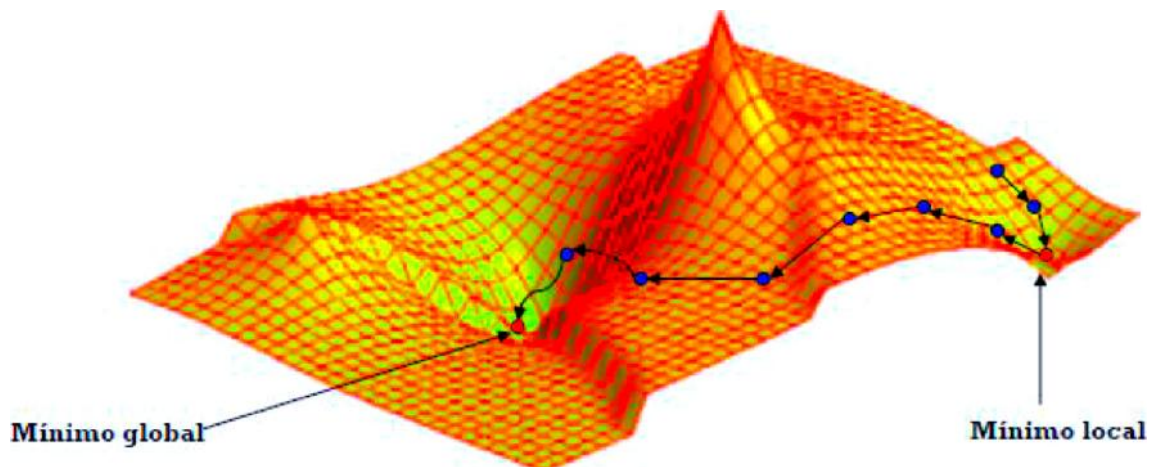
Partiendo de una solución inicial se construye un vecindario de soluciones adyacentes que pueden ser alcanzadas desde la solución actual. La característica principal de esta metaheurística es la prohibición o penalización de ciertos movimientos, lo que reduce el vecindario en cada iteración. Dichos movimientos son marcados como movimientos “tabú” y permanecerán durante un número de iteraciones con dicho atributo. Una vez ese número de iteraciones, inicialmente fijado, ha transcurrido, el movimiento se desprende del atributo “tabú” y puede ser ejecutado de nuevo sin penalización alguna. Este mecanismo recibe el nombre de memoria a corto plazo y su objetivo es evitar los ciclos en la búsqueda de soluciones (Glover, 1986).

Figura 2.7: Superficie de función objetivo de un problema de optimización combinatoria usada en la Búsqueda Tabú



Fuente: Adaptado de (Quevedo Orozco & Ríos Mercado, 2010)

Figura 2.8: Representación de búsqueda del mínimo global



Fuente: Adaptado de (Robles, 2018)

En la Figura 2.8 se observa el recorrido que debe seguir la búsqueda tabú para hallar la mejor solución, u óptimo global, del problema. La búsqueda tabú explora el espacio de búsqueda con mecanismos como la memoria flexible, restricciones estratégicas o niveles de aspiración con el fin de escapar de los óptimos locales y alcanzar el óptimo global. Para ello se permite el empeoramiento de la solución como mecanismo para alcanzar una solución final mejor, en la Figura 2.8 se muestra gráficamente este mecanismo.

2.2.4.2. Características del algoritmo Búsqueda Tabú

Entorno reducido: Al prohibirse ciertos movimientos etiquetados como movimientos tabú, el entorno o vecindario de cada solución se ve reducido y por lo tanto el tiempo total de resolución disminuirá. Es importante fijar el número de iteraciones que un movimiento permanece con el atributo tabú ya que esto influye bastante en los resultados.

Nivel de aspiración: Condición que al satisfacerse permite alcanzar una solución, aunque el movimiento que lleva a dicha solución tenga el atributo tabú.

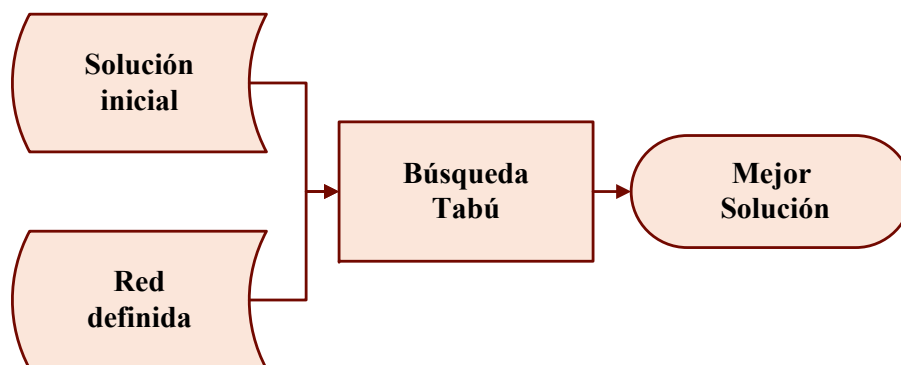
Memoria a corto plazo: Almacena características de las soluciones recientes, por ejemplo, el movimiento en la solución anterior que llevó a la solución actual, para asignarle el atributo tabú y así explorar a fondo una sección del espacio de soluciones.

Memoria a largo plazo: El objetivo es intensificar y diversificar la búsqueda almacenando frecuencia de ocurrencias de ciertas características de las soluciones y aplicando criterios para acotar estas ocurrencias.

Estas características son las más diferenciadoras de la búsqueda tabú con respecto a otras metaheurísticas. No obstante, el algoritmo puede implementarse incluyendo todas o bien solo alguna de las características anteriores, cada problema tendrá unos requisitos diferentes (Robles, 2018).

En la Figura 2.9 se explica el algoritmo de búsqueda tabú diseñado para la resolución del problema de optimización de redes de distribución de agua.

Figura 2.9: Entradas y Salidas de la Búsqueda Tabú



Fuente: Adaptado de (Robles, 2018)

El proceso de optimización mediante el algoritmo de Búsqueda Tabu tiene en consideración los siguientes pasos:

1. Definir parámetros
2. Inicializar

3. Genera Vecindario
4. Evaluación hidráulica
5. Genera Nueva Solución
6. Evaluación del costo
7. Criterio de aspiración

2.2.5. Búsqueda Tabu en los recursos hídricos

La forma básica de la búsqueda tabú (TS) se basa en ideas propuestas por Glover (1986). El método se basa en procedimientos diseñados para cruzar los límites de la viabilidad o la optimalidad local, en lugar de tratarlos como barreras.

Hoy, la optimización en el diseño y la gestión de los recursos hídricos es una alternativa tecnológica en el desarrollo sostenible. Durante los últimos 20 años la optimización por la búsqueda tabú ha tenido considerables avances y aplicaciones en los recursos hídricos y en la planificación y gestión ambiental. Las diferentes versiones TS han demostrado ser flexibles y poderosas para resolver un gran número de problemas de recursos hídricos espacialmente y temporalmente complejos en dominios discretos y continuos con objetivos únicos y/o múltiples.

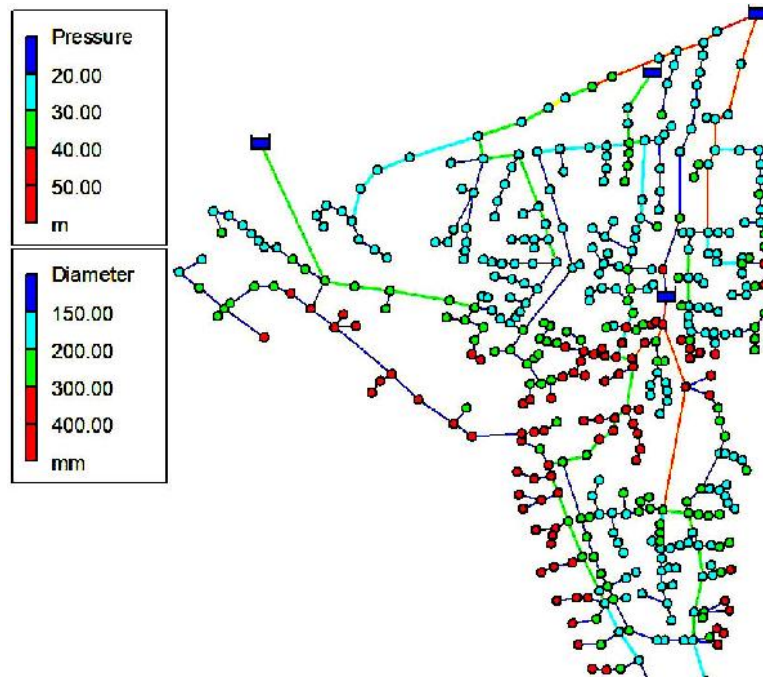
Diferentes autores desde Fanni et al. (2000) propusieron y aplicaron diferentes versiones del algoritmo original de la búsqueda tabú para resolver problemas de optimización de redes de distribución de agua resolviendo redes conocidas en la literatura clásica como las redes de Hanoi, Nueva York, Taichung, Alperovits y Shamir (Da Conceicao Cunha & Ribeiro, 2004; Fanni et al., 2000; Gao & Gao, 2013; Robles, 2018; Robles-Velasco et al., 2018; Sung et al., 2007). Sin embargo hasta la actualidad no se ha desarrollado modelos de alta resolución y de aplicación práctica para sistemas de redes de distribución de agua.

2.2.6. Modelo matemático de la búsqueda tabu

Los modelos de diseño de redes de distribución de agua buscan minimizar los costos de implementación de la red. En esta investigación no se incluye ningún término de penalización, mas bien se incluyen restricciones (Robles-Velasco et al., 2018).

Función objetivo

$$\text{Minimizar} = f(\phi_{1k}, \phi_{2k} \dots \phi_{Ak}) = \sum_{j \in A} C(\phi_{jk})L_j \quad (2.4)$$

Figura 2.10: Aplicación de búsqueda tabu y Optimización por enjambre de partículas


Fuente: Obtenido de (Macêdo et al., 2021)

Restricciones

$$\sum_{\forall j \in I_i} q_j - \sum_{\forall j \in O_i} q_j = d_i \quad \forall i = 1 \dots N \quad (2.5)$$

$$\sum_{\forall j \in M} H_{jk} = 0 \quad \forall m = 1 \dots M \quad (2.6)$$

$$h_i = h_{i-1} - H_{jk} \quad \forall i = 2 \dots N, J \in I_i \quad (2.7)$$

$$h_i \geq h_i^{\text{mín}} \quad \forall i = 2 \dots N \quad (2.8)$$

$$\phi_{jk} \in K; \quad q_j \in R; \quad h_i \in R \quad (2.9)$$

Donde:

N : Conjunto de nodos (tanto de consumo como nodo fuente).

I_i : Conjunto de arcos de entrada al nodo i . $\forall i = 1, \dots, N$.

O_i : Conjunto de arcos de salida del nodo i . $\forall i = 1, \dots, N$.

A : Conjunto total de arcos.

M : Conjunto de mallas.

K : Conjunto disponible de diámetros comerciales.

d_i : Demanda del nodo i . $\forall i = 1, \dots, N$.

L_j : Longitud del tramo o arco j . $\forall j = 1, \dots, A$.

$C(\phi_{jk})$: Coste unitario de tubería para el diámetro ϕ_k . $\forall k = 1, \dots, K$.

ϕ_{jk} : Diámetro $k \in K$, gama de diámetros comerciales, asignado al tramo j .

q_j : Caudal en el tramo j .

h_i : Presión en el nodo i .

H_j : Caída de presión en el arco j .

El objetivo final del modelo es encontrar los diámetros óptimos de cada tubería de la red que minimicen los costos totales (2.4) y satisfagan una serie de limitaciones técnicas. Además, los diámetros, que son las principales variables, son discretos porque hay que elegirlos entre un conjunto de diámetros comerciales. El rendimiento de la red está sujeto a las leyes de equilibrio del flujo (2.5) y conservación de energía (2.6). La presión de cada nodo se calcula mediante la presión de un nodo vinculado menos la caída de presión en el arco que conecta ambos nodos (2.7). Además, todos deben ser iguales o superiores a una presión mínima de acuerdo a la norma peruana, h_{min} (2.8).

Capítulo III: Método de la Investigación

3.1. Enfoque

En enfoque de esta investigación es del tipo **cuantitativo**, abordándose un tema delimitado y específico de optimización de redes de distribución de agua, de donde se han derivado los objetivos y preguntas de investigación, se revisó la literatura y se construyó un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se estableció la hipótesis y determinaron las variables; se trazó un plan para probarlas (diseño); se midieron las variables en un determinado contexto; se analizaron las mediciones obtenidas para obtener una serie de conclusiones respecto de las hipótesis propuestas.

3.2. Alcance

El alcance de la investigación nos indicará el resultado, lo que se obtendrá a partir de ella y condicionará el método que se seguirá para obtener dichos resultados. Esta investigación es del tipo **Correlacional**; pues se tiene como finalidad establecer el grado de relación o asociación no causal existente entre dos o más variables. Se caracteriza porque primero se miden las variables y luego, mediante pruebas de hipótesis correlacionales y la aplicación de técnicas estadísticas, se estima la correlación.

3.3. Diseño de investigación

La investigación desarrollada aquí es de tipo **no experimental**, pues los hechos y las variables ya ocurrieron, y esta investigación observa variables. La investigación no experimental, podría definirse como la investigación que se realiza sin manipular deliberadamente variables decir, se trata de estudios en los que no hacemos variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables.

Los parámetros de diseño para la proyección de un sistema de agua potable están especificados en el Reglamento Nacional de Edificaciones.

■ II.3 Obras de Saneamiento

- **OS.010** Captación y conducción de agua para consumo humano.
- **OS.030** Almacenamiento de agua para consumo humano.
- **OS.050** Redes de distribución de agua para consumo humano.
- **OS.100** Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población.

Según Tamayo (2007), la población es la totalidad de un fenómeno de estudio, incluye la totalidad de unidades de análisis o entidades de población que integran dicho fenómeno y que debe cuantificarse para un determinado estudio integrando un conjunto N de entidades que participan de una determinada característica y se le denomina población por constituir la totalidad del fenómeno adscrito a un estudio o investigación.

En el presente trabajo de investigación se ha tenido en cuenta la importancia de los sistemas de distribución de agua, que están directamente relacionados con el desarrollo socio económico y local de la Provincia de Huamanga. Así mismo para la selección de la población se ha tenido en consideración los antecedentes y severidad de las sequías y sobre su probabilidad de ocurrencia en la localidad de San Martín. Por lo tanto la población en este caso es el sistema de agua potable del proyecto: "Mejoramiento y rehabilitación del sistema de saneamiento básico del barrio San Martín, Distrito de Socos- Huamanga- Ayacucho".

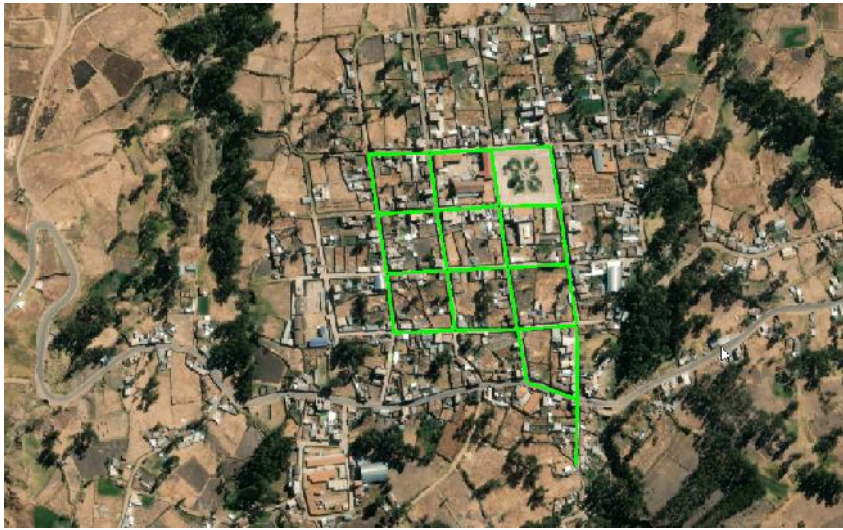
3.4.1.1. Unidad de muestreo

La unidad muestral corresponde a la red de tuberías del sistema de agua potable de la Localidad de San Martín, distrito de Socos - Huamanga - Ayacucho. El criterio fundamental para la selección de la muestra ha sido la disponibilidad de datos de caudales de demanda, datos topológicos y costos de las tuberías instaladas, las mismas que son seleccionadas tomando en cuenta la importancia desde el punto de vista de abastecimiento, desarrollo social y económico. La identificación de las unidades de muestreo quedan especificadas en la Figura 3.11.

3.4.1.2. Unidad de análisis.

La unidad de análisis son las tuberías desde las cuales se registran las unidades de análisis, éste se corresponde directamente con el registro de datos topológicos, caudales de demanda,

Figura 3.11: Unidades de muestreo de la red agua potable de la Localidad de San Martín



Fuente: Google Earth

costos y otro datos inherentes en la al problema de optimización de redes de distribución de agua.

3.4.1.3. Delimitación de la población

La delimitación de las características de la población no sólo depende de los objetivos de la investigación, sino de otras razones prácticas. Un estudio no será mejor por tener una población más grande; la calidad de un trabajo investigativo estriba en delimitar claramente la población con base en el planteamiento del problema (Hernández et al., 2014). Este trabajo de investigación se desarrollará sobre el sistema de distribución de agua de la localidad de San Martín, distrito de Socos - Huamanga - Ayacucho, por lo tanto la población es el sistema de agua potable del proyecto: "Mejoramiento y rehabilitación del sistema de saneamiento básico del barrio San Martín, Distrito de Socos- Huamanga- Ayacucho", seleccionados por la disponibilidad de datos y otros parámetros sociales, económicos y ambientales asociados a la ingeniería hidráulica, además, se tiene en cuenta la importancia local del desarrollo socio-económico del distrito de Socos. Bajo esta consideración el modelo metaheurístico basados en el algoritmo de Búsqueda Tabú se aplicará a esta RED para el diseño y optimización de las tuberías de costo mínimo. El periodo de registro de las unidades de análisis corresponden al año 2023.

3.4.2. Muestra del estudio

La muestra se determina a partir de la población cuantificada para una investigación, cuando no es posible medir cada una de las entidades de población; esta muestra, se considera, es representativa de la población . Para hacer una generalización exacta de una población es necesaria una muestra totalmente representativa y, por lo tanto, la validez de la genera-

lización depende de la validez y tamaño de la muestra (Tamayo, 2007). En este trabajo de investigación la muestra es igual a la población, es decir que la muestra es el “Sistema de Distribución de Agua Potable de la Localidad de San Martín , distrito de Socos - Huamanga - Ayacucho”, por lo tanto, el tipo de muestra es no probabilístico, también llamadas muestras dirigidas, subgrupo de la población en la que la elección de los elementos no depende de la probabilidad sino de las características de la investigación (Hernández et al., 2014).

3.4.2.1. Método de selección de la muestra

En las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o de quien hace la muestra (Hernández et al., 2014).



Figura 3.12: Toma de Datos de la Localidad de San Martín - Socos.

Aquí el procedimiento no es mecánico ni con base en fórmulas de probabilidad, sino que depende del proceso de toma de decisiones del investigador o de un grupo de investigadores y desde luego, las muestra seleccionada obedecen a los criterios del investigador y estos pueden fundamentados en diversos aspectos como el valor ambiental, la importancia de la localidad, accesos, disponibilidad para la medición y toma de datos, etc.

3.4.2.2. Tamaño de muestra

Teniendo en cuenta los criterios antes mencionados la muestra se elige de acuerdo a la conveniencia del investigador. Por lo tanto, el tamaño de la muestra es de 1 sistema de agua

potable de la localidad de San Martín, que se encuentra en el Distrito de Socos, Provincia de Huamanga, Región Ayacucho, que representan la red de distribución de agua de las unidades de análisis concernientes a la investigación.

3.5. Hipótesis

3.5.1. Hipótesis general

El Algoritmo Búsqueda Tabú nos permite optimizar el diseño de una red de distribución de agua potable cumpliendo las restricciones de las normativas existentes. Mediante la aplicación elaborado en el Matlab se calcula la solución óptima y así también el conjunto de diámetros óptimos.

3.5.2. Hipótesis específicas

1. Hay una diferencia significativa entre costo de la red optimizada y la red no optimizada (diseño inicial).
2. El número máximo de iteraciones depende de la cantidad de búsquedas de soluciones (Lista Tabú) realizadas hasta encontrar la solución óptima.
3. La elección de un diseño inicial define la cantidad y la calidad de soluciones al optimizar mediante el Algoritmo Búsqueda Tabú. Esto también permitirá encontrar la solución óptima en la búsqueda local o global.

3.6. Operacionalización de variables

3.6.1. Variables

Una variable es una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de medirse u observarse (Hernández et al., 2014). Por otro lado otros autores definen las variables como las características, rasgos, o propiedades de los elementos de la muestra o universo en estudio. La característica de las variables es que son medibles, directa o indirectamente mediante indicadores, por lo que cada elemento del conjunto tiene un valor diferente para cada una de sus variables. Existen básicamente tres variables que participan de todo proceso de investigación: Independientes, dependientes e intervinientes.

Considerando el problema de optimización de sistemas de distribución de agua; las variables en el presente trabajo de investigación, se clasifican en:

Variabes independientes: Las variables directas involucradas en el presente trabajo de investigación es: Algoritmo Búsqueda Tabú y los parámetros diseño inicial.

Variabes dependientes: Estas dependen de la acción (intensidad o característica) de la variable independiente. Las variables dependientes son: Red distribución de agua optimizada (costo mínimo y diámetros óptimos), determinadas con el algoritmo de búsqueda tabú, cumpliendo las restricciones técnicas de la Normativa Peruana.

Tabla 3.4: Variables e Indicadores

	Variabes	Indicadores	Medición
Dependientes	Red de distribución de agua optimizada	Costo Mínimo	<i>Soles (S/)</i>
		Diámetros óptimos	<i>mm</i>
	Restricciones	Velocidad (V)	<i>m/s</i>
		Presión (P)	<i>mH₂O</i>
Independientes	Algoritmo Búsqueda Tabú	Lista Tabú	<i>Iteraciones</i>
	Parámetros de diseño inicial	Demanda de consumo de agua (Q)	<i>m³/s</i>
		Coordenadas UTM de los nodos de la red de distribución de agua	<i>m</i>
		Diámetros comerciales	<i>mm</i>
		Solución inicial (Costo)	<i>Soles (S/)</i>

Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Indicadores

Al referirnos a los conceptos indicamos que estos no son observables directamente (García, 2008). Por lo tanto, se deben buscar procedimientos que permitan la medición indirecta mediante manifestaciones externas, empíricas y observables. Tales manifestaciones o expresiones reciben el nombre de indicadores. Los indicadores tienen como principal función señalar datos, procedimientos a seguir, fenómenos, situaciones específicas.

- **Indicador asociada a la variable independiente.** Diámetros comerciales, solución inicial (Costo), demanda de consumo de agua (m³/s), coordenadas UTM de los nodos de la red de distribución (m) y el número de iteraciones realizadas por el Algoritmo Búsqueda Tabú para encontrar la solución óptima.
- **Indicador asociada a la variable dependiente.** Diámetros óptimos (mm), presiones y velocidades permisibles en la red (mH₂O, m/s), y la solución optima (Costo mínimo y diámetros óptimos) encontrada por el Algoritmo Búsqueda Tabú.

En la Tabla 3.4 muestra en resumen, la relación entre las variables e indicadores identificados

en la presente investigación.

3.7. Técnicas e instrumentos

En correspondencia al enfoque de la investigación desarrollada (cuantitativo), se trabajan con registros cuantitativos y para la recolección de los datos es importante tener en cuenta las unidades de muestreo y las unidades de análisis. Las unidades de muestreo se corresponden a la red de tuberías del sistema de agua potable de la localidad de San Martín; donde existe la necesidad de optimizar el diámetro de las tuberías. Mientras las unidades de análisis son los datos que se tomará desde las unidades de muestreo, los datos que se recopilarán son:

- Datos topográficos
- Caudales de demanda
- Costos de las tuberías

Todos los datos serán recopilados desde el proyecto: "Mejoramiento y rehabilitación del sistema de saneamiento básico del barrio San Martín, Distrito de Socos- Huamanga- Ayacucho".

3.7.1. Equipos

- Estación total
- Distansímetros
- Laptop

3.7.2. Aplicaciones Utilizadas

- MATLAB R2023a, para el desarrollo del programa.
- EPANET, para el cálculo de los parámetros hidráulicos.
- Civil3D, AutoCAD, GIS para la generación de los datos geoespaciales.
- LaTeX para el procesamiento del proyecto de tesis y la tesis propiamente dicho.
- Planos, gráficos, memorias, dossier fotográfico documental.
- Herramientas informáticas WaterCAD.

3.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información

Recolección de datos, procesamiento de datos y presentación de los resultados obtenidos.

3.9. Desarrollo del trabajo de tesis

3.9.1. Formulación del modelo de optimización

El modelo de optimización de la red de distribución de agua propuesto en esta tesis se formula como un problema de costo mínimo para determinar el diámetro de las tuberías y el coto óptimo para un diseño determinado. Los datos de la tubería, las demandas nodales, los requisitos de carga mínima y los de velocidad se conocen. Todos los reservorios se toman como nodos de fuentes de agua con alturas piezométricas conocidas.

El objetivo del problema es encontrar la red de menor costo que pueda satisfacer las demandas bajo restricciones y penalizaciones hidráulicas y de ecuaciones de continuidad, impuestas para asegurar alturas piezométricas establecidos por la norma peruana en un subconjunto de nodos. En esta tesis se aborda un problema simplificado de diseño de redes de tuberías para un sistema de presión (sin estaciones de bombeo) con las siguientes características principales:

- Las demandas de la red se conocen y se consideran como salidas del nodo.
- La continuidad del flujo debe mantenerse en todos los nodos de la red de tuberías.
- La pérdida de carga en cada arco de tubería es una función conocida del flujo en la tubería, su diámetro, longitud y propiedades hidráulicas de la tubería.
- En cada nodo deben cumplirse las restricciones de carga de presión mínima y máxima según la norma.
- Se pueden aplicar restricciones de diámetro a las tuberías.

El problema de diseño es elegir entre un conjunto de diámetros comerciales discretos, la combinación de diámetros que proporcione la red de menor costo necesaria para suministrar un conjunto de nodos de demanda dentro de un rango prescrito de presiones.

3.9.1.1. Función objetivo

El modelo de optimización de la red de distribución de agua buscan minimizar los costos de implementación de la red. La función objetivo que expresa el costo de la red se formula

en función de los diámetros de la tubería. El problema de diseño óptimo para una red de distribución de agua general se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } f(D_1, \dots, D_{NT}) = \sum_{k=1}^{NT} C_k(D_k)L_k \quad (3.10)$$

Donde:

NT = Número total de tuberías en el sistema.

D_k = Diámetro de la tubería k seleccionado del conjunto de tamaños de tubería comercial D .

$C_k(D_k)L_k$ = El costo de la tubería k con el diámetro D_k por la longitud L_k .

3.9.2. Modelación hidráulica

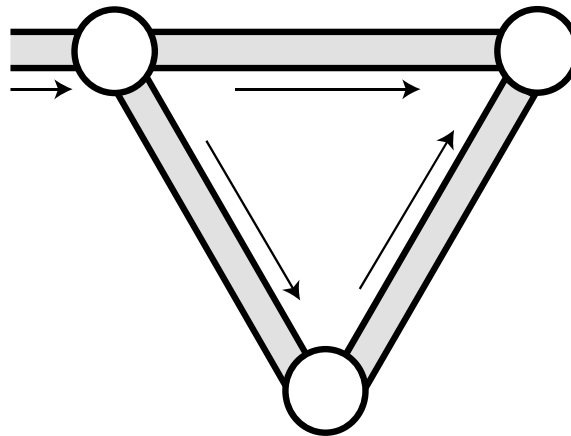
En el modelo de optimización de redes de distribución de agua mediante el algoritmo de Búsqueda Tabu, se requiere algún mecanismo de evaluación hidráulica, es decir cada solución vecina durante el proceso de optimización se analiza con respecto a sus parámetros hidráulicos y de decisión. Para este fin, en el presente trabajo de investigación se utiliza el método del gradiente hidráulico para calcular los caudales en las tuberías y las presiones en los nodos. El método resuelve el sistema de ecuaciones de conservación de masa y energía que rigen el funcionamiento de la red de distribución de agua. La solución obtenida en la simulación hidráulica se comprara con respecto al costo y las restricciones técnicas adoptas en el modelo.

El algoritmo de gradiente hidráulico para la solución de redes de tuberías se formula sobre el conjunto completo de ecuaciones del sistema que modelan las presiones y los caudales. Debido a que tanto como la ecuación de continuidad como la energía se equilibran y resuelven con cada iteración, el método está teóricamente garantizado para ofrecer el mismo nivel de precisión observado y esperado en otros algoritmos similares.

3.9.2.1. Conservación de Energía

El principio de conservación de la energía establece que las pérdidas a través del sistema deben equilibrarse en cada punto. Para las redes de presión, esto significa que la pérdida de carga total entre dos nodos del sistema debe ser la misma, independientemente de la ruta que se tome entre los dos puntos. La pérdida de carga debe ser coherente con la dirección de flujo asumida (es decir, ganar altura cuando se avanza en dirección opuesta a la del flujo y perder altura cuando se avanza en la dirección de flujo) Haestad (2002).

En cada tubería la perdida de la energía total se da por pérdidas por fricción y en pérdidas

Figura 3.13: Conservación de energía


Fuente: Obtenido de (Haestad, 2002)

menores.

$$h_t = h_f + \sum h_m \quad (3.11)$$

Si se tienen en cuenta las pérdidas menores y la posible existencia dispositivos de control hidráulico en algunas tuberías de la red, la ecuación (3.11) toma la siguiente forma general (Ley de Fricción) válida para todas las tuberías.:

$$h_t = \alpha Q^n + \beta Q^2 + \gamma \quad (3.12)$$

Donde:

n : Exponente que depende de la ecuación de fricción utilizada.

α, β, γ : Parámetros característicos de la tubería, las válvulas y las bombas.

Con:

$$\alpha_i = \frac{\delta C f_i^n L_i}{D_i^w} \quad (3.13)$$

En el siguiente cuadro, se muestra los valores de las principales ecuaciones de carga.

