

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL**



PROYECTO DE GRADO

**“DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN APLICANDO
EPANET Y WATERGEMS CASO DE ESTUDIO COMUNIDAD DE
CHICANI CHINCHAYA”**

AUTOR: ANGEL VIDAL MAMANI QUISPE

TUTOR: MSc. ING. GREGORIO CARVAJAL SUMI

LA PAZ – BOLIVIA

2021



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

AGRADECIMIENTOS

A cada uno de los docentes que fueron parte del presente proyecto:

Ing. Miguel Muñoz Black (Director)

Ing. Gregorio Carvajal Sumi (Asesor)

Ing. José Augusto Díaz Benavente

Ing. Hernán Agustín Coriza Rivas

Ing. Marcelo Gonzalo Delgadillo Zurita

Dr. Ing. Héctor Calixto Chávez Ríos

DEDICATORIA

*A Dios, por forjar mi camino, dirigirme por el sendero correcto, y permitirme
llegar hasta este punto.*

*A mis padres, Jorge y Angelica, que fueron pacientes y por su incondicional
apoyo permanente a través del tiempo, transmitiendo constancia y
perseverancia.*

*A mis hijas Alessandra y Fernanda, que son el mejor regalo que haya podido
recibir de parte de Dios, son mi mayor tesoro y también la fuente más pura
de mi inspiración*

RESUMEN

AUTOR: ANGEL VIDAL MAMANI QUISPE **TEL:72076757**
CORREO ELECTRÓNICO: info.angelmamani@gmail.com
DIRECCIÓN: C/ "L" DE LA VEGA, 3220, Z/ BALLIVIAN

El presente proyecto, pretende implementar la optimización de diámetros de tuberías de redes de distribución de agua potable, con la modelación estática, empleando WaterGEMS y Epanet.

Para lo cual se definirán parámetros de diseño y restricciones de optimización en base a la Norma Boliviana NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable.

El sistema comprende de una Red Principal (red de alta presión), donde se consideran nudos de demanda que corresponderán a las Redes Secundarias, reguladas por unas estaciones reductoras de presión, con características de una red mixta.

La Comunidades de Chicani – Chinchaya se encuentran en el distrito 22 del municipio de La Paz, provincia Murillo, departamento de La Paz.

La Red Principal cuenta con 9307.28 m y la Red Secundaria con 30076.89 m. comprendidos en un área de servicio de 303.33 Ha. Con caudales máximo diario y horario de 22.58 [l/s] y 30.03 [l/s], respectivamente.

La tubería de la red de distribución es de Material PEAD, PN25 para la Red Principal y PEAD, PN10 para las Redes Secundarias.

Presiones de trabajo de la red de alta presión de 1.30 a 24.67 [bar].

Costo optimizado de la Red Principal y Secundarias: 4,199,568.42 Bs. Cuatro Millones Ciento Noventa Y Nueve Mil Quinientos Sesenta Y Ocho 42/100 bolivianos.

ABSTRACT**AUTHOR: ANGEL VIDAL MAMANI QUISPE****TEL:72076757****EMAIL: info.angelmamani@gmail.com****ADDRESS: C/ "L" DE LA VEGA, 3220, Z/ BALLIVIAN**

This project intends to implement the optimization of pipe diameters in drinking water distribution networks, with static modeling, using WaterGEMS and Epanet. For which, design parameters and optimization restrictions will be defined based on Bolivian Standard NB-689 Technical Design Regulations for Drinking Water Systems.

The system comprises a Main Network (high pressure network), where demand nodes are considered that will correspond to the Secondary Networks, regulated by pressure reducing stations, with characteristics of a mixed network.

The Communities of Chicani - Chinchaya are located in district 22 of the municipality of La Paz, Murillo province, department of La Paz.

The Main Network has 9307.28 m and the Secondary Network with 30076.89 m. included in a service area of 303.33 Ha. With maximum daily and hourly flows of 22.58 [l / s] and 30.03 [l / s], respectively.

The pipes of the distribution network are made of HDPE Material, PN25 for the Main Network and HDPE, PN10 for the Secondary Networks.

High pressure network working pressures from 1.30 to 24.67 [bar].

Optimized cost of the Main and Secondary Network: 4,199,568.42 Bs. Four Million One Hundred Ninety-Nine Thousand Five Hundred Sixty-Eight 42/100 Bolivians.

ÍNDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN GENERAL.....	3
1.4 OBJETIVOS.....	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.5 ALCANCE.....	5
CAPITULO 2. FUNDAMENTOS DE DISEÑO.....	6
2.1 ECUACIONES Y VARIABLES DE NATURALEZA HIDRÁULICA.....	6
2.1.1 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	7
2.1.2 ECUACIONES DE PERDIDAS.....	8
2.1.3 PRESIÓN DE SERVICIO.....	10
2.1.4 VELOCIDAD DE SERVICIO.....	11
2.2 DISEÑO ÓPTIMO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.....	11
2.3 MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE REDES DISTRIBUCIÓN DE AGUA.....	13
2.4 ANÁLISIS HIDRÁULICO.....	14
CAPITULO 3. TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN.....	16
3.1 ALGORITMOS GENÉTICOS.....	17
3.1.1 POBLACIÓN.....	20
3.1.2 FUNCIÓN OBJETIVO.....	20
3.1.3 SELECCIÓN.....	21
3.1.4 CRUCE.....	22
3.1.5 MUTACIÓN.....	23
3.2 ALGORITMO DE RECOCIDO SIMULADO.....	24

3.2.1	<i>ETAPAS DEL ALGORITMO</i>	26
3.2.2	<i>PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN</i>	28
3.2.2.1	TEMPERATURA	29
3.2.2.2	VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO	30
CAPITULO 4.	MARCO PRÁCTICO	33
4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	33
4.2	PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN	37
4.2.1	<i>PARÁMETROS HIDRÁULICOS</i>	37
4.2.2	<i>PARÁMETROS DE SERVICIO</i>	40
4.3	OPTIMIZACIÓN APLICANDO WATERGEMS.....	40
4.3.1	<i>CONSTRUCCIÓN DEL MODELO</i>	43
4.3.2	<i>DETERMINACIÓN DE LAS DEMANDAS</i>	47
4.3.3	<i>DIÁMETROS Y COSTOS DE TUBERÍA</i>	52
4.3.4	<i>SELECCIÓN DE RED PRINCIPAL Y RED SECUNDARIA</i>	52
4.3.5	<i>PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN</i>	55
4.3.6	<i>OPTIMIZACIÓN CON DARWIN DESIGNER - WATERGEMS</i>	55
4.4	OPTIMIZACIÓN APLICANDO EPANET	65
4.4.1	<i>CONSTRUCCIÓN DEL MODELO</i>	68
4.4.2	<i>DETERMINACIÓN DE LAS DEMANDAS</i>	70
4.4.3	<i>DIÁMETROS Y COSTOS DE TUBERÍA</i>	71
4.4.4	<i>PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN</i>	71
4.4.5	<i>OPTIMIZACIÓN CON WATERNETGEN</i>	71
4.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	86
4.5.1	<i>ALGORITMO GENÉTICO</i>	86
4.5.2	<i>RECOCIDO SIMULADO</i>	87
4.5.3	<i>VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ALGORITMOS</i>	88
CAPITULO 5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90

5.1	CONCLUSIONES.....	90
5.2	RECOMENDACIONES	93
CAPITULO 6.	BIBLIOGRAFÍA.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro de tuberías de las redes no optimizadas	34
Tabla 2. Costos directos de tuberías de Red Principal no optimizada	36
Tabla 3. Costos directos de tuberías de Red Secundaria no optimizada	36
Tabla 4. Tabla resumen de parámetros de diseño	37
Tabla 5. Restricciones de servicio en las Red Principal y Secundaria.	40
Tabla 6. Características de la tubería a emplear.	52
Tabla 7. Tuberías empleadas en la red principal sin optimizar.	53
Tabla 8. Tuberías empleadas en la red secundaria sin optimizar.	53
Tabla 9. Resultados WaterGEMS – (Algoritmo Genético).	87
Tabla 10. Resultados Epanet – (Recocido simulado).	88
Tabla 11. Ventajas y desventajas del Algoritmo Genético.	88
Tabla 12. Ventajas y desventajas del Algoritmo de Recocido Simulado..	88
Tabla 13. Comparación de costos	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Funcionamiento de un Algoritmo Genético	19
Figura 2. Esquema de funcionamiento de un algoritmo genético	24
Figura 3. Funcionamiento del Algoritmo Recocido Simulado	32
Figura 4. Red principal del proyecto	35
Figura 5. Polígonos de Thiessen para los nudos de la red secundaria.	39
Figura 6. Diámetros nominales de la red de distribución inicial.	45
Figura 7. Material de la red de distribución inicial.	46
Figura 8. Aplicación de las demandas calculadas.	48
Figura 9. Creación de los polígonos de Thiessen.	49
Figura 10. Selección de límite para los polígonos de Thiessen.	50
Figura 11. Asignación del caudal máximo horario.	51
Figura 12. Demandas en nudos de la red principal	51
Figura 13. Red principal y secundaria del sistema	54
Figura 14. Selección de Darwin Designer.....	55
Figura 15. Ventana principal del Darwin Designer.	56
Figura 16. Selección de nuevo estudio de diseño.	56
Figura 17. Selección de nueva ejecución de diseño optimizado.	56
Figura 18. Creación del nuevo evento de optimización.	57
Figura 19. Restricciones de la red principal.....	57
Figura 20. Opciones de restricción.	58
Figura 21. Asignación de restricción a la red principal.....	58

Figura 22. Características de las tuberías en red principal.	59
Figura 23. Selección de costo mínimo.	59
Figura 24. Asignación del grupo de tuberías a optimizar.	60
Figura 25. Análisis de optimización.	60
Figura 26. Culminación del análisis de optimización.	61
Figura 27. Resultado del análisis de optimización de la red principal.	61
Figura 28. Presiones del análisis de optimización de la red principal.	61
Figura 29. Exportación de los resultados obtenidos.	62
Figura 30. Diámetros de la Red Principal optimizada empleando Watergems... 63	
Figura 31. Presiones de la Red Principal optimizada empleando Watergems. ... 64	
Figura 32. Topología de la red de distribución inicial en entorno Epanet 69	
Figura 33. Demandas en los nudos, bajo la plataforma Epanet..... 70	
Figura 34. Herramienta del catálogo de tuberías 71	
Figura 35. Creación del catálogo de tuberías 73	
Figura 36. Inicio del análisis de optimización 74	
Figura 37. Parámetros de modelación iniciales 75	
Figura 38. Configuración de las restricciones de velocidad 76	
Figura 39. Configuración de las restricciones de presiones 77	
Figura 40. Configuraciones iniciales del algoritmo recocido simulado 78	
Figura 41. Parámetros de aceptación en el algoritmo de recocido simulado 79	
Figura 42. Selección del tipo de análisis..... 80	
Figura 43. Ventanas a las condiciones de contorno de velocidades y presiones81	
Figura 44. Inicio del cómputo del análisis de algoritmo de recocido simulado ... 82	

Figura 45. Desarrollo del algoritmo de recocido simulado	83
Figura 46. Diámetros de la Red Principal optimizada empleando Epanet.....	84
Figura 47. Diámetros de la Red Principal optimizada empleando Epanet.....	85

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1.	UBICACIÓN DE L PROYECTO
ANEXO 2.	PARÁMETROS DE DISEÑO
ANEXO 3.	CUADRO DE DEMANDAS
ANEXO 4.	COTIZACIONES
ANEXO 5.	RESULTADOS
ANEXO 6.	PLANOS

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1 ANTECEDENTES.

El desarrollo de proyectos de saneamiento integral casi siempre ha tenido deficiencias en el diseño por la mala información recopilada de la zona a intervenir. El presente proyecto se originó debido a la falta del análisis de optimización de redes de agua potable en proyectos de nuestro medio, y el interés es de incluir este componente como parte fundamental en el desarrollo de proyectos de redes de distribución de agua potable. En la Red de Distribución de Agua Potable de las comunidades de Chicani – Chinchaya, se pudo evidenciar que no presenta un análisis de optimización de diámetros de tuberías, reducción de costos, por lo cual la red de distribución de agua potable, si bien considera los parámetros hidráulicos mínimos aceptables de, presiones, velocidades, el costo directo de tuberías se ve sobredimensionado.

En la actualidad y con las herramientas informáticas disponibles, podemos obtener procedimientos de diseño de las redes de agua potable que permiten un manejo de infinidad de variables en un tiempo razonable, mejorando sustancialmente el cálculo. Muchos de estos métodos son mejoras de otros propuestos anteriormente, de gran validez, pero complejos en su manejo debido a la cantidad de parámetros que deben utilizar.

Es por tal motivo, que se quiere implementar la optimización de la red de distribución empleando y comparando algoritmos de los programas EPANET y WATERGEMS.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, las redes de distribución de agua potable, en la ciudad de La Paz y a nivel nacional, frente a las exigencias de servicio de agua potable, y la búsqueda de nuevas estrategias que mejoren los procesos de rendimiento y las tareas de operación y/o gestión, llegamos al tema de optimización.

Con la modelación hidráulica actual se podrá definir con que características se está prestando el servicio en cuanto a presión, caudal transportado y velocidad del flujo, lo que representa optimizar la red con base a las necesidades y requerimientos en la prestación del servicio de redes de agua potable.

Es importante la búsqueda de una solución, por lo que al no poseer un sistema en óptimas condiciones la población tendrá inconvenientes para que el suministro llegue a sus hogares en cantidades óptimas, ya que las comunidades de Chicani – Chinchaya, está en desarrollo, por tal motivo si no se le presta atención a esta problemática podría colapsar la red por una sobre demanda en el sistema.

La optimización de la red permitiría saber la presión y velocidad en la que el sistema está trabajando, sobre los resultados en la simulación se haría una propuesta de optimización del sistema, para que la red trabajara en las mejores condiciones posibles.

1.3 JUSTIFICACIÓN GENERAL

La fase de interés y desarrollo en este trabajo es la de diseño de la red, en la cual, la estructura física de la red es un dato conocido, como la demanda en los nudos de consumo, las conexiones, las longitudes de cada tubería y la altura del embalse. El propósito principal de esta fase es seleccionar el diámetro y el material de cada tubería, de manera que el costo sea mínimo y la red satisfaga el caudal y las presiones requeridas en cada nudo, donde el costo por metro de cada tubería depende del tipo de material. Siendo la distribución de agua un factor crítico, uno de los principales desafíos es encontrar la red que cumpla con determinadas restricciones de presión y caudal a un costo razonable, mediante una propuesta de optimización del servicio por medio de los programas EPANET y WATERGEMS

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la optimización con los Algoritmos Genéticos y el de Recocido Simulado empleando WaterGEMS y Epanet respectivamente, con el fin de optimizar el diámetro de la red de distribución de agua potable, de manera que el costo sea mínimo y la red satisfaga el caudal y las presiones requeridas en cada nudo, de acuerdo a la norma NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable, para las comunidades de Chicani - Chinchaya.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Aplicación de Algoritmos Genéticos y de Recocido Simulado en la Hidráulica de sistemas de distribución de agua potable.
- ✓ Hacer una introducción al manejo de la herramienta de optimización DARWIN DESIGNER y WATERNETGEN, explicando cada uno de los parámetros introducidos y explicar el procedimiento de optimización.
- ✓ Comparar los resultados obtenidos con la modelación inicial mediante el empleo de Epanet y WaterGems.
- ✓ A partir de los resultados obtenidos determinar la versatilidad, precisión y ventajas o desventajas de los programas empleados.
- ✓ Comparar los costos totales de tuberías en cuanto a resultados de los programas empleados.
- ✓ Verificar a partir de los resultados que la presión y velocidad cumplan con la norma NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable.

1.5 ALCANCE

El alcance del presente proyecto es el de analizar y comparar resultados obtenidos luego de aplicar los Algoritmos Genéticos y el de Recocido Simulado, de WATERGEMS y EPANET respectivamente, dando solución a la problemática planteada inicialmente, obteniendo como resultado una red de distribución optimizada en cuanto a diámetro y costo.