Tabla 3.5: Principales ecuaciones de carga

Fórmula (Cf)	δ	n	w
Darcy-Weisbach	0.08265508	2	5
Chezy-Maning	10.2936	2	5.33
Hazen-William	10.6742	1.852	4.871

Para dispositivos de control hidráulico:

- Cuando hay válvulas en el tramo:

$$\beta_i = \frac{8 \sum K m_i}{g \pi^2 D_i^4} \quad (3.14)$$

- Cuando hay bombas en el tramo:

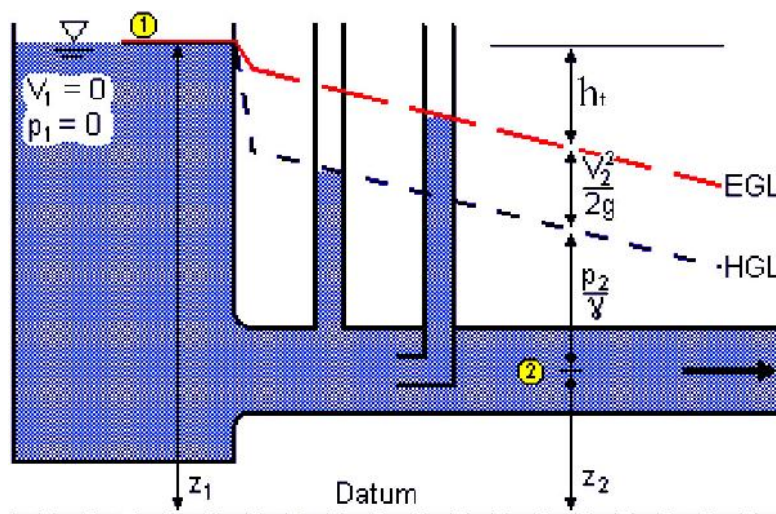
$$\gamma_i = a Q_i^2 + b Q_i + c \quad (3.15)$$

Donde:

a, b, c : Parámetros característicos de las bombas.

Si no existen ninguno de estos dispositivos, los coeficientes β_i y γ_i se consideran cero. En este caso particular para la tesis: $\gamma_i = 0$ y $\beta_i = 0$.

Figura 3.14: EGL y HGL



Fuente: Obtenido de (Haestad, 2002)

3.9.2.2. Conservación de Masa (Continuidad)

En cualquier nodo de un sistema que contenga fluido incompresible, los flujos volumétricos o máxicos totales deben ser iguales a los flujos de salida, menos el cambio en el almacenamiento. Al separarlos en flujos de tuberías de conexión, demandas y almacenamiento, se obtiene (Haestad, 2002):

$$\sum Q_{in} \Delta t = \sum Q_{out} \Delta t + \Delta V_s \quad (3.16)$$

Dónde:

Q_{in} = Flujo total en el nodo.

Q_{out} = Demanda total en el nodo.

ΔV_s = Cambio en el volumen de almacenamiento.

Δt = Cambio en el tiempo.

La ecuación de continuidad para todos los nodos de la red es:

$$[A_{18}][Q] = [q] \quad (3.17)$$

3.9.3. Restricciones

3.9.3.1. Restricciones físicas

Principio de conservación de masa (Continuidad en cada nodo \forall Nodo i)

$$\sum_{k=1}^N \text{sgn}(Q_k) + \sum_{d=1}^{ND} \text{sgn}(q_d) = 0 \quad (3.18)$$

Para cada uno de los bucles de la red, la ley de conservación de energía es otro conjunto de restricciones \forall Malla

$$\sum h_k = 0 \quad (3.19)$$

La pérdida de carga en cada tubería es la diferencia de carga entre sus nodos conectados y se puede formular mediante la ecuación de pérdida de carga (Ley de fricción \forall Tramo k)

$$h_k = \alpha_k Q_k^m + \gamma_k Q_k + \beta_k \quad (3.20)$$

3.9.3.2. Restricciones técnicas

El siguiente conjunto de restricciones expresa los requisitos de altura de presión en cada nodo y las velocidades en las tuberías:

$$H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \quad (3.21)$$

$$V_{\min} \leq V_k \leq V_{\max} \quad (3.22)$$

Diametros comerciales

Además, el diámetro de cada tubería debe pertenecer a un tamaño comercial:

$$D_{\min} \leq D_k \leq D_{\max} \quad (3.23)$$

Donde:

N : Número de tramos conectados al nudo i .

ND : Número de caudales de demanda en el nudo i .

NN : Número de Nudos de la red.

NT : Número de Tuberías de la red.

$C_k(D_k)$: Costo de Tuberías por unidad de longitud.

$L_k(D_k)$: Longitud de la tubería del tramo k .

H_i : Presión en el nudo i .

V_k : Velocidad del fluido en el tramo k .

Q_k : Caudal que circula por el tramo k .

sgn : Es una función que determina el sentido del flujo en el tramo k (este se considera positivo si entra al nudo i y negativo si sale de él).

$\{D_1, \dots, D_n\}$: Conjunto de diámetros comerciales.

H_{min} : Presión mínima en los nudos.

H_{max} : Presión máxima en los nudos.

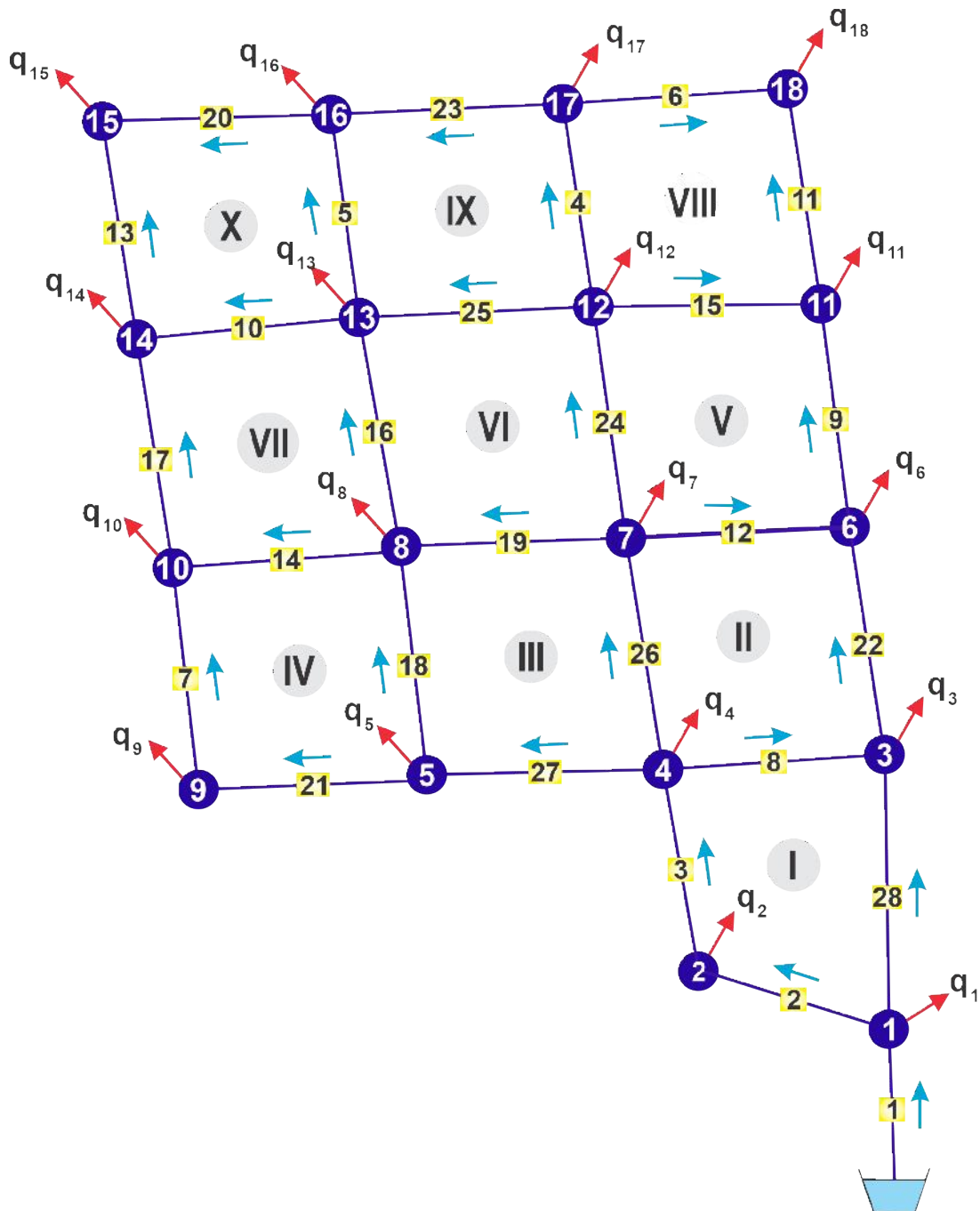
V_{min} : Velocidad mínima en el tramo k .

V_{max} : Velocidad máxima en el tramo k .

La función objetivo (3.18) expresa la minimización del costo de la red de distribución de agua que está en función de los diámetros de la tubería (variables de decisión), con la longitud L_k y el costo unitario C_k .

3.9.4. Construcción del modelo

Figura 3.15: Red de distribución de agua



Fuente: Elaboración propia

Para la red de distribución de agua mostrada en la Figura 3.15 se plantea la siguiente función objetivo.

$$\text{Minimizar } f(D_1, \dots, D_{NT}) = \sum_{k=1}^{28} C_k(D_k)L_k \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar } f = & C_1L_1 + C_2L_2 + C_3L_3 + C_4L_4 + C_5L_5 + C_6L_6 + C_7L_7 \\
 & + C_8L_8 + C_9L_9 + C_{10}L_{10} + C_{11}L_{11} + C_{12}L_{12} + C_{13}L_{13} + C_{14}L_{14} \\
 & + C_{15}L_{15} + C_{16}L_{16} + C_{17}L_{17} + C_{18}L_{18} + C_{19}L_{19} + C_{20}L_{20} + C_{21}L_{21} \\
 & + C_{22}L_{22} + C_{23}L_{23} + C_{24}L_{24} + C_{25}L_{25} + C_{26}L_{26} + C_{27}L_{27} + C_{28}L_{28} \quad (3.25)
 \end{aligned}$$

Restricciones

$$\sum_{k=1}^N \text{sgn}(Q_k) + \sum_{d=1}^{ND} \text{sgn}(q_d) = 0 \quad (3.26)$$

Se tiene para todos los nodos

$$\begin{aligned}
 -Q_1 &= q_0 \\
 Q_1 - Q_2 - Q_{28} &= q_1 \\
 Q_2 - Q_3 &= q_2 \\
 Q_8 - Q_{22} + Q_{28} &= q_3 \\
 Q_3 - Q_8 - Q_{26} - Q_{27} &= q_4 \\
 -Q_{18} - Q_{21} + Q_{27} &= q_5 \\
 -Q_9 + Q_{12} + Q_{22} &= q_6 \\
 -Q_{12} - Q_{19} - Q_{24} + Q_{26} &= q_7 \\
 -Q_{14} - Q_{16} + Q_{18} + Q_{19} &= q_8 \\
 -Q_7 + Q_{21} &= q_9 \quad (3.27) \\
 Q_7 + Q_{14} - Q_{17} &= q_{10} \\
 Q_9 - Q_{11} + Q_{15} &= q_{11} \\
 -Q_4 - Q_{15} + Q_{24} - Q_{25} &= q_{12} \\
 -Q_5 - Q_{10} + Q_{16} + Q_{25} &= q_{13} \\
 Q_{10} - Q_{13} + Q_{17} &= q_{14} \\
 Q_{13} + Q_{20} &= q_{15} \\
 Q_5 - Q_{20} + Q_{23} &= q_{16} \\
 Q_4 - Q_6 - Q_{23} &= q_{17} \\
 Q_6 + Q_{11} &= q_{18}
 \end{aligned}$$

Restricciones por principio de energía

$$\sum h_k = 0 \quad (3.31)$$

- Para la malla: I

$$\alpha_2 Q_2^n + \alpha_3 Q_3^n + \alpha_8 Q_8^n + \alpha_{28} Q_{28}^n = 0 \quad (3.32)$$

- Para la malla: II

$$\alpha_8 Q_8^n + \alpha_{12} Q_{12}^n + \alpha_{22} Q_{22}^n + \alpha_{26} Q_{26}^n = 0 \quad (3.33)$$

- Para la malla: III

$$\alpha_{18} Q_{18}^n + \alpha_{19} Q_{19}^n + \alpha_{26} Q_{26}^n + \alpha_{27} Q_{27}^n = 0 \quad (3.34)$$

- Para la malla: IV

$$\alpha_7 Q_7^n + \alpha_{14} Q_{14}^n + \alpha_{18} Q_{18}^n + \alpha_{21} Q_{21}^n = 0 \quad (3.35)$$

- Para la malla: V

$$\alpha_9 Q_9^n + \alpha_{12} Q_{12}^n + \alpha_{15} Q_{15}^n + \alpha_{24} Q_{24}^n = 0 \quad (3.36)$$

- Para la malla: VI

$$\alpha_{16} Q_{16}^n + \alpha_{19} Q_{19}^n + \alpha_{24} Q_{24}^n + \alpha_{25} Q_{25}^n = 0 \quad (3.37)$$

- Para la malla: VII

$$\alpha_{10} Q_{10}^n + \alpha_{14} Q_{14}^n + \alpha_{16} Q_{16}^n + \alpha_{17} Q_{17}^n = 0 \quad (3.38)$$

- Para la malla: VIII

$$\alpha_4 Q_4^n + \alpha_6 Q_6^n + \alpha_{11} Q_{11}^n + \alpha_{15} Q_{15}^n = 0 \quad (3.39)$$

- Para la malla: IX

$$\alpha_4 Q_4^n + \alpha_5 Q_5^n + \alpha_{23} Q_{23}^n + \alpha_{25} Q_{25}^n = 0 \quad (3.40)$$

■ Para la malla: X

$$\alpha_5 Q_5^n + \alpha_{10} Q_{10}^n + \alpha_{13} Q_{13}^n + \alpha_{20} Q_{20}^n = 0 \quad (3.41)$$

Reemplazando las ecuaciones de carga

$$\frac{\delta f_2^n L_2}{D_2^w} Q_2^n + \frac{\delta f_3^n L_3}{D_3^w} Q_3^n + \frac{\delta f_8^n L_8}{D_8^w} Q_8^n + \frac{\delta f_{28}^n L_{28}}{D_{28}^w} Q_{28}^n = 0 \quad (3.42)$$

$$\frac{\delta f_8^n L_8}{D_8^w} Q_8^n + \frac{\delta f_{12}^n L_{12}}{D_{12}^w} Q_{12}^n + \frac{\delta f_{22}^n L_{22}}{D_{22}^w} Q_{12}^n Q_{22}^n + \frac{\delta f_{26}^n L_{26}}{D_{26}^w} Q_{26}^n = 0 \quad (3.43)$$

$$\frac{\delta f_{18}^n L_{18}}{D_{18}^w} Q_{18}^n + \frac{\delta f_{19}^n L_{19}}{D_{19}^w} Q_{19}^n + \frac{\delta f_{26}^n L_{26}}{D_{26}^w} Q_{26}^n + \frac{\delta f_{27}^n L_{27}}{D_{27}^w} Q_{27}^n = 0 \quad (3.44)$$

$$\frac{\delta f_7^n L_7}{D_7^w} Q_7^n + \frac{\delta f_{14}^n L_{14}}{D_{14}^w} Q_{14}^n + \frac{\delta f_{18}^n L_{18}}{D_{18}^w} Q_{18}^n + \frac{\delta f_{21}^n L_{21}}{D_{21}^w} Q_{21}^n = 0 \quad (3.45)$$

$$\frac{\delta f_9^n L_9}{D_9^w} Q_9^n + \frac{\delta f_{12}^n L_{12}}{D_{12}^w} Q_{12}^n + \frac{\delta f_{15}^n L_{15}}{D_{15}^w} Q_{15}^n + \frac{\delta f_{24}^n L_{24}}{D_{24}^w} Q_{24}^n = 0 \quad (3.46)$$

$$\frac{\delta f_{16}^n L_{16}}{D_{16}^w} Q_{16}^n + \frac{\delta f_{19}^n L_{19}}{D_{19}^w} Q_{19}^n + \frac{\delta f_{24}^n L_{24}}{D_{24}^w} Q_{24}^n + \frac{\delta f_{25}^n L_{25}}{D_{25}^w} Q_{25}^n = 0 \quad (3.47)$$

$$\frac{\delta f_{10}^n L_{10}}{D_{10}^w} Q_{10}^n + \frac{\delta f_{14}^n L_{14}}{D_{14}^w} Q_{14}^n + \frac{\delta f_{16}^n L_{16}}{D_{16}^w} Q_{16}^n + \frac{\delta f_{17}^n L_{17}}{D_{17}^w} Q_{17}^n = 0 \quad (3.48)$$

$$\frac{\delta f_4^n L_4}{D_4^w} Q_4^n + \frac{\delta f_6^n L_6}{D_6^w} Q_6^n + \frac{\delta f_{11}^n L_{11}}{D_{11}^w} Q_{11}^n + \frac{\delta f_{15}^n L_{15}}{D_{15}^w} Q_{15}^n = 0 \quad (3.49)$$

$$\frac{\delta f_4^n L_4}{D_4^w} Q_4^n + \frac{\delta f_5^n L_5}{D_5^w} Q_5^n + \frac{\delta f_{23}^n L_{23}}{D_{23}^w} Q_{23}^n + \frac{\delta f_{25}^n L_{25}}{D_{25}^w} Q_{25}^n = 0 \quad (3.50)$$

$$\frac{\delta f_5^n L_5}{D_5^w} Q_5^n + \frac{\delta f_{10}^n L_{10}}{D_{10}^w} Q_{10}^n + \frac{\delta f_{13}^n L_{13}}{D_{13}^w} Q_{13}^n + \frac{\delta f_{20}^n L_{20}}{D_{20}^w} Q_{20}^n = 0 \quad (3.51)$$

Presiones en los nodos

$$P_i = Z_j - Z_i + P_j + h_k \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned}
 P_0 &= Z_1 - Z_0 + P_1 + h_1 \\
 P_1 &= Z_2 - Z_1 + P_2 + h_2 \\
 P_2 &= Z_4 - Z_2 + P_4 + h_3 \\
 P_{12} &= Z_{16} - Z_{12} + P_{16} + h_4 \\
 P_{13} &= Z_{17} - Z_{13} + P_{17} + h_5 \\
 P_{16} &= Z_{15} - Z_{16} + P_{15} + h_6 \\
 P_6 &= Z_{10} - Z_6 + P_{10} + h_7 \\
 P_4 &= Z_3 - Z_4 + P_3 + h_8 \\
 P_7 &= Z_{11} - Z_7 + P_{11} + h_9 \\
 P_{13} &= Z_{14} - Z_{13} + P_{14} + h_{10} \\
 P_{11} &= Z_{15} - Z_{11} + P_{15} + h_{11} \\
 P_8 &= Z_7 - Z_8 + P_7 + h_{12} \\
 P_{14} &= Z_{18} - Z_{14} + P_{18} + h_{13} \\
 P_9 &= Z_{10} - Z_9 + P_{10} + h_{14} \\
 P_{12} &= Z_{11} - Z_{12} + P_{11} + h_{15} \\
 P_9 &= Z_{13} - Z_9 + P_{13} + h_{16} \\
 P_{10} &= Z_{14} - Z_{10} + P_{14} + h_{17} \\
 P_5 &= Z_9 - Z_5 + P_9 + h_{18} \\
 P_8 &= Z_9 - Z_8 + P_9 + h_{19} \\
 P_{17} &= Z_{18} - Z_{17} + P_{18} + h_{20} \\
 P_5 &= Z_6 - Z_5 + P_6 + h_{21} \\
 P_3 &= Z_7 - Z_3 + P_7 + h_{22} \\
 P_{16} &= Z_{17} - Z_{16} + P_{17} + h_{23} \\
 P_8 &= Z_{12} - Z_8 + P_{12} + h_{24} \\
 P_{12} &= Z_{13} - Z_{12} + P_{13} + h_{25} \\
 P_4 &= Z_8 - Z_4 + P_8 + h_{26} \\
 P_4 &= Z_5 - Z_4 + P_5 + h_{27} \\
 P_1 &= Z_3 - Z_1 + P_3 + h_{28}
 \end{aligned} \tag{3.53}$$

Restricciones técnicas (Presiones en los nodos)

$$\begin{aligned}
 P_{\min} &\leq P_1 \leq P_{\max} & 10 &\leq P_1 \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_2 \leq P_{\max} & 10 &\leq P_2 \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_3 \leq P_{\max} & 10 &\leq P_3 \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_4 \leq P_{\max} & 10 &\leq P_4 \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_5 \leq P_{\max} & 10 &\leq P_5 \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_6 \leq P_{\max} & 10 &\leq P_6 \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_7 \leq P_{\max} & 10 &\leq P_7 \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_8 \leq P_{\max} & 10 &\leq P_8 \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_9 \leq P_{\max} & \Rightarrow 10 &\leq P_9 \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_{10} \leq P_{\max} & 10 &\leq P_{10} \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_{11} \leq P_{\max} & 10 &\leq P_{11} \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_{12} \leq P_{\max} & 10 &\leq P_{12} \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_{13} \leq P_{\max} & 10 &\leq P_{13} \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_{14} \leq P_{\max} & 10 &\leq P_{14} \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_{15} \leq P_{\max} & 10 &\leq P_{15} \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_{16} \leq P_{\max} & 10 &\leq P_{16} \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_{17} \leq P_{\max} & 10 &\leq P_{17} \leq 50 \\
 P_{\min} &\leq P_{18} \leq P_{\max} & 10 &\leq P_{18} \leq 50
 \end{aligned}
 \tag{3.54}$$

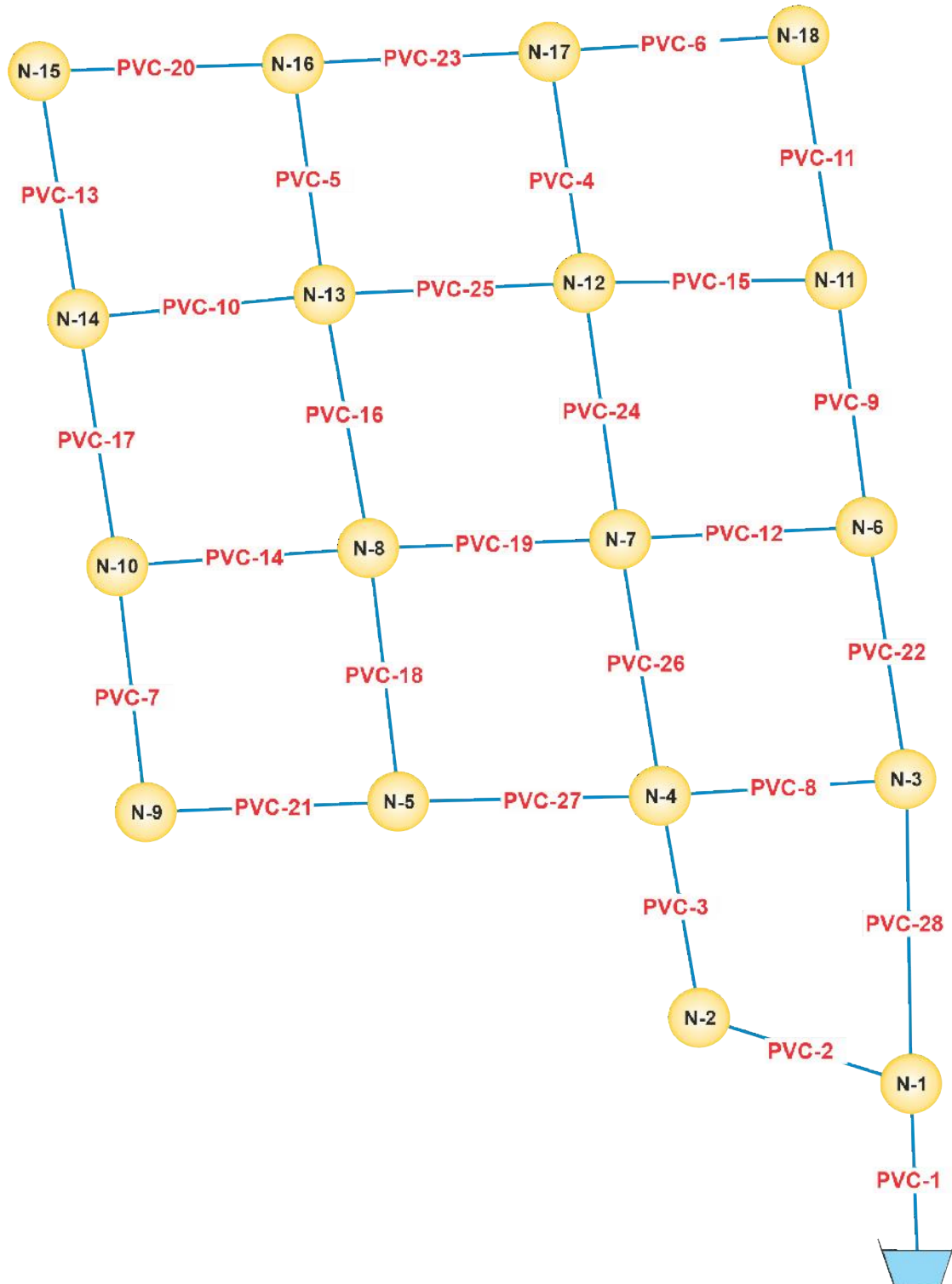
Restricciones técnicas (velocidades en las tuberías)

$$\begin{aligned}
 V_{\text{mín}} &\leq V_1 \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_1 \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_2 \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_2 \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_3 \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_3 \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_4 \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_4 \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_5 \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_5 \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_6 \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_6 \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_7 \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_7 \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_8 \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_8 \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_9 \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_9 \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{10} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{10} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{11} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{11} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{12} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{12} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{13} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{13} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{14} \leq V_{\text{máx}} & \Rightarrow 0.6 &\leq V_{14} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{15} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{15} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{16} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{16} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{17} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{17} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{18} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{18} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{19} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{19} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{20} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{20} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{21} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{21} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{22} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{22} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{23} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{23} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{24} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{24} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{25} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{25} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{26} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{26} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{27} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{27} \leq 3 \\
 V_{\text{mín}} &\leq V_{28} \leq V_{\text{máx}} & 0.6 &\leq V_{28} \leq 3
 \end{aligned}
 \tag{3.55}$$

3.9.5. Particularización del Modelo

En este apartado se muestran los datos y parámetros que serán tomados en cuenta para la optimización de la red de distribución de la Localidad de San Martín 3.16.

Figura 3.16: Red de distribución de agua



Fuente: Elaboración propia

Datos de la red de distribución de la Localidad de San Martín

En la tabla A.16, se muestra las distancias entre los nodos de la red de distribución de agua de la Localidad de San Martín.

Tabla 3.6: Longitud de las tuberías

TUBERIA	LONGITUD (m)
PVC-1	48.29
PVC-2	63.59
PVC-3	64.17
PVC-4	68.14
PVC-5	69.45
PVC-6	70.39
PVC-7	70.96
PVC-8	71.11
PVC-9	71.21
PVC-10	71.22
PVC-11	71.42
PVC-12	71.48
PVC-13	71.79
PVC-14	71.93
PVC-15	72.01
PVC-16	72.18
PVC-17	72.30
PVC-18	72.47
PVC-19	72.71
PVC-20	72.77
PVC-21	72.98
PVC-22	74.02
PVC-23	74.10
PVC-24	74.17
PVC-25	74.56
PVC-26	74.58
PVC-27	74.65
PVC-28	87.85

En la tabla 3.7, se muestra las coordenadas UTM y la demanda en cada Nodo de la Red de Distribución de agua de la Localidad de San Martín.

Tabla 3.7: Datos y notación de los Nodos

Nodo	Coordenas UTM		Elevación (Z)	Demanda (L/s)
	(X)	(Y)		
R-01	577,074.85	8,538,712.14	3,453.00	-27.24
N-1	577,073.35	8,538,760.41	3,434.29	0.39
N-2	577,012.98	8,538,780.40	3,429.43	2.36
N-3	577,072.40	8,538,848.25	3,425.21	0.83
N-4	577,001.45	8,538,843.53	3,429.15	0.61
N-5	576,926.81	8,538,842.55	3,420.00	0.86
N-6	577,061.35	8,538,921.44	3,420.87	1.82
N-7	576,989.99	8,538,917.22	3,416.55	1.05
N-8	576,917.33	8,538,914.40	3,414.25	0.37
N-9	576,853.89	8,538,839.51	3,421.59	2.74
N-10	576,845.54	8,538,909.98	3,414.18	1.27
N-11	577,051.69	8,538,991.99	3,411.98	0.76
N-12	576,979.69	8,538,990.67	3,410.27	0.90
N-13	576,905.30	8,538,985.57	3,414.10	1.10
N-14	576,834.20	8,538,981.39	3,415.22	1.96
N-15	576,823.47	8,539,052.37	3,412.27	5.10
N-16	576,896.21	8,539,054.42	3,412.90	1.71
N-17	576,970.22	8,539,058.15	3,415.21	2.21
N-18	577,040.47	8,539,062.52	3,418.35	1.20

Diámetros comerciales a utilizar

En la tabla 3.8, se muestran los diámetros comerciales en *mm* y su costo unitario por unidad de longitud correspondiente. Cabe indicar que los costos unitarios fueron tomados del Expediente Técnico del Proyecto: "Mejoramiento y rehabilitación del sistema de saneamiento

básico del barrio San Martín, Distrito de Socos- Huamanga- Ayacucho"

Tabla 3.8: Diámetros comerciales

Diámetro Nominal		COSTO
(in)	(mm)	(S/.)
3/4"	25.00	3.44
1"	32.00	5.11
1 1/4"	40.00	7.33
1 1/2"	50.00	10.50
2"	63.00	15.24
2 1/2"	75.00	20.19
3"	90.00	27.07
4"	110.00	37.40

Modelo

Función objetivo: Reemplazando las longitudes entre nodo a nodo en la ecuación(3.25).