CAPITULO 2. FUNDAMENTOS DE DISEÑO

En el diseño óptimo de redes de distribución intervienen tanto variables de naturaleza hidráulica como variables de naturaleza económica. En este apartado se trata de relacionar ambos con el objetivo de tener una perspectiva global del problema de diseño.

2.1 ECUACIONES Y VARIABLES DE NATURALEZA HIDRÁULICA

Desde un punto de vista hidráulico, una red de distribución se interpreta como un conjunto de elementos hidráulicos utilizados para distribuir agua en una zona determinada. Entre los elementos de una red, distinguimos dos principales elementos, a los que denominamos de forma genérica *Tuberías*, y que se encuentran conectados entre sí por sus extremos, a los que denominaremos *Nudos*. (Aguirre, 1996).

A cada línea es posible asociarle una ecuación constitutiva, que permite caracterizar el comportamiento global de los elementos que constituyen la línea, es decir, una relación entre el caudal circulante y la diferencia de alturas piezométricas entre ambos extremos de la línea.

Las tuberías pueden ser de varios tipos, presentando cada una de ellas distintas particularidades. Así, distinguimos entre:

- ✓ Tuberías
- ✓ Válvulas de regulación
- ✓ Válvulas de retención
- ✓ Bombas

Por su parte, los nudos constituyen el punto de unión entre varias tuberías y pueden ser agrupados en los siguientes tipos:

- ✓ Nudos de consumo: Puntos de la red en el que se realizó una extracción de caudal.
- ✓ Nudos de conexión: Puntos de la red donde no existe ningún tipo de aportación o extracción del caudal, o lo que es lo mismo, sólo existe una transferencia de caudal entre dos o más tuberías
- ✓ Nudos de presión. Son nudos en los que conocemos el valor de la presión, siendo nuestra incógnita el caudal que entra/sale a través de ellos.

Las tuberías quedan caracterizadas hidráulicamente por una serie de variables.

Por ejemplo, en el caso de las tuberías, las cuatro variables hidráulicas fundamentales son: velocidad v , caudal Q , diámetro D y pérdida de carga hf .

En este sentido, de acuerdo a la norma NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable, en cuanto al cálculo hidráulico y pérdidas de carga, se tiene las siguientes ecuaciones:

2.1.1 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad se plantea como la relación $Q = f(v, D)$ para el caso de conductos de sección circular.

$$Q = A * v$$

Ec. 1

Donde:

- Q = Caudal en m³/s

- A = Sección de escurrimiento en m^2 .
- v = velocidad de escurrimiento de agua en m/s

Fuente: 3.3.7 - NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable. Vol. 1

2.1.2 ECUACIONES DE PERDIDAS

La pérdida de carga, en una red de distribución de agua, es la pérdida de presión causada por la fricción, tanto de tuberías, como de otros componentes de la red como válvulas y piezas especiales, con el agua o fluido circulante. Las ecuaciones siguientes son las más utilizadas para su cálculo y pertenecen a distintos autores.

- **Ecuación de Flamant:**

$$S_t = \frac{4 * b * v^{7/2}}{D^{3/2}}$$

Ec. 2

Donde:

- S_t = Pérdida de carga unitaria en m/m
- B = Coeficiente de Flamant
- V = Velocidad del agua en m/s
- D = Diámetro interno de la tubería en m

Fuente: 3.5.8.1. - NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable. Vol. 1

- **Ecuación de Hazen Williams:**

$$Q = 0,28 * C * D^{2,63} * J^{0,54}$$

Ec. 3

Donde:

- Q = Caudal en m^3/s
- C = Coeficiente de Hazen Williams (adimensional)
- D = Diámetro interno de la tubería en m
- J = Pérdida de carga unitaria o gradiente hidráulico en m/m
- J = $= hf / L$
- hf = Pérdida de carga en m
- L = Longitud de la tubería en m

Fuente: 3.5.8.3. - NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable. Vol. 1

- **Ecuación de Darcy Weisbach:**

$$hf = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D_H \cdot 2 \cdot g}$$

Ec. 4

Donde:

hf = Pérdida de carga distribuida o continua en m

f = Coeficiente de pérdida de carga distribuida. Se obtiene del Diagrama de Moody o las siguientes fórmulas:

a) Escorrimento laminar ($R < 2000$):

$$(R < 2000): f = \frac{64}{R}$$

b) Zona crítica ($2000 < R < 4000$), fórmula de Prandtl-von Karman:

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 2 \cdot \log R \cdot f^{1/2} - 0.80$$

c) Escorrimento turbulento ($R > 5000$)

i. fórmula de Colebrook-White

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 2 * \log \left(\frac{k}{3,70 * D_H} + \frac{2,51}{R * f^{1/2}} \right)$$

ii. fórmula de Swamme – Jain

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{k}{3,71} + \frac{5,74}{R} \right) \right]^2}$$

f = Coeficiente de fricción (adimensional)

R = Número de Reynolds

$$R = \frac{v * D}{\nu}$$

ν = Viscosidad cinemática del agua en cm^2/s

k = Rugosidad uniforme equivalente o coeficiente de Colebrook

k = ϵ/D

ϵ = Rugosidad en mm

D = Diámetro interno de la tubería en m

L = Longitud de la tubería en m

v = Velocidad media en la sección en m/s

D_H = Diámetro hidráulico en m

g = Aceleración de la Gravedad en m/s^2

Fuente: 3.5.8.2. - NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable. Vol. 1

2.1.3 PRESIÓN DE SERVICIO

De acuerdo a la norma NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable, en cuanto a presiones de servicio no deben ser menor a:

a) Poblaciones iguales o menores a 2 000 habitantes 5,00 m.c.a.

- b) Poblaciones entre 2 001 y 10 000 habitantes 10,00 m.c.a.
- c) Poblaciones mayores a 10 000 habitantes 13,00 m.c.a.

Fuente: 9.5.5. - NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable. Vol. 1

La presión estática máxima en la red no debe ser superior a los 70 m.c.a.

Cuando la presión sobrepase los límites establecidos máximos se debe dividir la red en zonas que trabajen con diferentes líneas piezométricas, mediante válvulas reguladoras de presión.

2.1.4 VELOCIDAD DE SERVICIO

La velocidad de circulación del agua deberá ser lo suficientemente alta para evitar estancamientos en la tubería, que provocaría problemas de depósito en las paredes, así como otros de tipo sanitario. Del mismo modo, la velocidad máxima de circulación también estará limitada a un valor, por encima del cual, se considera que aparecerán problemas de erosión en la tubería,

La velocidad mínima en la red principal de distribución en ningún caso debe ser menor a 0,30 m/s para garantizar su autolimpieza.

Para poblaciones pequeñas, se aceptarán velocidades menores, solamente en ramales secundarios.

La velocidad máxima en la red de distribución no debe ser mayor a 2,00 m/s

2.2 DISEÑO ÓPTIMO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Los sistemas de distribución de agua están compuestos por una serie de elementos interconectados entre sí (fuentes, tuberías, bombas, depósitos, válvulas)

dispuestos de manera que se entregue la cantidad de agua demandada por los consumidores a una presión adecuada, con la calidad requerida (cuestión importante por temas de seguridad y salubridad) y de manera fiable, esto es continua, que además sea rentable y sostenible. (Nicklow, 2010)

Sin embargo, son varias y muy distintas las cuestiones a tener en cuenta para que el diseño de la red además de ser correcto resulte el óptimo. Junto con el diseño se deben considerar la operación, el mantenimiento y todo lo relacionado con la planificación y administración de la red en general. En el diseño óptimo intervienen, por tanto, variables de naturaleza hidráulica y de naturaleza económica. (Mora, 2012).

La labor de optimizar plantea el análisis de diferentes tamaños de tuberías para distintas configuraciones de la red, para obtener para cada caso, resultados de presiones y velocidad, para el diámetro mencionado, se debe tener en cuenta la disponibilidad de diámetros comerciales. (Mora, 2012).

El desarrollo de optimización de redes de agua potable, en el tratamiento hidráulico hace referencia a ecuaciones no lineales.

Una exhaustiva búsqueda de la red optimizada, también implica que cada elemento del sistema pueda tomar todos y cada uno de los posibles valores admisibles para la variable de decisión o parámetro a optimizar, lo cual supone la generación de múltiples combinaciones candidatas a ser solución, creciendo este número de forma exponencial conforme aumenta el número de elementos de la red implicados.

La optimización requiere de realizar un elevado número de simulaciones hidráulicas para comprobar la factibilidad de las soluciones propuestas por el algoritmo de optimización. El proceso se inicia con la generación de una solución o de una población de posibles soluciones.

Es por ello que es necesario combinar herramientas matemáticas de optimización con otras que permitan calcular las variables hidráulicas a objeto de alcanzar una solución factible, en la cual se satisfagan los requerimientos de presión y caudal en cada nudo de demanda, o incluso considerar otras soluciones en principio no factibles según el grado de violación de las restricciones. (Mora, 2012).

2.3 MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE REDES DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Para una topología dada, con tuberías y puntos de demanda dados, el diseño óptimo de una red de distribución de agua, consiste en encontrar la combinación comercial de diámetros de tuberías, la cual representa el costo mínimo de la red, sujeta a determinadas restricciones hidráulicas.

Ecuación de mínimo costo:

$$\text{Minimizar } f(D_j) = \sum_{j=1}^n C_j \cdot (D_j, L_j, \dots)$$

Ec. 5

Donde:

- n = número de tuberías
- L_j = longitud de la tubería j
- C_j = costo por metro para dicha tubería
- D_j = diámetro

Fuente: Diseño y optimización de redes de distribución de agua utilizando algoritmos genéticos, Pereyra, G.

Las restricciones se describen a continuación como ecuaciones hidráulicas, ya que la red de distribución de agua está sujeta a determinadas leyes físicas.

2.4 ANÁLISIS HIDRÁULICO

El análisis hidráulico permite resolver las restricciones establecidas por las ecuaciones hidráulicas, tanto para la conservación de la masa, como para la conservación de la energía. En este análisis se calculan los caudales circulantes para cada tubería, la presión en cada nudo, y otras variables, como la velocidad del agua o el sentido de circulación. En otras palabras, el análisis permite determinar el comportamiento hidráulico de una red de distribución en función de los datos dados como el diámetro de las tuberías, los consumos en cada nudo o la altura del embalse. Este comportamiento permite saber de forma anticipada si la red actual cumple con las restricciones de presión y de caudal, de esta manera, se puede evaluar la red y considerar otros diámetros para mejorar los valores de las variables, como la presión o caudal.

Existen diversos métodos utilizados para realizar un análisis hidráulico, uno de los más utilizados debido a su sencillez, es el método de Newton-Raphson, este método resuelve las ecuaciones de forma iterativa aplicando un corrector de caudal, por cada malla. Otro método es el de Hardy-Cross, una técnica que resuelve el sistema de ecuaciones dependiendo del número de mallas, también de forma iterativa, aunque su aplicación resulta más complicada. (Mora, 2012).

El software EPANET, permite realizar simulaciones del comportamiento hidráulico en redes a presión, es un software libre, ya que está disponible su código fuente.

Para el análisis de redes utiliza el método del gradiente, la principal característica de este método, es que no necesita valores de caudales iniciales, a diferencia de los anteriores. Aunque el resultado es el mismo en todos los métodos, las ecuaciones se deben resolver simultáneamente para todas las mallas, debido a que el sistema tiene solución única. (Rossman, 1997).

WaterGEMS, es un software comercial de análisis, modelación y gestión de redes a presión (sistemas de distribución), propiedad de la Empresa de Software Bentley Systems, que produce soluciones para el diseño, construcción y operación de infraestructuras en diversos campos. El software cuyo algoritmo de cálculo se basa en el método del Gradiente Hidráulico, permite el análisis hidráulico de redes de agua (aunque puede usarse para cualquier fluido newtoniano) determinando las presiones en diversos puntos del sistema, así como los caudales, velocidades, pérdidas en las tuberías que conforman la red hidráulica. (Bentley Systems, 2017)

CAPITULO 3. TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN

Las técnicas van desde las analíticas con una sola variable de decisión, pasando por las basadas en la programación lineal, no lineal o dinámica, hasta las técnicas adaptativas o heurísticas, de búsqueda que imitan procesos de la naturaleza

- ✓ Las técnicas analíticas han quedado relegadas al campo teórico. Básicamente pueden aplicarse a problemas sin restricciones donde sólo interviene la función objetivo y se basan en obtener los valores que anulan la primera y segunda derivadas de la función objetivo. Aunque difícilmente aplicables a redes de distribución de agua potable, dada la gran dimensión de las redes reales, estas técnicas han servido de base para el desarrollo de otras más avanzadas.
- ✓ Las técnicas adaptativas o heurísticas consisten en procedimientos sistemáticos de prueba que ofrecen soluciones aceptables, aunque no necesariamente la óptima absoluta. Dentro de sus virtudes, la principal es que el proceso no determinista de búsqueda permite al proceso de optimización saltar o escapar de quedar atrapado en un óptimo local, aumentando la probabilidad de encontrar un óptimo global. Otras ventajas son que no hace uso de las derivadas de la función objetivo y que puede manejar directamente variables de tipo discreto, como los diámetros de tubería. (Halhal, 1997)

A lo largo del presente proyecto se desarrollará las técnicas de Recocido Simulado y Algoritmos Genéticos, que pertenecen a Epanet y WaterGEMS, respectivamente.

3.1 ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos fueron propuestos por primera vez por Holland, en 1975 y desarrollados posteriormente por otros autores en la década de los ochenta siendo Golberg, quien, en 1989, los popularizó como herramienta de búsqueda y optimización.

Los algoritmos genéticos trabajan con una población de individuos cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado. Cada individuo o posible solución se representa como un conjunto de valores, llamados genes, agrupados formando una estructura mayor, llamada cromosoma. Cada gen significa el valor tomado por cada variable de decisión en el problema de optimización y el cromosoma el conjunto de los valores tomados por todas las variables, conformando una solución al problema.

El concepto de convergencia está relacionado con la progresión hacia la uniformidad. Por ejemplo, si se asume una convergencia del 95%, un gen habrá convergido cuando al menos el 95 % de los individuos de la población compartan el mismo valor para dicho gen. Se dice que la población converge cuando todos los genes han convergido. (Millet, 2014).

Lo habitual cuando se trabaja con Algoritmos Genéticos, es manejar las restricciones usando un término de penalización que, añadido a la función objetivo, reduzca (en caso de maximizar) o aumente (en caso de minimizar) el valor de la función objetivo y que sólo interviene cuando la solución viola alguna de las restricciones. No ignorar estas soluciones para concentrarse sólo en las factibles contribuye a guiar la búsqueda, aunque a costa de pagar de un precio.

El término de penalización incluye un factor, llamado factor de penalización, para adecuar la escala de la penalización a las unidades de la función objetivo. Este factor puede ser función del número de generación de manera que la penalización tomará un valor distinto a medida que avanza el algoritmo y así asegurar que la solución final sea factible.

En muchas ocasiones, se utiliza la combinación del valor de la función objetivo con la penalización como indicador del ajuste de cada solución al problema.