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar } f = & 48.29C_1 + 63.59C_2 + 64.17C_3 + 68.14C_4 + 69.45C_5 + 70.39C_6 \\
 & + 70.96C_7 + 71.11C_8 + 71.21C_9 + 71.22C_{10} + 71.42C_{11} + 71.48C_{12} \\
 & + 71.79C_{13} + 71.93C_{14} + 72.01C_{15} + 72.18C_{16} + 72.30C_{17} + 72.47C_{18} \\
 & + 72.71C_{19} + 72.77C_{20} + 72.98C_{21} + 74.02C_{22} + 74.10C_{23} + 74.17C_{24} \\
 & + 74.56C_{25} + 74.58C_{26} + 74.65C_{27} + 87.85C_{28} \quad (3.56)
 \end{aligned}$$

- En el cuadro 3.9, se muestra los coeficientes de Hazem-Williams para las tuberías de material PVC que serán utilizados en la Red de Distribución de Agua de San Martín.

Tabla 3.9: Coeficientes de Hazem-Williams para la red de San Martín

Fórmula (Cf)	δ	n	w	C
Hazen-Williams	10.6742	1.852	4.871	150

- Reemplazando las variables de $\delta = 10.67$, $n = 1.852$, $w = 4.87$ según la Ecuación de Hazem-Williams; en las Ecuaciones de Conservación de Energía:

$$\frac{10.67}{C} \left(\frac{L_2}{D_2^{4.87}} Q_2^{1.852} + \frac{L_3}{D_3^{4.87}} Q_3^{1.852} + \frac{L_8}{D_8^{4.87}} Q_8^{1.852} + \frac{L_{28}}{D_{28}^{4.87}} Q_{28}^{1.852} \right) = 0 \quad (3.59)$$

$$\frac{10.67}{C} \left(\frac{L_8}{D_8^{4.87}} Q_8^{1.852} + \frac{L_{12}}{D_{12}^{4.87}} Q_{12}^{1.852} + \frac{L_{22}}{D_{22}^{4.87}} Q_{22}^{1.852} + \frac{L_{26}}{D_{26}^{4.87}} Q_{26}^{1.852} \right) = 0 \quad (3.60)$$

$$\frac{10.67}{C} \left(\frac{f_{18}^n L_{18}}{D_{18}^{4.87}} Q_{18}^{1.852} + \frac{L_{19}}{D_{19}^{4.87}} Q_{19}^{1.852} + \frac{L_{26}}{D_{26}^{4.87}} Q_{26}^{1.852} + \frac{L_{27}}{D_{27}^{4.87}} Q_{27}^{1.852} \right) = 0 \quad (3.61)$$

$$\frac{10.67}{C} \left(\frac{L_7}{D_7^{4.87}} Q_7^{1.852} + \frac{L_{14}}{D_{14}^{4.87}} Q_{14}^{1.852} + \frac{L_{18}}{D_{18}^{4.87}} Q_{18}^{1.852} + \frac{L_{21}}{D_{21}^{4.87}} Q_{21}^{1.852} \right) = 0 \quad (3.62)$$

$$\frac{10.67}{C} \left(\frac{L_9}{D_9^{4.87}} Q_9^{1.852} + \frac{L_{12}}{D_{12}^{4.87}} Q_{12}^{1.852} + \frac{L_{15}}{D_{15}^{4.87}} Q_{15}^{1.852} + \frac{L_{24}}{D_{24}^{4.87}} Q_{24}^{1.852} \right) = 0 \quad (3.63)$$

$$\frac{10.67}{C} \left(\frac{L_{16}}{D_{16}^{4.87}} Q_{16}^{1.852} + \frac{L_{19}}{D_{19}^{4.87}} Q_{19}^{1.852} + \frac{L_{24}}{D_{24}^{4.87}} Q_{24}^{1.852} + \frac{L_{25}}{D_{25}^{4.87}} Q_{25}^{1.852} \right) = 0 \quad (3.64)$$

$$\frac{10.67}{C} \left(\frac{L_{10}}{D_{10}^{4.87}} Q_{10}^{1.852} + \frac{L_{14}}{D_{14}^{4.87}} Q_{14}^{1.852} + \frac{L_{16}}{D_{16}^{4.87}} Q_{16}^{1.852} + \frac{L_{17}}{D_{17}^{4.87}} Q_{17}^{1.852} \right) = 0 \quad (3.65)$$

$$\frac{10.67}{C} \left(\frac{L_4}{D_4^{4.87}} Q_4^{1.852} + \frac{L_6}{D_6^{4.87}} Q_6^{1.852} + \frac{L_{11}}{D_{11}^{4.87}} Q_{11}^{1.852} + \frac{L_{15}}{D_{15}^{4.87}} Q_{15}^{1.852} \right) = 0 \quad (3.66)$$

$$\frac{10.67}{C} \left(\frac{L_4}{D_4^{4.87}} Q_4^{1.852} + \frac{L_5}{D_5^{4.87}} Q_5^{1.852} + \frac{L_{23}}{D_{23}^{4.87}} Q_{23}^{1.852} + \frac{L_{25}}{D_{25}^{4.87}} Q_{25}^{1.852} \right) = 0 \quad (3.67)$$

$$\frac{10.67}{C} \left(\frac{L_5}{D_5^{4.87}} Q_5^{1.852} + \frac{L_{10}}{D_{10}^{4.87}} Q_{10}^{1.852} + \frac{L_{13}}{D_{13}^{4.87}} Q_{13}^{1.852} + \frac{L_{20}}{D_{20}^{4.87}} Q_{20}^{1.852} \right) = 0 \quad (3.68)$$

- Reemplazamos los coeficientes de Hazen - Williams en las ecuaciones de Presiones:

$$\begin{aligned}
 P_0 &= Z_1 - Z_0 + P_1 + 10.67 \left(\frac{L_1 \cdot Q_1^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_1^{4.87}} \right) \\
 P_1 &= Z_2 - Z_1 + P_2 + 10.67 \left(\frac{L_2 \cdot Q_2^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_2^{4.87}} \right) \\
 P_2 &= Z_4 - Z_2 + P_4 + 10.67 \left(\frac{L_3 \cdot Q_3^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_3^{4.87}} \right) \\
 P_{12} &= Z_{16} - P_{12} + H_{16} + 10.67 \left(\frac{L_4 \cdot Q_4^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_4^{4.87}} \right) \\
 P_{13} &= Z_{17} - P_{13} + H_{17} + 10.67 \left(\frac{L_5 \cdot Q_5^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_5^{4.87}} \right) \\
 P_{16} &= Z_{15} - P_{16} + H_{15} + 10.67 \left(\frac{L_6 \cdot Q_6^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_6^{4.87}} \right) \\
 P_6 &= Z_{10} - Z_6 + P_{10} + 10.67 \left(\frac{L_7 \cdot Q_7^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_7^{4.87}} \right) \\
 P_4 &= Z_3 - Z_4 + P_3 + 10.67 \left(\frac{L_8 \cdot Q_8^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_8^{4.87}} \right) \\
 P_7 &= Z_{11} - Z_7 + P_{11} + 10.67 \left(\frac{L_9 \cdot Q_9^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_9^{4.87}} \right) \\
 P_{13} &= Z_{14} - Z_{13} + P_{14} + 10.67 \left(\frac{L_{10} \cdot Q_{10}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{10}^{4.87}} \right) \\
 P_8 &= Z_7 - Z_8 + P_7 + 10.67 \left(\frac{L_{12} \cdot Q_{12}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{12}^{4.87}} \right) \\
 P_{14} &= Z_{18} - Z_{14} + P_{18} + 10.67 \left(\frac{L_{13} \cdot Q_{13}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{13}^{4.87}} \right) \\
 P_9 &= Z_{10} - Z_9 + P_{10} + 10.67 \left(\frac{L_{14} \cdot Q_{14}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{14}^{4.87}} \right) \\
 P_{12} &= Z_{11} - Z_{12} + P_{11} + 10.67 \left(\frac{L_{15} \cdot Q_{15}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{15}^{4.87}} \right) \\
 P_{10} &= Z_{14} - Z_{10} + P_{14} + 10.67 \left(\frac{L_{17} \cdot Q_{17}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{17}^{4.87}} \right) \\
 P_8 &= Z_9 - Z_8 + P_9 + 10.67 \left(\frac{L_{19} \cdot Q_{19}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{19}^{4.87}} \right) \\
 P_{17} &= Z_{18} - Z_{17} + P_{18} + 10.67 \left(\frac{L_{20} \cdot Q_{20}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{20}^{4.87}} \right) \\
 P_5 &= Z_6 - Z_5 + P_6 + 10.67 \left(\frac{L_{21} \cdot Q_{21}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{21}^{4.87}} \right) \\
 P_3 &= Z_7 - Z_3 + P_7 + 10.67 \left(\frac{L_{22} \cdot Q_{22}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{22}^{4.87}} \right) \\
 P_{16} &= Z_{17} - Z_{16} + P_{17} + 10.67 \left(\frac{L_{23} \cdot Q_{23}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{23}^{4.87}} \right) \\
 P_8 &= Z_{12} - Z_8 + P_{12} + 10.67 \left(\frac{L_{24} \cdot Q_{24}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{24}^{4.87}} \right) \\
 P_4 &= Z_8 - Z_4 + P_8 + 10.67 \left(\frac{L_{26} \cdot Q_{26}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{26}^{4.87}} \right) \\
 P_4 &= Z_5 - Z_4 + P_5 + 10.67 \left(\frac{L_{27} \cdot Q_{27}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{27}^{4.87}} \right) \\
 P_1 &= Z_3 - Z_1 + P_3 + 10.67 \left(\frac{L_{28} \cdot Q_{28}^{1.852}}{130^{1.852} \cdot D_{28}^{4.87}} \right)
 \end{aligned} \tag{3.69}$$

Velocidad en Tuberías

- La velocidad en cada tubería se define por la Ecuación de Continuidad (3.70):

$$V_i = \frac{4 \cdot Q_i}{\pi \cdot D_i^2} \quad (3.70)$$

$$V_1 = \frac{4 \cdot Q_1}{\pi \cdot D_1^2} \quad (3.71)$$

$$V_{15} = \frac{4 \cdot Q_{15}}{\pi \cdot D_{15}^2} \quad (3.85)$$

$$V_2 = \frac{4 \cdot Q_2}{\pi \cdot D_2^2} \quad (3.72)$$

$$V_{16} = \frac{4 \cdot Q_{16}}{\pi \cdot D_{16}^2} \quad (3.86)$$

$$V_3 = \frac{4 \cdot Q_3}{\pi \cdot D_3^2} \quad (3.73)$$

$$V_{17} = \frac{4 \cdot Q_{17}}{\pi \cdot D_{17}^2} \quad (3.87)$$

$$V_4 = \frac{4 \cdot Q_4}{\pi \cdot D_4^2} \quad (3.74)$$

$$V_{18} = \frac{4 \cdot Q_{18}}{\pi \cdot D_{18}^2} \quad (3.88)$$

$$V_5 = \frac{4 \cdot Q_5}{\pi \cdot D_5^2} \quad (3.75)$$

$$V_{19} = \frac{4 \cdot Q_{19}}{\pi \cdot D_{19}^2} \quad (3.89)$$

$$V_6 = \frac{4 \cdot Q_6}{\pi \cdot D_6^2} \quad (3.76)$$

$$V_{20} = \frac{4 \cdot Q_{20}}{\pi \cdot D_{20}^2} \quad (3.90)$$

$$V_7 = \frac{4 \cdot Q_7}{\pi \cdot D_7^2} \quad (3.77)$$

$$V_{21} = \frac{4 \cdot Q_{21}}{\pi \cdot D_{21}^2} \quad (3.91)$$

$$V_8 = \frac{4 \cdot Q_8}{\pi \cdot D_8^2} \quad (3.78)$$

$$V_{22} = \frac{4 \cdot Q_{22}}{\pi \cdot D_{22}^2} \quad (3.92)$$

$$V_9 = \frac{4 \cdot Q_9}{\pi \cdot D_9^2} \quad (3.79)$$

$$V_{23} = \frac{4 \cdot Q_{23}}{\pi \cdot D_{23}^2} \quad (3.93)$$

$$V_{10} = \frac{4 \cdot Q_{10}}{\pi \cdot D_{10}^2} \quad (3.80)$$

$$V_{24} = \frac{4 \cdot Q_{24}}{\pi \cdot D_{24}^2} \quad (3.94)$$

$$V_{11} = \frac{4 \cdot Q_{11}}{\pi \cdot D_{11}^2} \quad (3.81)$$

$$V_{25} = \frac{4 \cdot Q_{25}}{\pi \cdot D_{25}^2} \quad (3.95)$$

$$V_{12} = \frac{4 \cdot Q_{12}}{\pi \cdot D_{12}^2} \quad (3.82)$$

$$V_{26} = \frac{4 \cdot Q_{26}}{\pi \cdot D_{26}^2} \quad (3.96)$$

$$V_{13} = \frac{4 \cdot Q_{13}}{\pi \cdot D_{13}^2} \quad (3.83)$$

$$V_{27} = \frac{4 \cdot Q_{27}}{\pi \cdot D_{27}^2} \quad (3.97)$$

$$V_{14} = \frac{4 \cdot Q_{14}}{\pi \cdot D_{14}^2} \quad (3.84)$$

$$V_{28} = \frac{4 \cdot Q_{28}}{\pi \cdot D_{28}^2} \quad (3.98)$$

Variables

$$D_1, D_2, D_3, \dots, D_{28} \in k$$

$$V_1, V_2, V_3, \dots, V_{28} \in k$$

$$P_1, P_2, H_3, \dots, P_{18} \in k$$

De las ecuaciones descritas se tiene un total de 74 variables:

- 28 diámetros(mm) que son variables discretas que deben tomar valores de entre el conjunto de diámetros comerciales de la tabla 3.8
- 28 variables continuas referente a las velocidades(m/s)
- 18 variables que representan a las presiones(mH_2O); que son variables continuas.

La función objetivo depende los diámetros asignados a cada uno de los tramos de tuberías. Como se muestra en la ecuación(3.56), esta función es el coste total de la red definido como el sumatoria del producto de las longitudes(L_i) y el costo unitario que corresponde a cada diámetro comercial(C_i).

De la Ecuación de Conservación de Masa(3.58) se calcula los caudales en cada tubería. Consecuentemente aplicando las ecuaciones de Continuidad en cada tramo se calculará las velocidades en cada tramo de tubería; cabe indicar que éstas deben estar en rango de 0.50 m/s a 3.00 m/s.

De las ecuaciones de Conservación de Energía se calculan los diámetros a utilizar en cada tramo de la red de distribución, éstas deben ser comerciales como lo indicado en la tabla 3.8

De las ecuaciones de Presiones(3.69), se calcula las presiones en cada Nodo. Cabe resaltar que según las restricciones de la Normativa Peruana(OS.050), estas presiones deben estar en el rango de 10 a 50 m.c.a

3.9.6. Optimización mediante el Algoritmo de Búsqueda Tabu

La búsqueda tabú es una heurística de optimización global basada en el proceso de la memoria humana (Glover & Laguna, 1998). La implementación de este método se basa en la exploración de la vecindad de la solución actual. Esto se puede hacer explorando todo el vecindario o una parte de él, por lo que se debe proporcionar un mecanismo para generar soluciones vecinas. Este mecanismo define los movimientos a realizar en cada iteración. Para evitar el ciclo entre las mismas soluciones, se pueden prohibir ciertos movimientos, lo que les otorga el estado de “movimiento tabú”. El conjunto de movimientos tabú define la lista tabú. Los movimientos tabú no son permanentes; una función de memoria a corto plazo les

permite salir de la lista tabú. Permanecen en la lista tabú durante un tiempo establecido (número de iteraciones) definido por el parámetro de permanencia tabú. El uso del criterio de aspiración permite ciertos movimientos en la lista tabú para superar cualquier estado tabú. Esto ocurrirá siempre que los movimientos lleven a encontrar soluciones que correspondan a un criterio predefinido. Un procedimiento de diversificación, que utiliza una función de memoria a largo plazo, conducirá a la exploración de regiones del espacio de la solución no visitadas previamente.

El algoritmo de Búsqueda Tabu utilizado en esta investigación consta de los siguientes componentes básicos:

3.9.6.0.1. Generación del vecindario El algoritmo de la Búsqueda Tabu supone que se puede construir un vecindario para identificar soluciones adyacentes a las que se puede llegar a partir de la solución actual (Laguna, 1994). El mecanismo de “movimiento” representa el proceso de apuntar el estado actual de la solución hacia otro. Hay varios tipos de movimientos como intercambiar, insertar y agregar/soltar o aumentar/disminuir, etc., y sus usos dependen del tipo de problema (Glover & Laguna, 1998). Esta investigación ha desarrollado dos tipos diferentes de movimientos, es decir, el movimiento fijo y el movimiento secuencial. El movimiento fijo emplea un tamaño de paso de movimiento constante para todas las iteraciones; mientras que el movimiento secuencial utiliza varios tamaños de pasos cíclicos para aumentar la aleatoriedad de la búsqueda en el proceso de movimiento.

3.9.6.0.2. Lista tabú Un mecanismo principal para explotar la memoria en la Búsqueda Tabú es clasificar un conjunto de movimientos en un vecindario como tabú (Laguna, 1994). La lista tabú es la característica más singular de la BT. Registra los movimientos (soluciones) encontrados en el pasado para evitar búsquedas cíclicas y atrapamiento en óptimos locales. La estrategia de búsqueda se ve afectada por el tamaño de la lista tabú, que a menudo está determinada por la experiencia. El impacto de los tamaños de las listas tabú sobre el rendimiento de la optimización ha sido investigado por varios estudios (Kovačević-Vujčić et al., 1999; Salhi, 2002; Tsubakitani & Evans, 1998). En general, las listas tabú más pequeñas y más grandes demuestran búsquedas intensificadas y diversificadas, respectivamente (Al-Sultan & Fedjki, 1997). La lista tabú empleada en este estudio registra todos los atributos de la solución, es decir, los valores de las variables de decisión, y utiliza el “número mágico 7”, de acuerdo a la sugerencia de Glover y Laguna (1998), como tamaño de lista tabú.

3.9.6.0.3. Criterio de aspiración Para implementar la restricción tabú, se debe tener en cuenta una excepción importante, es decir, las restricciones tabú no deben ser inviolables en todas las circunstancias. Si un movimiento, aunque inicialmente es tabú, da como resultado una solución mejor que cualquier visita hasta ahora, su clasificación tabú puede ser anulada. El mecanismo que permite tal anulación se denomina “criterios de aspiración” (Laguna,

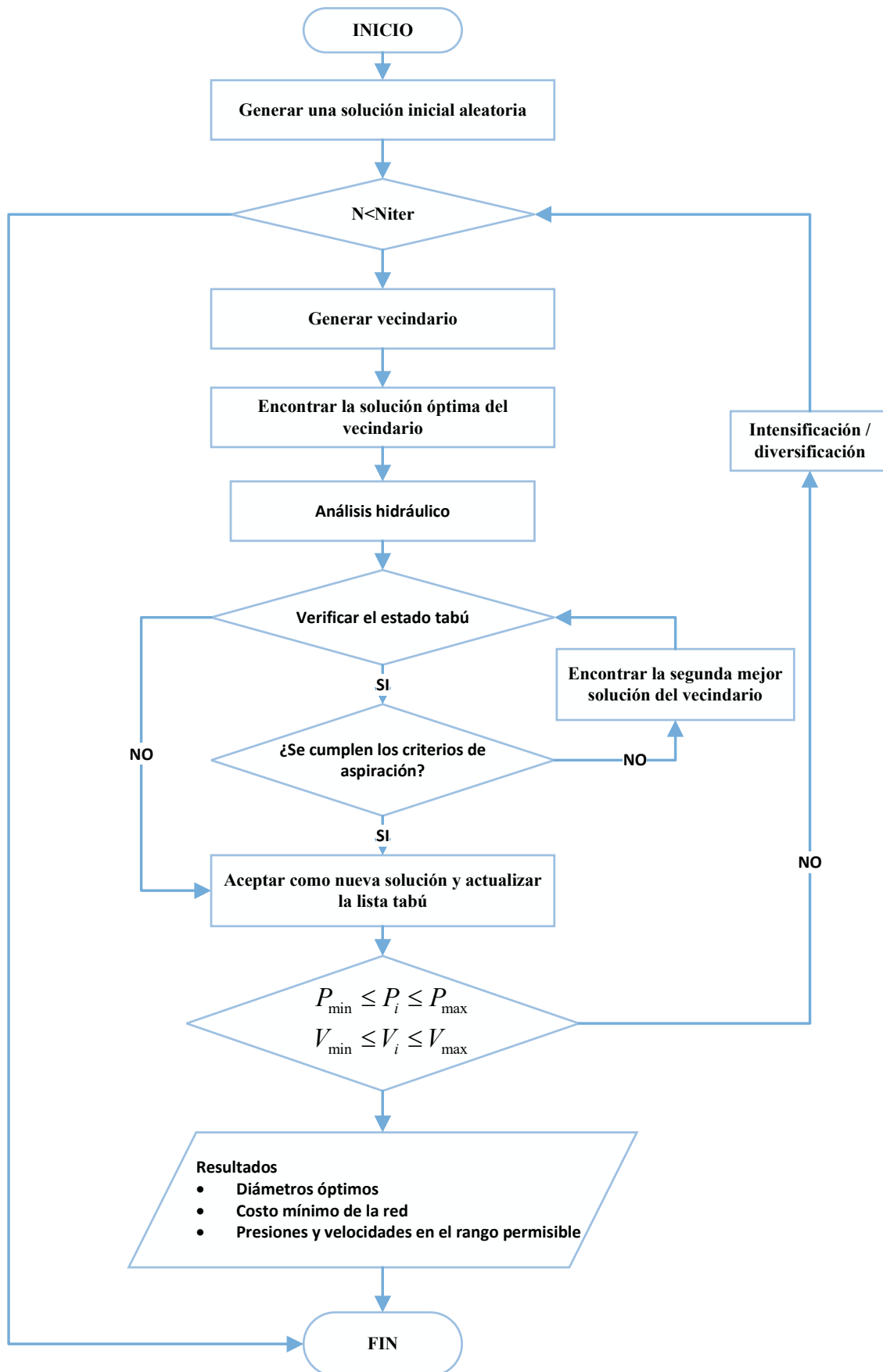
1994). El principal objetivo de los criterios de aspiración es reducir la probabilidad de perder buenas soluciones.

3.9.6.0.4. Estrategia de intensificación Para preservar la agresividad de una búsqueda, en la Búsqueda Tabu a menudo se emplean estrategias complementarias llamadas “estrategias de intensificación”. La estrategia de intensificación utilizada en este estudio registró un subconjunto de soluciones de élite que consisten en óptimos locales de alta calidad de las soluciones pasadas recientes (por ejemplo, de las últimas 50 iteraciones). Cuando la BT no puede encontrar una mejor solución para un número específico de iteraciones, seleccionará la mejor solución entre estos candidatos de élite como la solución inicial para la siguiente iteración. Debido a la secuencia aleatoria de tamaños de paso de movimiento secuencial empleada en esta investigación, la revisión de las soluciones de élite no dará como resultado búsquedas cíclicas. Las estrategias de intensificación están diseñadas para mejorar los movimientos de alta calidad y las características de la solución con el fin de buscar regiones potenciales del espacio de la solución más a fondo.

3.9.6.0.5. Estrategia de diversificación La estrategia de diversificación es otro mecanismo diseñado para mejorar el rendimiento de optimización de la BT. A diferencia de las estrategias de intensificación, las estrategias de diversificación buscan de manera diversa las regiones no visitadas para explorar soluciones que difieran significativamente de las ya encontradas.

El significado físico de la estrategia de diversificación es la posibilidad de obtener una solución valiosa revisando nuevos espacios de solución. En esta investigación, cuando la mejor solución encontrada hasta ahora no ha sido mejorada para un número específico de iteraciones, la búsqueda probablemente esté confinada dentro de un área de soluciones inferiores (donde las funciones objetivas generalmente no están optimizadas). Por tanto, es necesario un mecanismo de diversificación para diversificar la búsqueda, llevándola a nuevas regiones. Luego se aplica la diversificación perturbando aleatoriamente la solución actual para generar un nuevo punto de partida para la siguiente iteración para explorar otros espacios de solución no visitados.

3.9.6.0.6. Criterios de parada El criterio de parada más utilizado en los modelos de optimización es probablemente el número máximo de iteraciones. Sin embargo, es difícil determinar los números máximos de iteración, ya que dependen de los problemas que se resuelvan. En este estudio, si la mejor solución encontrada hasta ahora no ha mejorado para un número específico (por ejemplo, 1000) de iteraciones, la BT terminará. Tal criterio de detención asegurará que el proceso de búsqueda de la BT haya llegado a la etapa final.

Figura 3.17: Diagrama de flujo de la búsqueda tabú


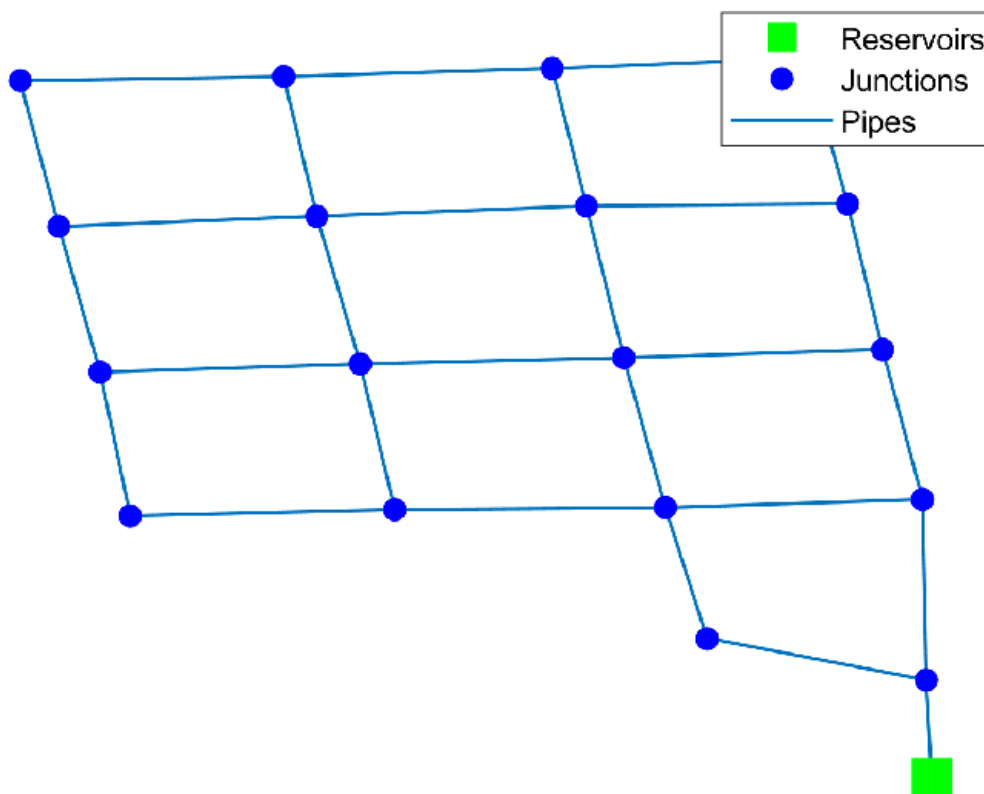
Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV: Resultados

4.1. Condiciones iniciales de la red asignada

La metodología desarrollada ha sido aplicado a la red de distribución de agua del proyecto: "Mejoramiento y rehabilitación del sistema de saneamiento básico del barrio San Martín, Distrito de Socos- Huamanga- Ayacucho". Se ha considerado como un caso de estudio relevante para analizar el diseño óptimo de la red de agua en la region Ayacucho.