A modo de resumen, los pasos seguidos por un algoritmo genético son los siguientes:

1. Genera de forma aleatoria una población de potenciales soluciones.
2. Mediante la función objetivo se evalúa el ajuste o adaptación al problema de cada solución de la población inicial, asignándole el valor obtenido.
3. Durante la ejecución del algoritmo, se seleccionan los individuos que se reproducirán, los padres, en base a su valor en la función objetivo.
4. Se genera una nueva población de soluciones utilizando operadores que se inspiran en la reproducción biológica: cruce y mutación. Los padres seleccionados se cruzarán generando dos hijos sobre los que actuará un operador de mutación.
5. El resultado de la reproducción de los padres es una nueva generación de individuos, nuevas posibles soluciones al problema.
6. Se evalúa la calidad de cada nueva solución obteniendo su valor en la función objetivo y de nuevo se repite el proceso de reproducción hasta que

el algoritmo converge o se alcanza la condición de terminación. (Halhal, 1997)

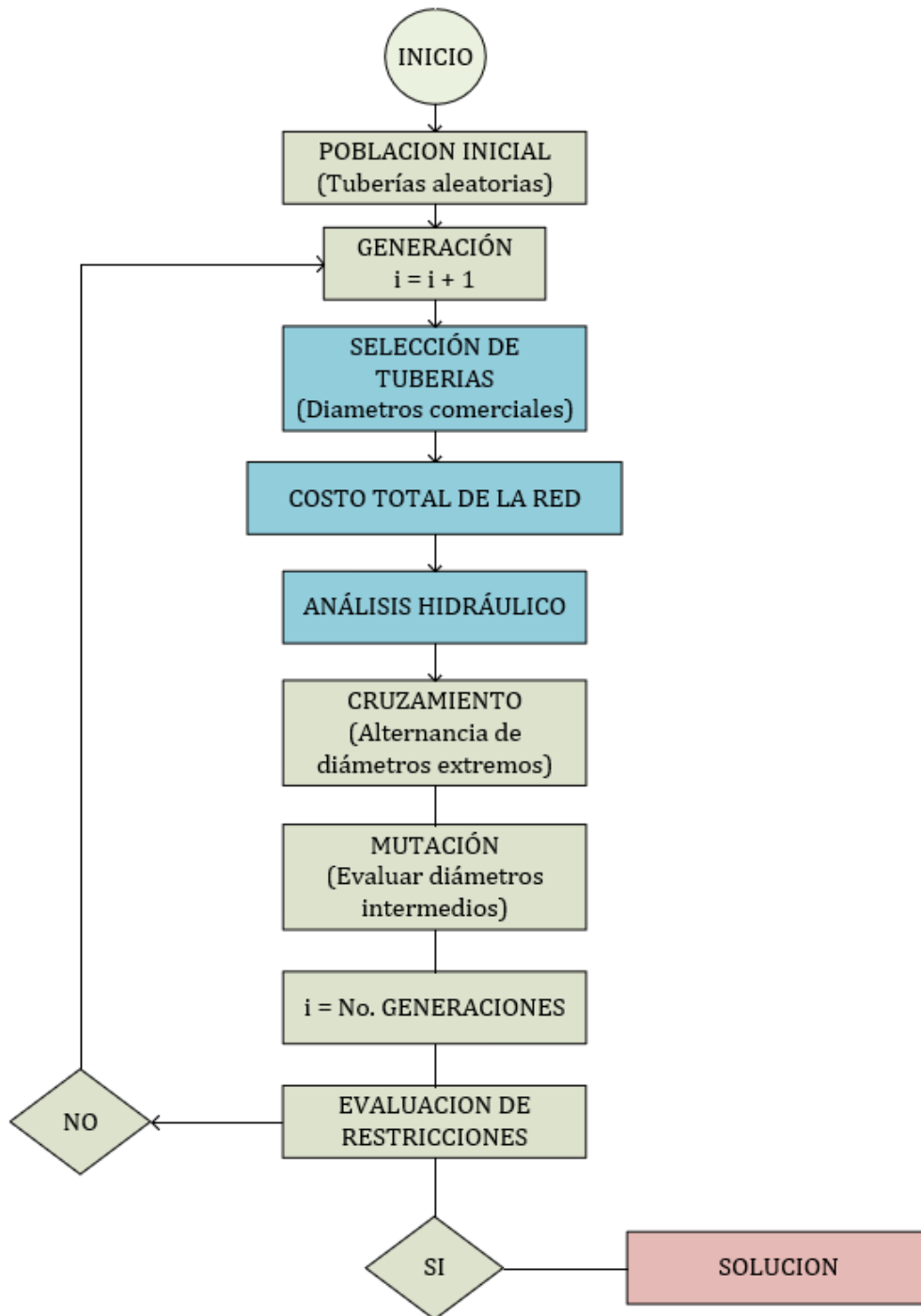


Figura 1. Funcionamiento de un Algoritmo Genético

Fuente: Elaboración propia

3.1.1 POBLACIÓN

El tamaño de la población inicial es uno de los parámetros a ajustar. Intuitivamente se podría pensar que poblaciones pequeñas podrían no cubrir adecuadamente el espacio de búsqueda y que poblaciones demasiado grandes podrían consumir un excesivo tiempo de cálculo.

Algunos autores (como Alander en 1992) han sugerido que un tamaño de la población comprendido entre L y $2L$ es suficiente para atacar con éxito un problema con L variables de decisión, es decir, la longitud del cromosoma o solución.

3.1.2 FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo debe ser diseñada específicamente para cada problema de manera que refleje fehacientemente el nivel de adaptación de cada individuo de la población al problema particular.

Idealmente, la función debería verificar que para dos individuos que se encuentran próximos en el espacio de búsqueda sus respectivos valores en la función objetivo sean similares. Sin embargo, esto no siempre es posible, sobre todo en los problemas con un gran número de restricciones donde muchos puntos del espacio de búsqueda pueden representar soluciones no factibles. Una forma de manejar a estas soluciones sería directamente desestimarlas por no cumplir las restricciones pero que siguieran evolucionando con cruces y mutaciones hasta obtener soluciones factibles. Otra forma sería directamente asignarles un valor de cero a la función objetivo. (Millet, 2014)

3.1.3 SELECCIÓN

El método de selección de padres más utilizado es el denominado método de ruleta donde la selección de un individuo como padre es proporcional a su valor de la función objetivo. Este método asume que cada individuo tiene asignada una porción en la ruleta cuya área es proporcional al valor de la función objetivo, de manera que un individuo con mayor área tendrá más probabilidades de ser elegido para reproducirse. Sin embargo, este método puede llevar a una convergencia prematura ya que se centra en explotar los individuos que desde el principio presentan una mayor aptitud, se multiplicarán rápidamente en la población desplazando a otros individuos que, aunque en un primer momento son poco idóneos, en generaciones futuras podrían aportar buena información para llegar a la solución óptima.

Para evitar el inconveniente de la convergencia prematura, una alternativa es la selección por ranking. En este método los individuos de la población son ordenados de mayor a menor aptitud o fitness (que muchas veces coincide con el valor de la función objetivo) y, según su puesto en el ranking, se calcula su probabilidad de selección. Este método ignora el valor absoluto de la función objetivo de cada individuo, lo que en ocasiones podría ser interesante para saber el grado de diferencia entre las soluciones competidoras. En comparación con la selección por ruleta, puesto que evita coger la mayoría de los hijos de un pequeño grupo de individuos, aumenta la variedad genética, lo que puede conducir a una búsqueda más exitosa. Sin embargo, tiene la desventaja de que la convergencia puede ser más lenta ya que no existe tanta diferencia entre individuos. En

definitiva, la población no se colapsa rápidamente con los descendientes de un pequeño grupo de individuos lo que permite una mayor efectividad del Algoritmo Genético.

Otros métodos serían la selección elitista y la selección por torneo:

- ✓ En la selección elitista el mejor individuo en cada momento es forzado a ser seleccionado como padre.
- ✓ En la selección por torneo se escoge al azar un determinado número de entre los individuos de la población (tamaño del torneo) y se les hace competir entre ellos, en términos de valor de la función objetivo, para seleccionar como padre al mejor del torneo. El proceso de torneo se repite hasta que el número de individuos seleccionados coincide con el tamaño de la población. (Millet, 2014)

3.1.4 CRUCE

El operador de cruce es el responsable de efectuar la búsqueda a lo largo del espacio de posibles soluciones. Su objetivo es conseguir descendientes que mejoren la aptitud con respecto a sus padres.

Habitualmente el operador de cruce no se aplica a todos los pares de individuos que han sido seleccionados para emparejarse, sino que se aplica de manera aleatoria con una probabilidad comprendida entre 0,5 y 1,0, es decir, sobre entre el 50 y el 100 % de los individuos seleccionados. En el caso en que el operador de cruce no se aplique la descendencia se obtiene simplemente duplicando los padres. Goldberg (1989) propone una probabilidad de cruce entre 0,6 y 1.

Existen varias formas de realizar el cruce entre dos individuos seleccionados:

- ✓ Cruce por un punto: Es la forma más simple del operador de cruce. Se escoge una posición de cruce de forma aleatoria y las partes de los padres se intercambian para formar dos descendientes.
- ✓ Cruce por dos puntos: Trata de reducir el sesgo posicional. Se escogen dos posiciones de cruce de forma aleatoria y los padres se intercambian los segmentos existentes entre ellas.

Algunos investigadores opinan que el operador de cruce más eficiente es el cruce uniforme, ya que opera sobre cada gen de los padres individualmente, y no sobre bloques de material genético. Cada gen del descendiente tiene las mismas probabilidades de pertenecer a uno u otro padre. Una forma sería generando un número aleatorio de modo que si supera un cierto umbral se toma el gen de primer padre y si no lo supera se toma del otro. Otra forma sería seleccionando una máscara generada aleatoriamente que contiene unos y ceros, ambos con la misma probabilidad. En caso de que el bit correspondiente a la máscara esté a 1, se copia el gen del primer padre y en caso de que esté a 0 se copia el gen del segundo. Para producir el segundo descendiente se intercambian los papeles de los padres. (Millet, 2014)

3.1.5 MUTACIÓN

El objetivo de la mutación es asegurar que ningún punto del espacio de búsqueda tenga probabilidad cero de ser examinado y evitar así una convergencia prematura del algoritmo hacia buenas soluciones óptimas locales en las que podría quedar atrapado. Si la probabilidad de mutación es demasiado alta la búsqueda de soluciones podría degenerar en una búsqueda aleatoria, lo cual no

está permitido en un problema de optimización mediante Algoritmos Genéticos. Por ello los valores más habituales de la probabilidad de mutación están entre 0,001 y 0,01, es decir, actúa sobre entre un 0,1% y un 1% de los individuos descendientes. (Millet, 2014)

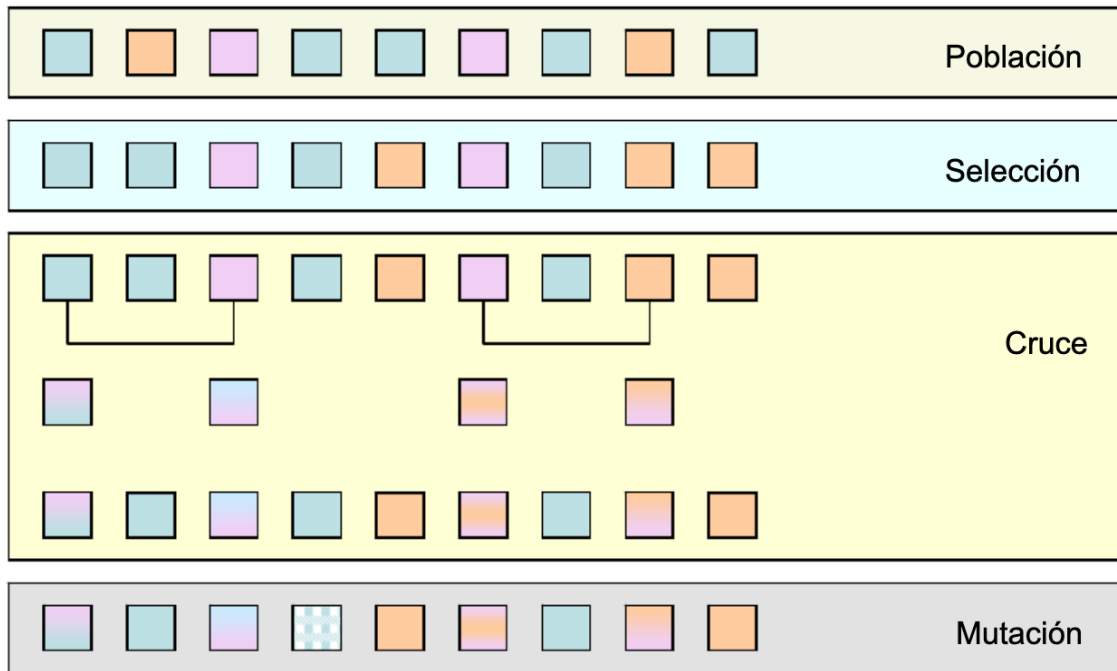


Figura 2. Esquema de funcionamiento de un algoritmo genético

Fuente: Elaboración propia

3.2 ALGORITMO DE RECOCIDO SIMULADO

El algoritmo de recocido simulado (Kirkpatrick, 1983) está basado en una analogía con el proceso de fundir un material sólido y posteriormente enfriarlo lentamente hasta su congelación, un proceso termodinámico. En el proceso de templado, el material se calienta más allá del punto de recristalización, luego se deja enfriar de manera paulatina.

En este caso, las partículas que contienen una solución del problema de optimización las conocemos como piezas. En este caso, cada iteración del algoritmo lleva asociada una probabilidad que permite sustituir la solución actual por una nueva solución generada de modo aleatorio. De este modo, toda nueva solución que mejora las anteriores se acepta automáticamente, mientras que movimientos hacia soluciones peores se aceptan con una probabilidad dada. Conforme el proceso avanza es más complicado que soluciones peores sustituyan a las mejores.

Realizando una analogía con el proceso físico, esta probabilidad de cambio está relacionada con las leyes de la termodinámica, según las cuales a una temperatura T la probabilidad de un incremento energético de magnitud δE se puede aproximar por:

$$P(\delta E) = e^{-\delta E/kT}$$

Ec. 6

Donde:

K = Constante de Boltzmann.

Dicha constante no se considera, puesto que no tiene ningún sentido en un problema de optimización.

De este modo se genera una perturbación aleatoria en el sistema y se calculan los cambios de energía resultantes: Si hay una caída energética, el cambio se acepta automáticamente; si por el contrario se produce un incremento energético, el cambio será aceptado con una probabilidad dada por la ecuación 6.

El proceso se repite durante un número predefinido de iteraciones en series decrecientes de temperaturas hasta que el sistema se enfría.

La idea de usar una función de temperatura es la de controlar la presión de selección. Así, al principio se utiliza un valor alto de temperatura, lo que provoca que la presión de selección sea baja. Conforme el proceso avanza, la temperatura disminuye, y esta disminución de T está asociada con un aumento del proceso de selección. De esta manera se incita a un comportamiento de exploración global en las primeras generaciones y se acota a un proceso de exploración local hacia el final del proceso evolutivo.

La posibilidad de que soluciones peores entren en el sistema es la principal diferencia que presenta frente a otros algoritmos tradicionales de búsqueda, puesto que el resto de algoritmos tradicionales parten de una solución inicial que es mejorada paulatinamente al introducir pequeñas perturbaciones o cambios. Esto significa que el resto de algoritmos nunca vuelven sobre sus pasos, lo que en ocasiones puede provocar convergencias prematuras que hacen que el proceso de optimización finalice en un óptimo local, que no tiene necesariamente que ser el global.

El proceso de optimización fue diseñado para la optimización en espacios discretos, por lo que es fácilmente adaptable al diseño de redes de agua, donde se trata de determinar el diámetro de las conducciones. (Mora, 2012)

3.2.1 ETAPAS DEL ALGORITMO

El algoritmo genético sigue una serie de etapas, las cuales se muestran a continuación:

- ✓ **Eta** **1. Definición de los parámetros del algoritmo**

En primera instancia es necesario definir el valor de los parámetros con los que va a trabajar. El modelo permite elegir el valor de la temperatura inicial, el valor de la temperatura final, la función de reducción de temperatura y el número de iteraciones que va a realizar el algoritmo antes de cada bajada de temperatura.

✓ **Etapa 2. Generar una solución inicial**

El cálculo comienza con la generación de una solución aleatoria. En la mayoría de algoritmos evolutivos se generan tantas soluciones aleatorias como individuos tiene la población del algoritmo. En este sentido el algoritmo genético, trabaja de un modo diferente, puesto que tan sólo crea una pieza (un individuo), de modo que todas las operaciones posteriores se aplican sobre una única pieza.

Esta primera solución se genera a la temperatura inicial elegida en la Etapa 1, a la que llamaremos T_0 .

✓ **Etapa 3. Generación nuevas soluciones en T_0**

Un nuevo vector solución (pieza) se genera a partir de una serie de reglas en T_0 , este nuevo vector solución sustituirá siempre al anterior si el costo que proporciona para la función objetivo es menor. En caso de que el valor de la función objetivo sea más alto sólo sustituirá al anterior según una probabilidad dada, de valor $e^{1-\delta/T}$, donde δ es la diferencia de costo entre ambas soluciones y T es la temperatura a la que nos encontramos en este momento.

Esta operación se repite en una determinada temperatura tantas veces como se haya indicado en Etapa 1, donde se definían los parámetros del algoritmo.

✓ **Etapa 4. Paso a una nueva temperatura**

Una vez finalizados los cálculos a una determinada temperatura se produce un proceso de enfriamiento, donde la nueva temperatura será una u otra según la función de reducción de temperatura elegida en la Etapa 1. Una vez calculada la nueva temperatura se repite la Etapa 3.

✓ **Etapa 5. Condición de parada**

Las etapas 3 y 4 se repiten hasta que se cumple un determinado criterio de convergencia que da por finalizado el proceso de optimización. Existen distintas teorías acerca de cuál es el criterio de convergencia más adecuado en el algoritmo.

Así, una posibilidad es reducir la temperatura hasta cero, pero en la práctica la búsqueda converge por lo general a su óptimo local final mucho antes de ese valor nulo, por lo que una temperatura de parada excesivamente baja gastaría demasiado tiempo de búsqueda en las fases finales sin alcanzar una mejor solución. Por el contrario, si la temperatura final se fija en un valor muy alto, es posible que la búsqueda no consiga alcanzar ningún óptimo local, perdiendo la posibilidad de mejora que permite este tipo de algoritmo.

El modelo implementado en este trabajo no impone una temperatura de parada fija, sino que se ha optado por finalizar la simulación cuando no se producen mejoras en el costo durante un número determinado de simulaciones. (Gonzales, 2013)

3.2.2 PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN

La implementación del modelo en cualquier problema de optimización requiere del ajuste de una serie de parámetros, que en mayor o menor medida determinan el

éxito o el fracaso del método. De modo similar al resto de métodos heurísticos no existen reglas generales para todos los casos, sino que según la tipología del problema es necesario proceder de un modo u otro.

En el caso concreto del diseño de redes de agua es necesario tomar una serie de decisiones genéricas y específicas. Las decisiones específicas de aplicación al diseño de redes de agua comprenden la definición del espacio de soluciones y estructura de entornos, así como la función de costo (objetivo) y cómo se obtiene la solución inicial X_0 del problema.

Por otro lado, existen una serie de decisiones genéricas del método en sí, y que se refieren principalmente a la forma de control de la temperatura. Para ello es necesario definir el valor inicial de temperatura (T_0), la función de decrecimiento de temperatura (α), el número de iteraciones realizadas antes de bajar de nuevo la temperatura y la condición de convergencia final, donde se considera que el sistema ya está frío.

Pese a que no hay un conjunto concluyente de reglas que definan cómo tomar las mejores decisiones genéricas y específicas para un problema, sí que hay algunos consejos que ayudan en el proceso de elección de estos parámetros. Las siguientes secciones profundizan en el estudio de estos parámetros asociados a la optimización. (Gonzales, 2013)

3.2.2.1 TEMPERATURA

El parámetro t es un parámetro de control al que se denomina temperatura por analogía con el proceso de enfriamiento físico. Una solución que suponga un incremento δ en la función de costo se aceptará con probabilidad $e^{1-\delta/T}$.

Por tanto, en el caso de que T alcance valores lo suficientemente pequeños no habrá movimientos hacia peores soluciones y la convergencia será a un óptimo local, que podrá coincidir o no con el óptimo global del sistema.

Algunos autores han elaborado estudios teóricos que demuestran que si t baja de un modo suficientemente lento, el proceso debe converger hacia un óptimo global con una probabilidad 1, según t tiende a 0. Sin embargo, una función de reducción de temperatura (α) que garantice esa convergencia al óptimo global requeriría unos tiempos de cálculo excesivamente elevados.

Uno de los objetivos de cualquier procedimiento robusto de búsqueda es que la calidad de la solución final debe ser independiente de la solución inicial de partida. En concordancia con esta premisa, la temperatura inicial debe ser independiente de la solución inicial y lo suficientemente alta como para aceptar casi libremente las soluciones del entorno. (Gonzales, 2013)

3.2.2.2 VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

La velocidad a la que se produce el enfriamiento es otro factor clave en el éxito de la estrategia. Esta velocidad viene determinada por un parte por el número de iteraciones realizadas en cada valor de temperatura (n_{rep}), y por otra por la velocidad α a la que se realizará el enfriamiento. La teoría sugiere que se debería permitir que el sistema esté cerca del estado estacionario correspondiente a una determinada temperatura antes de reducir ésta, y que además la temperatura vaya gradualmente acercándose al valor 0.

Existe gran diversidad de funciones de enfriamiento que pueden ser utilizadas en el proceso de optimización. El modelo de optimización realizado ofrece dos

alternativas distintas para realizar el enfriamiento: La primera de ellas equivale a enfriar la pieza utilizando una función aritmética, tal que $T \rightarrow T - \alpha$, con $\alpha > 0$.

La segunda propone una alternativa de enfriamiento de tipo geométrico, tal que $T \rightarrow T - \alpha$, con $\alpha < 1$. En esta segunda opción, las evidencias empíricas dan a entender que valores elevados de α entre 0,8 y 0,99 (correspondientes a velocidades lentas de enfriamiento) son los que mejores resultados proporcionan).

La conclusión de todo esto es que la velocidad del programa de enfriamiento debe estar relacionada con las características del espacio de soluciones, definidas por la función de costo y la estructura de entornos elegida. Esto hace que sea fundamental una optimización de parámetros de cara a conseguir un buen funcionamiento del algoritmo de optimización. (Gonzales, 2013)

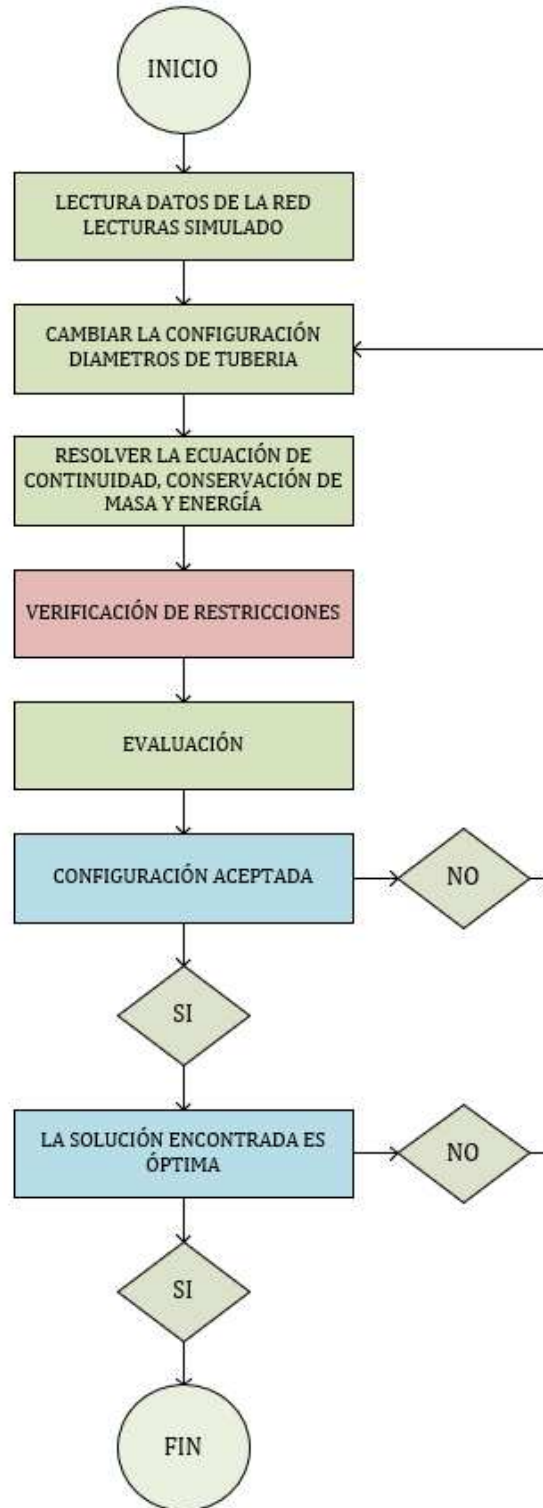


Figura 3. Funcionamiento del Algoritmo Recocido Simulado

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 4. MARCO PRÁCTICO

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El área del proyecto “Extensión de la Red de Agua Potable para las comunidades Chicani - Chinchaya” se encuentra localizada política y administrativamente en:

- ✓ Departamento : La Paz
- ✓ Provincia : Murillo
- ✓ Sección : Segunda
- ✓ Municipio : La Paz
- ✓ Cantón : Hampaturi
- ✓ Distrito : 22
- ✓ Comunidades : Chicani y Chinchaya

El suministro de agua potable considerado en el proyecto está determinado en dos partes, una primera de bombeo desde la planta de tratamiento de Pampahasi hasta el tanque de almacenamiento de Alto Pampahasi y desde este tanque a la red principal y la distribución es por gravedad.

El proyecto de Chicani – Chinchaya, tiene una población inicial (2017) de 4421 hab., contando con 1 año de construcción y una proyección de 20 años, teniendo como población final 7298 hab. (Argos S.R.L.,2017)

El diseño preliminar del sistema de agua potable, se compone de dos partes, inicialmente una línea de bombeo desde la Planta de Tratamiento Pampahasi, en la línea DN-600 (diámetro nominal de 600mm), hasta el tanque de 400m³ que se encuentra en la zona de Alto Pampahasi, con una longitud de bombeo de

1290.89m. A partir del tanque, las comunidades de Chicani y Chinchaya serán abastecidas por gravedad, donde se tiene la red secundaria, los cuales se encontrarán interconectados a la red principal, en base a la implementación de tuberías principales calculadas de acuerdo a la demanda futura, la red principal tendrá diámetros de PEAD-DN280mm, FFD-8", FFD-6", y FFD-4", que serán de alta presión, y la red secundaria estará moderada con reductoras de presión de diámetros de: 110mm, 90mm y 63mm, bajo el siguiente detalle:

Tabla 1. Cuadro de tuberías de las redes no optimizadas

TUBERÍA	LONGITUD [m]
TUBERÍA PEAD SDR7.4 PN25 DN 280mm (DE 200mm)	1611.4
TUBERÍA PEAD SDR11 PN16 DN 110mm (DE 90mm)	494.99
TUBERÍA PEAD SDR17 PN10 DN 90mm (DE 75mm)	388.5
TUBERÍA PEAD SDR17 PN10 DN 63mm (DE 50mm)	30076.89
TUBERÍA FFD 8"	914.04
TUBERÍA FFD 6"	3107.36
TUBERÍA FFD 4"	443.37
TUBERÍA FFD 3"	1308.8
TUBERÍA FFD 2"	1038.81
TOTALES	39384.16

FUENTE: Argos S.R.L. 2017



Figura 4. Red principal del proyecto

FUENTE: Elaboración propia

Presupuesto por componente

Tabla 2. Costos directos de tuberías de Red Principal no optimizada

TUBERÍA	LONGITUD [m]	COSTO [Bs/m]	TOTAL
			[Bs]
TUBERÍA PEAD SDR7.4 PN25 DN 280mm (DE 200mm)	1 611.40	1068.20	1 721 297.48
TUBERÍA PEAD SDR11 PN16 DN 110mm (DE 90mm)	494.99	161.20	79 792.39
TUBERÍA PEAD SDR17 PN10 DN 90mm (DE 75mm)	388.5	64.9	25 213.65
TUBERÍA FFD 8"	914.04	2 342.13	2 140 800.51
TUBERÍA FFD 6"	3 107.36	1890.21	5 873 562.95
TUBERÍA FFD 4"	443.37	1742.25	772 461.38
TUBERÍA FFD 3"	1 308.80	1516.6	1 984 926.08
TUBERÍA FFD 2"	1 038.81	1116	1 159 311.96
TOTALES	9 307.27		13 757 366.39

FUENTE: Elaboración propia – (precios 2020)

Tabla 3. Costos directos de tuberías de Red Secundaria no optimizada

TUBERÍA	LONGITUD [m]	COSTO [Bs/m]	TOTAL
			[Bs]
TUBERÍA PEAD SDR17 PN10 DN 63mm (DE 50mm)	30 076.89	54.8	1 648 213.57
TOTALES	30 076.89		1 648 213.57

FUENTE: Elaboración propia – (precios 2020)

4.2 PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN

4.2.1 PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Los parámetros de diseño para la modelación hidráulica sin considerar el análisis de optimización (ver anexo 2. Parámetros de diseño), son los de la Tabla 4:

Tabla 4. Tabla resumen de parámetros de diseño

PARÁMETROS DE DISEÑO			
POBLACIÓN ACTUAL 2017	Po =	4421	[hab]
ÍNDICE DE CRECIMIENTO (censo local)	ip =	3,76	[%]
ÍNDICE DE CRECIMIENTO (Plan Maestro Metropolitano)	ip =	1,07	[%]
ÍNDICE DE CRECIMIENTO POBLACIONAL (promedio)	ip =	2,42	[%]
DOTACIÓN ACTUAL 2017	Do =	140,97	[l/hab d]
ÍNDICE DE CRECIMIENTO DOTACIÓN (calculado)	id =	4,05	[%]
ÍNDICE DE CRECIMIENTO DOTACIÓN (adoptado según NB 689)	id =	2,00	[%]
ÍNDICE DE CRECIMIENTO COMERCIAL	ic =	1,33	[%]
PORCENTAJE DE PERDIDAS	p =	25,00	[%]
PERIODO DE DISEÑO	n =	21,00	[año]
POBLACIÓN FUTURA 2038	P f =	7305	[hab]
DOTACIÓN FUTURA 2038	D f =	213,66	[l/hab d]
CAUDAL MEDIO DIARIO 2038	Qm =	18,06	[l/s]
CAUDAL MEDIO DIARIO (actual)	Qm =	7,21	[l/s]
CAUDAL MÁXIMO DIARIO 2038	Qmax_d =	22,58	[l/s]
CAUDAL MÁXIMO DIARIO (actual)	Qmax_d =	9,02	[l/s]
CAUDAL MÁXIMO HORARIO 2038	Qmax_h =	30,03	[l/s]
CAUDAL MÁXIMO HORARIO (actual)	Qmax_h =	11,99	[l/s]

FUENTE: Elaboración propia

Se emplea el método geométrico para la proyección de la población futura, de acuerdo a la recomendación de la norma NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable, para poblaciones hasta 5000 habitantes, siendo el caso más crítico con respecto al método aritmético.

Cabe destacar que la metodología propuesta no incluye otras problemáticas de las redes de agua, como son: el trazado de la misma, estudios básicos de

población, topografía, la calidad del agua suministrada, operación de los sistemas de distribución existentes y la altura de bombeo.

En el proceso de optimización se establecerá la distribución por gravedad, es decir, a partir del tanque situado en Alto Pampahasi.

Los caudales calculados serán distribuidos por el área de influencia de cada nudo en todo el proyecto.