Figura 4.18: Esquema de la Red de Distribución de San Martin en el API



Fuente: Elaboración propia

4.1.1. Diseño inicial A:

Se presenta un Diseño Inicial A; con los parámetros que se describen a continuación:

Tabla 4.10: Diámetros y costos del Diseño Inicial A

Id_tubos	Diametro (mm)	Longitud (m)	Velocidad (m/s)	Parcial (S/.)
PVC-1	110	48.29	2.87	1,806.05
PVC-2	110	63.59	1.38	2,378.27
PVC-3	110	64.17	1.13	2,399.96
PVC-4	110	68.14	0.30	2,548.44
PVC-5	110	69.45	0.26	2,597.43
PVC-6	90	70.39	0.23	1,905.46
PVC-7	90	70.96	0.21	1,920.89
PVC-8	110	71.11	0.51	2,659.51
PVC-9	110	71.21	0.50	2,663.25
PVC-10	90	71.22	0.34	1,927.93
PVC-11	110	71.42	0.28	2,671.11
PVC-12	90	71.48	0.24	1,934.96
PVC-13	90	71.79	0.36	1,943.36
PVC-14	90	71.93	0.32	1,947.15
PVC-15	90	72.01	0.22	1,949.31
PVC-16	110	72.18	0.37	2,699.53
PVC-17	90	72.3	0.33	1,957.16
PVC-18	110	72.47	0.32	2,710.38
PVC-19	90	72.71	0.45	1,968.26
PVC-20	90	72.77	0.44	1,969.88
PVC-21	110	72.98	0.43	2,729.45
PVC-22	110	74.02	0.86	2,768.35
PVC-23	90	74.1	0.32	2,005.89
PVC-24	110	74.17	0.48	2,773.96
PVC-25	90	74.56	0.35	2,018.34
PVC-26	110	74.58	0.73	2,789.29
PVC-27	110	74.65	0.84	2,791.91
PVC-28	110	87.85	1.45	3,285.59
TOTAL (S/)				65,721.05

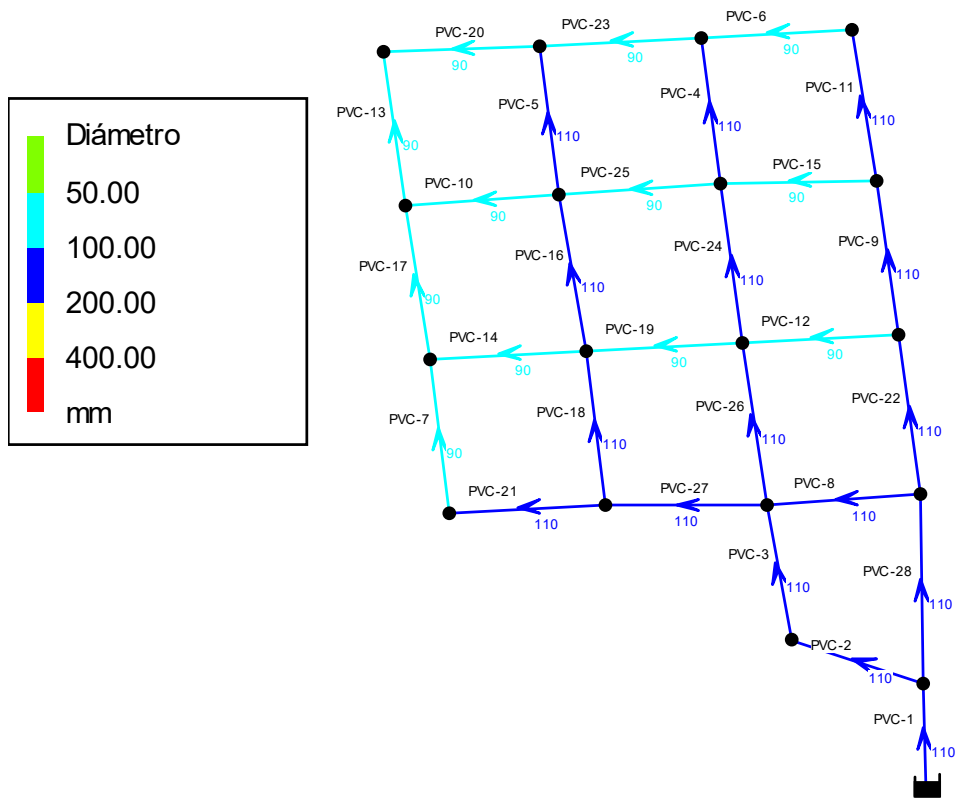
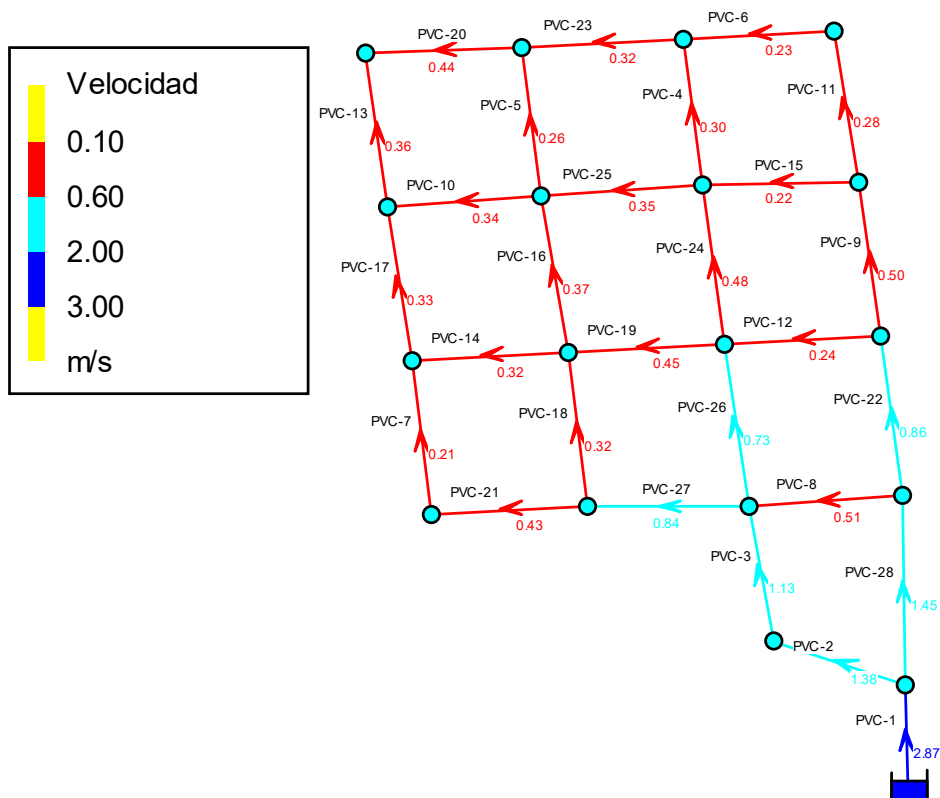
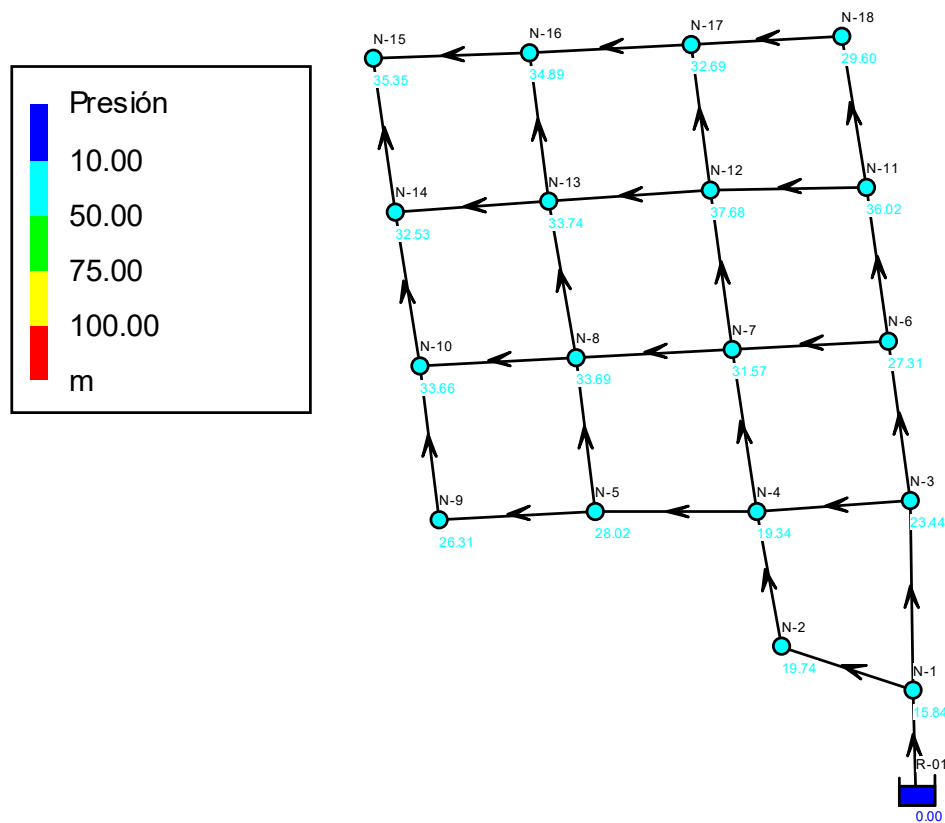
Figura 4.19: Diámetros del diseño inicial A

Figura 4.20: Velocidades del diseño inicial A


Figura 4.21: Presiones del diseño inicial A


Fuente: Elaboración propia

Análisis del diseño inicial A:

- Costo: El costo inicial asciende a la suma de S/ 65,721.05
- Nodos: Cumplen con las restricciones de $10 \leq P \leq 50$ m.c.a
- Velocidad: Los tramos PVC-04, PVC-05, PVC-06, PVC-07, PVC-09, PVC-10, PVC-11, PVC-12, PVC-13, PVC-14, PVC-15, PVC-16, PVC-17, PVC-18, PVC-19, PVC-20, PVC-21, PVC-23, PVC-24 y PVC-25 no cumple con las restricciones de $0.60 \leq V \leq 3.00$ m/s.
- Cabe mencionar que los nodos cumplen con las restricciones de la Normativa Peruana. Sin embargo hay 20 tuberías que no cumplen, por ello este diseño se considera un **Diseño No Optimizado**.

4.1.2. Diseño inicial B:

Se presenta un Diseño Inicial B; con los parámetros que se describen a continuación:

Tabla 4.11: Diámetros y costos del diseño Inicial B

Id_tubos	Diametro (mm)	Longitud (m)	Velocidad (m/s)	Parcial (S/.)
PVC-1	110	48.29	2.87	1,806.05
PVC-2	110	63.59	1.54	2,378.27
PVC-3	110	64.17	1.30	2,399.96
PVC-4	90	68.14	0.76	1,038.45
PVC-5	75	69.45	0.93	1,058.42
PVC-6	32	70.39	0.58	359.69
PVC-7	50	70.96	0.59	745.08
PVC-8	63	71.11	0.88	1,083.72
PVC-9	110	71.21	0.48	2,663.25
PVC-10	63	71.22	1.05	1,085.39
PVC-11	63	71.42	0.53	1,088.44
PVC-12	63	71.48	0.71	1,089.36
PVC-13	40	71.79	2.60	526.22
PVC-14	63	71.93	0.66	1,096.21
PVC-15	63	72.01	0.70	1,097.43
PVC-16	75	72.18	0.91	1,457.31
PVC-17	50	72.3	1.00	759.15
PVC-18	90	72.47	0.65	1,961.76
PVC-19	63	72.71	0.74	1,108.10
PVC-20	32	72.77	2.27	371.85
PVC-21	90	72.98	0.61	1,975.57
PVC-22	110	74.02	0.91	2,768.35
PVC-23	32	74.1	0.78	378.65
PVC-24	110	74.17	0.46	2,773.96
PVC-25	63	74.56	1.05	1,136.29
PVC-26	110	74.58	0.58	2,789.29
PVC-27	110	74.65	0.94	2,791.91
PVC-28	110	87.85	1.28	3,285.59
TOTAL (S/)				43,073.73

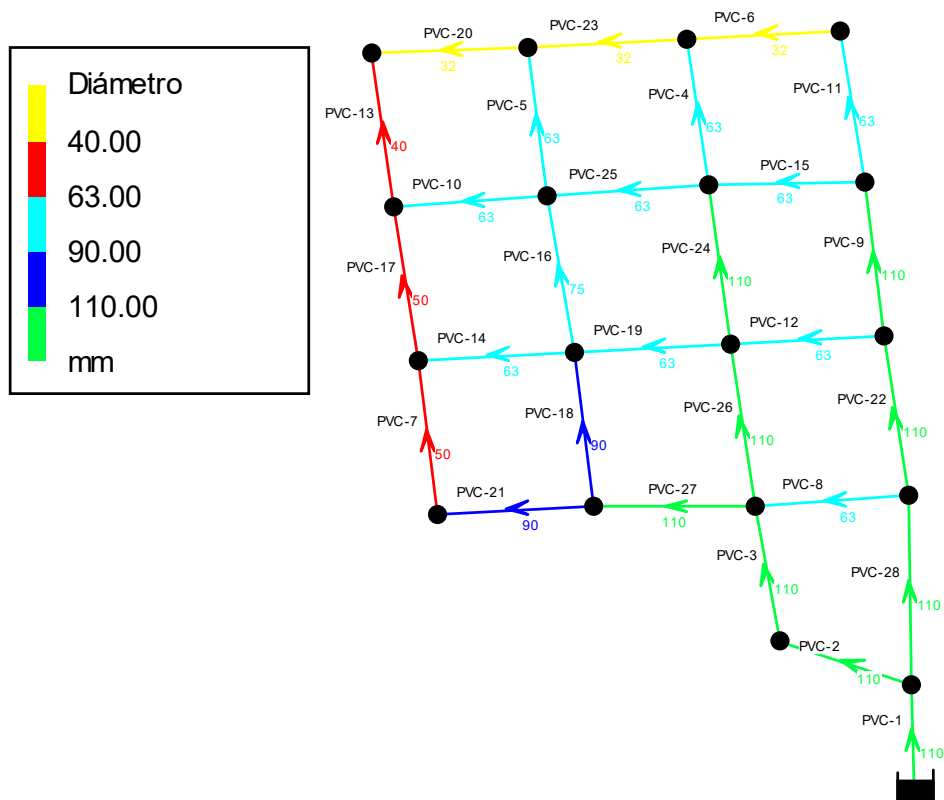
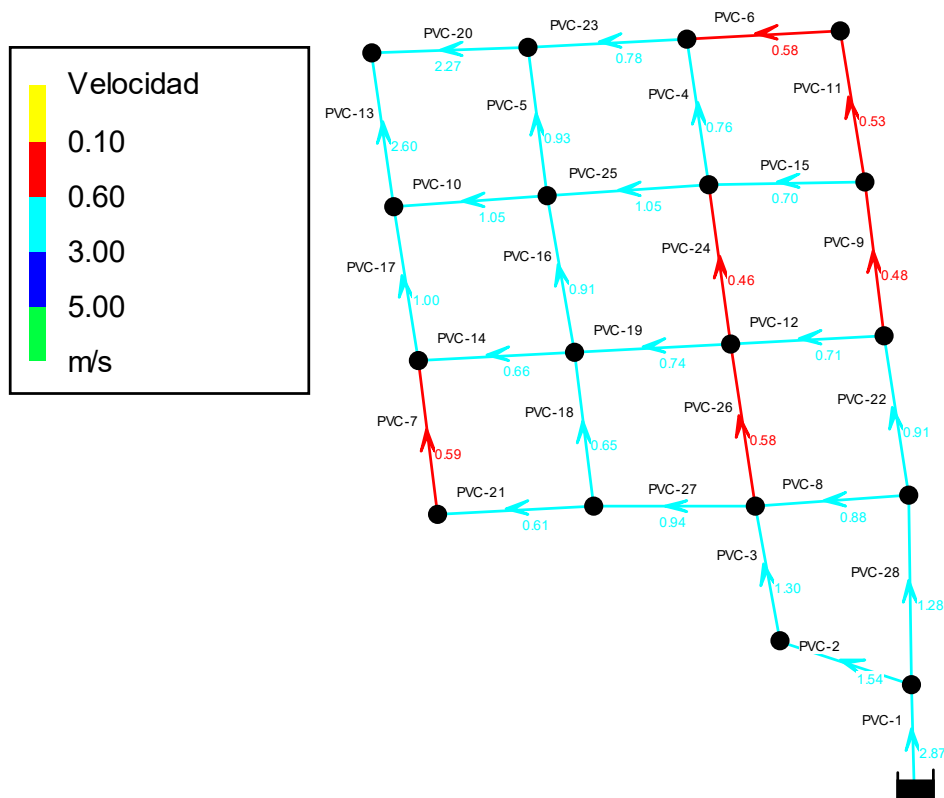
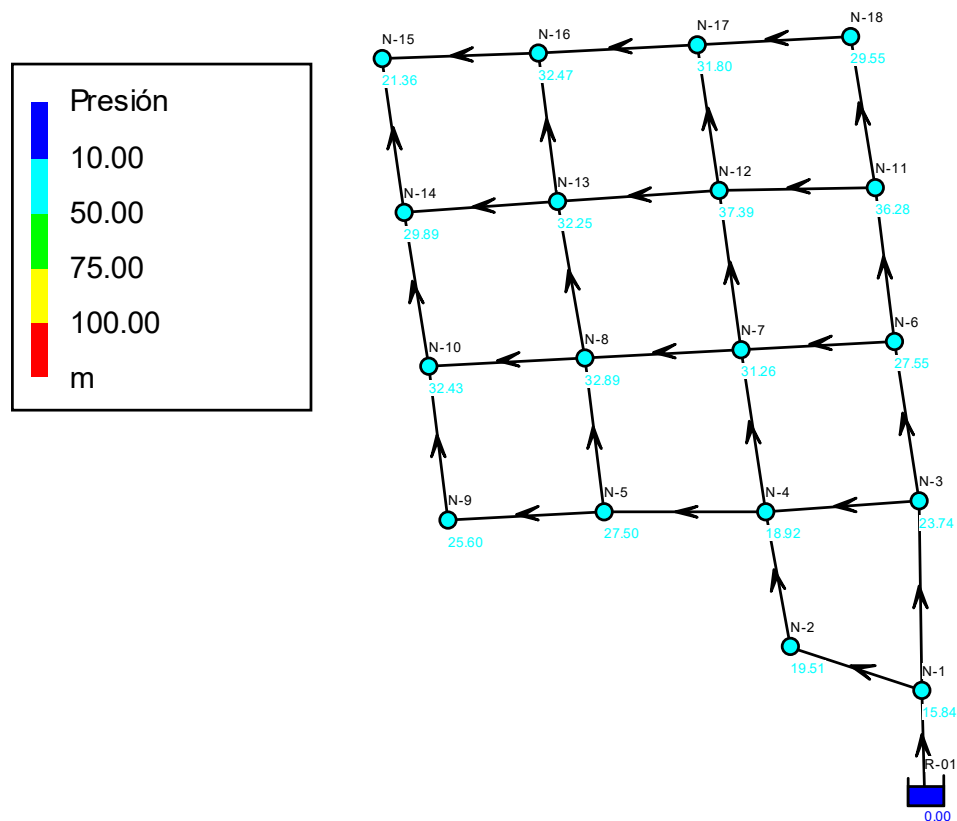
Figura 4.22: Diámetros del diseño inicial B

Figura 4.23: Velocidades del diseño inicial B


Figura 4.24: Presiones del diseño inicial B


Fuente: Elaboración propia

Análisis del diseño inicial B:

- Costo: El costo inicial asciende a la suma de S/ 43,073.73
- Nodos: Cumplen con las restricciones de $10 \leq P \leq 50$ m.c.a
- Velocidad: Los tramos PVC-06, PVC-07, PVC-09, PVC-11, PVC-24 y PVC-26 no cumple con las restricciones de $0.60 \leq V \leq 3.00$ m/s.
- Cabe mencionar que los nodos cumplen con las restricciones de la Normativa Peruana. Sin embargo hay 06 tuberías que no cumplen, por ello este diseño se considera un **Diseño No Optimizado**.

4.2. Análisis de resultados

4.2.1. Hipótesis general

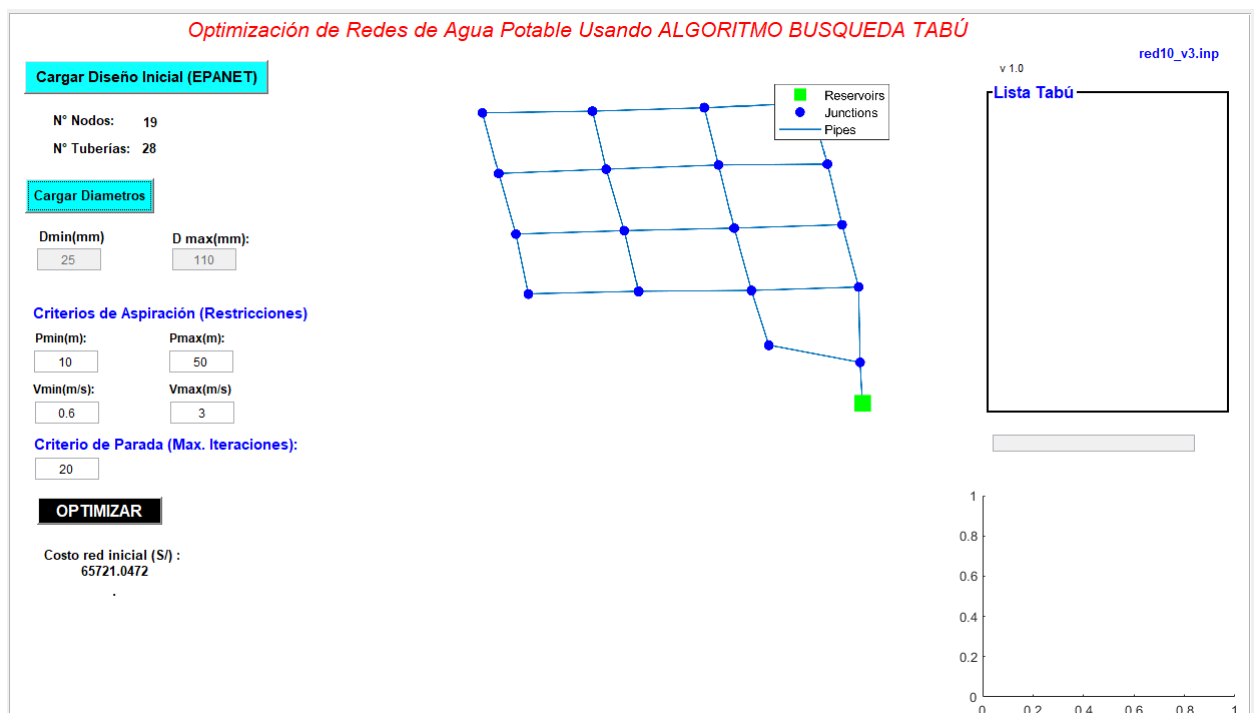
4.2.1.1. Optimización del diseño de redes de distribución de agua mediante el Algoritmo Búsqueda Tabú

Para desarrollar el algoritmo, probar y obtener la solución del problema de optimización de redes de distribución de agua se ha utilizado el Matlab. Para simular la red y analizar si se alcanzan los requisitos hidráulicos, se utilizó el **compilador de C++ (MinGW-w64 para 64 bits)** para poder conectar el Matlab con el Toolkits de Epanet. Este componente incorporado permite definir redes de agua así como simular su desempeño y ha permitido explorar diferentes soluciones de forma iterativa en poco tiempo.

Procedimiento del uso del API(Matlab)

Definidos los parametros iniciales se procede a realizar la optimización de la Red de Distribucion de Agua; mediante el API desarrollado en el Matlab:

Figura 4.25: Interfaz del API en MatLab



Fuente: Elaboración propia

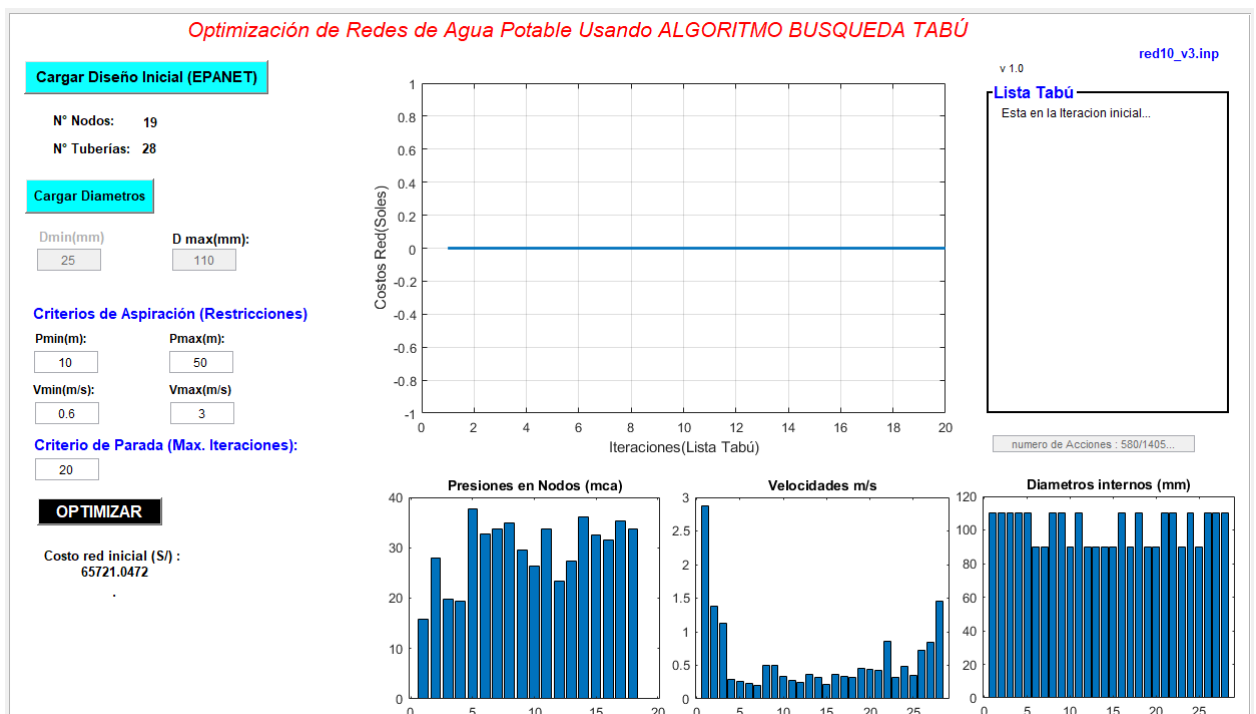
Pasos a seguir:

- El programa carga el archivo de extensión **.inp** (que debe ser creado en EPANET usando un conjunto inicial de diámetros tomados aleatoriamente), y de allí extrae el

número de tuberías y el número de nodos.

- Cargar la tabla de Diámetros (mm) en Excel.
- Colocar los Criterios de Aspiración que viene a ser las restricciones de presión en nodos y velocidad en tuberías; acuerdo a la Normativa Peruana.
- Colocar el Criterio de Parada (Número máximo de iteraciones).
- Al cargar los datos mencionados anteriormente; el programa realiza el cálculo del costo inicial y así también simula los parámetros iniciales, tal como se muestra en la figura(??).

Figura 4.26: Interfaz del API (Solución Inicial)

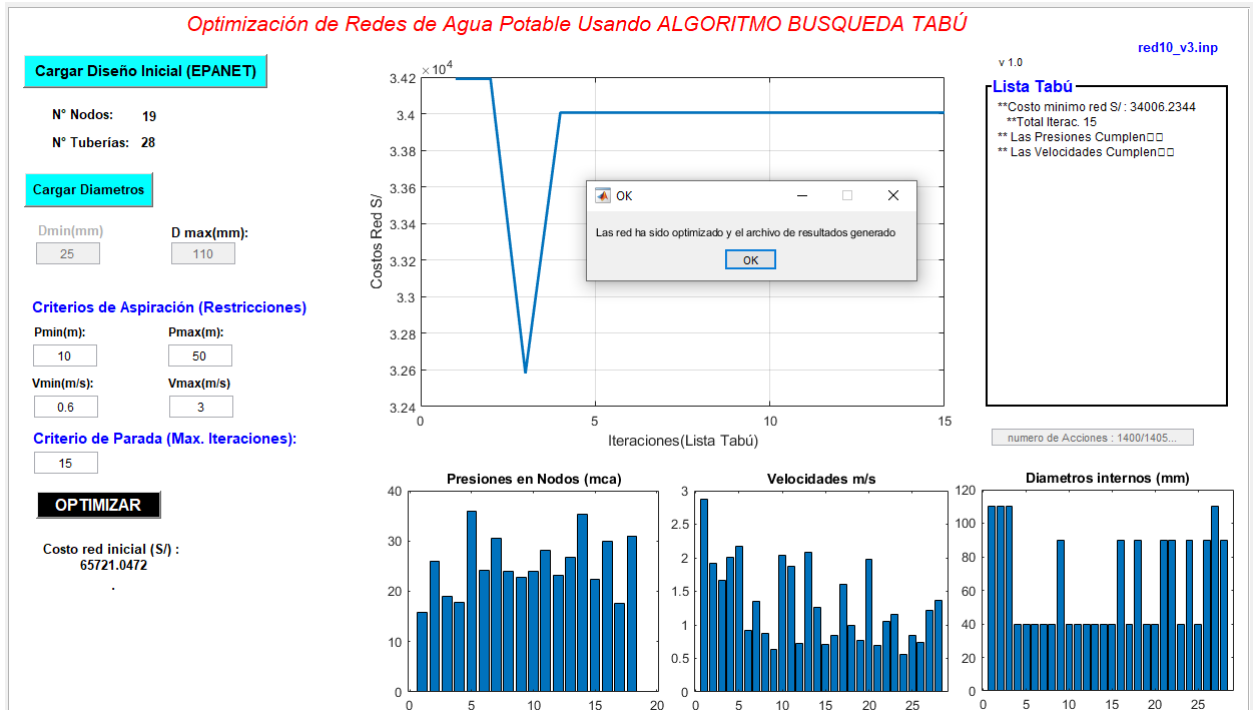


Fuente: Elaboración propia

- En cada iteración se mostrará el costo de las tuberías y la tendencia se mostrará en el gráfico implementado en el API.
- En cada iteración se mostrará las simulaciones de las presiones, velocidades y diámetros.
- Al finalizar las iteraciones, los resultados (Costo óptimo) se mostrarán en la pantalla y así también el cumplimiento de las restricciones. Tal como se muestra en la figura(4.27).
- Los resultados finales de cada iteración se guardarán en el Archivo Base del programa.

- Cabe mencionar que la Red Optimizada se guardará en archivo de extensión **.inp** (EPANET). Esto servirá para validar los datos de la Red Optimizada.

Figura 4.27: Interfaz del API (Solución Óptima)



Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2. Optimización del diseño inicial A

- **Solución óptima:** Del análisis de los resultados se obtuvo que el costo mínimo encontrado es S/. 34,006.23. Así también se verifica el cumplimiento de las restricciones en nodos y tuberías acorde a la Normativa Peruana.