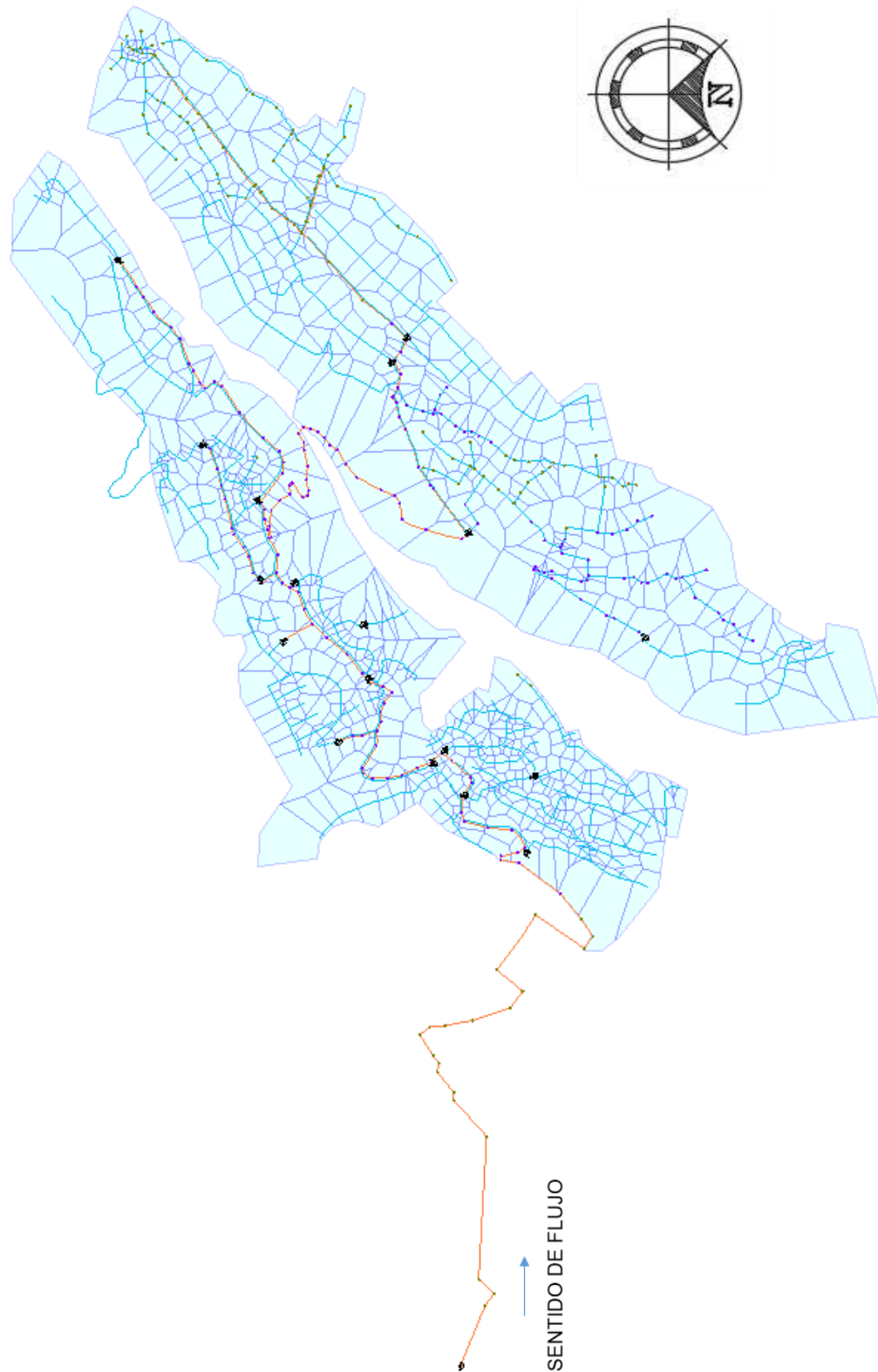


Figura 5. Polígonos de Thiessen para los nudos de la red secundaria.

FUENTE: Elaboración propia

4.2.2 PARÁMETROS DE SERVICIO

Para el proceso de optimización se basará en los parámetros de diseño señalados en la norma boliviana NB-689, mencionados en el capítulo 2, Fundamentos de Diseño. Tabla 5.

Tabla 5. Restricciones de servicio en las Red Principal y Secundaria.

	PRESIÓN MÍNIMA	PRESIÓN MÁXIMA	VELOCIDAD MÍNIMA	VELOCIDAD MÁXIMA
	[bar]	[bar]	[m/s]	[m/s]
RED PRINCIPAL	5.0	20	0.3	2.0
RED SECUNDARIA	1.0	5	0.3	2.0

FUENTE: Elaboración propia

4.3 OPTIMIZACIÓN APLICANDO WATERGEMS

WaterGEMS, es un software comercial de análisis, modelación y gestión de redes, propiedad de la Empresa de Software Bentley Systems Incorporated que produce soluciones para el diseño, construcción y operación de infraestructuras en diversos campos. WaterGEMS permite la simulación hidráulica de un modelo computacional representado en este caso por elementos tipo: Línea (tramos de tuberías), Punto (Nudos de Consumo, Tanques, Reservorios, Hidrantes) e Híbridos (Bombas, Válvulas de Control, Regulación, etc.) El software cuyo algoritmo de cálculo se basa en el método del Gradiente Hidráulico, permite el análisis hidráulico de redes de agua (aunque puede usarse para cualquier fluido newtoniano), determinando las presiones en diversos puntos del sistema, así como los caudales, velocidades, pérdidas en las tuberías que conforman la red

hidráulica; así como otros muchos parámetros operativos derivados de los elementos presentes en el sistema como: Bombas, Válvulas de Control, Tanques, etc. a partir de las características físicas del sistema y unas condiciones de demanda previamente establecidas. WaterGEMS además permite extender sus capacidades a temas de gestión a largo plazo de sistemas de abastecimiento incluyendo: análisis de vulnerabilidad, análisis de protección contra incendio, estimación de costos energéticos, calibración hidráulica, optimización, etc.

Este programa adicional a las herramientas convencionales para el análisis y modelación de redes a presión, cuenta con herramientas de productividad en los procesos de gestión de datos, construcción de modelos a partir de archivos externos, extracción de elevaciones, asignación de demandas a partir de técnicas de análisis espacial, preparación y gestión de escenarios, cálculos hidráulicos complementarios, gestión operativa y preparación de reportes y planos. Asimismo, el software ofrece diversas opciones para visualización de resultados como reportes tabulares, perfiles, gráficos de variación temporal, anotaciones y codificación por color, etc.

Debido a esta necesidad, de conocer el comportamiento hidráulico de los sistemas de distribución de agua, en el transcurso del tiempo, ha evolucionado la hidráulica de redes. Desde teorías para resolver un sistema cerrado de redes (Método de Hardy Cross – 1936), hasta técnicas para optimizar el diseño y operación de los sistemas. Siendo una de ellas, la modelación hidráulica, técnica para el análisis hidráulico y calidad de agua, cuya interpretación de resultados la usaremos para planificar, diseñar y operar redes. (Pereyra, 2016).

La optimización partiendo de las características topológicas, topográficas y ciertas características físicas (materiales, ubicación de los accesorios/coeficiente de perdidas menores) e hidráulica (caudales demandados y presiones mínimas en los nudos) de una red de acueductos determina, encontrar la combinación de diámetros de los tubos de la red que lleve el caudal demandado especificado a todos los nudos de la red con no menos de la presión mínima específica a priori que sea de mínimo costo según los criterios de diseño.

La optimización es posible gracias a la capacidad de utilizar algoritmos genéticos la misma que permite llegar a una solución mucho más ajustada con una combinación de parámetros adecuados.

Si la función a optimizar tiene muchos máximos/mínimos locales se requerirán más iteraciones del algoritmo para asegurar el máximo/mínimo global.

Si la función a optimizar contiene varios puntos muy cercanos en valor al óptimo, solamente podemos asegurar que encontraremos uno de ellos (no necesariamente el óptimo)

Los Algoritmos Genéticos constituyen, en un problema de optimización, un método de búsqueda ordenada por el espacio de solución. Es decir, los algoritmos genéticos, no garantizan de ninguna manera el encontrar el mínimo global y, ni siquiera, los mínimos Locales de una función determinada. Simplemente estos algoritmos van buscando por el espacio de solución localizado los individuos de cada generación progresivamente más cercana de los mínimos locales o globales de la función de costo. Es de esperar que después de un número razonable de

generaciones se encuentre una solución cuyo valor en la función de costo sea bajo, o se encuentre cerca al mínimo.

Aunque lo anterior muestre que los algoritmos genéticos no son formalmente algoritmos de optimización, su eficiencia como tal se ha visto comprobada tanto por la resolución efectiva de diversos problemas desde su desarrollo por ejemplo el éxito que han tenido como mecanismo de optimización dentro de los sistemas biológicos.

Para la optimización con WaterGEMS, se utilizó la herramienta del Darwin Designer, presenta 3 opciones de optimización, las cuales son: Optimización minimizando el costo, optimización maximizando el beneficio y la combinación de ambas. Y en estas 3 opciones de optimización, las tuberías se pueden analizar como nuevas o de rehabilitación.

El procedimiento a seguir será el siguiente:

- ✓ Construir el modelo
- ✓ Determinar las demandas
- ✓ Determinar los diferentes diámetros y costos de tuberías
- ✓ Identificar grupos
- ✓ Determinar las restricciones
- ✓ Realizar el compute de optimización
- ✓ Exportar alternativa optimizada

4.3.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

La topología que se muestra en la figura 6, con diámetros nominales fue parte de la información recabada, la cual se compone de una red mixta, sin embargo, la

mayoría de las tuberías pertenecen a una red abierta, en este sentido no se tendrá variaciones con el fin de realizar comparaciones con los resultados obtenidos durante la optimización, tomando en cuenta que en la modelación original contiene tuberías de FFD, que requieren accesorios en nudos donde se presentan deflexiones mayores a los 11° , y en el proceso de la optimización se empleará tubería PEAD, solamente se requieren accesorios en nudos con deflexiones mayores a los 45° , por la flexibilidad de la tubería, por este motivo se reducirán los nudos y tramos del modelo original, dejando de manera inalterada la longitud.



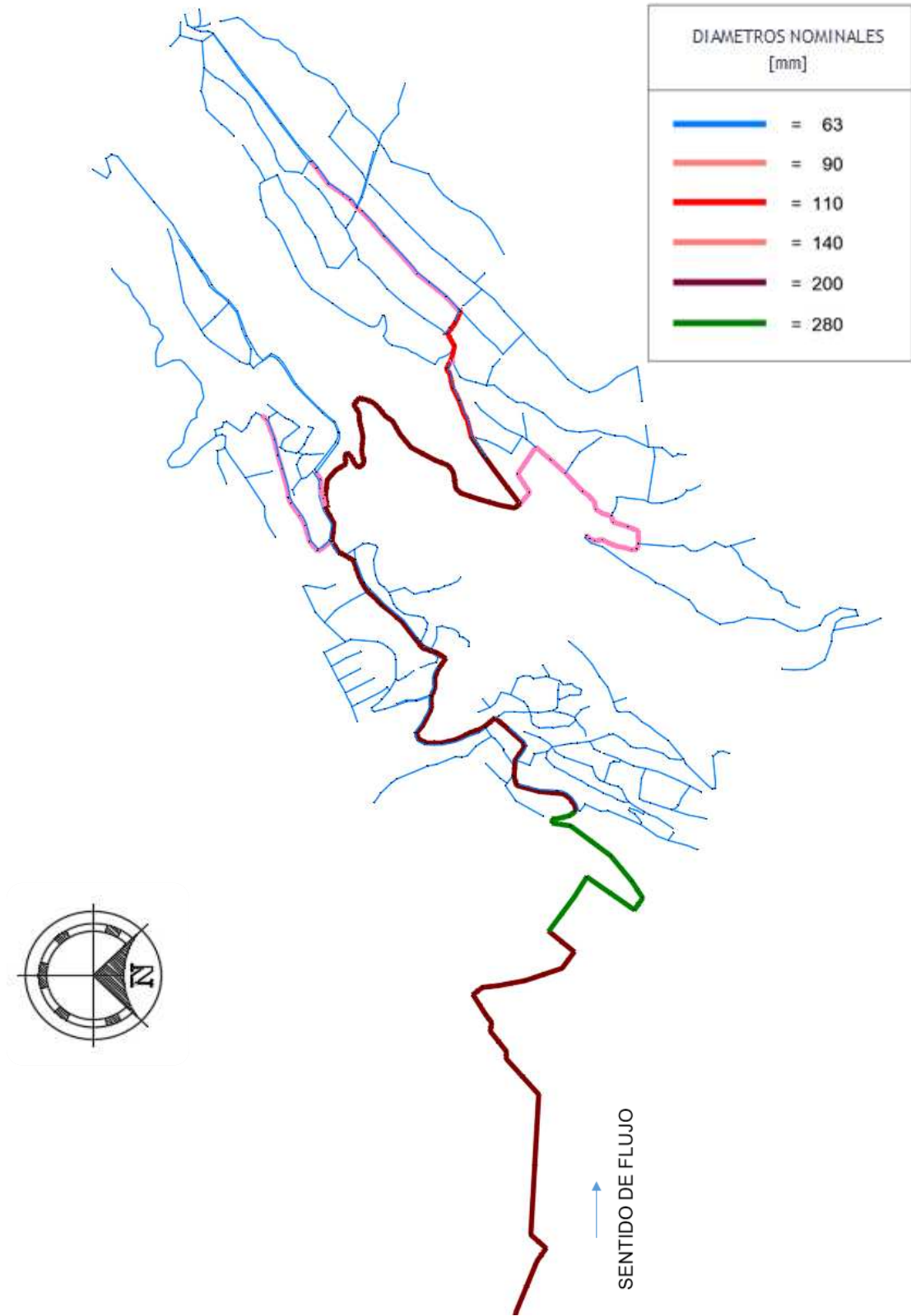


Figura 6. Diámetros nominales de la red de distribución inicial.

FUENTE: Elaboración propia

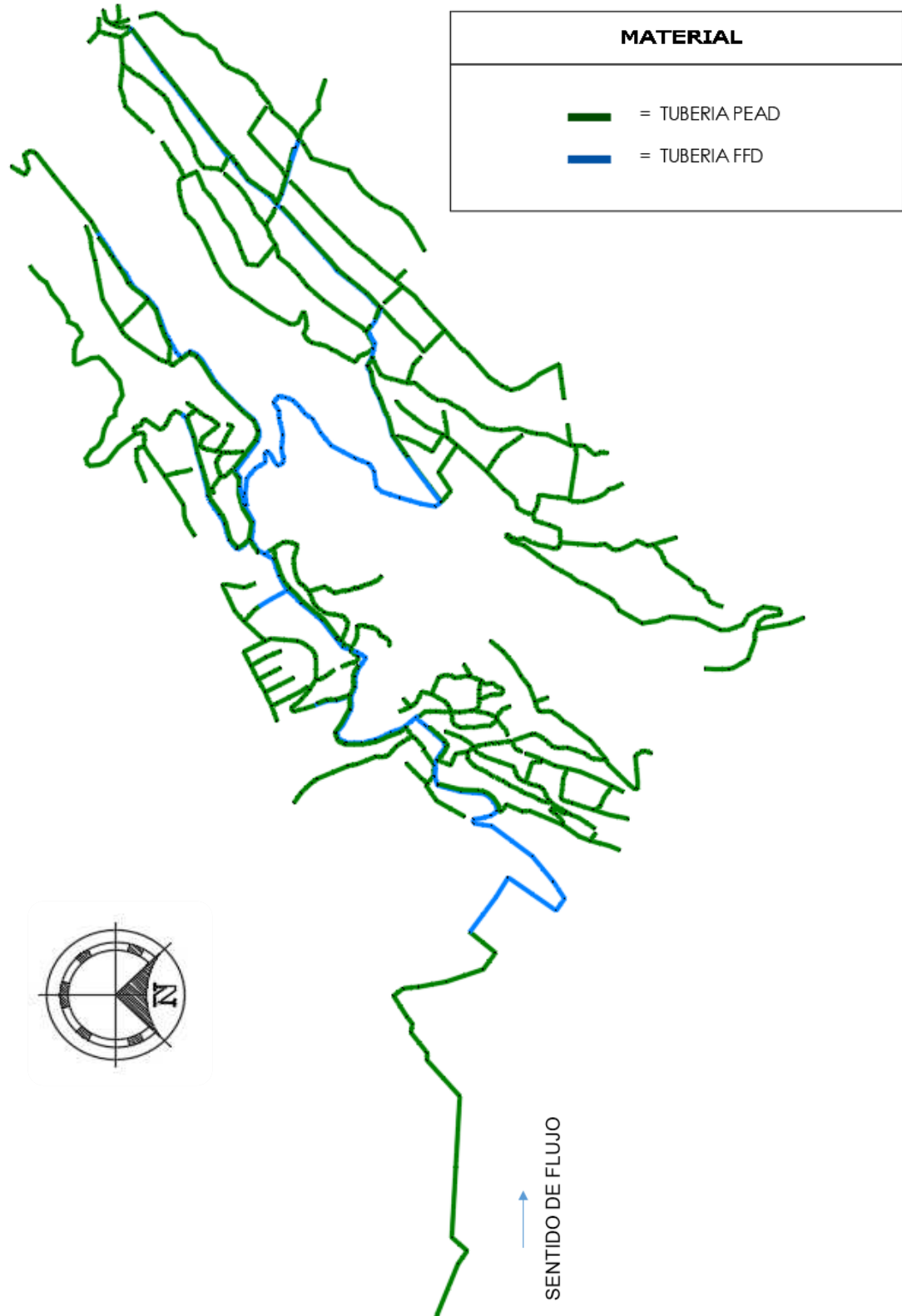


Figura 7. Material de la red de distribución inicial.