Figura 4.28: Costo óptimo del diseño A (Interfaz del API)

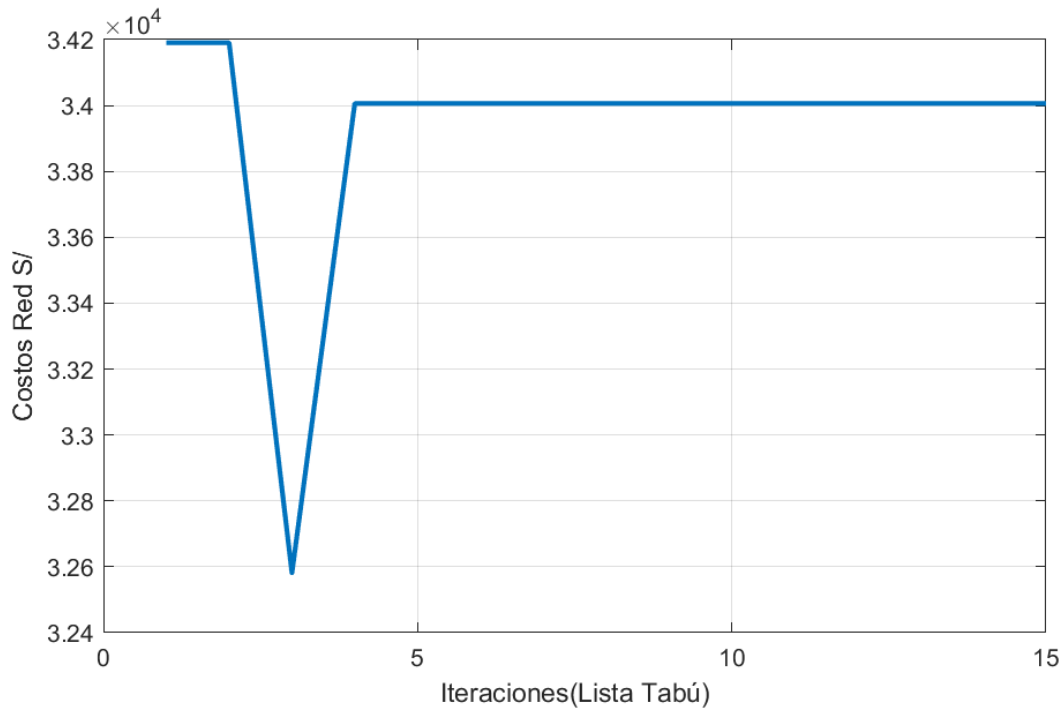
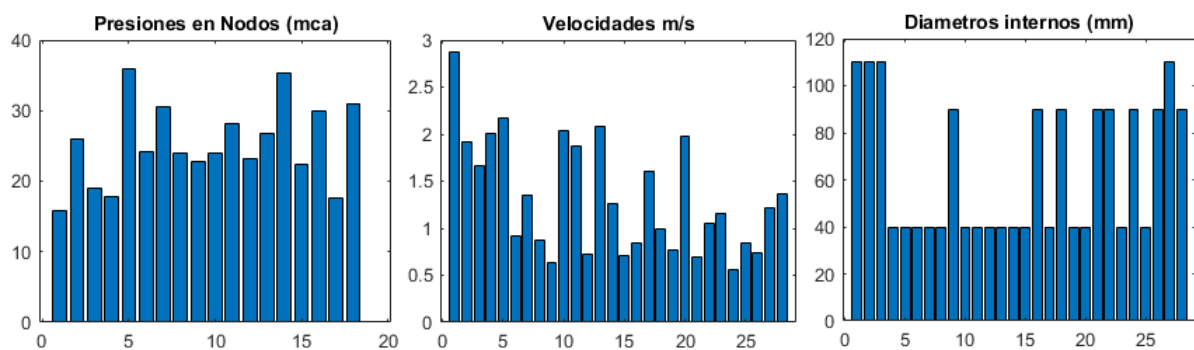
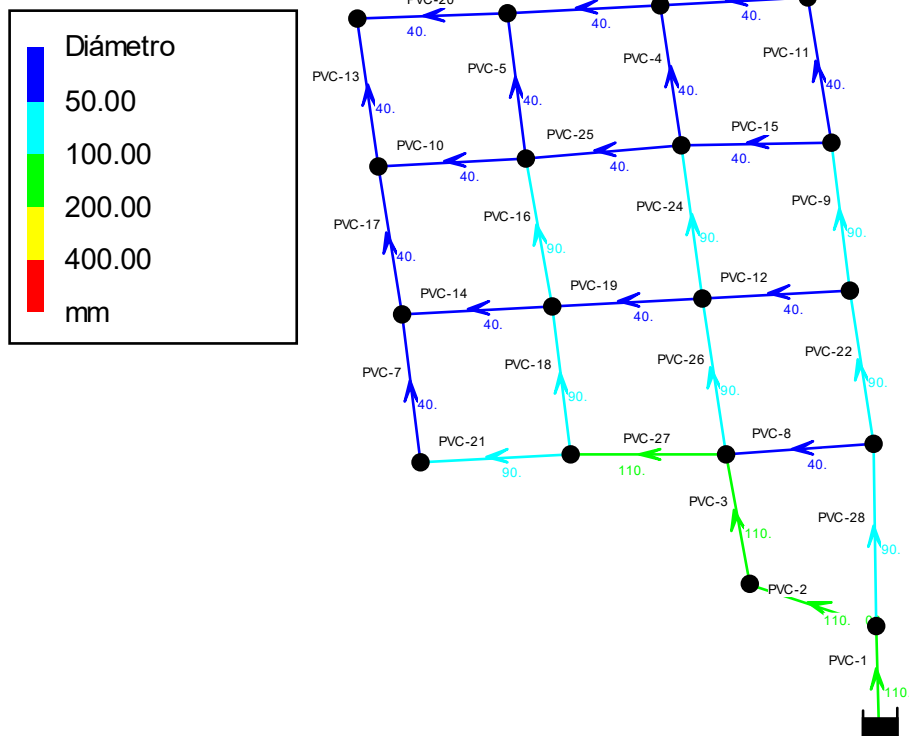


Figura 4.29: Cumplimiento de restricciones (Interfaz del API)

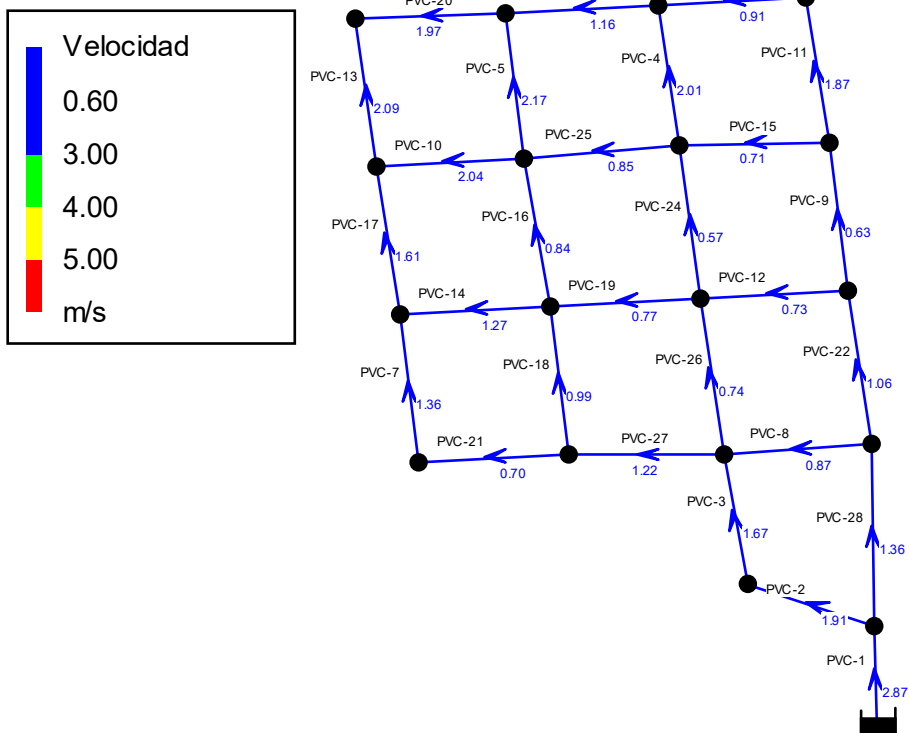


Análisis de restricciones:

- Presiones en Nodos: Cumplen con las restricciones de ($10 \leq P \leq 50$ m.c.a).
 - Velocidad en tuberías: Todas las tuberías cumplen con la restricción de velocidad ($0.60 \leq V \leq 3.00$ m/s).
- **Simulación de diámetros óptimos:** A continuación se muestra la simulación del conjunto de diámetros óptimos de la Red Inicial A.

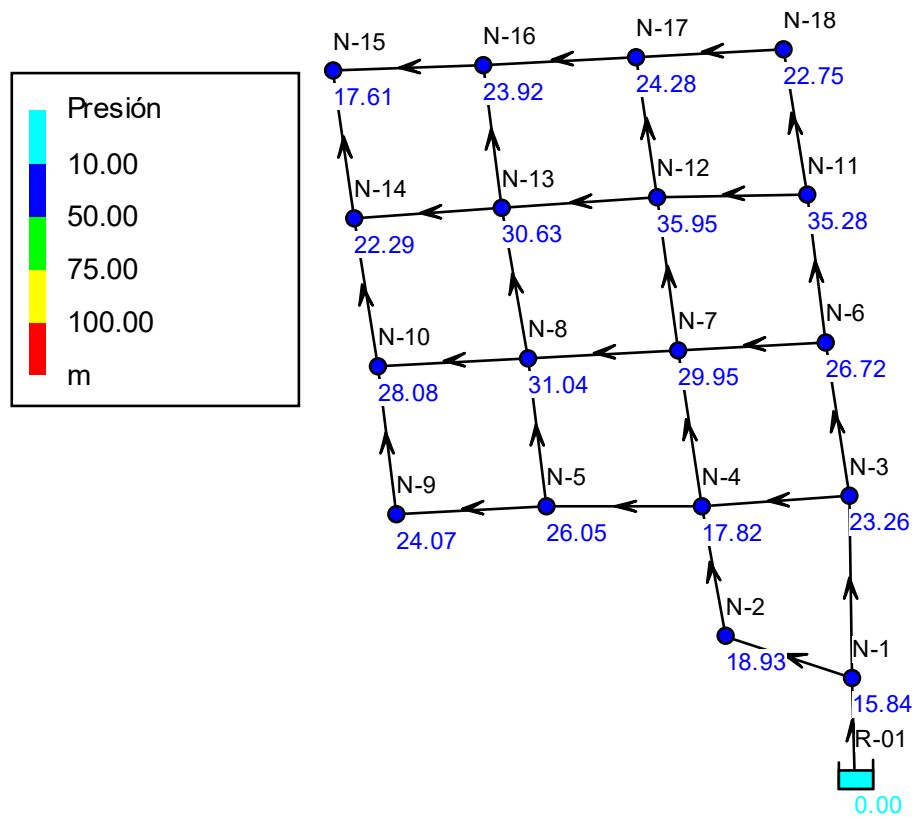
Figura 4.30: Diámetros óptimos del Diseño A


■ **Simulación de velocidades óptimas:**

Figura 4.31: Velocidades óptimas del Diseño A


■ Simulación de presiones óptimas:

Figura 4.32: Presiones óptimas del Diseño A



4.2.1.3. Optimización del diseño inicial B

- **Solución óptima:** Del análisis de los resultados se obtuvo que el costo mínimo encontrado es S/. 38,630.72. Así también se verifica el cumplimiento de las restricciones en nodos y tuberías acorde a la Normativa Peruana.

Figura 4.33: Costo óptimo del Diseño B (Interfaz del API)

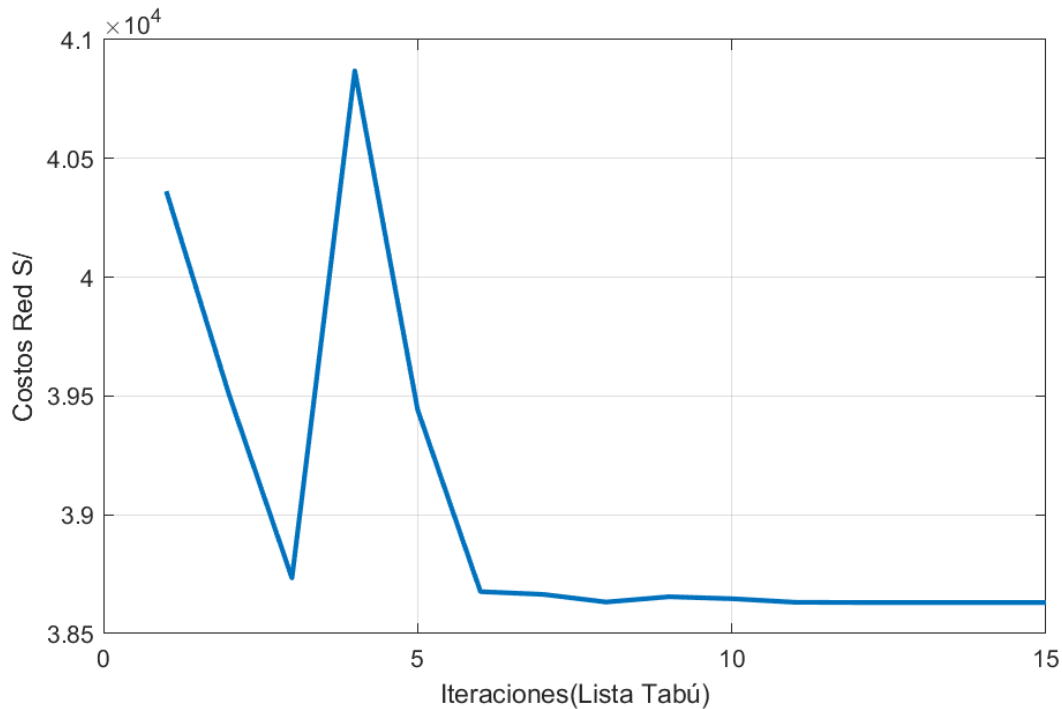
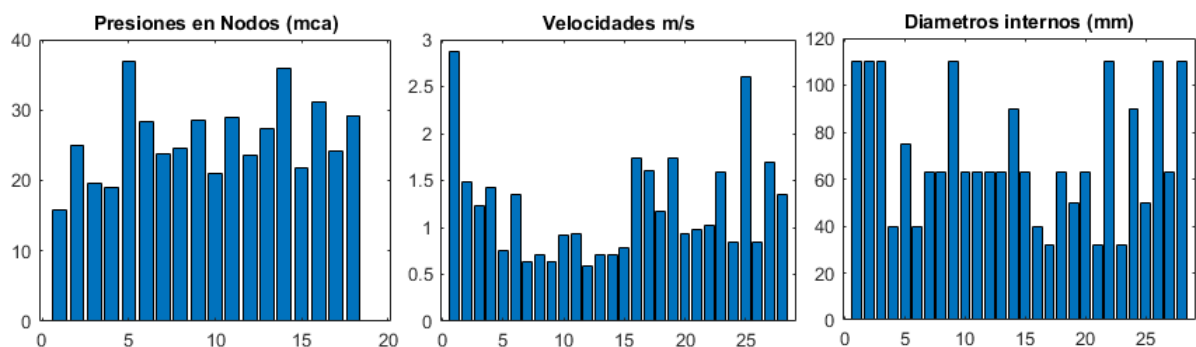
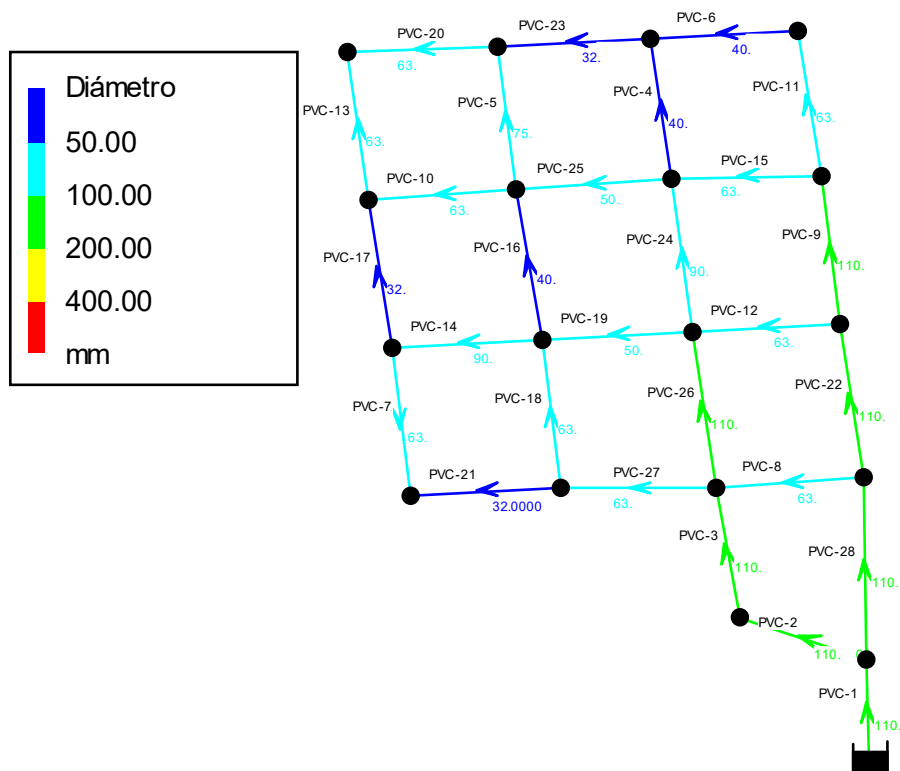


Figura 4.34: Cumplimiento de restricciones (Interfaz del API)

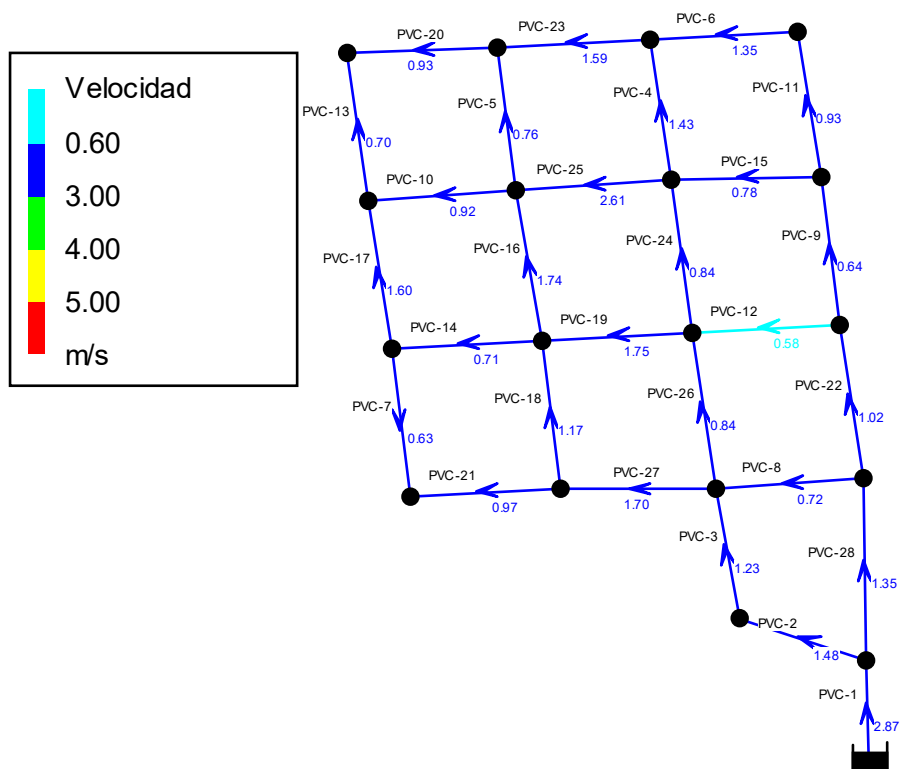


Análisis de restricciones:

- Presiones en Nodos: Cumplen con las restricciones de ($10 \leq P \leq 50$ m.c.a).
 - Velocidad en tuberías: Todas las tuberías cumplen con la restricción de velocidad ($0.60 \leq V \leq 3.00$ m/s).
- **Simulación de diámetros óptimos:** A continuación se muestra la simulación del conjunto de diámetros óptimos de la Red Inicial B.

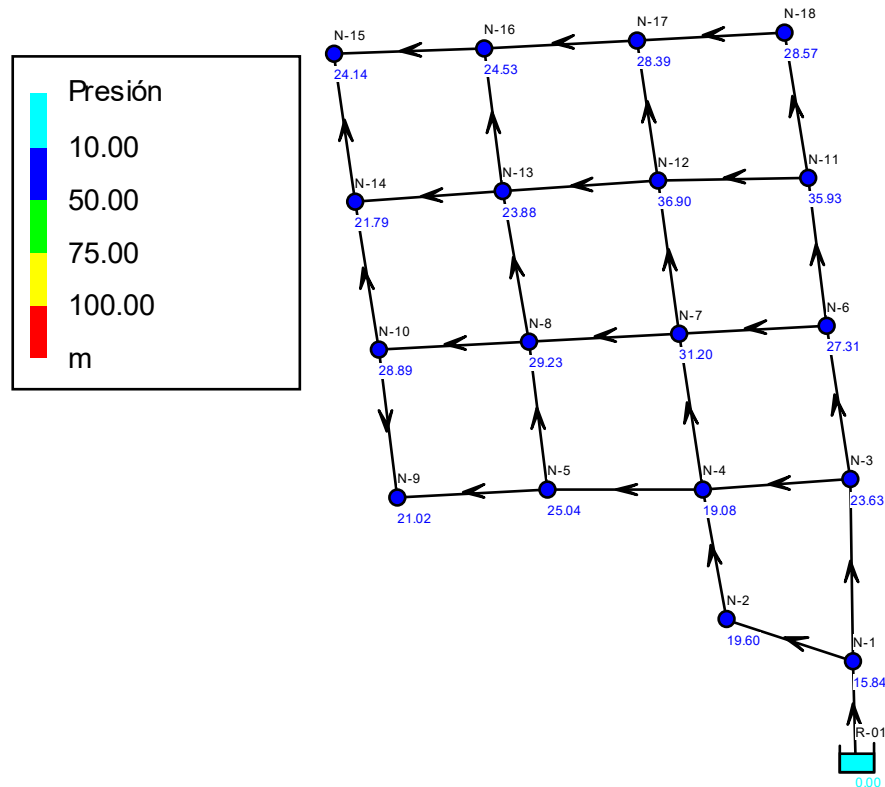
Figura 4.35: Diámetros óptimos del Diseño B


■ **Simulación de velocidades óptimas:**

Figura 4.36: Velocidades óptimas del Diseño B


■ Simulación de presiones óptimas:

Figura 4.37: Presiones óptimas del Diseño B



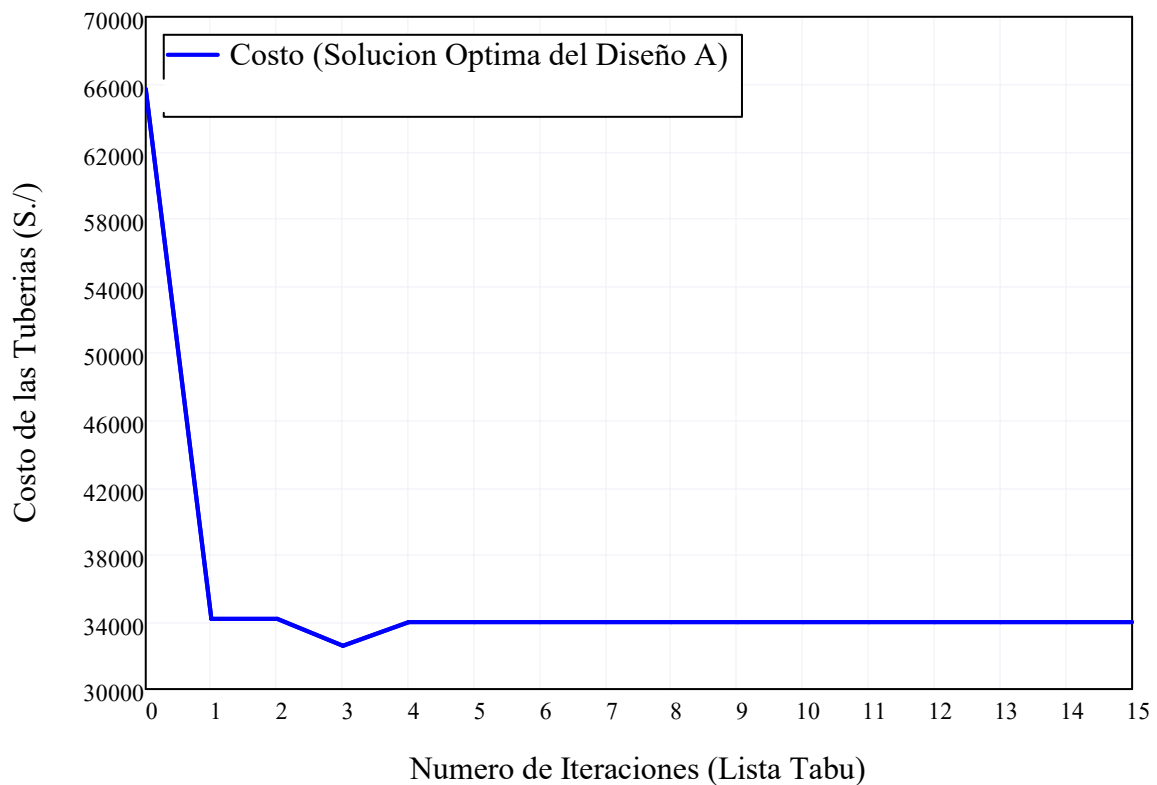
4.2.2. Hipótesis específico 01

4.2.2.1. Costos óptimos de la red inicial A

Al aplicar el Algoritmo Búsqueda Tabú al diseño inicial A, mediante el API en Matlab, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.12: Costos óptimos en cada iteración de la Red inicial A

N°	ITERACIÓN	COSTO (\$.)
00	Costo Inicial	65,721.05
01	Iteración N° 01	34,190.56
02	Iteración N° 02	34,190.56
03	Iteración N° 03	32,581.40
04	Iteración N° 04	34,006.23
05	Iteración N° 05	34,006.23
06	Iteración N° 06	34,006.23
07	Iteración N° 07	34,006.23
08	Iteración N° 08	34,006.23
09	Iteración N° 09	34,006.23
10	Iteración N° 10	34,006.23
11	Iteración N° 11	34,006.23
12	Iteración N° 12	34,006.23
13	Iteración N° 13	34,006.23
14	Iteración N° 14	34,006.23
15	Iteración N° 15	34,006.23

Figura 4.38: Gráfica de los costo óptimos de la Red Inicial A


Fuente: Elaboración propia

Comparación del costo de la red optimizada y la Red Inicial A:

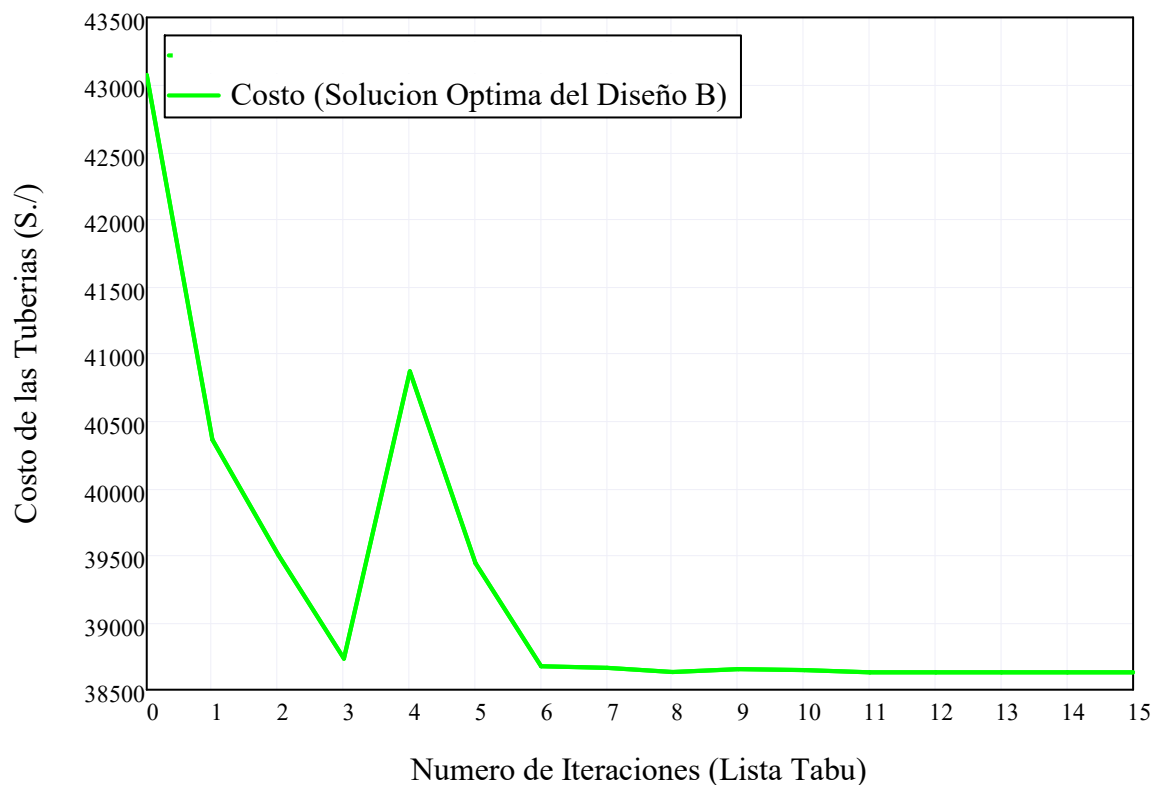
- El costo inicial fue S/. 65,721.05.
- El costo óptimo hallado por el Algoritmo Búsqueda Tabú es S/. 34,006.23
- La diferencia entre el monto del diseño inicial y el costo óptimo es la suma de S/. 31,714.81. Siendo éste un monto considerable con respecto al inicial.
- Se observa la optimización de costos en cada iteración hasta encontrar la solución más óptima.

4.2.2.2. Costos óptimos de la red inicial B

Al aplicar el Algoritmo Búsqueda Tabú al diseño inicial B, mediante el API en Matlab, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.13: Costos óptimos en cada iteración de la Red inicial B

N°	ITERACIÓN	COSTO (S./)
00	Costo Inicial	43,073.73
01	Iteración N° 01	40,362.31
02	Iteración N° 02	39,504.99
03	Iteración N° 03	38,733.86
04	Iteración N° 04	40,869.41
05	Iteración N° 05	39,442.68
06	Iteración N° 06	38,676.50
07	Iteración N° 07	38,664.92
08	Iteración N° 08	38,632.74
09	Iteración N° 09	38,655.05
10	Iteración N° 10	38,646.74
11	Iteración N° 11	38,631.86
12	Iteración N° 12	38,630.72
13	Iteración N° 13	38,630.72
14	Iteración N° 14	38,630.72
15	Iteración N° 15	38,630.72

Figura 4.39: Gráfica de los costo óptimos de la Red Inicial B


Fuente: Elaboración propia

Comparación del costo de la red optimizada y la Red Inicial B:

- El costo inicial fue S/. 65,721.05.
- El costo óptimo hallado por el Algoritmo Búsqueda Tabú es S/. 34,006.23

- La diferencia entre el monto del diseño inicial y el costo óptimo es la suma de S/. 31,714.81. Siendo éste un monto considerable con respecto al inicial.
- Se observa la optimización de costos en cada iteración hasta encontrar la solución más óptima.

4.2.3. Hipótesis específico 02

4.2.3.1. Lista tabú del diseño A

En la figura. (4.40) se registró el total de movimientos(soluciones) que realizó el Algoritmo Búsqueda Tabú hasta encontrar la solución óptima de la red en evaluación.

Figura 4.40: Lista Tabú(Interfaz del API)

Lista Tabú	
Iter. 1:	Costo (S/) = 34190.5586.....
Iter. 2:	Costo (S/) = 34190.5586.....
Iter. 3:	Costo (S/) = 32581.4012.....
Iter. 4:	Costo (S/) = 34006.2344.....
Iter. 5:	Costo (S/) = 34006.2344.....
Iter. 6:	Costo (S/) = 34006.2344.....
Iter. 7:	Costo (S/) = 34006.2344.....
Iter. 8:	Costo (S/) = 34006.2344.....
Iter. 9:	Costo (S/) = 34006.2344.....
Iter. 10:	Costo (S/) = 34006.2344.....
Iter. 11:	Costo (S/) = 34006.2344.....
Iter. 12:	Costo (S/) = 34006.2344.....
Iter. 13:	Costo (S/) = 34006.2344.....
Iter. 14:	Costo (S/) = 34006.2344.....

Fuente: Elaboración propia

- La cantidad de iteraciones que necesitó, el Algoritmo Búsqueda Tabú, para calcular la solución óptima fue 4 iteraciones. A partir de la iteración N° 05 el Algoritmo no puede escapar de la Búsqueda Local y toma el resultado de la iteración N° 05 como la más óptima.
- Cabe mencionar que la lista tabú depende de la cantidad de soluciones descartadas, por el Algoritmo Búsqueda Tabú, hasta encontrar la solución óptima. Para nuestro caso solo fue necesario 04 iteraciones.
- Aplicando el criterio de parada(número máximo de iteraciones), sólo sería necesario realizar 04 iteraciones para encontrar la solución óptima; esto lo definió la Lista Tabú.

4.2.3.2. Lista tabú del diseño B

En la figura. (4.41) se registró el total de movimientos(soluciones) que realizó el Algoritmo Búsqueda Tabú hasta encontrar la solución óptima de la red en evaluación.

Figura 4.41: Lista Tabú(Interfaz del API)

Lista Tabú	
Iter. 1: Costo (S/) = 40362.3121.....	
Iter. 2: Costo (S/) = 39504.992.....	
Iter. 3: Costo (S/) = 38733.8574.....	
Iter. 4: Costo (S/) = 40869.4071.....	
Iter. 5: Costo (S/) = 39442.6769.....	
Iter. 6: Costo (S/) = 38676.5008.....	
Iter. 7: Costo (S/) = 38664.9178.....	
Iter. 8: Costo (S/) = 38632.7402.....	
Iter. 9: Costo (S/) = 38655.0464.....	
Iter. 10: Costo (S/) = 38646.7398.....	
Iter. 11: Costo (S/) = 38631.8562.....	
Iter. 12: Costo (S/) = 38630.7186.....	
Iter. 13: Costo (S/) = 38630.7186.....	
Iter. 14: Costo (S/) = 38630.7186.....	

Fuente: Elaboración propia

- La cantidad de iteraciones que necesitó, el Algoritmo Búsqueda Tabú, para calcular la solución óptima fue 12 iteraciones. A partir de la iteracion N° 13 el Algoritmo no puede escapar de la Búsqueda Local y toma el resultado de la iteracion N° 12 como las más óptima.
- Cabe mencionar que la lista tabú depende de la cantidad de soluciones descartadas, por el Algoritmo Búsqueda Tabú, hasta encontrar la solución optima. Para nuestro caso solo fue necesario 04 iteraciones.
- Aplicando el criterio de parada(número maximo de iteraciones),sólo sería necesario realizar 12 iteraciones para encontrar la solución optima; esto lo definió la Lista Tabú.

4.2.3.3. Relación entre el criterio de parada y lista tabú

En la optimización del del diseño A y B, se determinó que el número máximo de iteraciones depende de la Lista Tabú.

Tabla 4.14: Relación entre el número máximo de iteraciones y Lista Tabú

Red	Lista Tabú	Número máximo de Iteraciones
Diseño A	04	04
Diseño B	12	12

- En la tabla (4.14) se puede apreciar que la lista tabú depende la solución inicial planteada; no siendo este el mismo para todos los casos.
- Determinar el número máximo de iteraciones a realizar en la optimación de una red, es necesario para así no perder demasiado tiempo en la búsqueda de la solución óptima; teniendo en cuenta que el algoritmo demora un cierto intervalo de tiempo en cada iteración.

4.2.4. Hipótesis específico 03

4.2.4.1. Evaluación de los resultados obtenidos del diseño A y B

Figura 4.42: Gráfico de costos óptimos del Diseño A y B

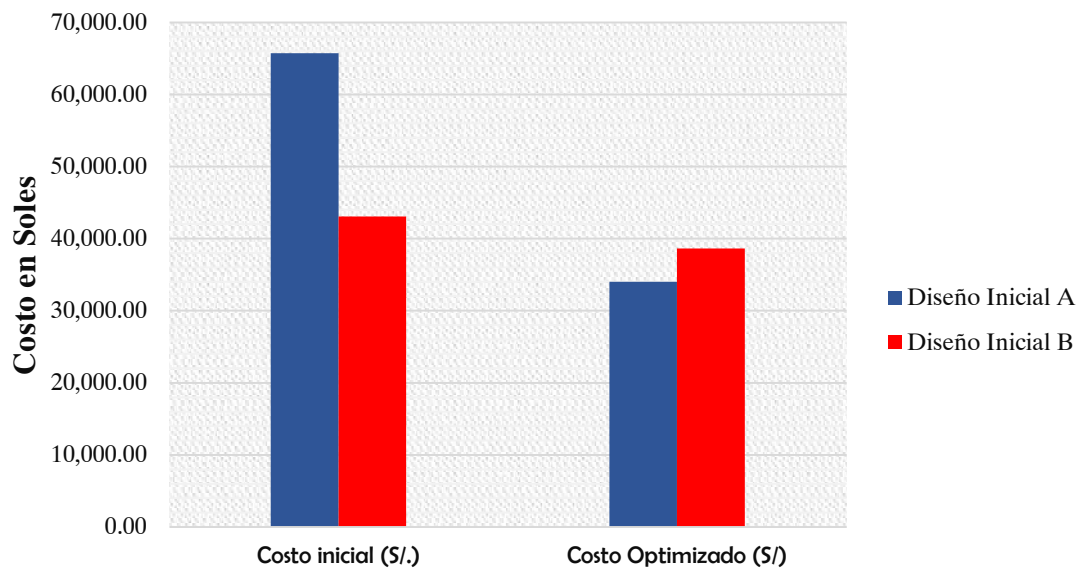
Fuente: Elaboración propia

- En el gráfico (4.42) se puede apreciar que para determinar la solución óptima A, solo se necesitó realizar 04 iteraciones, mientras que en el caso del Diseño B se necesitó 12 iteraciones.
- Cabe indicar que la elección de un determinada solución inicial (Diseño) influye directamente en la cantidad de iteraciones a realizar hasta encontrar la solución óptima.
- Teniendo en cuenta que en cada iteración, el Algoritmo Búsqueda Tabú, demora un intervalo de tiempo; el tiempo para calcular la solución óptima del Diseño B fue mayor que del Diseño A.

4.2.4.2. Evaluación de los costos del diseño A y B

Tabla 4.15: Costos iniciales y óptimos de Diseño A y B

Red	Costo inicial (S/.)	Costo Optimizado (S/)	Variación (S/)
Diseño Inicial A	65,721.05	34,006.23	31,714.81
Diseño Inicial B	43,073.73	38,630.72	4,443.02

Figura 4.43: Gráfico de costos del Diseño A y B


Fuente: Elaboración propia

- En la tabla (4.43) se aprecia que la variación (Costo óptimo - Costo inicial) es mayor en el Diseño A que en la B, con esto se concluye que la elección de una solución inicial (Diseño) determina la calidad de optimización y así también el tiempo que amerita calcular la solución óptima.

Capítulo V: Conclusiones

Conclusiones

1. Se ha demostrado que el Algoritmo Búsqueda Tabú puede resolver problemas complejos, como la optimización de redes de distribución de agua potable. En ese sentido; el API elaborado en Matlab fue capaz de resolver los diseños iniciales planteados con resultados óptimos a nivel de costos y paralelamente cumpliendo las restricciones de la Normativa Peruana(OS.050).
2. En la tabla (5.16) se puede apreciar que los costos de las redes optimizadas son menores al redes iniciales. Estos significa que el Algoritmo Búsqueda Tabú permite economizar el costo de las tuberías cumpliendo las restricciones hidráulicas.

Tabla 5.16: Costos iniciales y óptimos de Diseño A y B

Red	Costo inicial (S/.)	Costo Optimizado (S/)	Variación (S/)
Diseño Inicial A	65,721.05	34,006.23	31,714.81
Diseño Inicial B	43,073.73	38,630.72	4,443.02

3. En el proceso de optimización mediante el Algoritmo Búsqueda Tabú se determinó que el número máximo de iteración depende directamente de la Lista Tabú (posible soluciones). Esto permite tener tener la certeza de cuantas iteraciones son necesarias para encontrar la solución óptima; teniendo en cuenta que el algoritmo demora un intervalo de tiempo en cada iteración.
4. La calidad de los resultados de la optimización depende en gran medida de la calidad de los datos utilizados. El ahorro, a nivel económico, fue mayor en la Red Inicial A que la del Red Inicial B; así tambien se necesitó menos tiempo para hallar la solución óptima con respecto a la segunda. En conclusión; la eleccion de una solución inicial permitirá definir la calidad y el tiempo es necesario para encontrar la solución óptima.

Recomendaciones

1. Registrar todo el proceso de optimización, incluyendo los datos utilizados, el modelo, los parámetros del algoritmo y los resultados obtenidos. Esto facilita la revisión y la replicación del proceso en el futuro.
2. La aplicación de la BT en la optimización de redes de distribución de agua esta en pleno desarrollo y es necesario seguir mejorando. Por ejemplo, es probable que se requiera el desarrollo de mecanismos de movimiento mejorados que puedan realizar la búsqueda de vecindarios de manera más sistemática y eficiente para resolver redes de distribución de agua prácticas o de gran escala.

Trabajos futuros

1. Los trabajos futuros puede incluir la resolución de redes más grandes que incluyan distintos dispositivos de control hidráulico utilizando la Búsqueda Tabu en combinación con otras metaheurísticas para demostrar el buen desempeño de la metodología aplicada en esta tesis.

Referencias

Metodología de la Investigación

- García, C. F. (2008). *La tesis y el trabajo de tesis: recomendaciones metodológicas para la elaboración de los trabajos de tesis*. Editorial Limusa S.A.
- Hernández, S. R., Fernández, C. C. & Baptista, L. P. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico McGraw-Hill.
- Tamayo, M. (2007). *Metodología de la Investigación*.

Ingeniería de tuberías

- Boulos, P. F., Karney, B. W., Wood, D. J. & Lingireddy, S. (2005). Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. *Journal-American Water Works Association*, 97(5), 111-124.
- Haestad, M. (2002). *WaterCAD User's Guide*. Haestad Methods, Inc. 37 Brookside Road, Waterbury, CT 06708-1499 USA.
- Hopkins, P. (2007). Oil and gas pipelines: Yesterday and today. *International Petroleum Technology Institute, ASME, New York*.
- Jovic, V. (2013). *Analysis and modelling of non-steady flow in pipe and channel networks*. John Wiley & Sons.
- Larock, B. E., Jeppson, R. W. & Watters, G. Z. (1999). *Hydraulics of pipeline systems*. CRC press.
- Liu, H. (2017). *Pipeline engineering*. CRC Press.
- Menapace, A., Avesani, D., Righetti, M., Bellin, A. & Pisaturo, G. (2018). Uniformly distributed demand EPANET extension. *Water resources management*, 32(6), 2165-2180.

Inteligencia Artificial

- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13(5), 533-549.

Metaheurística

- Kiranyaz, S., Ince, T. & Gabbouj, M. (2014). *Multidimensional particle swarm optimization for machine learning and pattern recognition*. Springer.
- Martí, R., Moreno, J. et al. (2000). Meta Heurísticos en Optimización Combinatoria. *World Wide Web*, <http://www.uv.es/~rmarti/heur.html>.
- Osman, I. H. & Kelly, J. P. (1996). Meta-heuristics: an overview. *Meta-heuristics*, 1-21.

Búsqueda Tabú

- Al-Sultan, K. S. & Fedjki, C. A. (1997). A tabu search-based algorithm for the fuzzy clustering problem. *Pattern Recognition*, 30(12), 2023-2030.
- Baba Yamakawa, K. (2015). *Tesis para optar el Título de Ingeniero Informático: Implementación de un algoritmo búsqueda tabú para el problema de selección de portafolio aplicado a inversiones en bolsas de valores*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Da Conceicao Cunha, M. & Ribeiro, L. (2004). Tabu search algorithms for water network optimization. *European Journal of Operational Research*, 157(3), 746-758.
- Glover, F. & Laguna, M. (1998). *Tabu search*. Springer.
- Kovačević-Vujčić, V., Čangalović, M., Ašić, M., Ivanović, L. & Dražić, M. (1999). Tabu search methodology in global optimization. *Computers & Mathematics with Applications*, 37(4-5), 125-133.
- Laguna, M. (1994). A guide to implementing tabu search. *Investigación Operativa*, 4(1), 5-25.
- Mendoza Apaza, O. D. (2017). *Tesis: Diseño e implementación de un circuito turístico inteligente en la Región Puno mediante la metaheurística Búsqueda Tabú*. Universidad Peruana Unión.
- Quevedo Orozco, D. R. & Ríos Mercado, R. Z. (2010). Uso de búsqueda Tabú en la solución del problema de asignación cuadrática. *Ingenierías*, 13(48), 40-48.
- Rejas Cano, E. A. (2014). *Tesis para optar el Título de Ingeniero Informático: Diseño de un algoritmo de búsqueda tabú para resolver el problema de la selección de proyectos*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Salhi, S. (2002). Defining tabu list size and aspiration criterion within tabu search methods. *Computers & Operations Research*, 29(1), 67-86.
- Suárez, J. G., Manchego, F. A. & Nicho, A. A. N. G. B. (2010). Generación Inteligente de Horarios empleando heurísticas GRASP con Búsqueda Tabú para la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Revista de Ingeniería Informática PUCP*, 1(1), 15-23.
- Tsubakitani, S. & Evans, J. R. (1998). Optimizing tabu list size for the traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*, 25(2), 91-97.

Optimización de redes de distribución de agua

- Dandy, G., Simpson, A. & Murphy, L. (1993). A review of pipe network optimisation techniques.
- Engelhardt, M. O., Skipworth, P. J., Savic, D. A., Saul, A. J. & Walters, G. A. (2000). Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective. *Urban Water*, 2(2), 153-170.
- Fanni, A., Liberatore, S., Sechi, G. M., Soro, M. & Zuddas, P. (2000). Optimization of water distribution systems by a tabu search metaheuristic. *Computing Tools for Modeling, Optimization and Simulation* (pp. 279-298). Springer.
- Gao, X. & Gao, Y. (2013). Optical Distribution Network Partitioning Method Based on Tabu Search. *Applied Mechanics and Materials*, 427, 2395-2398.
- Goulter, I. (1992). Systems analysis in water-distribution network design: From theory to practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(3), 238-248.
- Lansey, K. E. (2008). The evolution of optimizing water distribution system applications. *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 1-20.
- Lansey, K. E. & Mays, L. W. (1989). Optimization models for design of water distribution systems. *Reliability Analysis of Water Distribution Systems. Part 1: State-of-the-Art* (pp. 37-84).
- Macêdo, J. E. S. d., Azevedo, J. R. G. d. & Bezerra, S. d. T. M. (2021). Hybrid particle swarm optimization and tabu search for the design of large-scale water distribution networks. *RBRH*, 26.
- Mala-Jetmarova, H., Sultanova, N. & Savic, D. (2017). Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental modelling & software*, 93, 209-254.
- Ormsbee, L. E. & Lansey, K. E. (1994). Optimal control of water supply pumping systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(2), 237-252.
- Ostfeld, A. & Shamir, U. (1993). Incorporating reliability in optimal design of water distribution networks—review and new concepts. *Reliability Engineering & System Safety*, 42(1), 5-11.
- Robles, V. A. (2018). *Tesis de Máster Universitario en Organización Industrial y Gestión de Empresas: Diseño óptimo de redes de distribución de agua mediante algoritmos de búsqueda tabú*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla.
- Robles-Velasco, A., Cortés, P., Muñuzuri, J. & Escudero-Santana, A. (2018). Optimization of Water Supply Network Design Based on a Tabu Search Algorithm. *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 61-69.
- Savic, D. A., Kapelan, Z. S. & Jonkergouw, P. M. (2009). Quo vadis water distribution model calibration? *Urban Water Journal*, 6(1), 3-22.

- Savić, D., Mala-Jetmarova, H. et al. (2018). History of optimization in water distribution system analysis. *WDSA/CCWI Joint Conference Proceedings, 1*.
- Shamir, U. (1974). Optimal design and operation of water distribution systems. *Water resources research, 10*(1), 27-36.
- Shamir, U. (1979). Optimization in water distribution systems engineering. *Engineering optimization* (pp. 65-84). Springer.
- Simpson, A. R., Dandy, G. C. & Murphy, L. J. (1994). Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of water resources planning and management, 120*(4), 423-443.
- Sung, Y.-H., Lin, M.-D., Lin, Y.-H. & Liu, Y.-L. (2007). Tabu search solution of water distribution network optimization. *Journal of Environmental Engineering and management, 17*(3), 177.
- Walski, T. M. (1985). State-of-the-art pipe network optimization. *Computer applications in water resources, 559-568*.
- Walters, G. A. (1992). A review of pipe network optimization techniques. *Pipeline systems, 3-13*.
- Walters, G. A. & Cembrowicz, R. (1993). Optimal design of water distribution networks. *Water Supply Systems, state of the art and future trends, 91-117*.

Anexo A

Resultados de cada iteración (Optimización mediante Algoritmo Búsqueda Tabú - API Matlab)

A.1. Diseño inicial A

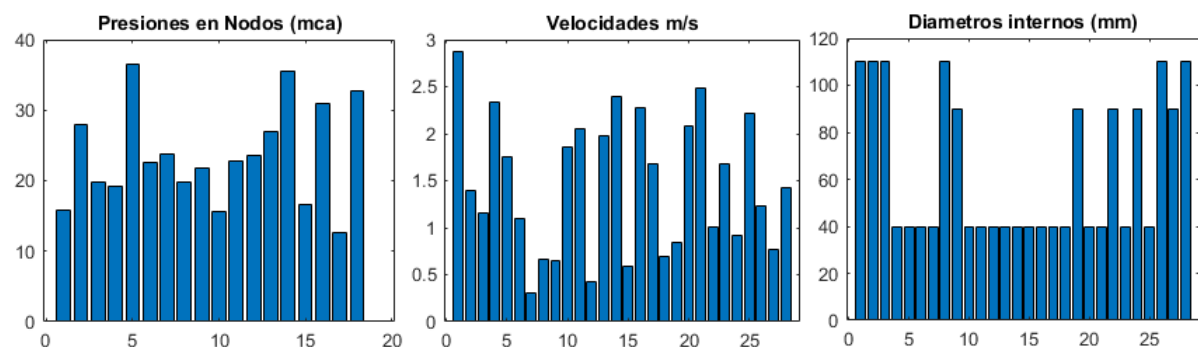
A.1.1. Resultados de cada iteración (Costos optimos, presiones y velocidades)

Iteración N° 01

Tabla A.1: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 01)

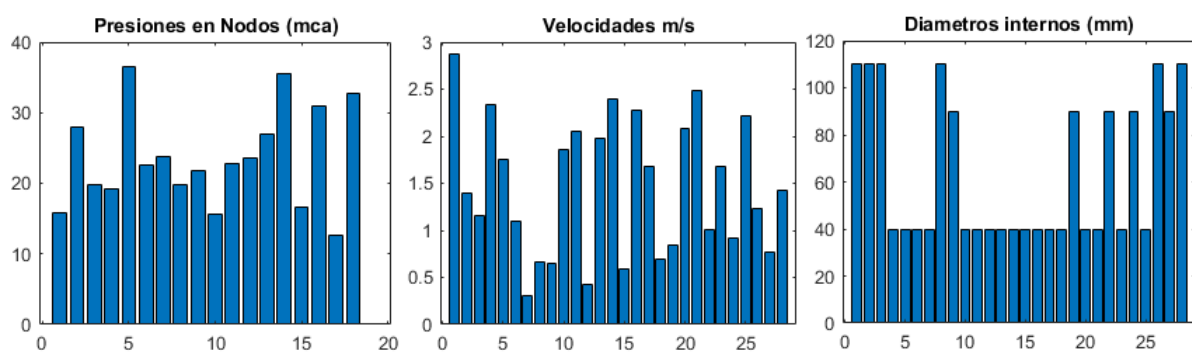
Id_tubos	Diametro (mm)	Velocidad (m/s)	Parcial (S/.)	Index Nodo	Id Nodo	Presión (m.c.a)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.40	2,378.27	2	N-5	27.94
PVC-3	110	1.20	2,399.96	3	N-2	19.70
PVC-4	40	2.30	499.47	4	N-4	19.28
PVC-5	40	1.80	509.07	5	N-12	36.53
PVC-6	40	1.10	515.96	6	N-17	22.67
PVC-7	40	0.30	520.14	7	N-13	23.86
PVC-8	110	0.70	2,659.51	8	N-16	19.70
PVC-9	90	0.60	1,927.65	9	N-18	21.82
PVC-10	40	1.90	522.04	10	N-9	15.69
PVC-11	40	2.10	523.51	11	N-10	22.87
PVC-12	40	0.40	523.95	12	N-3	23.49
PVC-13	40	2.00	526.22	13	N-6	27.02
PVC-14	40	2.40	527.25	14	N-11	35.57
PVC-15	40	0.60	527.83	15	N-14	16.67
PVC-16	40	2.30	529.08	16	N-7	30.93
PVC-17	40	1.70	529.96	17	N-15	12.68
PVC-18	40	0.70	531.21	18	N-8	32.67
PVC-19	90	0.80	1,968.26			
PVC-20	40	2.10	533.40			
PVC-21	40	2.50	534.94			
PVC-22	90	1.00	2,003.72			
PVC-23	40	1.70	543.15			
PVC-24	90	0.90	2,007.78			
PVC-25	40	2.20	546.52			
PVC-26	110	1.20	2,789.29			
PVC-27	90	0.80	2,020.78			
PVC-28	110	1.40	3,285.59			

Figura A.1: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 01)



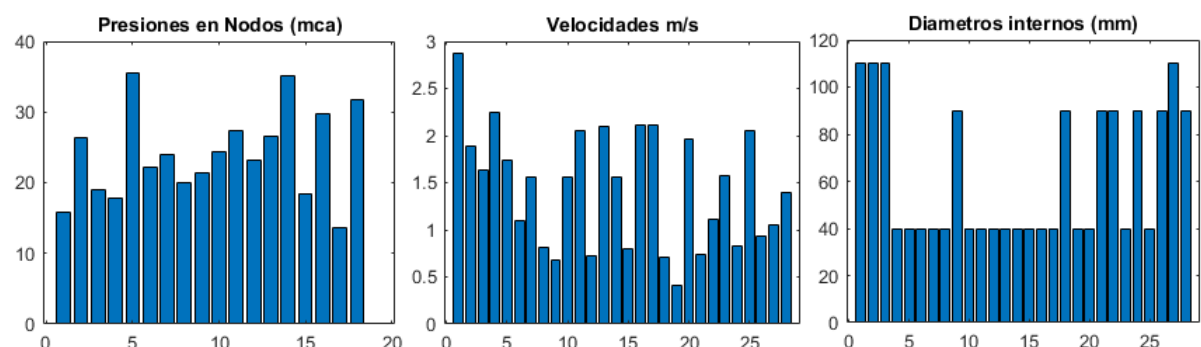
Iteración N° 02
Tabla A.2: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 02)

Id_tubos	Diametro (mm)	Velocidad (m/s)	Parcial (S/.)	Index Nudo	Id Nudo	Presión (m.c.a)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.40	2,378.27	2	N-5	27.94
PVC-3	110	1.20	2,399.96	3	N-2	19.70
PVC-4	40	2.30	499.47	4	N-4	19.28
PVC-5	40	1.80	509.07	5	N-12	36.53
PVC-6	40	1.10	515.96	6	N-17	22.67
PVC-7	40	0.30	520.14	7	N-13	23.86
PVC-8	110	0.70	2,659.51	8	N-16	19.70
PVC-9	90	0.60	1,927.65	9	N-18	21.82
PVC-10	40	1.90	522.04	10	N-9	15.69
PVC-11	40	2.10	523.51	11	N-10	22.87
PVC-12	40	0.40	523.95	12	N-3	23.49
PVC-13	40	2.00	526.22	13	N-6	27.02
PVC-14	40	2.40	527.25	14	N-11	35.57
PVC-15	40	0.60	527.83	15	N-14	16.67
PVC-16	40	2.30	529.08	16	N-7	30.93
PVC-17	40	1.70	529.96	17	N-15	12.68
PVC-18	40	0.70	531.21	18	N-8	32.67
PVC-19	90	0.80	1,968.26			
PVC-20	40	2.10	533.40			
PVC-21	40	2.50	534.94			
PVC-22	90	1.00	2,003.72			
PVC-23	40	1.70	543.15			
PVC-24	90	0.90	2,007.78			
PVC-25	40	2.20	546.52			
PVC-26	110	1.20	2,789.29			
PVC-27	90	0.80	2,020.78			
PVC-28	110	1.40	3,285.59			

Figura A.2: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 02)


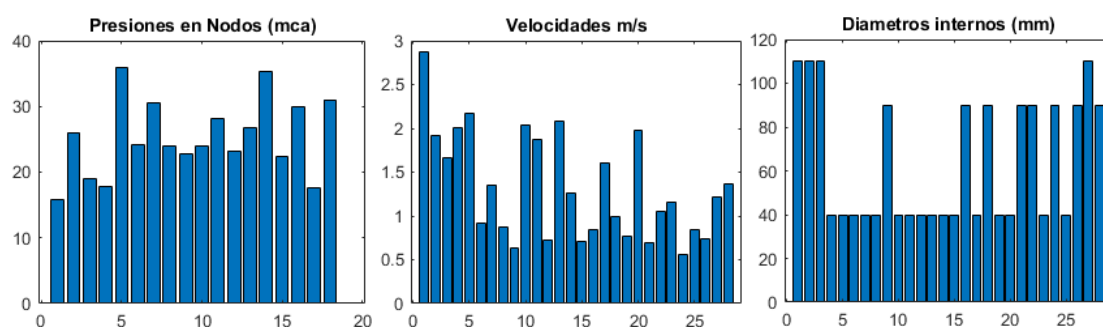
Iteración N° 03
Tabla A.3: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 03)

Id_tubos	Diametro (mm)	Velocidad (m/s)	Parcial (S/.)	Index Nodo	Id Nodo	Presión (m.c.a)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.90	2,378.27	2	N-5	26.35
PVC-3	110	1.60	2,399.96	3	N-2	18.97
PVC-4	40	2.20	499.47	4	N-4	17.91
PVC-5	40	1.70	509.07	5	N-12	35.50
PVC-6	40	1.10	515.96	6	N-17	22.29
PVC-7	40	1.60	520.14	7	N-13	23.98
PVC-8	40	0.80	521.24	8	N-16	19.91
PVC-9	90	0.70	1,927.65	9	N-18	21.40
PVC-10	40	1.60	522.04	10	N-9	24.33
PVC-11	40	2.00	523.51	11	N-10	27.33
PVC-12	40	0.70	523.95	12	N-3	23.17
PVC-13	40	2.10	526.22	13	N-6	26.55
PVC-14	40	1.60	527.25	14	N-11	35.06
PVC-15	40	0.80	527.83	15	N-14	18.48
PVC-16	40	2.10	529.08	16	N-7	29.79
PVC-17	40	2.10	529.96	17	N-15	13.70
PVC-18	90	0.70	1,961.76	18	N-8	31.70
PVC-19	40	0.40	532.96			
PVC-20	40	2.00	533.40			
PVC-21	90	0.70	1,975.57			
PVC-22	90	1.10	2,003.72			
PVC-23	40	1.60	543.15			
PVC-24	90	0.80	2,007.78			
PVC-25	40	2.10	546.52			
PVC-26	90	0.90	2,018.88			
PVC-27	110	1.10	2,791.91			
PVC-28	90	1.40	2,378.10			

Figura A.3: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 03)


Iteración N° 04 al N° 15
Tabla A.4: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 04 al N° 15)

Id_tubos	Diametro (mm)	Velocidad (m/s)	Parcial (S/.)	Index Nodo	Id Nodo	Presión (m.c.a)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.90	2,378.27	2	N-5	26.05
PVC-3	110	1.70	2,399.96	3	N-2	18.93
PVC-4	40	2.00	499.47	4	N-4	17.82
PVC-5	40	2.20	509.07	5	N-12	35.95
PVC-6	40	0.90	515.96	6	N-17	24.28
PVC-7	40	1.40	520.14	7	N-13	30.63
PVC-8	40	0.90	521.24	8	N-16	23.92
PVC-9	90	0.60	1,927.65	9	N-18	22.75
PVC-10	40	2.00	522.04	10	N-9	24.07
PVC-11	40	1.90	523.51	11	N-10	28.08
PVC-12	40	0.70	523.95	12	N-3	23.26
PVC-13	40	2.10	526.22	13	N-6	26.72
PVC-14	40	1.30	527.25	14	N-11	35.28
PVC-15	40	0.70	527.83	15	N-14	22.29
PVC-16	90	0.80	1,953.91	16	N-7	29.95
PVC-17	40	1.60	529.96	17	N-15	17.61
PVC-18	90	1.00	1,961.76	18	N-8	31.04
PVC-19	40	0.80	532.96			
PVC-20	40	2.00	533.40			
PVC-21	90	0.70	1,975.57			
PVC-22	90	1.10	2,003.72			
PVC-23	40	1.20	543.15			
PVC-24	90	0.60	2,007.78			
PVC-25	40	0.80	546.52			
PVC-26	90	0.70	2,018.88			
PVC-27	110	1.20	2,791.91			
PVC-28	90	1.40	2,378.10			

Figura A.4: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 04 al N° 15)


A.2. Diseño inicial B

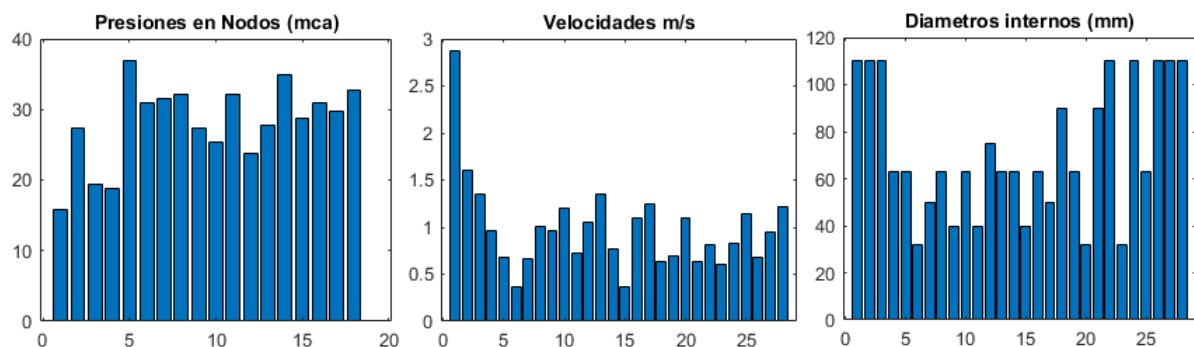
A.2.1. Resultados de cada iteración (Costos optimos, presiones y velocidades)