FUENTE: Elaboración propia

4.3.2 DETERMINACIÓN DE LAS DEMANDAS

La red de estudio presenta una red mixta, por contar tanto con redes cerradas en tramos intermedios, y abiertas en los tramos finales, en este sentido, y de acuerdo a la norma NB 689, Reglamentos Técnico de Diseño para Sistemas de Agua Potable, se adoptará el Método de área unitaria, para la determinación de los caudales de todos los nudos del proyecto.

$$Q_i = Q_u * A_i \quad Q_u = \frac{Q_t}{A_t}$$

Donde:

- Q_i = Caudal en el nudo “i”
- Q_u = Caudal unitario superficial
- Q_t = Caudal máximo horario
- A_t = Superficie total del proyecto
- A_i = Área de influencia del nudo “i”

Fuente: 2.5.2.1. - NB-689 Reglamentos Técnicos de Diseño para Sistemas de Agua Potable. Vol. 1

Para la aplicación de las demandas ya calculadas en los parámetros de diseño, se empleará la herramienta **LoadBuilder**, que cuenta con diferentes metodologías de asignación de demandas, estas son las siguientes:

- ✓ **point load data** – (datos aplicados como caudal puntual)
- ✓ **area load data** – (datos aplicados en función al área)
- ✓ **population/land use data** – (datos aplicados en función a la densidad poblacional).

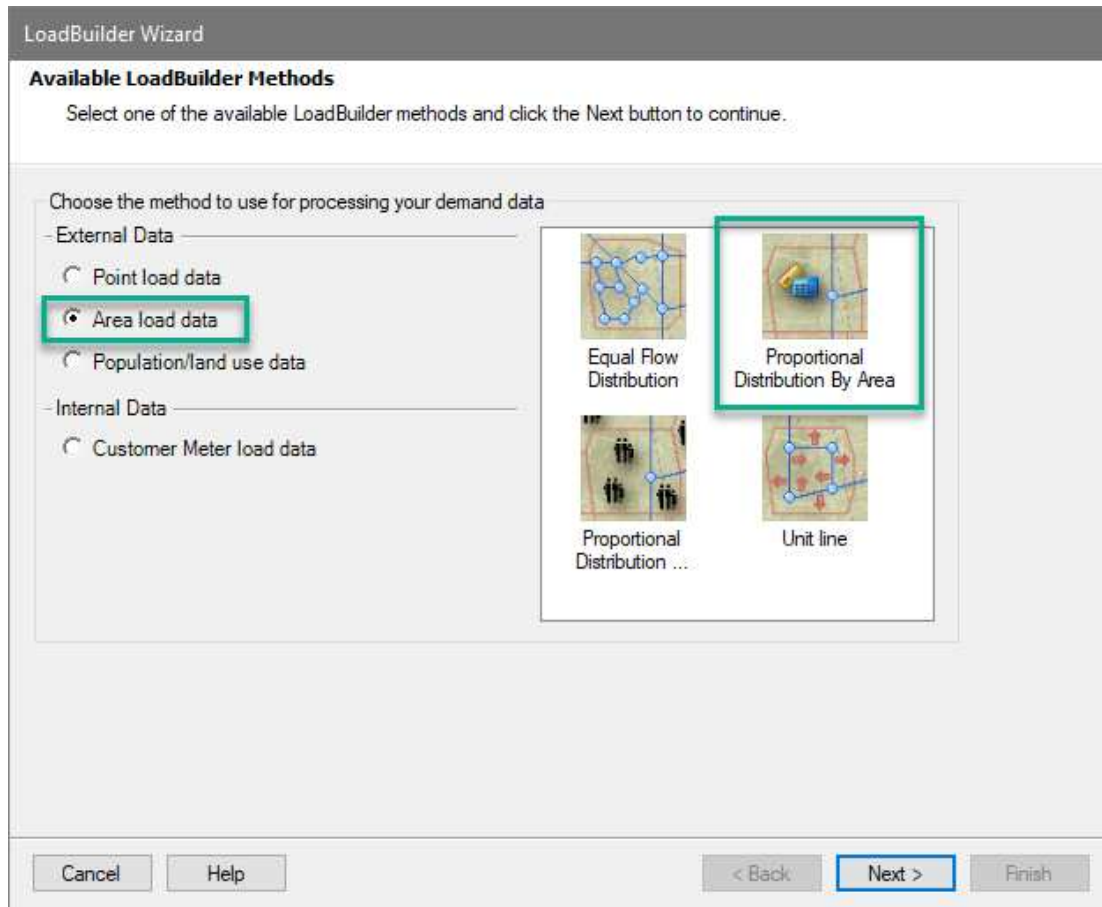


Figura 8. Aplicación de las demandas calculadas.

FUENTE: Elaboración propia

Para el proyecto se empleó la distribución de demandas en función al área de cobertura de cada nudo. (Figura 8). Para recurrir a este método, se requiere inicialmente los polígonos de Thiessen y un límite de cobertura.

Para este propósito inicial utilizaremos la herramienta del Creador de Polígonos de Thiessen de las herramientas del WaterGEMS. (Figura 9).

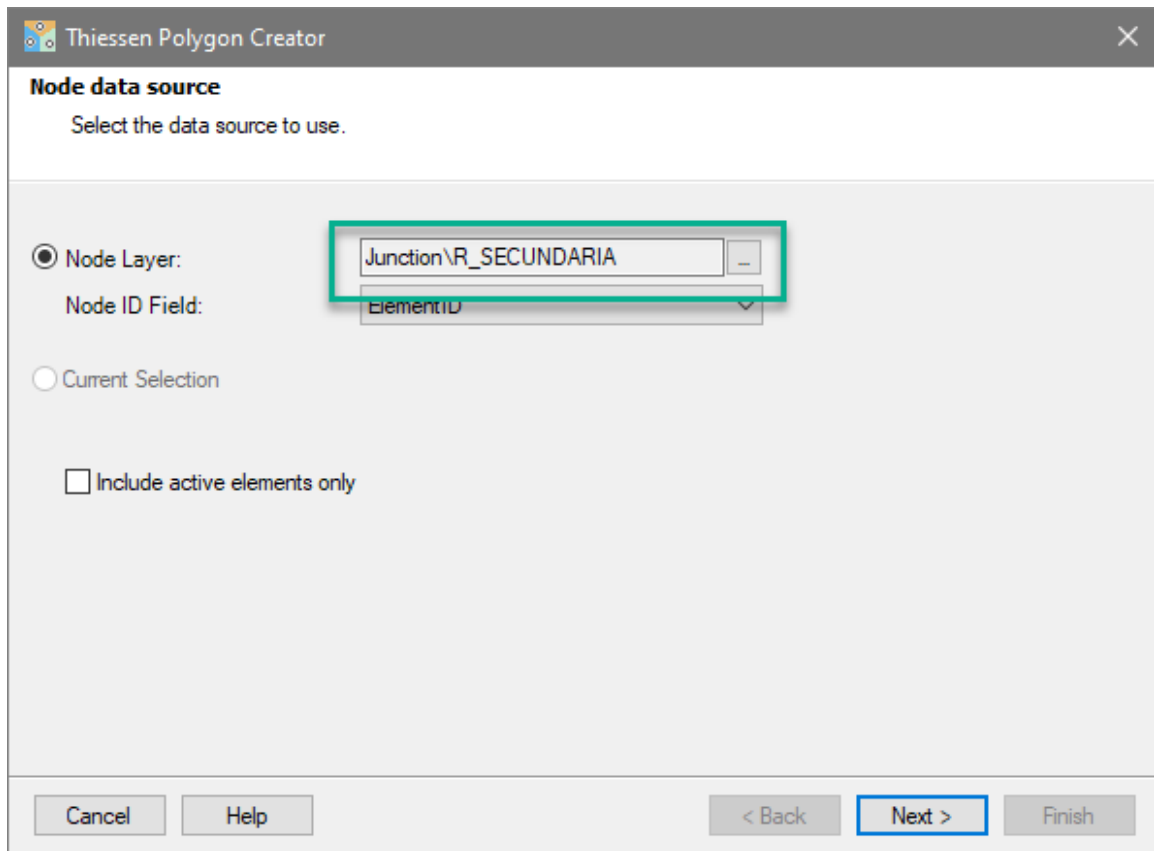


Figura 9. Creación de los polígonos de Thiessen.

FUENTE: Elaboración propia

La herramienta de creación de polígonos de Thiessen, deberá ser aplicada únicamente a nudos de la red secundaria, y el límite de proyecto deberá ser determinado en función a los alcances de cobertura o planimetrías ya establecidas por las zonas que intervienen en el proyecto. (Figura 10).

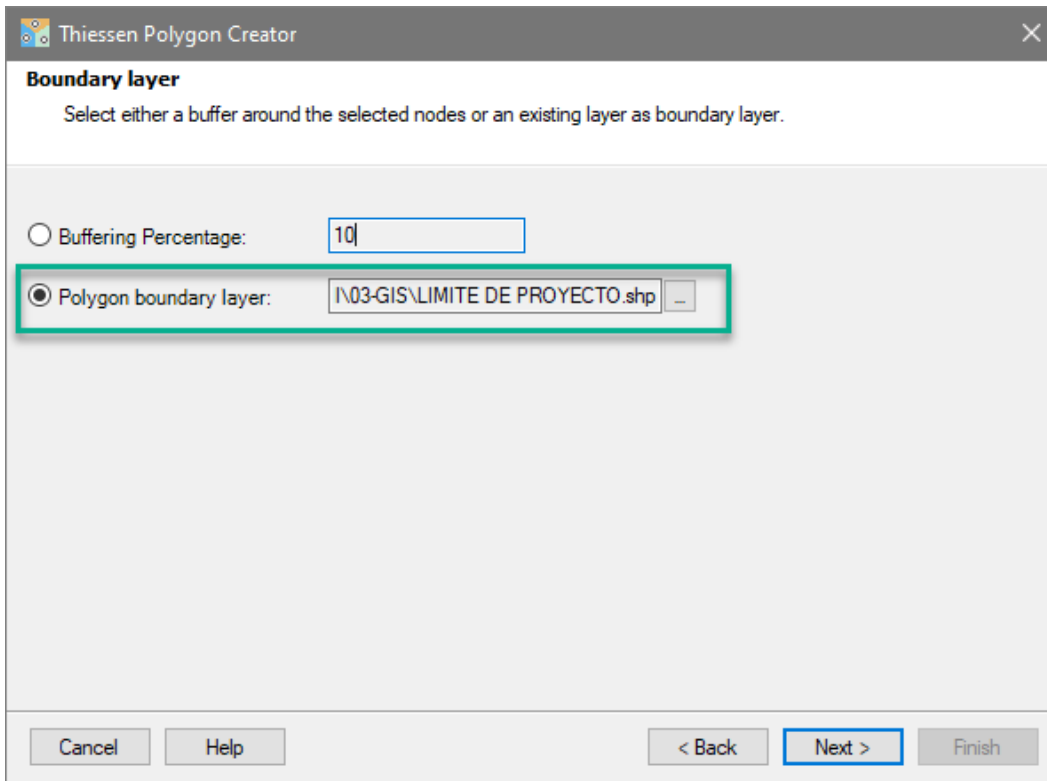


Figura 10. Selección de límite para los polígonos de Thiessen.

FUENTE: Elaboración propia

Con los polígonos de Thiessen, ya se inicia la asignación de demandas con el caudal máximo horario a los nudos de la red secundaria. (Figura 11).

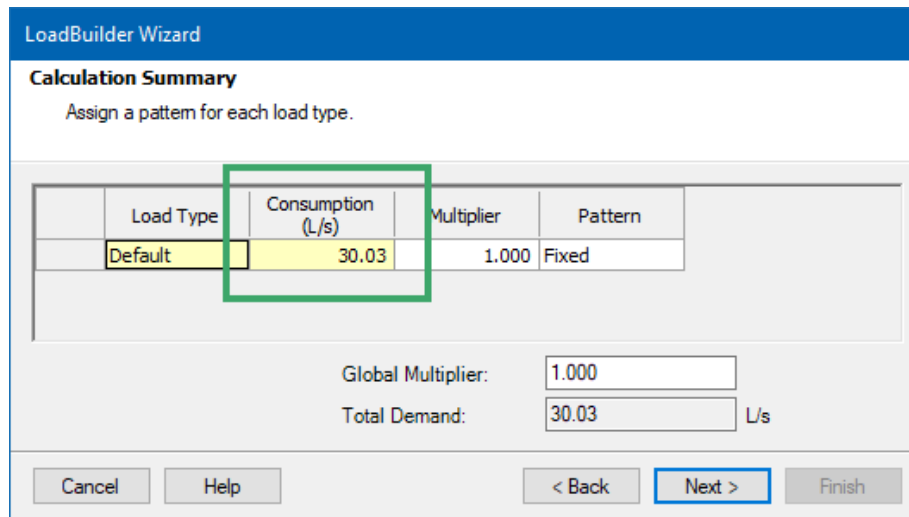


Figura 11. Asignación del caudal máximo horario.

FUENTE: Elaboración propia

Finalmente se muestra la asignación de demandas a los nudos de la red principal. (Figura 12). (ver tabla completa en anexo 3).

Label	Demand (Base) (L/s)
J-4	0.69
J-237	0.15
J-423	1.26
J-230	1.89
J-216	3.09
J-218	1.96
J-83	2.21
J-6	0.20
J-7	1.30
J-41	2.71
J-51	0.81
J-8	1.16
J-910	1.06
J-52	1.50
J-10	1.73
J-144	2.30
J-213	6.01

Figura 12. Demandas en nudos de la red principal

FUENTE: Elaboración propia

4.3.3 DIÁMETROS Y COSTOS DE TUBERÍA

Para el desarrollo de la optimización de las redes principal y secundaria, se emplearán tuberías de diámetro comercial y de un material que reduzcan los costos del proyecto, en base a la siguiente tabla:

Tabla 6. Características de la tubería a emplear.

MATERIAL	DN	Espesor	D Interno	COSTO	PN
	[mm]	[mm]	[mm]	[Bs/m]	[bares]
PEAD	110	16	78.00	161.20	PN25
PEAD	140	20.3	99.40	268.10	PN25
PEAD	160	23.1	113.80	339.30	PN25
PEAD	200	28.9	142.20	530.20	PN25
PEAD	250	36	178.00	827.70	PN25
PEAD	280	40.3	199.40	1068.20	PN25
PEAD	32	2.2	27.60	8.80	PN10
PEAD	50	3.2	43.60	17.20	PN10
PEAD	63	4.1	54.80	27.60	PN10

FUENTE: Elaboración propia

Esta tabla esta realizada en base a cotizaciones del mercado local (ver anexo 4).

4.3.4 SELECCIÓN DE RED PRINCIPAL Y RED SECUNDARIA

La red de abastecimiento de agua potable del proyecto cuenta con una red principal y una red secundaria, donde se empleó diferentes criterios de optimización, es por esto la creación de grupos.

a) Red principal

En este grupo, se tienen tuberías que conducen el agua potable a una gran presión, hasta 34 bares, por ello se las denomina red de alta presión y porque no tienen derivación directa a conexiones domiciliarias como las tuberías de la red

secundaria. Esta red se conecta desde el tanque de distribución hasta las reductoras de presión, en las comunidades de Chicani y Chinchaya.

En el modelo original sin optimizar, se cuentan con las tuberías de la Tabla 7:

Tabla 7. Tuberías empleadas en la red principal sin optimizar.

TUBERÍA	LONGITUD [m]
TUBERÍA PEAD SDR7.4 PN25 DN 280mm (DE 200mm)	1 611.40
TUBERÍA PEAD SDR11 PN16 DN 110mm (DE 90mm)	494.99
TUBERÍA PEAD SDR17 PN10 DN 90mm (DE 75mm)	388.5
TUBERÍA FFD 8"	914.04
TUBERÍA FFD 6"	3 107.36
TUBERÍA FFD 4"	443.37
TUBERÍA FFD 3"	1 308.80
TUBERÍA FFD 2"	1 038.81
TOTALES	9 307.27

FUENTE: Elaboración propia

b) Red secundaria

La red secundaria, a diferencia de la red principal, conduce el agua, hasta 7 bares de presión, y distribuye agua a las conexiones domiciliarias. Están conectadas desde las reductoras de presión hasta los límites de las conexiones domiciliarias.

En el modelo original sin optimizar, se cuentan con las tuberías de la Tabla 8:

Tabla 8. Tuberías empleadas en la red secundaria sin optimizar.

TUBERÍA	LONGITUD [m]
TUBERÍA PEAD SDR17 PN10 DN 63mm (DE 50mm)	30 076.89
TOTALES	30 076.89

FUENTE: Elaboración propia

En la siguiente figura se presenta la red principal y la red secundaria.

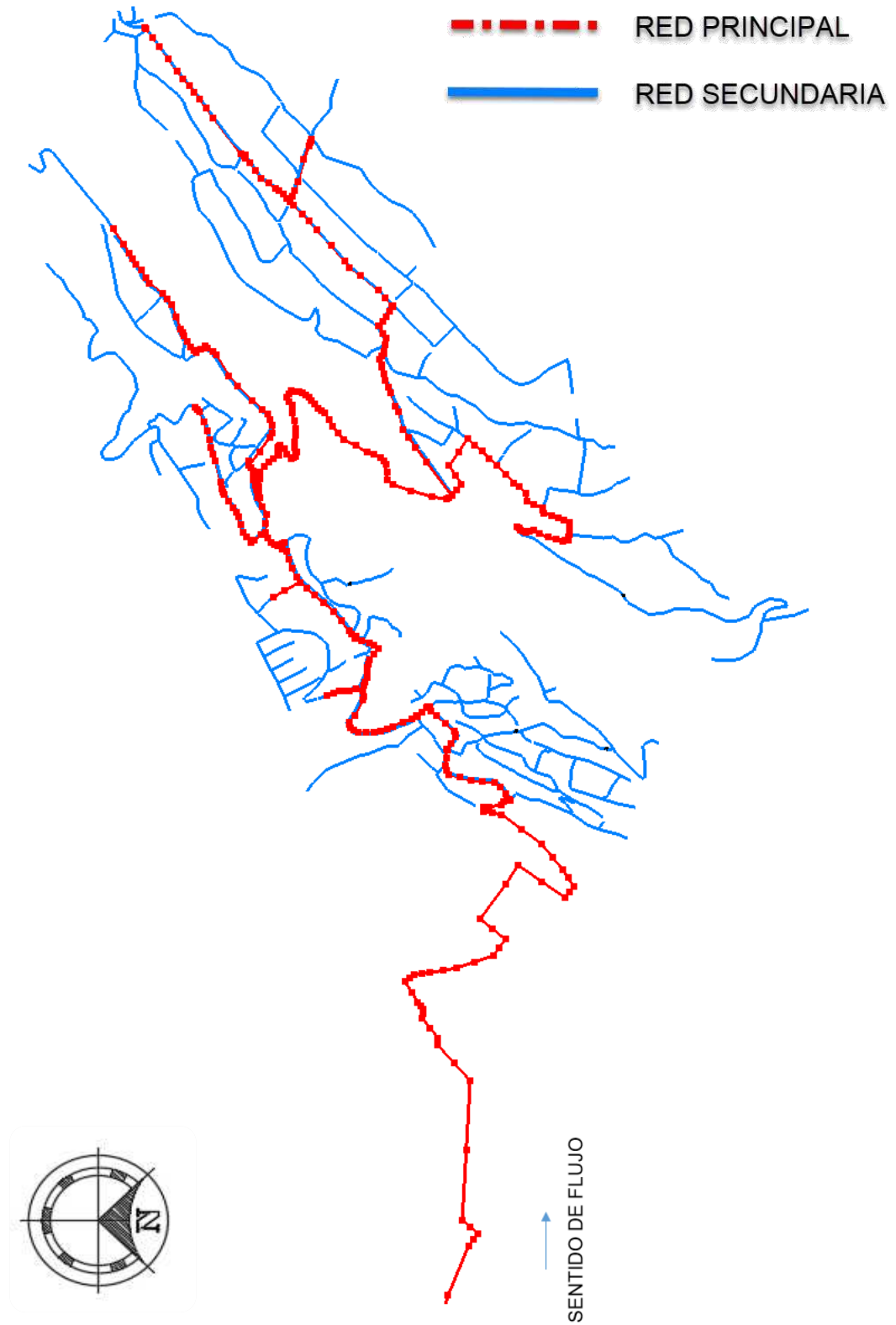


Figura 13. Red principal y secundaria del sistema

FUENTE: Elaboración propia

4.3.5 PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN

Los parámetros de optimización están directamente relacionados con los parámetros de servicio, mencionado en el capítulo 2, que están en función a la norma, NB-689 Reglamentos Técnicos de diseño para Sistemas de Agua Potable.

4.3.6 OPTIMIZACIÓN CON DARWIN DESIGNER - WATERGEMS

La optimización de las redes de agua potable se las realizará de manera separada, para la red principal y secundaria, continuando con el siguiente procedimiento:

Seleccionar la herramienta Darwin Designer, (Figura 14)., de la barra de herramientas, en el apartado de **Analysis**.



Figura 14. Selección de Darwin Designer.

FUENTE: Elaboración propia

El **Darwin Designer**, muestra en la siguiente ventana la bienvenida y los pasos a seguir durante la optimización. (Figura 15).

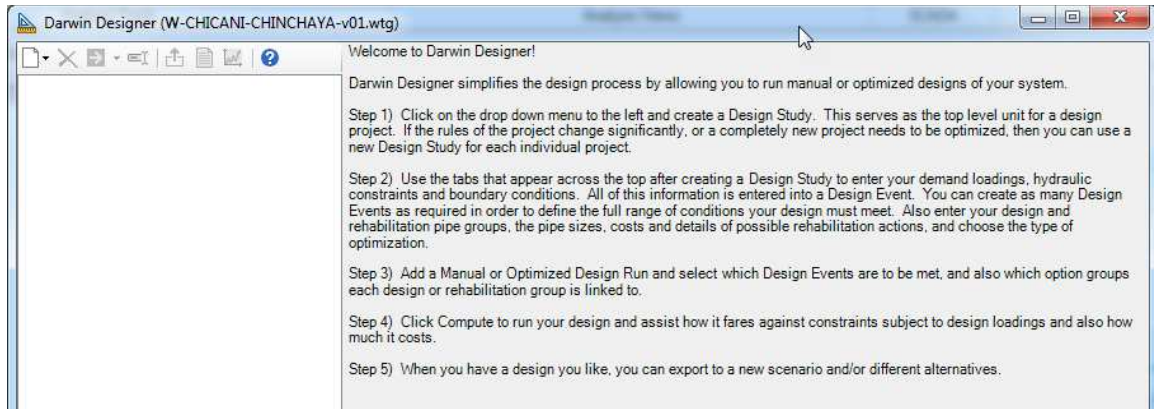


Figura 15. Ventana principal del Darwin Designer.

FUENTE: Elaboración propia

Seleccionar **New Designer Study** (nuevo estudio de diseño). (Figura 16).

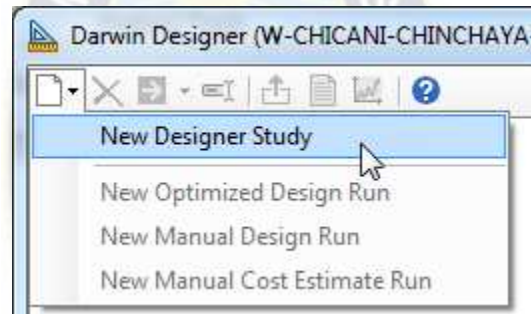


Figura 16. Selección de nuevo estudio de diseño.

FUENTE: Elaboración propia

Luego seleccionamos **New Optimized Design Run** (Nueva ejecución de diseño optimizado). (Figura 17).

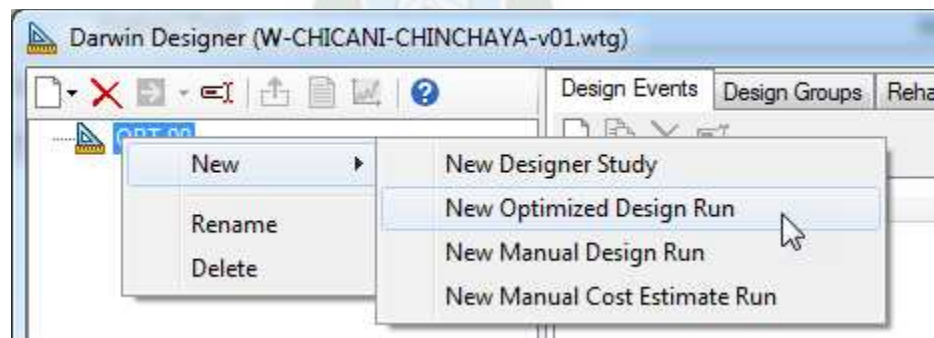


Figura 17. Selección de nueva ejecución de diseño optimizado.

FUENTE: Elaboración propia

En esta ventana tenemos seis sub - ventanas de configuración, estas son:

- ✓ Diseño de eventos
- ✓ Grupos de diseño
- ✓ Grupos de rehabilitación
- ✓ Costos y propiedades
- ✓ Tipo de diseño notas

En la pestaña de diseño de eventos, creamos un nuevo evento de optimización.

(Figura 18).

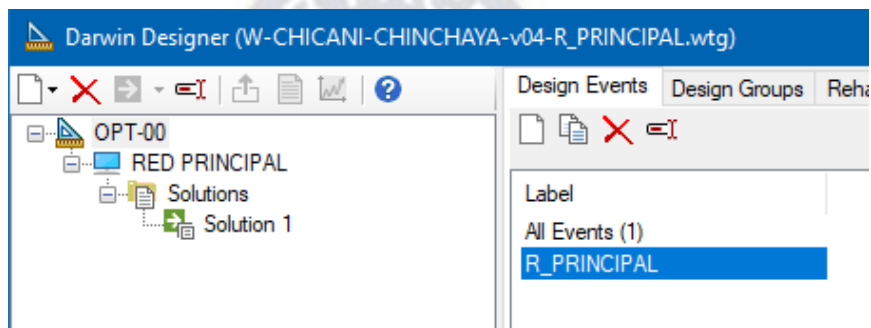


Figura 18. Creación del nuevo evento de optimización.

FUENTE: Elaboración propia

En la siguiente ventana establecemos las restricciones planteadas de manera general, en la cual editaremos los siguientes campos, (Figura 19)., de acuerdo al acápite 4.3.5.

- ✓ Presión mínima
- ✓ Presión máxima
- ✓ Velocidad mínima
- ✓ Velocidad máxima

Label	Start Time	Design Time	Time From Start (hours)	Override Scenario Demand Alternative?	Demand Alternative	Demand Multiplier	Minimum Pressure (Default) (bars)	Maximum Pressure (Default) (bars)	Consider Pressure Benefit? (Default)	Minimum Velocity (Default) (m/s)	Maximum Velocity (Default) (m/s)
R_PRINCIPAL	12:00:00	12:00:00	0.000	<input type="checkbox"/>	Demanda Base	1.000	1.30	20.00	<input type="checkbox"/>	0.30	2.00

Figura 19. Restricciones de la red principal.

FUENTE: Elaboración propia

En esta misma ventana contamos con cuatro opciones, que son:

- ✓ Condiciones de contorno
- ✓ Ajustes de demanda
- ✓ Restricciones de presión
- ✓ Restricciones de velocidad

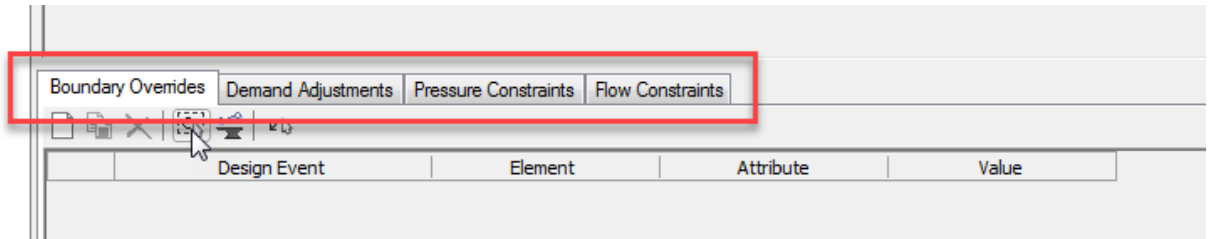


Figura 20. Opciones de restricción.

FUENTE: Elaboración propia

En estas opciones solamente elegiremos las restricciones de presiones y velocidades, (Figura 20)., aplicados únicamente a la red principal. (Figura 21).

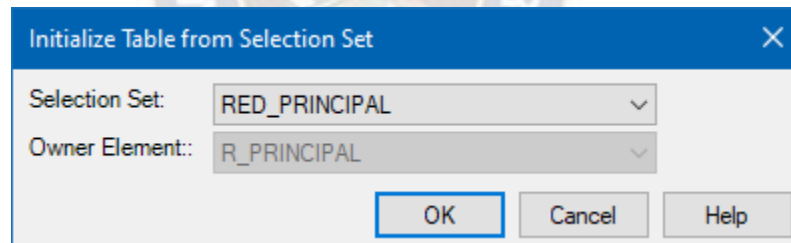


Figura 21. Asignación de restricción a la red principal.

FUENTE: Elaboración propia

Retornando al menú de opciones iniciales, seleccionamos Costos y propiedades, ahí se añadirá las tuberías empleadas en la red principal. Los datos que se deben introducir son: material, diámetro (interno), coeficiente Hazen Williams, y el costo por unidad de longitud. (Figura 22).

	Material	Diameter (mm)	Hazen Williams C Factor	Unit Cost (Bs/m)
	PEAD	199.40	148.0	1 068.20
	PEAD	178.00	148.0	827.70
	PEAD	142.20	148.0	530.20
	PEAD	113.80	148.0	339.30
	PEAD	99.40	148.0	268.10
	PEAD	78.00	148.0	161.20
*				

Figura 22. Características de las tuberías en red principal.

FUENTE: Elaboración propia

En la pestaña Tipo de Diseño, existen las opciones de: máximo beneficio, costo mínimo, y multiobjetivo que analiza ambas opciones, el objetivo se selecciona la opción de mínimo costo. (Figura 23).

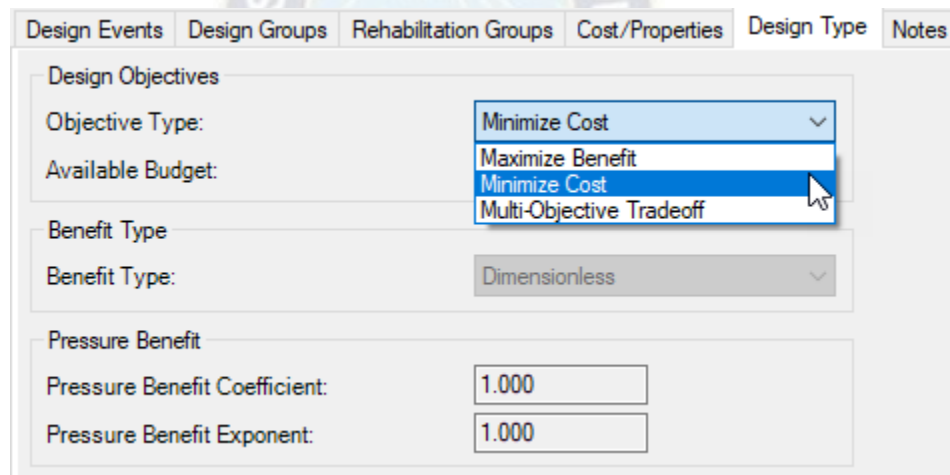


Figura 23. Selección de costo mínimo.

FUENTE: Elaboración propia

En la opción de Grupos de Diseño, se deben asignar el grupo de tuberías creadas en la opción de Costos y Propiedades, a todas las tuberías que intervienen en el análisis. (Figura 24).

Design Events	Design Groups	Rehabilitation Groups	Options	Notes
	Design Pipe Group		Is Active?	Cost/properties
1	Design Group - P-242		<input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA-00
2	Design Group - P-247		<input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA-00
3	Design Group - P-248		<input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA-00
4	Design Group - P-250		<input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA-00
5	Design Group - P-256		<input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA-00
6	Design Group - P-258		<input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA-00
7	Design Group - P-259		<input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA-00
8	Design Group - P-260		<input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA-00
9	Design Group - P-262		<input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA-00
10	Design Group - P-263		<input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA-00

Figura 24. Asignación del grupo de tuberías a optimizar.

FUENTE: Elaboración propia

Finalmente se procede al cómputo de la optimización. (Figura 25).

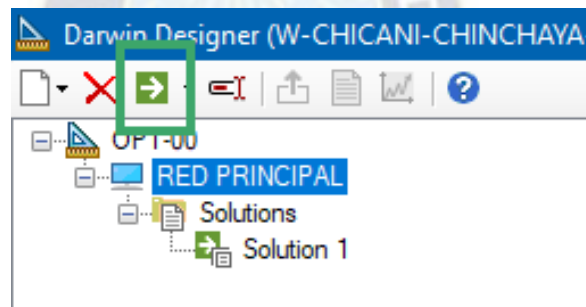


Figura 25. Análisis de optimización.

FUENTE: Elaboración propia

Una vez finalizado el análisis de optimización, nos muestra el siguiente mensaje:
Diseño de optimización completado exitosamente. (Figura 26).

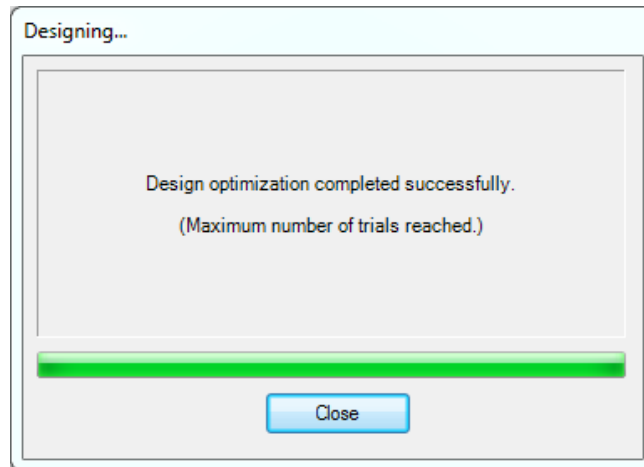


Figura 26. Culminación del análisis de optimización.

FUENTE: Elaboración propia

A continuación, se muestra la alternativa de solución del análisis de optimización, presentando una única solución, con un costo de Bs. 5'275,028.00. (Figura 27).

Solution	Fitness	Total Cost (Bs)	Total Benefit
1 Solution 1	19 332 048.000	5 275 028.00	0.000

Figura 27. Resultado del análisis de optimización de la red principal.

FUENTE: Elaboración propia

Seleccionando la Solución 1, muestra resultados de la simulación, en presiones y velocidades, tanto restricciones, como resultados y las infracciones obtenidas. (Figura 28).

	Design Event	Element	Required Minimum Pressure (bars)	Required Maximum Pressure (bars)	Simulated Pressure (bars)	Violation (bars)
1	R_PRINCIPAL	J-216	1.30	20.00	11.91	0.00
2	R_PRINCIPAL	J-218	1.30	20.00	10.66	0.00
3	R_PRINCIPAL	J-224	1.30	20.00	8.52	0.00
4	R_PRINCIPAL	J-230	1.30	20.00	7.76	0.00
5	R_PRINCIPAL	J-423	5.00	20.00	4.71	0.29
6	R_PRINCIPAL	J-212	1.30	20.00	12.89	0.00
7	R_PRINCIPAL	J-213	1.30	20.00	12.21	0.00
8	R_PRINCIPAL	J-237	5.00	20.00	4.11	0.89
9	R_PRINCIPAL	J-38	1.30	20.00	16.80	0.00
10	R_PRINCIPAL	J-41	1.30	20.00	17.36	0.00

Figura 28. Presiones del análisis de optimización de la red principal.

FUENTE: Elaboración propia

Finalmente exportamos la red ya optimizada como nuevo escenario, nueva alternativa física y topológica. (Figura 29).

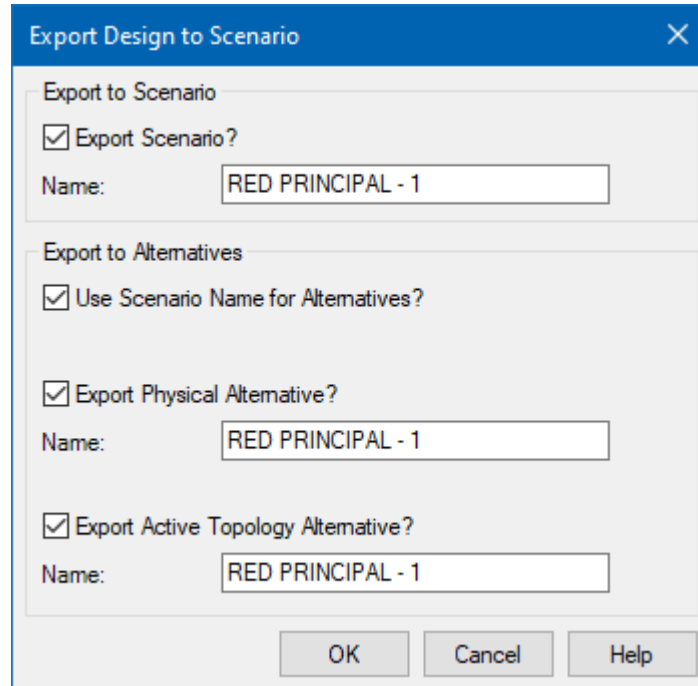


Figura 29. Exportación de los resultados obtenidos.

FUENTE: Elaboración propia

Para una verificación del cumplimiento de las restricciones empleadas en el proceso de optimización, se realizará nuevamente la modelación hidráulica en el modelo combinado, resultado que se presenta en la figura 30, con diámetros nominales

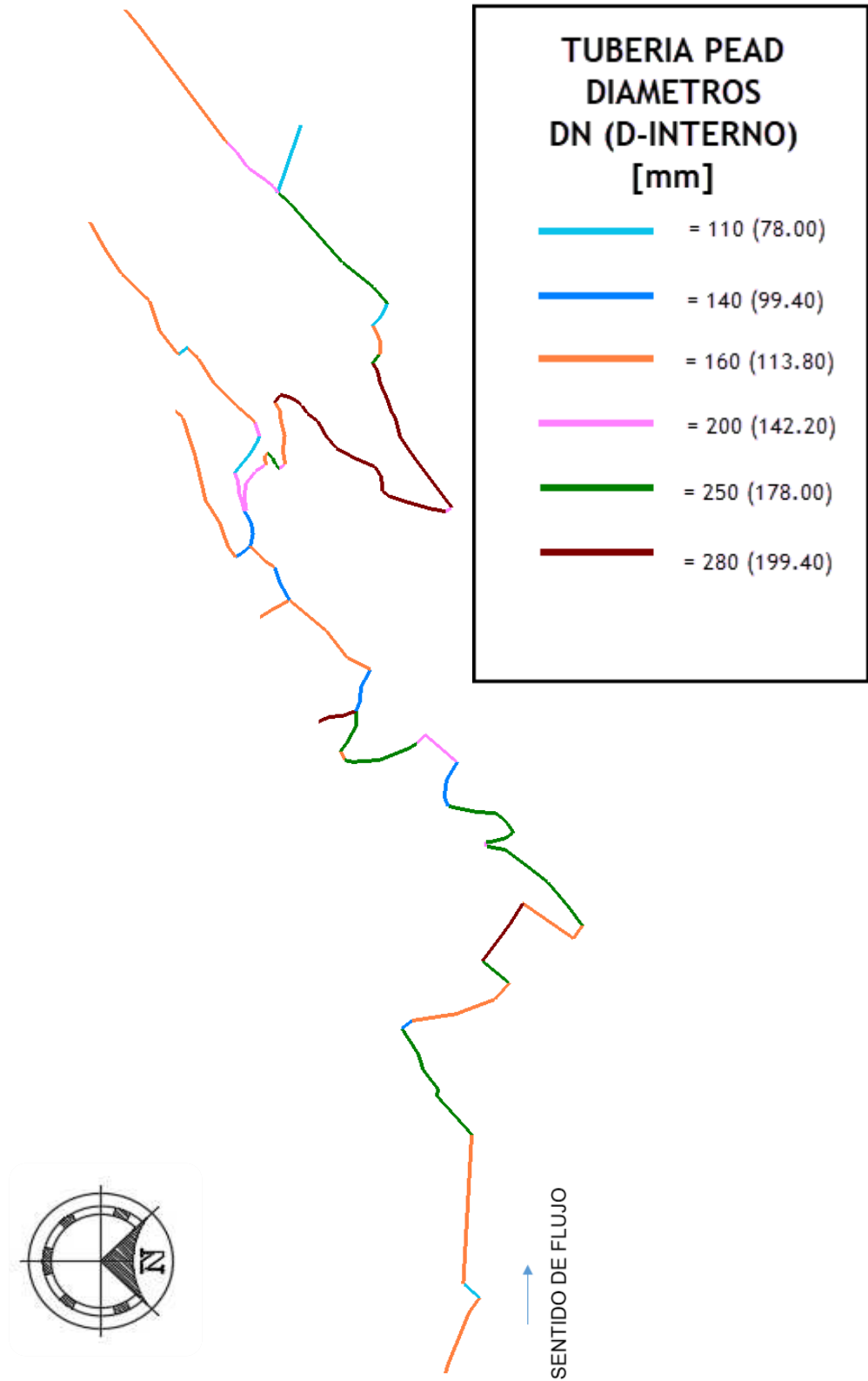


Figura 30. Diámetros de la Red Principal optimizada empleando Watergems.

FUENTE: Elaboración propia

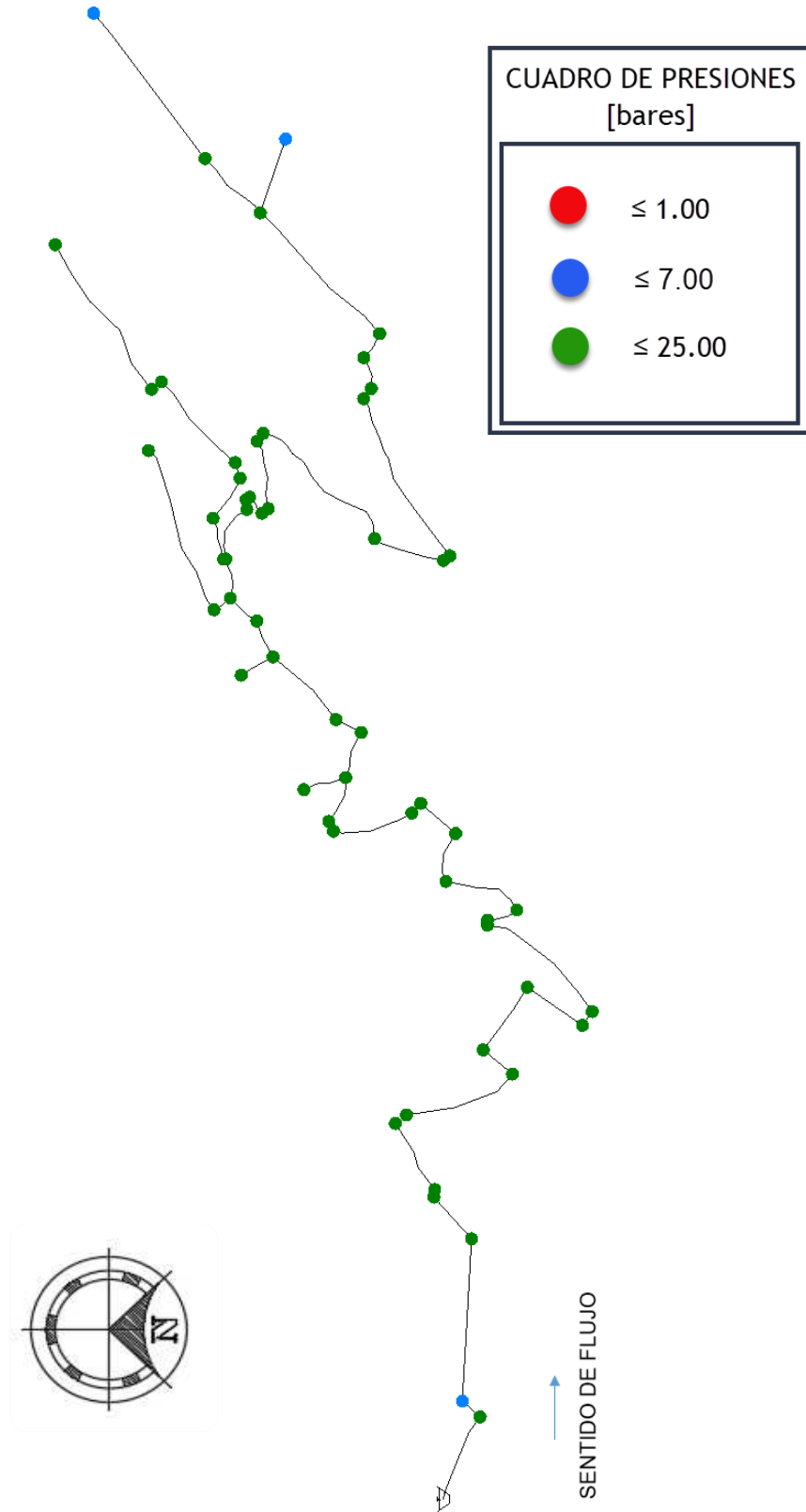


Figura 31. Presiones de la Red Principal optimizada empleando Watergems.

FUENTE: Elaboración propia

4.4 OPTIMIZACIÓN APLICANDO EPANET

Dentro del amplio campo de simuladores hidráulicos destaca especialmente por sus capacidades y su reconocimiento a nivel mundial, la aplicación EPANET, y en concreto su última versión EPANET 2, que es un programa de análisis hidráulico de redes a presión orientado a sistemas de abastecimiento urbano de agua, es un programa gratuito y de código abierto. Realizando los siguientes análisis:

- ✓ Análisis del comportamiento hidráulico de la red. (presiones, velocidades) a partir de los datos introducidos (suministros, consumos, cotas, características de las conducciones, bombas, válvulas).
- ✓ Análisis de la calidad del agua de la red. EPANET incluye un modelo de evolución de una sustancia genérica disuelta en la red, que se transporta con el agua y que simultáneamente varía su concentración debido a reacciones químicas. Un ejemplo de aplicación usual es el estudio de la concentración de cloro en una red de abastecimiento de agua potable.

EPANET realizó análisis hidráulicos estacionarios, permitiendo la simulación en periodo extendido mediante la configuración de escenarios sucesivos cambiantes a través de herramientas específicas de modulación. En particular, se permite la modulación temporal de la demanda para simular, por ejemplo, las variaciones de los consumos de agua a lo largo del día en un sistema de abastecimiento urbano. EPANET ha sido desarrollado por la División de Recursos Hídricos y Suministros de Agua del Laboratorio de Investigación Nacional para la Gestión de Riesgos, de la Agencia del Medio Ambiente de los Estados Unidos (Water Supply and Water

Resources Division of the U.S. Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory).

La versión española de EPANET 2.0 ha sido traducida por el Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia.

El módulo WaterNetGen es una extensión de EPANET concebida para generar modelos de redes de abastecimiento urbano y su posterior dimensionado (Muranho, 2012).

Este módulo fue desarrollado por investigadores de la Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (Portugal).

El proceso de generación desarrollado por este grupo construye modelos reales de redes de distribución de agua que pueden ir desde sencillos modelos de pequeñas dimensiones a grandes sistemas compuestos por varios sistemas interconectados. El proceso de generación permite al usuario definir mapas, el número de áreas en las que se quiere dividir la red y el número de nudos en cada área.

El dimensionado de la red se produce tras la introducción de la base de datos de tuberías y consiste en un proceso iterativo que asigna diámetros comerciales, previamente introducidos en la base de datos, a cada tubería de la red respetando algunas restricciones. Estas restricciones son propuestas en función de un diámetro mínimo, una velocidad máxima y una presión mínima.