Iteración N° 01

Tabla A.5: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 01)

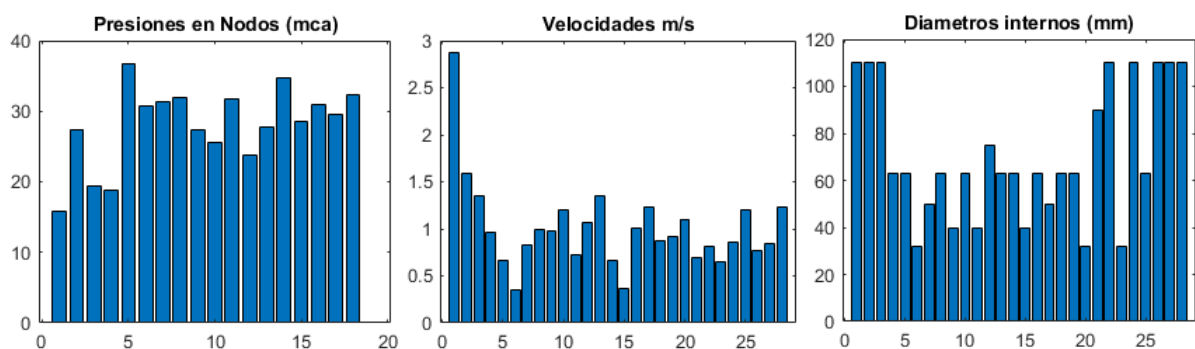
Id_tubos	Diámetro (mm)	velocidad (EM)	parcial (S/.)	Índice Nodo	Identificación Nodo	presión (mca)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.60	2,378.27	2	N-5	27.34
PVC-3	110	1.40	2,399.96	3	N-2	19.42
PVC-4	63	1.00	1,038.45	4	N-4	18.76
PVC-5	63	0.70	1,058.42	5	N-12	36.86
PVC-6	32	0.40	359.69	6	N-17	30.92
PVC-7	50	0.70	745.08	7	N-13	31.53
PVC-8	63	1.00	1,083.72	8	N-16	32.19
PVC-9	40	1.00	521.97	9	N-18	27.41
PVC-10	63	1.20	1,085.39	10	N-9	25.42
PVC-11	40	0.70	523.51	11	N-10	32.11
PVC-12	75	1.10	1,443.18	12	N-3	23.83
PVC-13	63	1.40	1,094.08	13	N-6	27.75
PVC-14	63	0.80	1,096.21	14	N-11	34.85
PVC-15	40	0.40	527.83	15	N-14	28.82
PVC-16	63	1.10	1,100.02	16	N-7	31.03
PVC-17	50	1.20	759.15	17	N-15	29.76
PVC-18	90	0.60	1,961.76	18	N-8	32.75
PVC-19	63	0.70	1,108.10			
PVC-20	32	1.10	371.85			
PVC-21	90	0.60	1,975.57			
PVC-22	110	0.80	2,768.35			
PVC-23	32	0.60	378.65			
PVC-24	110	0.80	2,773.96			
PVC-25	63	1.10	1,136.29			
PVC-26	110	0.70	2,789.29			
PVC-27	110	0.90	2,791.91			
PVC-28	110	1.20	3,285.59			

Figura A.5: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 01)



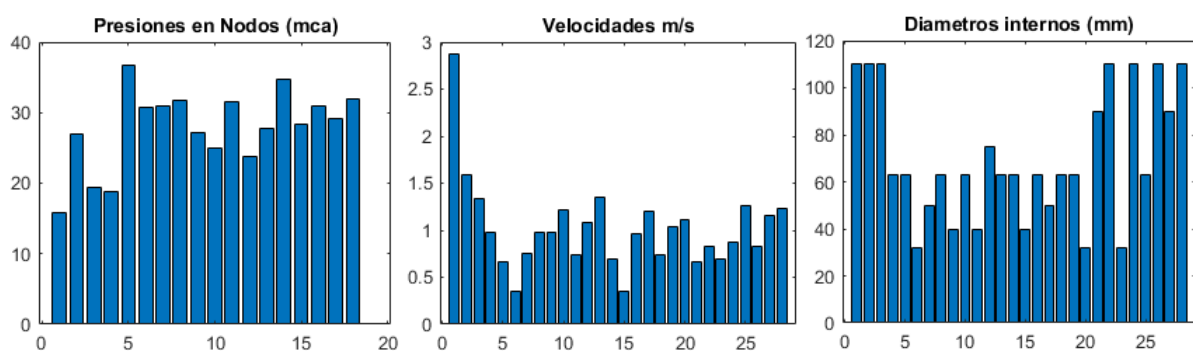
Iteración N° 02
Tabla A.6: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 02)

Id_tubos	Diámetro (mm)	velocidad (EM)	parcial (S/.)	Índice Nodo	Identificación Nodo	presión (mca)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.60	2,378.27	2	N-5	27.46
PVC-3	110	1.30	2,399.96	3	N-2	19.43
PVC-4	63	1.00	1,038.45	4	N-4	18.78
PVC-5	63	0.70	1,058.42	5	N-12	36.78
PVC-6	32	0.40	359.69	6	N-17	30.82
PVC-7	50	0.80	745.08	7	N-13	31.26
PVC-8	63	1.00	1,083.72	8	N-16	31.94
PVC-9	40	1.00	521.97	9	N-18	27.32
PVC-10	63	1.20	1,085.39	10	N-9	25.49
PVC-11	40	0.70	523.51	11	N-10	31.82
PVC-12	75	1.10	1,443.18	12	N-3	23.82
PVC-13	63	1.40	1,094.08	13	N-6	27.72
PVC-14	63	0.70	1,096.21	14	N-11	34.77
PVC-15	40	0.40	527.83	15	N-14	28.55
PVC-16	63	1.00	1,100.02	16	N-7	30.97
PVC-17	50	1.20	759.15	17	N-15	29.48
PVC-18	63	0.90	1,104.44	18	N-8	32.29
PVC-19	63	0.90	1,108.10			
PVC-20	32	1.10	371.85			
PVC-21	90	0.70	1,975.57			
PVC-22	110	0.80	2,768.35			
PVC-23	32	0.70	378.65			
PVC-24	110	0.90	2,773.96			
PVC-25	63	1.20	1,136.29			
PVC-26	110	0.80	2,789.29			
PVC-27	110	0.80	2,791.91			
PVC-28	110	1.20	3,285.59			

Figura A.6: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 02)


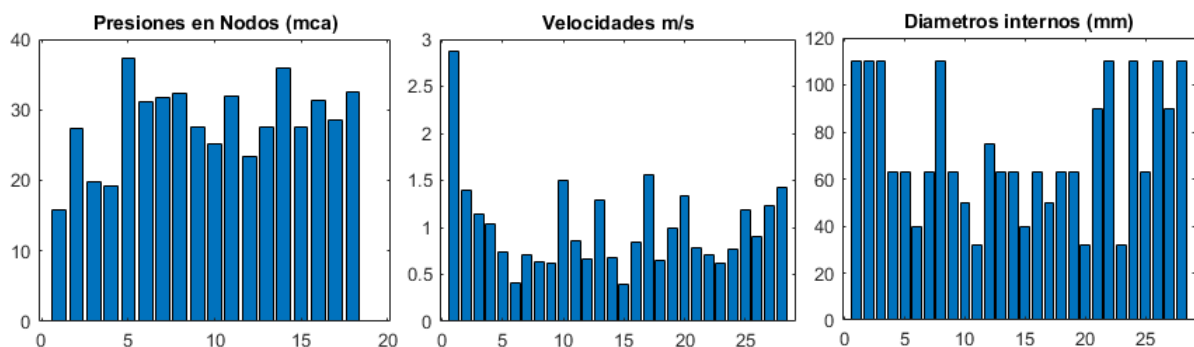
Iteración N° 03
Tabla A.7: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 03)

Id_tubos	Diámetro (mm)	velocidad (EM)	parcial (S/.)	Índice Nodo	Identificación Nodo	presión (mca)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.60	2,378.27	2	N-5	26.89
PVC-3	110	1.30	2,399.96	3	N-2	19.44
PVC-4	63	1.00	1,038.45	4	N-4	18.79
PVC-5	63	0.70	1,058.42	5	N-12	36.72
PVC-6	32	0.30	359.69	6	N-17	30.74
PVC-7	50	0.80	745.08	7	N-13	31.04
PVC-8	63	1.00	1,083.72	8	N-16	31.73
PVC-9	40	1.00	521.97	9	N-18	27.26
PVC-10	63	1.20	1,085.39	10	N-9	24.95
PVC-11	40	0.70	523.51	11	N-10	31.46
PVC-12	75	1.10	1,443.18	12	N-3	23.81
PVC-13	63	1.30	1,094.08	13	N-6	27.71
PVC-14	63	0.70	1,096.21	14	N-11	34.72
PVC-15	40	0.40	527.83	15	N-14	28.29
PVC-16	63	1.00	1,100.02	16	N-7	30.93
PVC-17	50	1.20	759.15	17	N-15	29.23
PVC-18	63	0.70	1,104.44	18	N-8	31.98
PVC-19	63	1.00	1,108.10			
PVC-20	32	1.10	371.85			
PVC-21	90	0.70	1,975.57			
PVC-22	110	0.80	2,768.35			
PVC-23	32	0.70	378.65			
PVC-24	110	0.90	2,773.96			
PVC-25	63	1.30	1,136.29			
PVC-26	110	0.80	2,789.29			
PVC-27	90	1.20	2,020.78			
PVC-28	110	1.20	3,285.59			

Figura A.7: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 03)


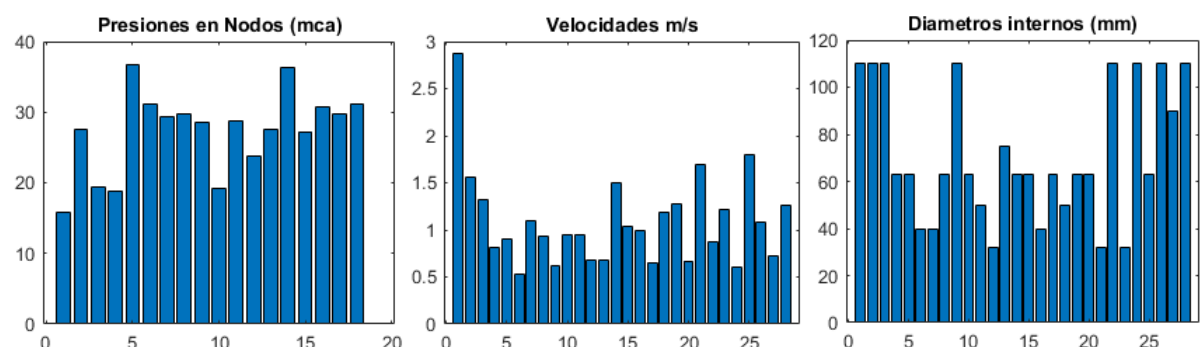
Iteración N° 04
Tabla A.8: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 04)

Id_tubos	Diámetro (mm)	velocidad (EM)	parcial (S/.)	Índice Nodo	Identificación Nodo	presión (mca)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.40	2,378.27	2	N-5	27.27
PVC-3	110	1.10	2,399.96	3	N-2	19.71
PVC-4	63	1.00	1,038.45	4	N-4	19.29
PVC-5	63	0.70	1,058.42	5	N-12	37.25
PVC-6	40	0.40	515.96	6	N-17	31.15
PVC-7	63	0.70	1,081.43	7	N-13	31.79
PVC-8	110	0.60	2,659.51	8	N-16	32.37
PVC-9	63	0.60	1,085.24	9	N-18	27.65
PVC-10	50	1.50	747.81	10	N-9	25.20
PVC-11	32	0.90	364.96	11	N-10	32.00
PVC-12	75	0.70	1,443.18	12	N-3	23.48
PVC-13	63	1.30	1,094.08	13	N-6	27.48
PVC-14	63	0.70	1,096.21	14	N-11	35.89
PVC-15	40	0.40	527.83	15	N-14	27.54
PVC-16	63	0.80	1,100.02	16	N-7	31.36
PVC-17	50	1.60	759.15	17	N-15	28.63
PVC-18	63	0.60	1,104.44	18	N-8	32.49
PVC-19	63	1.00	1,108.10			
PVC-20	32	1.30	371.85			
PVC-21	90	0.80	1,975.57			
PVC-22	110	0.70	2,768.35			
PVC-23	32	0.60	378.65			
PVC-24	110	0.80	2,773.96			
PVC-25	63	1.20	1,136.29			
PVC-26	110	0.90	2,789.29			
PVC-27	90	1.20	2,020.78			
PVC-28	110	1.40	3,285.59			

Figura A.8: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 04)


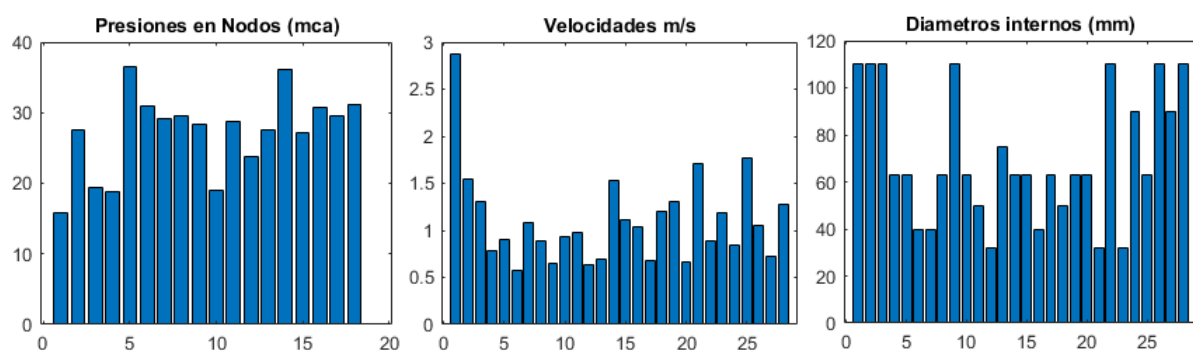
Iteración N° 05
Tabla A.9: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 05)

Id_tubos	Diámetro (mm)	velocidad (EM)	parcial (S/.)	Índice Nodo	Identificación Nodo	presión (mca)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.60	2,378.27	2	N-5	27.56
PVC-3	110	1.30	2,399.96	3	N-2	19.48
PVC-4	63	0.80	1,038.45	4	N-4	18.85
PVC-5	63	0.90	1,058.42	5	N-12	36.74
PVC-6	40	0.50	515.96	6	N-17	31.07
PVC-7	40	1.10	520.14	7	N-13	29.38
PVC-8	63	0.90	1,083.72	8	N-16	29.66
PVC-9	110	0.60	2,663.25	9	N-18	28.54
PVC-10	63	0.90	1,085.39	10	N-9	19.14
PVC-11	50	1.00	749.91	11	N-10	28.81
PVC-12	32	0.70	365.26	12	N-3	23.78
PVC-13	75	0.70	1,449.44	13	N-6	27.63
PVC-14	63	1.50	1,096.21	14	N-11	36.27
PVC-15	63	1.00	1,097.43	15	N-14	27.25
PVC-16	40	1.00	529.08	16	N-7	30.71
PVC-17	63	0.70	1,101.85	17	N-15	29.73
PVC-18	50	1.20	760.94	18	N-8	31.19
PVC-19	63	1.30	1,108.10			
PVC-20	63	0.70	1,109.01			
PVC-21	32	1.70	372.93			
PVC-22	110	0.90	2,768.35			
PVC-23	32	1.20	378.65			
PVC-24	110	0.60	2,773.96			
PVC-25	63	1.80	1,136.29			
PVC-26	110	1.10	2,789.29			
PVC-27	90	0.70	2,020.78			
PVC-28	110	1.30	3,285.59			

Figura A.9: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 05)


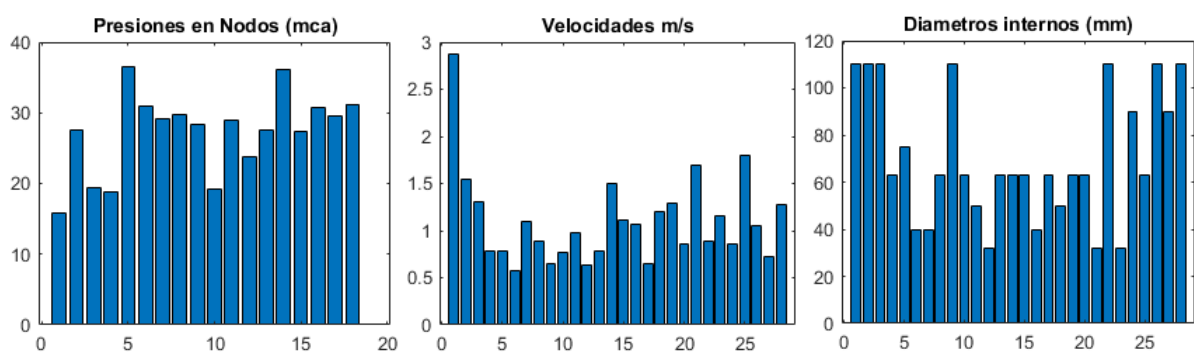
Iteración N° 06
Tabla A.10: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 06)

Id_tubos	Diámetro (mm)	velocidad (EM)	parcial (S/.)	Índice Nodo	Identificación Nodo	presión (mca)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.60	2,378.27	2	N-5	27.60
PVC-3	110	1.30	2,399.96	3	N-2	19.50
PVC-4	63	0.80	1,038.45	4	N-4	18.89
PVC-5	63	0.90	1,058.42	5	N-12	36.49
PVC-6	40	0.60	515.96	6	N-17	30.86
PVC-7	40	1.10	520.14	7	N-13	29.25
PVC-8	63	0.90	1,083.72	8	N-16	29.54
PVC-9	110	0.60	2,663.25	9	N-18	28.40
PVC-10	63	0.90	1,085.39	10	N-9	19.10
PVC-11	50	1.00	749.91	11	N-10	28.75
PVC-12	32	0.60	365.26	12	N-3	23.75
PVC-13	75	0.70	1,449.44	13	N-6	27.58
PVC-14	63	1.50	1,096.21	14	N-11	36.20
PVC-15	63	1.10	1,097.43	15	N-14	27.15
PVC-16	40	1.00	529.08	16	N-7	30.79
PVC-17	63	0.70	1,101.85	17	N-15	29.62
PVC-18	50	1.20	760.94	18	N-8	31.19
PVC-19	63	1.30	1,108.10			
PVC-20	63	0.70	1,109.01			
PVC-21	32	1.70	372.93			
PVC-22	110	0.90	2,768.35			
PVC-23	32	1.20	378.65			
PVC-24	90	0.80	2,007.78			
PVC-25	63	1.80	1,136.29			
PVC-26	110	1.00	2,789.29			
PVC-27	90	0.70	2,020.78			
PVC-28	110	1.30	3,285.59			

Figura A.10: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 06)


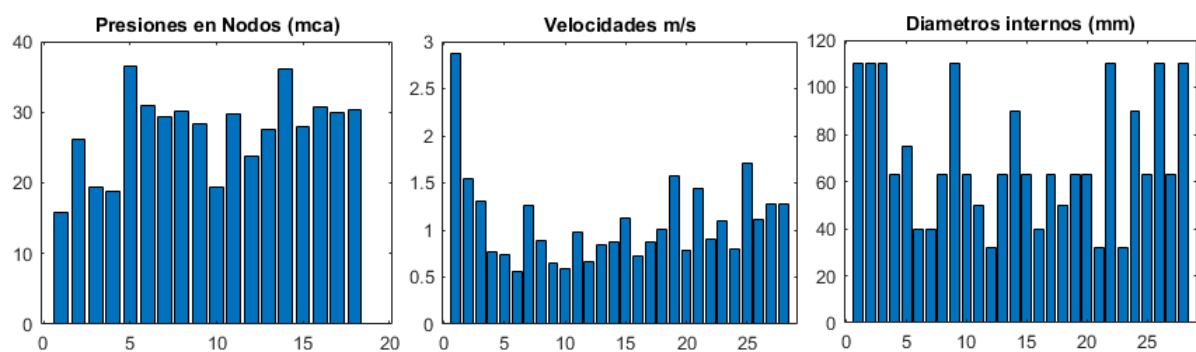
Iteración N° 07
Tabla A.11: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 07)

Id_tubos	Diámetro (mm)	velocidad (EM)	parcial (S./)	Índice Nodo	Identificación Nodo	presión (mca)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.60	2,378.27	2	N-5	27.60
PVC-3	110	1.30	2,399.96	3	N-2	19.50
PVC-4	63	0.80	1,038.45	4	N-4	18.90
PVC-5	75	0.80	1,402.20	5	N-12	36.48
PVC-6	40	0.60	515.96	6	N-17	30.86
PVC-7	40	1.10	520.14	7	N-13	29.14
PVC-8	63	0.90	1,083.72	8	N-16	29.77
PVC-9	110	0.60	2,663.25	9	N-18	28.40
PVC-10	63	0.80	1,085.39	10	N-9	19.19
PVC-11	50	1.00	749.91	11	N-10	28.87
PVC-12	32	0.60	365.26	12	N-3	23.75
PVC-13	63	0.80	1,094.08	13	N-6	27.58
PVC-14	63	1.50	1,096.21	14	N-11	36.19
PVC-15	63	1.10	1,097.43	15	N-14	27.32
PVC-16	40	1.10	529.08	16	N-7	30.79
PVC-17	63	0.60	1,101.85	17	N-15	29.53
PVC-18	50	1.20	760.94	18	N-8	31.22
PVC-19	63	1.30	1,108.10			
PVC-20	63	0.90	1,109.01			
PVC-21	32	1.70	372.93			
PVC-22	110	0.90	2,768.35			
PVC-23	32	1.20	378.65			
PVC-24	90	0.90	2,007.78			
PVC-25	63	1.80	1,136.29			
PVC-26	110	1.10	2,789.29			
PVC-27	90	0.70	2,020.78			
PVC-28	110	1.30	3,285.59			

Figura A.11: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 07)


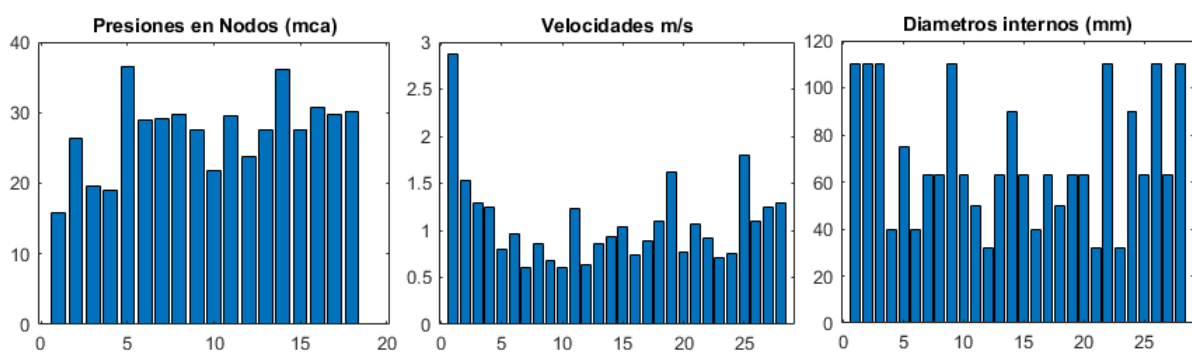
Iteración N° 08
Tabla A.12: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 08)

Id_tubos	Diámetro (mm)	velocidad (EM)	parcial (S/.)	Índice Nodo	Identificación Nodo	presión (mca)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.50	2,378.27	2	N-5	26.14
PVC-3	110	1.30	2,399.96	3	N-2	19.50
PVC-4	63	0.80	1,038.45	4	N-4	18.90
PVC-5	75	0.70	1,402.20	5	N-12	36.47
PVC-6	40	0.60	515.96	6	N-17	30.87
PVC-7	40	1.30	520.14	7	N-13	29.41
PVC-8	63	0.90	1,083.72	8	N-16	30.08
PVC-9	110	0.60	2,663.25	9	N-18	28.40
PVC-10	63	0.60	1,085.39	10	N-9	19.47
PVC-11	50	1.00	749.91	11	N-10	29.81
PVC-12	32	0.70	365.26	12	N-3	23.75
PVC-13	63	0.80	1,094.08	13	N-6	27.57
PVC-14	90	0.90	1,947.15	14	N-11	36.19
PVC-15	63	1.10	1,097.43	15	N-14	27.86
PVC-16	40	0.70	529.08	16	N-7	30.72
PVC-17	63	0.90	1,101.85	17	N-15	29.96
PVC-18	50	1.00	760.94	18	N-8	30.34
PVC-19	63	1.60	1,108.10			
PVC-20	63	0.80	1,109.01			
PVC-21	32	1.40	372.93			
PVC-22	110	0.90	2,768.35			
PVC-23	32	1.10	378.65			
PVC-24	90	0.80	2,007.78			
PVC-25	63	1.70	1,136.29			
PVC-26	110	1.10	2,789.29			
PVC-27	63	1.30	1,137.67			
PVC-28	110	1.30	3,285.59			

Figura A.12: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 08)


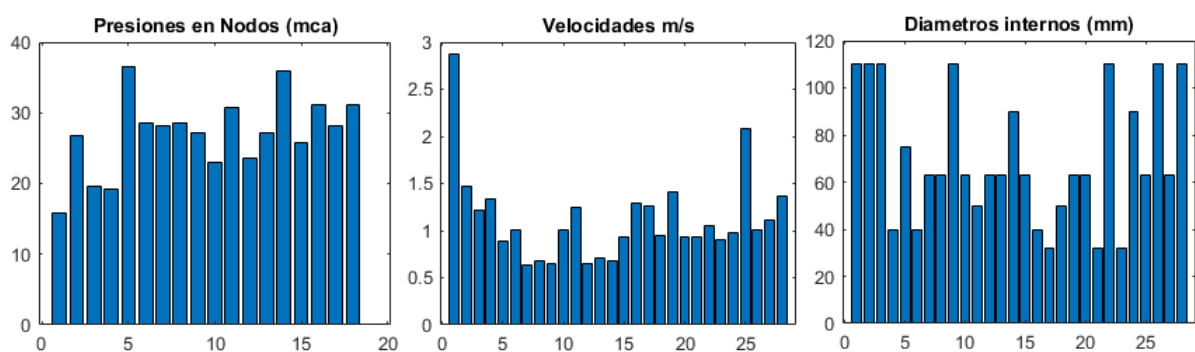
Iteración N° 09
Tabla A.13: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 09)

Id_tubos	Diámetro (mm)	velocidad (EM)	parcial (S./)	Índice Nodo	Identificación Nodo	presión (mca)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.50	2,378.27	2	N-5	26.28
PVC-3	110	1.30	2,399.96	3	N-2	19.52
PVC-4	40	1.20	499.47	4	N-4	18.94
PVC-5	75	0.80	1,402.20	5	N-12	36.58
PVC-6	40	1.00	515.96	6	N-17	28.88
PVC-7	63	0.60	1,081.43	7	N-13	29.22
PVC-8	63	0.90	1,083.72	8	N-16	29.82
PVC-9	110	0.70	2,663.25	9	N-18	27.55
PVC-10	63	0.60	1,085.39	10	N-9	21.78
PVC-11	50	1.20	749.91	11	N-10	29.62
PVC-12	32	0.60	365.26	12	N-3	23.72
PVC-13	63	0.90	1,094.08	13	N-6	27.52
PVC-14	90	0.90	1,947.15	14	N-11	36.12
PVC-15	63	1.00	1,097.43	15	N-14	27.66
PVC-16	40	0.70	529.08	16	N-7	30.77
PVC-17	63	0.90	1,101.85	17	N-15	29.72
PVC-18	50	1.10	760.94	18	N-8	30.21
PVC-19	63	1.60	1,108.10			
PVC-20	63	0.80	1,109.01			
PVC-21	32	1.10	372.93			
PVC-22	110	0.90	2,768.35			
PVC-23	32	0.70	378.65			
PVC-24	90	0.80	2,007.78			
PVC-25	63	1.80	1,136.29			
PVC-26	110	1.10	2,789.29			
PVC-27	63	1.20	1,137.67			
PVC-28	110	1.30	3,285.59			

Figura A.13: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 09)


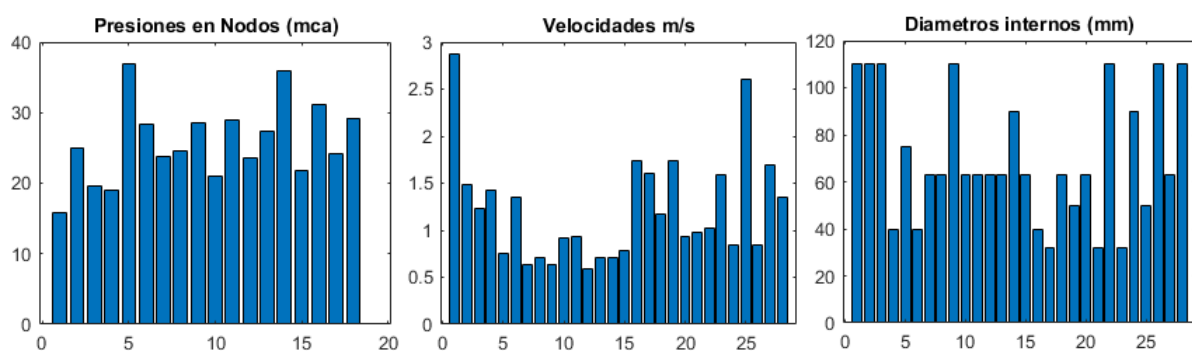
Iteración N° 10
Tabla A.14: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 10)

Id_tubos	Diámetro (mm)	velocidad (EM)	parcial (S/.)	Índice Nodo	Identificación Nodo	presión (mca)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.50	2,378.27	2	N-5	26.79
PVC-3	110	1.20	2,399.96	3	N-2	19.62
PVC-4	40	1.30	499.47	4	N-4	19.12
PVC-5	75	0.90	1,402.20	5	N-12	36.58
PVC-6	40	1.00	515.96	6	N-17	28.47
PVC-7	63	0.60	1,081.43	7	N-13	28.11
PVC-8	63	0.70	1,083.72	8	N-16	28.60
PVC-9	110	0.60	2,663.25	9	N-18	27.25
PVC-10	63	1.00	1,085.39	10	N-9	22.96
PVC-11	50	1.30	749.91	11	N-10	30.85
PVC-12	63	0.70	1,089.36	12	N-3	23.61
PVC-13	63	0.70	1,094.08	13	N-6	27.26
PVC-14	90	0.70	1,947.15	14	N-11	35.88
PVC-15	63	0.90	1,097.43	15	N-14	25.86
PVC-16	40	1.30	529.08	16	N-7	31.05
PVC-17	32	1.30	369.45	17	N-15	28.20
PVC-18	50	1.00	760.94	18	N-8	31.14
PVC-19	63	1.40	1,108.10			
PVC-20	63	0.90	1,109.01			
PVC-21	32	0.90	372.93			
PVC-22	110	1.00	2,768.35			
PVC-23	32	0.90	378.65			
PVC-24	90	1.00	2,007.78			
PVC-25	63	2.10	1,136.29			
PVC-26	110	1.00	2,789.29			
PVC-27	63	1.10	1,137.67			
PVC-28	110	1.40	3,285.59			

Figura A.14: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 10)


Iteración N° 12 al 15
Tabla A.16: Resultados de Nodos y tuberías (Iteración N° 12 al 15)

Id_tubos	Diámetro (mm)	velocidad (EM)	parcial (S/.)	Índice Nodo	Identificación Nodo	presión (mca)
PVC-1	110	2.90	1,806.05	1	N-1	15.84
PVC-2	110	1.50	2,378.27	2	N-5	25.04
PVC-3	110	1.20	2,399.96	3	N-2	19.60
PVC-4	40	1.40	499.47	4	N-4	19.08
PVC-5	75	0.80	1,402.20	5	N-12	36.90
PVC-6	40	1.30	515.96	6	N-17	28.39
PVC-7	63	0.60	1,081.43	7	N-13	23.88
PVC-8	63	0.70	1,083.72	8	N-16	24.53
PVC-9	110	0.60	2,663.25	9	N-18	28.57
PVC-10	63	0.90	1,085.39	10	N-9	21.02
PVC-11	63	0.90	1,088.44	11	N-10	28.89
PVC-12	63	0.60	1,089.36	12	N-3	23.63
PVC-13	63	0.70	1,094.08	13	N-6	27.31
PVC-14	90	0.70	1,947.15	14	N-11	35.93
PVC-15	63	0.80	1,097.43	15	N-14	21.79
PVC-16	40	1.70	529.08	16	N-7	31.20
PVC-17	32	1.60	369.45	17	N-15	24.14
PVC-18	63	1.20	1,104.44	18	N-8	29.23
PVC-19	50	1.70	763.45			
PVC-20	63	0.90	1,109.01			
PVC-21	32	1.00	372.93			
PVC-22	110	1.00	2,768.35			
PVC-23	32	1.60	378.65			
PVC-24	90	0.80	2,007.78			
PVC-25	50	2.60	782.88			
PVC-26	110	0.80	2,789.29			
PVC-27	63	1.70	1,137.67			
PVC-28	110	1.30	3,285.59			

Figura A.16: Simulación de presiones, velocidades y diámetros (Iteración N° 12 al 15)


Anexo B

Código Fuente del API elaborado en Matlab

Código fuente deL API elaborado en Matlab para la Optimización del diseño de redes de distribución de agua potable usando el Algoritmo de Búsqueda Tabú.

Código Fuente B.1: IMPORTACION DE LA RED DE EPANET

```
1 %=====
2 %                               TBRED
3 % OPTIMIZACION DEL DISENO DE REDES DE DISTRIBUCION
4 % DE AGUA POTABLE USANDO EL ALGORITMO DE BUSQUEDA TABU
5 % AUTOR:
6 %     SOSA LOZANO, ELVIS JHOEL
7 %=====
8 clc;
9 clear;
10 close all;
11
12
13 %guidata(hObject, handles);
14 drawnow;
15 set(handles.text9, 'String', 'Dmin(mm)');
16
17
18 % Leer el archivo de EPANET cargando el toolkit de Epanet - Matlab
19 start_toolkit;
20 nombre = uigetfile('*.inp', 'Abrir');
21 %nombre='C:\Users\alejandro\Desktop\Elvis\Elvis_GUIv1/red1.inp';
22
23 % Se asigna el objeto de Epanet o Red a la Variable G
```

```

24 G = epanet(nombre) ;           % Load EPANET Input file
25 handles.nomb=nombre;         % Para poder utilizar la variable nombre en otro ↔
    funcion u objeto
26 handles.G=G;
27 guidata(hObject,handles);
28
29 % Se leen las propiedades de la Red usando los Metodos de la libreria
30 NumNod=G.getLinkCount;
31 NumTub= G.getNodeCount;
32 guidata(hObject,handles);
33
34 % para mostrar la cantidad de tubos y la cantidad de nodos de la Red
35 set(handles.text2,'visible','on','String',NumTub);
36 set(handles.text3,'visible','on','String',NumNod);
37 %set(handles.text9,'visible','on');
38 set(handles.pushbutton2,'visible','on');
39
40 % mostrar imagen de la red en la GUI
41 cla reset;
42 exportgraphics(G.plot() , 'plot_loss.png', 'Resolution', 300)
43
44 close([1 2])
45
46 img_red = imread('plot_loss.png') ;% leer la imagen guardada
47 set(handles.axes2,'visible','on');
48 axes(handles.axes2);
49 imshow(img_red); % Mostrar la red.
50 %display_red
51 set(handles.text1,'String',handles.nomb);
52 set(handles.pushbutton3,'visible','on');
    
```

Código Fuente B.2: LEER LOS PARAMETROS INICIALES DE LA RED

```

1 % Leer la tabla de diametros y costos que debe tener dos columnas
2 % Una que se llama MM y otra COSTOS
3 nombre_tabla = uigetfile('*.xlsx','Abrir tabla Excel');
4 %nombre_tabla ='C:\Users\Desktop\Elvis\Elvis_GUIv1/costos_diam.xlsx';
5 handles.nombre_tabla=nombre_tabla;           % Para poder utilizar la variable ↔
    nombre en otro objeto
6 guidata(hObject,handles);
7
8 % Hacer visible algunos objetos
9 set(handles.pushbutton3,'visible','on');
10 set(handles.text9,'visible','on');
11 set(handles.axes2,'visible','on');
12
    
```

```

13 % Leer la Tabla de Excel
14 tabla_costos=readtable(handles.nombre_tabla);
15 handles.tabla_costos=tabla_costos;
16 guidata(hObject,handles);
17
18 % Calcular Diametro maximo y minimo
19 D_min=min(tabla_costos.MM); D_max=max(tabla_costos.MM);
20 set (handles.edit2,'visible','on','String',D_min, 'Enable','off');
21 set (handles.edit3,'visible','on','String',D_max, 'Enable','off');
22
23 axis off
24 %obtener longitudes -----
25 L = handles.G.getLinkLength;
26 Diam_originales = handles.G.getLinkDiameter;
27 costo_red=0;
28
29 % ciclo para calcular los costos de la red tubo por tubo
30 for i=1:numel (L)
31 if L(i)>0
32 %i,L(i),Diam_originales (i)
33 costo_xi=interp1(handles.tabla_costos.MM,handles.tabla_costos.COSTO,↵
    Diam_originales (i));
34 costo_total_i = costo_xi * L(i);
35 costo_red = costo_total_i + costo_red;
36 end
37 end
38 texto_inicial =['Costo red inicial $ : ' num2str(costo_red)];
39 set (handles.text20,'String',texto_inicial);
    
```

Código Fuente B.3: PROCESO DE OPTIMIZACION

```

1
2
3 % variables globales que se usan en otras funciones
4 global P_min P_max D_min D_max V_min V_max penalty W_penalty NV;
5
6 set(handles.axes3,'visible','on');
7 set(handles.axes4,'visible','on');
8 set(handles.axes5,'visible','on');
9 set(handles.axes2,'visible','on');
10
11 % Se lee los diámetros y las restricciones
12 D_min = str2double (get (handles.edit2,'String')); D_max=str2double (get(↵
    handles.edit3,'String'));
13 P_min= str2double (get (handles.edit4,'String')); P_max=str2double (get(handles↵
    .edit5,'String'));
    
```

```

14 V_min= str2double (get(handles.edit6,'String')); V_max=str2double (get(handles←
    .edit7,'String'));
15 handles.P_min=P_min;handles.P_max=P_max;handles.D_min=D_min;handles.D_max=D_max←
    ;
16 handles.V_min=V_min;handles.V_max=V_max;
17 guidata(hObject,handles);
18
19 % Se lee las iteraciones
20 iter_max= str2double (get(handles.edit8,'String'));
21
22 % Se usa la Red leida en Epanet
23 G = handles.G;
24
25 % Definicion del Problema generando la funcion de Costos
26 % Tal como recomiendan varios autores , se debe utilizar una funcion de
27 % penalizacion que se le suma a la funcion de costos, para considerar las
28 % restricciones. Esta pensalizacion va obligando al algoritmo a alejarse de
29 % las soluciones que tenga tendencia a no cumplir las restricciones.
30 % Consiste usar un multiplicador o coeficiente que multiplique las cantidad
31 % de violaciones en cada iteracion, en ese sentido, si el numero de
32 % violaciones es grande esta penalidad sera mas grande y viceversa, si el
33 % numero de violaciones es menor , entonces la penalidad sera mas pequena.
34 CostFunction=@(G,p) MyCost_tuberias(G,p);
35
36 %, Cantidad de tuberias de la red
37 num_tub = G.getLinkCount;
38
39 % Lista de accion
40 ActionList=CreatePermActionList(num_tub);
41
42 % Numero de Acciones
43 nAction=numel(ActionList)
44
45 % Parametros de la Busqueda Tabu Search Parameters
46 MaxIt=iter_max; % Maximum Number of Iterations
47 cont_result=0; % contador de resultados a mostrar en la ←
    pantalla
48 %contador_imprimir_resultados=0; % contador de resultados a mostrar en la ←
    pantalla
49
50 % dimensiones de la busqueda Tabu o % Tabu Length
51 TL=round(0.5*nAction);
52
53 % Inicializmos algunos parametros importantes del Algoritmo
54 % Creamos una estructura individual que este vacia para Costos y variables
55 % de decision
56 empty_individual.Position=[];
    
```

```

57 empty_individual.Cost=[];
58
59 % Creamos una solucion inicial
60 sol=empty_individual;
61 %sol.Position=randperm(num_tub);
62
63 % Generamos un vector de solucion inicial que vaya entre Dmin y 0.5Dmax
64 % sol.Position=randi([D_min, round(0.6*D_max)],1,num_tub);
65 %randi([D_min, round(0.6*D_max)],1,num_tub)
66 sol.Position=handles.G.getLinkDiameter;
67
68
69 % Calculamos el costo de la solucion anterior
70 sol.Cost=CostFunction(G,sol.Position);
71
72 % Inicializamos la mejor solucion encontrada
73 BestSol=sol;
74
75 % Este es un vector para ir guardando los costos
76 BestCost=zeros(MaxIt,1);
77
78 % Inicializamos el contador de Acciones Tabu
79 TC=zeros(nAction,1);
80
81 % Aca se inicia el Ciclo de la Busqueda Tabu
82 set(handles.text9,'visible','on');
83 set(handles.text9,'Enable','off');
84
85 set(handles.text19,'String',' Esta en la Iteracion inicial...')
86 drawnow;
87
88 G.setLinkDiameter(sol.Position);
89 H = G.getComputedHydraulicTimeSeries ;% Solve hydraulics in library;
90 % mostrar presiones
91 axes(handles.axes3);
92 bar(H.Pressure);title('Presiones en Nodos (mca)');
93 %title('Presiones en Nodos (mca)');bar(H.Pressure);title('Presiones en Nodos (←
    mca)'); title('Presiones en Nodos (mca)');
94 % mostrar Velocidades
95 axes(handles.axes4);bar(H.Velocity);title('Velocidades m/s'); title('←
    Velocidades m/s');
96 % mostrar Diametro
97 axes(handles.axes5);bar(sol.Position);title('Diametros internos (mm)');
98 % mostrar curva
99 axes(handles.axes2); handles.plot_perd = plot(BestCost,'LineWidth',2);
100 xlabel('Iteraciones'); ylabel('Costos Red S/.'); grid on;
101

```

```
102
103
104 for it=1:MaxIt
105 %it
106
107 % primera solucion con costo infinito
108 bestnewsol.Cost=inf;
109
110 % Se aplican las acciones
111 con=0;
112 for i=1:nAction % desde 1 hasta el numero de acciones
113 con=con+1;
114 if con == 20
115 texto=['numero de Acciones : ' num2str(i) '/' num2str(nAction) '...'];
116 set(handles.edit9, 'String', texto)
117 drawnow;
118 con=0;
119 end
120 %
121
122 if TC(i)==0 % Si el contador de acciones en la poscion i es cero ejecuta esto
123 newsol.Position=DoAction(sol.Position,ActionList{i}); % ejecuta la accion
124 newsol.Cost=CostFunction(G,newsol.Position); % calcula los costos
125 newsol.ActionIndex=i;
126 if newsol.Cost<=bestnewsol.Cost % compara si la nueva solucion es mas barata ↔
    que la mejor
127 bestnewsol=newsol;
128 end
129 end
130 end
131
132 % Actualizamos la mejor solucion
133 sol=bestnewsol;
134
135 % Actualizamos la lista Tabu usando un ciclo para recorrer el numero de
136 % acciones
137 for i=1:nAction
138 if i==bestnewsol.ActionIndex
139 TC(i)=TL; % Agregamos la ista Tabu
140 else
141 TC(i)=max(TC(i)-1,0); % Reducimos en Contador Tabu
142 end
143 end
144
145 % Se actualiza la mejor solucion posible encontrada por el algortimo
146 if sol.Cost<=BestSol.Cost
147 BestSol=sol;
```

```

148 end
149
150
151
152 % Se guardan los costos con mejor resultado
153 BestCost(it)=BestSol.Cost;
154
155
156 % Aca se chequeann las restricciones
157 Best_actual      = BestSol.Position;
158 Best_actual_cost = BestSol.Cost(1);
159 costos_acum (it) = Best_actual_cost;
160 % Esta funcion obliga al algortimo a dejar de lado y reemplazar
161 % aquellos diametros que esten fuera del diametro minimo y maximo
162 % establecido.
163 % Ademas tiene una ecuacion que estima un nuevo diametro en funcion de
164 % la velocidad media economica establecida en este caso en el rando
165 % (1-3 m/s)
166 BestSol.Position = check_constraint(G,it, Best_actual,Best_actual_cost,↔
    costos_acum,P_min, P_max, V_min,V_max,D_min,D_max) ;
167 %BestSol.Position
168
169 % Se muestran los resultados
170 if BestCost(it)< W_penalty*NV
171 W_penalty=0;
172 end
173
174 %obtener longiutdes -----
175 L = G.getLinkLength;
176 costo_red=0;
177 % ciclo para calculas los costos de la red tubo por tubo
178 for i=1:numel (L)
179 costo_xi=interp1(handles.tabla_costos.MM,handles.tabla_costos.COST0,Best_actual↔
    (i));
180 costo_total_i = costo_xi * L(i);
181 costo_red      = costo_total_i + costo_red;
182 end
183
184
185
186 % Aqui modique la salida de costo parcial
187
188 % resultado_parcial=['Iter. ' num2str(it) ': Costo$ = ' num2str(costo_red ) ↔
    '..... ']
189 % % todos los textos se limitan a 43 caracteres para que quepan en la
190 % % caja de texto
191 % % Ademas se van concatenando todas las iteraciones para generar un solo
    
```

```
192 %% texto
193 %% cada 20 iteraciones se reinicia el texto a mostrar
194 % resultado_parcial= [resultado_parcial(1:43) ' '];
195 % if cont_result>0
196 %     resultado_total = [resultado_total resultado_parcial];
197 %     cont_result=cont_result+1;
198 % else
199 %     resultado_total = resultado_parcial;
200 %     cont_result=cont_result+1;
201 % end
202 % set(handles.text19, 'String', resultado_total)
203 % drawnow;
204 % if cont_result==20
205 %     cont_result=0;
206 % end
207
208 % If el minimo global se alcanza sale del ciclo
209 if BestCost(it)==0
210 break;
211 end
212
213 % correr modelo
214 %cla reset;
215 G.setLinkDiameter(BestSol.Position);
216 H = G.getComputedHydraulicTimeSeries ;% Solve hydraulics in library;
217 % mostrar presiones
218 axes(handles.axes3);
219 % hold on
220 % for p = 1:length(H.Pressure)
221 %     h=bar(p,H.Pressure(p));
222 %     if P_min <= H.Pressure(p) &&  H.Pressure(p) <= P_max
223 %         set(h,'FaceColor','b');
224 %     else
225 %         set(h,'FaceColor','r');
226 %     end
227 % end
228 bar(H.Pressure);title('Presiones en Nodos (mca)');
229
230 title('Presiones en Nodos (mca)');
231 %hold off
232
233
234 % mostrar Velocidades
235 axes(handles.axes4);
236 % hold on
237 % for p = 1:length(H.Velocity)
238 %     h=bar(p,H.Velocity(p));
```

```

239 %     if V_min <= H.Velocity(p) &&   H.Velocity(p) <= V_max
240 %         set(h,'FaceColor','b');
241 %     else
242 %         set(h,'FaceColor','r');
243 %     end
244 % end
245 %hold off
246 bar(H.Velocity);title('Velocidades m/s');
247 title('Velocidades m/s');
248
249 % mostrar Diametro
250 axes(handles.axes5);
251 bar(BestSol.Position);title('Diametros internos (mm)');
252 %hold off
253
254
255 % guardar presiones de cada iteracion
256 % Exportar a Excel
257 %Id_tubos      = categorical (G.LinkNameID)';
258 Id_tubos=G.LinkNameID'; Index_tubos = G.LinkIndex' ; Diametros_mm_p = BestSol.↵
    Position';
259 Id_Nodos      = G.NodeNameID'; Index_Nodos = G.NodeIndex'; Presiones_parciales ↵
    = H.Pressure';
260 Velocidad_p   = round(H.Velocity',1);
261 % Calcular el costo por tubo de la red
262 for d=1:numel(L)
263 costo_tubo(d)=L(d)*interp1(handles.tabla_costos.MM,handles.tabla_costos.COSTO,↵
    Diametros_mm_p (d));
264 end
265 Costos_Parcial=costo_tubo';
266 Tabla_diam_p   = table (Index_tubos, Id_tubos , Diametros_mm_p ,Velocidad_p,↵
    Costos_Parcial);
267 Tabla_presiones_p = table (Index_Nodos , Id_Nodos ,Presiones_parciales) ;
268 filename_p = ['iter_' num2str(it) '.xlsx'];
269 writetable(Tabla_diam_p ,filename_p,'Sheet',1,'Range','A1');
270 writetable(Tabla_presiones_p,filename_p,'Sheet',2,'Range','A1');
271
272 resultado_parcial=['Iter. ' num2str(it) ': Costo$ = ' num2str(sum(↵
    Costos_Parcial) ) '..... ']
273 % todos los textos se limitan a 43 caracteres para que quepan en la
274 % caja de texto
275 % Ademas se van concatenando todas las iteraciones para generar un solo
276 % texto
277 % cada 20 iteraciones se reinicia el texto a mostrar
278 resultado_parcial= [resultado_parcial(1:43) ' '];
279 if cont_result>0
280 resultado_total = [resultado_total resultado_parcial];
    
```

```

281 cont_result=cont_result+1;
282 else
283 resultado_total = resultado_parcial;
284 cont_result=cont_result+1;
285 end
286 set(handles.text19, 'String', resultado_total)
287 drawnow;
288 if cont_result==20
289 cont_result=0;
290 end
291
292 BestCost_neto(it)= sum(Costos_Parcial)
293 % mostrar curva
294 axes(handles.axes2);
295 handles.plot_perd = plot(BestCost_neto,'LineWidth',2);
296 xlabel('Iteraciones');
297 ylabel('Costos Red Soles');
298 grid on;
299 %hold off
300
301
302 end
303 BestCost=BestCost(1:it);
304
305 % Para Mostrar en la caja de texto los resultados finales
306 Diametros_finales = num2str(BestSol.Position);
307 Diametros_finales_costos=BestSol.Position;
308 % handles.tabla_costos.MM
309 % handles.tabla_costos.COSTO
310
311 % Revisar diametros muy grandes
312
313
314 %obtener longiutdes -----
315 L = G.getLinkLength; costo_red=0;
316 % ciclo para calculas los costos de la red tubo por tubo
317 for i=1:numel (L)
318 costo_xi=interp1(handles.tabla_costos.MM,handles.tabla_costos.COSTO,↵
        Diametros_finales_costos (i));
319 costo_total_i = costo_xi * L(i);
320 costo_red      = costo_total_i + costo_red;
321 end
322
323 if BestSol.Cost < W_penalty*NV
324 W_penalty=0;
325 end
326
    
```

```

327 Costo_final          = ['**Costo minimo red S/ : ' num2str(costo_red ) ' ←
                          '];
328 Costo_final = Costo_final(1:43);
329 iteraciones_finales = ['**Total Iterac. ' num2str(it) ' ←
                          '];
330 iteraciones_finales = iteraciones_finales(1:55);
331 texto_final = [ Costo_final iteraciones_finales ];
332 set(handles.text19, 'String', texto_final)
333 % Mostrar resultados de restricciones
334 G.setLinkDiameter(BestSol.Position);
335 H = G.getComputedHydraulicTimeSeries ;% Solve hydraulics in library;
336 P_out=0; V_out=0;
337 for i=1:numel(H.Pressure)
338 if strcmp(G.getNodeType{i},'JUNCTION')
339 if P_min > H.Pressure(i) || H.Pressure(i) > P_max
340 P_out=P_out+1;
341 end
342 end
343 end
344 if P_out==0
345 texto_PV = ['** Las Presiones Cumplen ←
              ' ];
346 else
347 texto_PV = ['** ' num2str(P_out) ' nodos que no cumplen Presiones ←
              ' ];
348 end
349 texto_PV = texto_PV (1:43);
350 for i=1:numel(H.Velocity)
351 if strcmp(G.getLinkType{i},'PIPE')
352 if V_min > H.Velocity(i) || H.Velocity(i) > V_max
353 V_out=V_out+1;
354 end
355 end
356 end
357 if V_out==0
358 texto_V = [ '** Las Velocidades Cumplen ←
              ' ];
359 else
360 texto_V = ['** Hay ' num2str(V_out) ' tuberias que no cumplen Velocidades ←
              ' ];
361 end
362 texto_V = texto_V (1:43);
363
364 texto_f =[texto_final texto_PV texto_V ];
365
366 set(handles.text19, 'String',texto_f)
367 drawnow;
    
```

```

368
369 % Para crear la grafica de rendimiento de la F0 o graficos de perdidas
370 disp(' ');
371 disp('Best Solution:');
372 x=BestSol.Position;
373 y=1:num_tub;
374 % Etiquetar ejes y graficar F0
375 axes(handles.axes2)
376 handles.plot_perd = plot(BestCost_neto,'LineWidth',2);
377 xlabel('Iteraciones');
378 ylabel('Costos Red S/');
379 grid on;
380
381 % Exportar a Excel
382 % Exportar a Excel
383 Id_tubos      = G.getLinkNameID';Index_tubos = G.LinkIndex' ; Diametros_mm = ←
      BestSol.Position';
384 Id_Nodos      = G.NodeNameID'; Index_Nodos = G.NodeIndex' ; Velocidad      = ←
      round(H.Velocity',1);
385 Presiones_m = H.Pressure';
386 Costos_Parcial=costo_tubo';
387 Tabla_diam      = table (Id_tubos ,Index_tubos, Diametros_mm ,Velocidad,←
      Costos_Parcial);
388 Tabla_presiones = table (Id_Nodos ,Index_Nodos , Presiones_m ) ;
389 filename = ['Red_iter_' num2str(it) '.xlsx'];
390 writetable(Tabla_diam ,filename,'Sheet',1,'Range','A1');
391 writetable(Tabla_presiones,filename,'Sheet',2,'Range','A1');
392
393 % crear red inp optimizada
394 G.saveInputFile('red_optimizada.inp');
395 % Mensaje final(msgbox('Las red ha sido disenada y el archivo de resultados ←
      generado','OK','modal'));
    
```

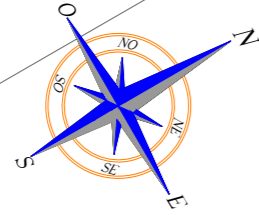
Fuente: Elaboración propia

Anexo C

Planos

PLANO DE MODELAMIENTO RED DE DISTRIBUCION - SAN MARTIN

ESCALA: 1/1250




LOCALIDAD DE SAN MARTIN
COTA: 3210.00 m.s.n.m

RESERVOIRIO N°2 A PROYECTAR

VOLUMEN : 15.0 m³
 COTA TERRENO : 8456.0 msnm
 TIPO : NORTE
 DIMENSIONES INT. : 57.057 x 5.11
 AREA TOTAL CERCO : 853860 x 145
 H = 1.75 m
 282.75 m²
 SAN MARTIN

PROYECTADO

 Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento		MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE SOCOS SUB-GERENCIA DE OBRAS E INFRAESTRUCTURA		
PROYECTO: "MEJORAMIENTO Y REHABILITACIÓN DEL SISTEMA DE SANEAMIENTO BÁSICO DE LOS BARRIOS SAN MARTIN, MATARCOCHA, SOCOS Y ORCOPUQUIO ALTA, DISTRITO DE SOCOS, PROVINCIA DE HUAMANGA - AYACUCHO"				
COMPONENTE:	AGUA POTABLE	PLANO:	PLANO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE (SAN MARTIN)	
LOCALIDAD:	SAN MARTIN	REVISADO:	
DISTRITO:	SOCOS	CONSULTOR:	
PROVINCIA:	HUAMANGA	ESCALA:	INDICADA	FECHA: MARZO - 204
DEPARTAMENTO:	AYACUCHO	DIBUJO:	E.J.S.L	
		CODIGO:		
		N° LAMINA:		

**ACTA N° 018-2024-FIMGC: ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS****PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal N° 173-2024-FIMGC-D**, a los cuatro días del mes de marzo de 2024, siendo las 06:00 p.m, reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, bajo la presidencia del M.Sc. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS Decano de la FIMGC y los miembros; M.Sc. Hemerson LIZARBE ALARCON, M.Sc. Edwar LEON PALACIOS, M.Sc. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO, actuando como secretario docente el M.Sc. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO, para proceder a la sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, del bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil:

ELVIS JHOEL SOSA LOZANO

Quien presentó la tesis denominada:

**“OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE
USANDO EL ALGORITMO DE BUSQUEDA TABÚ”**

Los señores miembros del jurado luego de expuesto la tesis y absueltas las preguntas, delibera y lo declaran:

APROBADO CON NOTA DIECISEIS (16)

Siendo las 8:10 p.m. del día 04 de marzo de 2024, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad a lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

M.Sc. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS
Presidente

M.Sc. Hemerson LIZARBE ALARCON
Miembro

M.Sc. Edwar LEON PALACIOS
Miembro

M.Sc. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO
Miembro

M.Sc. kelvis BERROCAL ARGUMEDO
Secretario docente de la FIMGC

cc:
Archivo

**UNSCH**FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 009-2024-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuelas Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 476-2023-FIMGC-UNSCH-D**, deja constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : SOSA LOZANO, ELVIS JHOEL
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE USANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA TABÚ
Evaluación de la Originalidad : 19 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2295472226

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 16 de febrero del 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Msc. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS, GEOLOGIA Y CIVIL
Av. Independencia S/N Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE USANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA TABÚ

por ELVIS JHOEL SOSA LOZANO

Fecha de entrega: 16-feb-2024 05:43a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2295472226

Nombre del archivo: BORRADOR_TESIS_ELVIS_SL.pdf (11.85M)

Total de palabras: 35359

Total de caracteres: 162958

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE USANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA TABÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

8%

PUBLICACIONES

11%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	8%
2	idus.us.es Fuente de Internet	2%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	www.mmc.igeofcu.unam.mx Fuente de Internet	1%
6	docshare.tips Fuente de Internet	<1%
7	www.grafiati.com Fuente de Internet	<1%
8	docplayer.es Fuente de Internet	<1%

9	moam.info Fuente de Internet	<1 %
10	1library.co Fuente de Internet	<1 %
11	Daniel Mora Melia. "Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia", 'Universitat Politecnica de Valencia', 2015 Fuente de Internet	<1 %
12	fdocuments.mx Fuente de Internet	<1 %
13	www2.ing.puc.cl Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to Universidad Catolica de la Santisima Concepcion Trabajo del estudiante	<1 %
15	"Analysis and Modelling of Non-Steady Flow in Pipe and Channel Networks", Wiley, 2013 Publicación	<1 %
16	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	publicaciones.unpa.edu.ar Fuente de Internet	<1 %

19	repositorio.escuelaing.edu.co Fuente de Internet	<1 %
20	vis.uky.edu Fuente de Internet	<1 %
21	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to Latvia University of Life Sciences and Technologies Trabajo del estudiante	<1 %
23	leeds-faculty.colorado.edu Fuente de Internet	<1 %
24	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %
25	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1 %
26	real-d.mtak.hu Fuente de Internet	<1 %
27	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
28	www.ambientesanitario.cl Fuente de Internet	<1 %
29	Submitted to Universidad Nacional de Costa Rica Trabajo del estudiante	<1 %

30	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
31	Submitted to Universidad Internacional de la Rioja Trabajo del estudiante	<1 %
32	Submitted to University College London Trabajo del estudiante	<1 %
33	AMILKAR ERNESTO ILAYA AYZA. "PROPUESTA PARA LA TRANSICIÓN DE UN SISTEMA CON SUMINISTRO DE AGUA INTERMITENTE A SUMINISTRO CONTINUO", Universitat Politecnica de Valencia, 2016 Publicación	<1 %
34	Submitted to Imperial College of Science, Technology and Medicine Trabajo del estudiante	<1 %
35	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
36	loki.udc.es Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo