UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA
(Creada por Ley N°25265)

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL – HUANCAVELICA

TESIS

RENDIMIENTO DEL ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO DE CLASIFICACIÓN NO DOMINADA EN EL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

HIDRÁULICA

PRESENTADO POR:

Bach. RICRA DUEÑAS, Franzua Patrick

Bach. TUNQUE DUEÑAS, Tony Max

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

HUANCAVELICA, PERÚ

2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Universidad Nacional de Huancavelica Facultad de Ciencias de Ingeniería DECANO Huancavelica

En el Auditórium de la Facultad de Ciencias de Ingeniería, a los 15 días del mes de junio del año 2022, a horas 5:00 p.m., se reunieron los miembros del jurado calificador conformado de la siguiente manera:

PRESIDENTE : **M.Sc. HUGO RUBÉN LUJAN JERI**
https://orcid.org/0000-0002-7995-6296
DNI N° 28591429

SECRETARIO : **Arq. ABDÓN DANTE OLIVERA QUINTANILLA**
https://orcid.org/0000-0003-0247-7737
DNI N° 19878788

ASESOR : **M.Sc. IVÁN ARTURO AYALA BIZARRO**
https://orcid.org/0000-0002-6906-4120
DNI N° 42470714

Designados con Resolución de Decano Nº 083-2022-FCI-UNH, de fecha 24 de mayo del 2022, a fin de proceder el acto académico de evaluación y calificación de la sustentación del informe final de tesis titulado: "RENDIMIENTO DEL ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO DE CLASIFICACIÓN NO DOMINADA EN EL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE", presentado por los Bachilleres **Franzua Patrick RICRA DUEÑAS con DNI N° 47608617 y Tony Max TUNQUE DUEÑAS con DNI N° 70319348**, a fin de optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**; Finalizado la evaluación a horas 6:25pm; se invitó al público presente y a los sustentantes abandonar el recinto. Luego de una amplia deliberación por parte de los jurados, se llegó al siguiente resultado:

Bach. Franzua Patrick RICRA DUEÑAS

APROBADO [X] POR UNANIMIDAD

DESAPROBADO [ ] POR.....

Bach. Tony Max TUNQUE DUEÑAS

APROBADO [X] POR UNANIMIDAD

DESAPROBADO [ ] POR .....

En señal de conformidad, firmamos a continuación:

Presidente

Secretario

Asesor

Vº Bº Decano

Título

RENDIMIENTO DEL ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO DE CLASIFICACIÓN NO DOMINADA EN EL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Autores

Bach. RICRA DUEÑAS, Franzua Patrick

Bach. TUNQUE DUEÑAS, Tony Max

Asesor

MSc. Ing. AYALA BIZARRO, Iván Arturo

ORCID https://orcid.org/0000-0002-6906-4120

D.N.I. Nº42470714

Agradecimiento

A la Universidad Nacional de Huancavelica, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil quienes aportaron y contribuyeron en nuestra formación profesional con sus conocimientos rigurosos y precisos. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia.

A nuestros padres que han sido el motor, quienes estuvieron siempre apoyándonos en los momentos más difíciles.

Índice

Portada i
Acta de sustentación ii
Título iii
Autores iv
Asesor v
Agradecimiento vi
Índice vii
Índice de tablas x
Índice de figuras xii
Resumen xiv
Abstract xv
Introducción xvi
CAPÍTULO I 17
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 17
1.1 Descripción del problema 17
1.1.1 Problema general 20
1.1.2 Problemas específicos 20
1.2 Objetivos 20
1.2.1 Objetivo general 20
1.2.2 Objetivos específicos 20
1.3 Justificación 21
CAPÍTULO II 22
MARCO TEÓRICO 22
2.1 Antecedentes 22
2.1.1 A nivel internacional 22
2.1.2 A nivel nacional 26
2.1.3 A nivel local 29
2.2 Bases teóricas 30
2.2.1 Red de distribución de agua potable 30
2.2.1.1 Definición de red de distribución de agua potable 30
2.2.1.2 Metodología del gradiente hidráulico 31
2.2.1.3 Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable 39
2.2.1.4 Función objetivo de costo 40
2.2.1.5 Función objetivo de confiabilidad resiliente 42
2.2.1.6 Número de incumplimientos de la red 44

2.2.1.7 Optimización multiobjetivo 45
2.2.2 Algoritmos genéticos 47
2.2.2.1 Historia de los algoritmos genéticos 47
2.2.2.2 Metodología del algoritmo genético 47
2.2.2.3 Población 50
2.2.2.4 Algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada 51
2.2.2.5 Operadores genéticos 53
2.2.2.6 Ordenamiento no dominado 58
2.2.2.7 Frente de Pareto 60
2.2.2.8 Distancia de hacinamiento 62
2.2.2.9 Distancia de hacinamiento modificada 65
2.3 Hipótesis 68
2.3.1 Hipótesis general 68
2.3.2 Hipótesis específicas 68
2.4 Definición de términos 68
2.5 Variables 69
2.5.1 Variable independiente 69
2.5.1.1 Dimensiones 69
2.5.2 Variable dependiente 69
2.5.2.1 Dimensiones 70
2.6 Operacionalización de variables 70
CAPÍTULO III 71
MATERIALES Y MÉTODOS 71
3.1 Ámbito de estudio 71
3.2 Tipo y nivel de investigación 71
3.2.1 Tipo de investigación 71
3.2.2 Nivel de investigación 72
3.3 Método de investigación 72
3.3.1 Método general 72
3.3.2 Método específico 73
3.4 Diseño de investigación 73
3.5 Población y muestra 74
3.5.1 Población 74
3.5.2 Muestra 75
3.5.3 Muestreo 75
3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos 75
3.6.1 Técnicas 75

3.6.2 Instrumentos 75
3.7 Técnicas de procesamiento y análisis de datos 76
3.7.1 Toolkit de Epanet 76
3.7.2 Programación en el lenguaje Python 77
3.7.3 Diagrama de flujo 78
3.8 Esquema metodológico 79
CAPÍTULO IV 81
DISCUSIÓN DE RESULTADOS 81
4.1 Validación del algoritmo genético 81
4.1.1 Red de Hanoi 81
4.1.2 Simulación de la red de Hanoi 84
4.1.3 Rendimiento del NSGA-II en el diseño de la red de Hanoi 93
4.2 Análisis de la red de distribución de Huancavelica 96
4.2.1 Área de estudio 96
4.2.2 Periodo de diseño 98
4.2.3 Población censal INEI 99
4.2.4 Proyección de la población 99
4.2.4.1 Método aritmético 99
4.2.4.2 Método geométrico 101
4.2.4.3 Método parabólico 103
4.2.4.4 Curva exponencial modificada 104
4.2.4.5 Método de Wappus 105
4.2.4.6 Comparación de curvas obtenidas 107
4.2.5 Consumos 109
4.2.6 Demanda de agua potable 111
4.2.1 Consumo en los nudos 113
4.3 Características de la red de distribución actual de Huancavelica 115
4.4 Red de distribución actual de Huancavelica 118
4.5 Red de distribución optimizada de Huancavelica 126
4.5.1 Ejecución del código principal NSGA-II 127
4.6 Comparación entre la red actual y la red optimizada 141
Conclusiones 149
Recomendaciones 151
Referencias bibliográficas 152
Apéndice 157

Índice de tablas

Tabla 1: Reclamos operacionales año 2017 ... 18
Tabla 2: Datos de tuberías – red de Hanoi ... 82
Tabla 3: Datos de nudos – red de Hanoi ... 83
Tabla 4: Diámetros comerciales disponibles – red de Hanoi ... 83
Tabla 5: Soluciones de la generación 500 (final) – red de Hanoi ... 88
Tabla 6: Datos de tuberías de la solución seleccionada – red de Hanoi ... 89
Tabla 7: Datos de nudos de la solución seleccionada – red de Hanoi ... 89
Tabla 8: Comparación de diámetros NSGA – II respecto a otros algoritmos ... 93
Tabla 9: Comparación de velocidades NSGA – II respecto a otros algoritmos ... 94
Tabla 10: Comparación de presiones NSGA – II respecto a otros algoritmos ... 94
Tabla 11: Comparación del algoritmo NSGA – II respecto a otros algoritmos ... 95
Tabla 12: Características de los sectores operacionales ... 96
Tabla 13: Información censal de los distritos de Huancavelica y Ascensión ... 99
Tabla 14: Método Aritmético – Combinación con dos censos ... 100
Tabla 15: Método Aritmético – Combinación con tres censos ... 100
Tabla 16: Método aritmético – Combinación con cuatro censos ... 100
Tabla 17: Tasas de crecimiento – método aritmético ... 100
Tabla 18: Método geométrico – combinación con dos censos ... 101
Tabla 19: Método geométrico – combinación con tres censos ... 102
Tabla 20: Método geométrico – combinación con cuatro censos ... 102
Tabla 21: Tasas de crecimiento – Método geométrico ... 102
Tabla 22: Método parabólico – Combinación de tres censos 1 ... 103
Tabla 23: Método parabólico – Combinación de tres censos 2 ... 103
Tabla 24: Método parabólico – Combinación de tres censos 3 ... 103
Tabla 25: Método parabólico – Combinación de tres censos 4 ... 103
Tabla 26: Tasas de crecimiento – Método parabólico ... 104
Tabla 27: Información para el método de curva exponencial modificada ... 105
Tabla 28: Método de Wappus – Combinación con dos censos ... 106
Tabla 29: Método de Wappus – Combinación con tres censos ... 106
Tabla 30: Método de Wappus – Combinación con cuatro censos ... 106
Tabla 31: Tasas de crecimiento – Método de Wappus ... 106
Tabla 32: Resumen de métodos utilizados para determinar la población futura ... 107
Tabla 33: Población futura del área de estudio ... 109
Tabla 34: Tipos de usuarios ... 110
Tabla 35: Número de conexiones según tipo de usuario ... 110

Tabla 36: Consumo por conexión según tipo de usuario 110
Tabla 37: Parámetros para la determinación del caudal de demanda 111
Tabla 38: Coeficientes de varios para la determinación del caudal de demanda 111
Tabla 39: Cuadro de demanda total para la red de distribución de agua del área de estudio 112
Tabla 40: Demanda de consumo en cada nudo 114
Tabla 41: Características de la fuente de suministro 115
Tabla 42: Características de tuberías en la red de distribución 117
Tabla 43: Resultado de tuberías de la simulación – Red actual 119
Tabla 44: Resultado de nudos de la simulación – Red actual 121
Tabla 45: Variación de velocidades – Red actual 123
Tabla 46: Variación de presiones – Red actual 123
Tabla 47: Índices de la red actual 124
Tabla 48: Resultado de presiones – Red actual 125
Tabla 49: Diámetros comerciales disponibles 127
Tabla 50: Soluciones de la generación 2000 (final) – Red optimizada 133
Tabla 51: Resultados de tuberías de la solución seleccionada – Red optimizada 134
Tabla 52: Resultados de nudos de la solución seleccionada – Red optimizada 136
Tabla 53: Comparación de índices entre la red optimizada y no optimizada 141
Tabla 54: Comparación de diámetros internos entre la red actual y la optimizada 142
Tabla 55: Comparación de velocidades entre la red actual y la optimizada 143
Tabla 56: Comparación de presiones entre la red actual y optimizada 144

Índice de figuras

Figura 1: Red de distribución de agua potable 30
Figura 2: Modelo de optimización multiobjetivo 46
Figura 3: Diagrama de flujo de un algoritmo genético simple 49
Figura 4: Representación de una solución 51
Figura 5: Proceso NSGA-II 53
Figura 6: Proceso de Selección por torneo 54
Figura 7: Selección por ruleta 55
Figura 8: Cruce de un solo punto 57
Figura 9: Cruce de dos puntos 57
Figura 10: Operador de mutación 58
Figura 11: Pseudocódigo de ordenamiento no dominado 59
Figura 12: Frentes Óptimos de Pareto para el mismo espacio de soluciones 61
Figura 13: Frente Óptimo de Pareto y Frentes No Óptimos 62
Figura 14: Cálculo de la distancia de hacinamiento 63
Figura 15: Pseudocódigo de la distancia de hacinamiento 63
Figura 16: Distancia de hacinamiento para la alternativa de selección Xi 65
Figura 17: Ilustración de la distancia de hacinamiento en la definición inicial 66
Figura 18: Ilustración sobre la distancia de hacinamiento mejorada 66
Figura 19: Distancia de hacinamiento en la definición inicial 67
Figura 20: Distancia de hacinamiento en la definición mejorada 67
Figura 21: Modelo de la red de Hanoi 82
Figura 22: Generación 1 – red de Hanoi 85
Figura 23: Generación 5 – red de Hanoi 85
Figura 24: Generación 10 – red de Hanoi 86
Figura 25: Generación 50 – red de Hanoi 86
Figura 26: Generación 100 – red de Hanoi 87
Figura 27: Generación 500 – red de Hanoi 87
Figura 28: Distribución de diámetros de la solución seleccionada 91
Figura 29: Velocidades en las tuberías de la solución seleccionada 91
Figura 30: Caudales en las tuberías de la solución seleccionada 92
Figura 31: Presiones en los nudos de la solución seleccionada 92
Figura 32: Sectores operacionales de los distritos de Huancavelica y Ascensión 97
Figura 33: Sectores operacionales 3 y 5 del área de estudio 98
Figura 34: Ajuste de la información censal – Método aritmético 101
Figura 35: Ajuste de la información censal – Método geométrico 102

Figura 36: Ajuste de la información censal – método parabólico 104
Figura 37: Ajuste de información censal – Método de Wappus 107
Figura 38: Curva de crecimiento población 108
Figura 39: Modelo de la red de distribución del área de estudio 115
Figura 40: Red de distribución de los sectores operacionales 3 y 5 116
Figura 41: Ubicación de la fuente de suministro 116
Figura 42: Resultado de diámetros – Red actual 124
Figura 43: Resultado de velocidades – Red actual 125
Figura 44: Generación 1 – Red optimizada 127
Figura 45: Generación 10 – Red optimizada 128
Figura 46: Generación 100 – Red optimizada 128
Figura 47: Generación 250 – Red optimizada 129
Figura 48: Generación 500 – Red optimizada 129
Figura 49: Generación 750 – Red optimizada 130
Figura 50: Generación 1000 – Red optimizada 130
Figura 51: Generación 1250 – Red optimizada 131
Figura 52: Generación 1500 – Red optimizada 131
Figura 53: Generación 1750 – Red optimizada 132
Figura 54: Generación 2000 – Red optimizada 132
Figura 55: Variación de velocidades de la solución seleccionada – Red optimizada 138
Figura 56: Variación de presiones de la solución seleccionada – red optimizada 138
Figura 57: Resultados de diametros – Red optimizada 139
Figura 58: Resultados de velocidades – Red optimizada 139
Figura 59: Resultado de presiones – Red optimizada 140
Figura 60: Resultado de caudales – Red optimizada 140
Figura 61: Comparativa de porcentaje de tuberías según diámetros 145
Figura 62: Distribución de tuberías cercanas a la fuente de suministro (Red optimizada) 145
Figura 63: Comparación de la variación de diámetros entre ambas redes 146
Figura 64: Comparación de la variación de velocidades entre ambas redes 147
Figura 65: Comparación de presiones entre la red actual y la optimizada 148

Resumen

La investigación titulada “Rendimiento del algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable”, se realizó en base a una realidad problemática de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Huancavelica, cuyo sistema de distribución presenta una operación deficiente, debido a que su diseño de red no está de acorde a los requerimientos de los usuarios ni cuenta con criterios de optimización en costo y confiabilidad. El objetivo principal es determinar la influencia del algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable. En la investigación se utilizó, la metodología científica, de tipo aplicada con un nivel explicativo y se planteó un diseño preexperimental. La población fue conformada por las redes de distribución de agua potable, a través del muestreo no probabilístico se consideró como muestra a la red de distribución de la ciudad de Huancavelica. Entre las técnicas e instrumentos para el tratamiento de datos fue la inspección de la situación actual de la red, así como la obtención de la información de la red a través de la EPS EMAPA Huancavelica S.A. y mediante el lenguaje de programación Python con el Toolkit de Epanet se validó el algoritmo genético Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) aplicándolo al diseño de la red patrón de Hanoi y posteriormente en el diseño de la red de Huancavelica considerando los índices de costo y confiabilidad como funciones objetivo. Entre los resultados obtenidos se precisa una influencia favorable al emplear el algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada en el diseño de redes de distribución; las conclusiones arribadas fueron que el NSGA-II posee buen rendimiento ya que permite obtener diseños de redes óptimos en términos de costo y confiabilidad.

Palabras clave: Algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada, NSGA - II, diseño óptimo de redes de distribución de agua potable, costo, confiabilidad.

Abstract

The research entitled "Performance of the multi-objective genetic algorithm of non-dominated classification in the optimal design of drinking water distribution networks", was carried out based on a problematic reality of drinking water supply in the city of Huancavelica, whose distribution system presents a deficient operation, due to the fact that its network design is not in accordance with the requirements of the users nor does it have optimization criteria in cost and reliability. The main objective is to determine the influence of the non-dominated classification multiobjective genetic algorithm on the optimal design of drinking water distribution networks. In the investigation, the scientific methodology was improved, of an applied type with an explanatory level and a pre-experimental design was proposed. The population was made up of the distribution networks of drinking water, through the non-probabilistic survey, the distribution network of the city of Huancavelica was considered as a sample. Among the techniques and instruments for data processing was the inspection of the current situation of the network, as well as obtaining network information through the EPS EMAPA Huancavelica S.A. and through the Python programming language with the Epanet Toolkit, the genetic algorithm Non-Domination Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) was validated, applying it to the design of the Hanoi pattern network and later in the design of the Huancavelica network considering cost and reliability indices as objective functions. Among the results obtained, a favorable influence is required when using the multi-objective genetic algorithm of non-dominated classification in the design of distribution networks; The conclusions reached were that the NSGA-II has good performance since it allows obtaining optimal network designs in terms of cost and reliability.

Keywords: Non-dominated classification multiobjective genetic algorithm, NSGA - II, optimal design of drinking water distribution networks, cost, reliability.

Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, el agua se considera un insumo clave para el desarrollo y la evolución. Desde la antigüedad, el ser humano ha almacenado y distribuido agua, empleando distintos métodos que van desde el aprovechamiento de ríos, lagos y recursos subterráneos hasta desarrollar sistemas de distribución.

Los sistemas de abastecimiento de agua potable representan una parte importante de la infraestructura en todo el mundo; por lo que una red de distribución de agua es el elemento más importante en un sistema de este tipo, que está constituido por componentes como tuberías, bombas, elementos de control, etc. cuya finalidad es proporcionar agua potable a los usuarios mediante sistemas eficientes. El rápido crecimiento de la población, genera nuevos desafíos hídricos que complejizan paulatinamente los sistemas de distribución de agua potable, por lo que, es necesario realizar diseños integrales, donde se abarquen factores económicos inmersos, grado de confiabilidad, y que vayan de acorde a las normativas vigentes. Sin embargo, realizar un diseño integral requiere el empleo de técnicas heurísticas, las cuales en nuestro país son escasas.

Durante los últimos años, se han ido implementando nuevas técnicas de optimización multiobjetivo, como los algoritmos genéticos que se han aplicado a la optimización de redes de distribución con una popularidad cada vez mayor. Su atractivo se debe a su potencial para resolver problemas no lineales para los cuales los métodos deterministas presentan dificultades.

Existe presión sobre las empresas prestadoras de servicio para que brinden un suministro continuo de agua y garanticen la cantidad y calidad requerida por usuario, sujeto a una serie de requisitos de entrega y restricciones operativas. Esta flexibilidad brinda la oportunidad de optimizar el funcionamiento de una red de distribución de agua. Es por ello, que este trabajo de investigación tiene como finalidad, determinar en qué medida favorece la aplicación de un algoritmo genético multiobjetivo en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

Las redes de distribución de agua potable son sistemas conformados por tuberías, accesorios, etc., conectados de tal manera que suministren agua a los usuarios en cantidad y calidad suficiente, ya que, un buen servicio es prioritario y primordial para el desarrollo de una comunidad.

Gran parte de los países en vías de desarrollo todavía sufren de problemas de abastecimiento de agua potable, debido a las brechas en el acceso al servicio o su pésima calidad; es por ello trascendental realizar diseños que brinden un mejor servicio con los recursos disponibles y que su operación sea eficiente en términos hidráulicos y económicos (Saldarriaga et al., 2010).

En nuestro país, el diseño tradicional de redes de distribución de agua potable asegura que el agua llegue a la población según las restricciones que rigen las normativas. Sin embargo, al ser un método ensayo-error donde prima la experiencia de los diseñadores, no garantiza sistemas económicos ni confiables frente a eventuales fallas que afecten el funcionamiento durante su vida útil.

En la ciudad de Huancavelica, de acuerdo al Plan Maestro Optimizado para el período 2018 – 2047 de la EPS EMAPA Huancavelica S.A. menciona que

durante el año 2017 existieron 271 reclamos operacionales sobre el funcionamiento de la red de distribución de la ciudad de Huancavelica, siendo la mayor incidencia la falta de agua, fugas en tuberías y bajas presiones lo cual representa más del 60% del total de reclamos presentado por los usuarios.

Tabla 1: *Reclamos operacionales año 2017*

TIPOS DE RECLAMO								
Mes	Atoro conex. Domicilia	Falta de agua	Calidad del agua	Fuga agua tubería matriz	Fuga agua conex. Domic.	Baja presión	Otros	Total
ENERO	4	3	0	0	0	0	2	9
FEBRERO	0	5	0	2	0	0	3	10
MARZO	6	13	0	0	2	1	13	35
ABRIL	13	2	0	0	0	1	4	20
MAYO	6	9	0	1	4	0	3	23
JUNIO	3	4	0	0	0	3	8	18
JULIO	5	1	0	2	0	1	5	14
AGOSTO	0	6	1	10	0	1	6	24
SETIEMBRE	1	7	0	8	2	2	4	24
OCTUBRE	3	6	0	8	12	7	0	36
NOVIEMBRE	1	5	0	7	13	4	6	36
DICIEMBRE	2	4	0	2	5	3	6	22
TOTAL	**44**	**65**	**1**	**40**	**38**	**23**	**60**	**271**

Fuente: Plan Maestro Optimizado 2018-2047, EPS EMAPA Huancavelica S.A. (2017).

De continuar así, serán más recurrentes los cortes del servicio de agua potable en distintos sectores, la restricción del servicio en zonas altas e intermedias de la ciudad, la falta de continuidad en el servicio, lo que finalmente se traduce en un malestar a la población.

Esto sucede debido a que no se ha prestado atención especial a los diseños (dimensionamiento y configuración), pues realizar diseños adecuados tiene un grado de dificultad considerable por abarcar aspectos hidráulicos y económicos, el no contemplarlos trae como consecuencia sobrecostos, presiones excesivas y muy bajas en los nudos e inadecuadas velocidades del flujo de agua en las tuberías lo que desencadena rotura de las mismas y fugas constantes de agua.

Las inversiones en nuestra ciudad para la implementación de nuevas redes o ampliaciones de las existentes son significativas, por lo que, es necesario utilizar metodologías que busquen optimizar el diseño de la red de distribución. De acuerdo con Saldarriaga, Bernal & Ochoa (como se citó en Posada y Saldarriaga,

2018) se han desarrollado múltiples enfoques para mejorar las redes de distribución de agua potable a nivel hidráulico, cambiando los diámetros de las tuberías según técnicas basadas en indicadores hidráulicos los cuales dieron como resultado la reducción en los costos e incremento del desempeño hidráulico del sistema.

Los enfoques desarrollados, tienen como objetivo encontrar la red que cumpla con determinadas restricciones, como presiones en los nudos y velocidades en las tuberías a un costo y confiabilidad razonable. Al tratar de encontrar una solución basada en este enfoque es necesaria la optimización. Los métodos que existen para encontrar la solución óptima varían según la complejidad del problema, para problemas ordinarios el cerebro humano posee la habilidad de resolverlos, pero para problemas complejos es necesario contar con herramientas adicionales. Según Takahashi y Ñañéz (2012) continuamente se presentan nuevos avances para el diseño de redes de distribución de agua potable que utilizan técnicas modernas de optimización multiobjetivo como la Inteligencia Artificial, para minimizar costos constructivos y de operación.

En la actualidad, las técnicas de Inteligencia Artificial se han ido aplicando a diversos campos en la ingeniería, entre las principales herramientas tecnológicas destacan los algoritmos genéticos, que son productos de los avances de la computación evolutiva y la genética, los cuales son herramientas de búsqueda de soluciones óptimas que permiten escoger una entre un universo de soluciones a un problema que por su naturaleza no cuenta con una solución precisa.

Los algoritmos genéticos, presentan una gran alternativa como técnica de optimización multiobjetivo en el diseño de redes de distribución de agua potable, ya que se puede considerar no sólo el costo como una opción óptima, sino que se puede agregar las variables como confiabilidad de la red, operación del sistema, calidad del agua, entre otros, esto hace que la complejidad del diseño sea alta al hacer uso de todas estas variables, mejorando así el diseño convencional y por ende lograr un diseño eficiente y óptimo.

1.1.1 Problema general

- ¿De qué manera el algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable?

1.1.2 Problemas específicos

- ¿De qué manera el algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye en el costo de redes de distribución de agua potable?
- ¿De qué manera el algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye en la confiabilidad de redes de distribución de agua potable?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Determinar la influencia del algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la influencia del algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada en el costo de redes de distribución de agua potable.
- Determinar la influencia del algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada en la confiabilidad de redes de distribución de agua potable.

1.3 Justificación

La investigación expresa su justificación según la siguiente preposición de Saldarriaga, Takahashi, Hernández y Escovar (2010): “Las necesidades de acceso al agua potable son apremiantes alrededor del mundo. Por esta razón, muchos investigadores han desarrollado, en las últimas décadas, técnicas de optimización para ofrecer a la comunidad diseños más económicos y eficientes” (p. 1).

La optimización en redes de distribución de agua potable es primordial ya que existe una evidente crisis de abastecimiento en el Perú y el mundo, la cual no es ocasionado por la falta de agua sino de un inadecuado abastecimiento. Usualmente las metodologías de optimización, se basan en determinar un conjunto de elementos que hagan que mejore el resultado dado por una función objetivo, pero los problemas en la realidad están dados por un grupo de éstas. Un diseño basado en la optimización multiobjetivo permite optimizar no sólo una función objetivo sino un conjunto de ellas simultáneamente. Mediante la optimización multiobjetivo con la aplicación de algoritmos genéticos se pretende buscar la red del mínimo costo y máxima confiabilidad regulado por las restricciones normativas. Además de brindar reducciones de costo considerables, los diseños optimizados hacen que la distribución de energía se realice de forma eficiente dentro del sistema, lo que la hace operar con mayor velocidad, otorgando una disminución de adherencia de partículas en las paredes de las tuberías y la reducción del rango de disolución del cloro residual, lo que finalmente reduce los riesgos para la salud.

De esta manera, la investigación permite determinar en qué medida favorece la aplicación de un algoritmo genético multiobjetivo en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 A nivel internacional

Pereyra, Pandolfi y Villagra (2017), realizaron el artículo científico: *"Diseño y optimización de redes de distribución de agua utilizando algoritmos genéticos"* en Universidad Nacional de la Patagonia Austral Unidad e Instituto de Tecnología Aplicada. El objetivo de este trabajo fue analizar y resolver el diseño óptimo de redes de distribución de agua usando algoritmos genéticos. Se utilizaron cuatro algoritmos genéticos para realizar el diseño optimizado de dos redes de distribución clásicas como son la red de Alperovits y Shamir, y la red de Nuevo York con el propósito de 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. Este trabajo de investigación llegó a las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos permitieron analizar el desempeño de estos cuatro algoritmos genéticos por cada método de mejora propuesto y por cada factor de penalidad planteada en la función objetivo.

- Se obtuvieron altos porcentajes de éxito con la utilización de los cuatro métodos

Pino, Valle, Condori, Mejía, Chavarri & Alfaro (2017), publicaron el artículo científico: "*Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Usando Un Software Basado En Microalgoritmos Genéticos Multiobjetivos*". Tuvieron como objetivo emplear algoritmos genéticos en la solución de las redes de distribución de agua. Desarrollaron un programa llamado Magmoredes para la optimización multiobjetivo. La técnica de optimización que usó este programa es un micro algoritmo genético multiobjetivo, de tal forma que fue adaptado para el diseño de una red de distribución de agua potable considerando como funciones objetivo el costo de la red y la máxima confiabilidad, estos cumpliendo con las exigencias económicas, y bajo los rangos de presión y velocidad según las normativas peruanas. Finalmente comprobaron la eficacia de esta técnica de optimización, en la red de Hanoi la cual es considerada una red patrón estándar para la comprobación de técnicas de optimización. Esta investigación llegó a las siguientes conclusiones:

- La aplicación de un micro algoritmo genético multiobjetivo en el diseño optimizado de la red de Hanoi, dio buenos resultados en sus funciones objetivo, obteniendo un costo menor a la calculado por otros algoritmos de optimización, además se obtuvo un índice de confiabilidad aceptable que es un elemento importante a tener en cuenta en el diseño de redes de distribución de agua.
- El tiempo de convergencia es algo que se debe optimizar, pues no sólo depende del algoritmo que se usa para la optimización, sino de su programación y el uso de un lenguaje adecuado, debiéndose siempre buscar la optimización del mismo.

Peñuela y Granada (2007), redactaron el artículo científico: *"Optimización multiobjetivo usando un algoritmo genético y un*

operador elitista basado en un ordenamiento no-dominado (NSGA-II)", Universidad Tecnológica de Pereira. Enmarcaron el objetivo de describir el uso del algoritmo genético NSGA-II en la optimización multiobjetivo. La investigación presentó conceptos básicos de la optimización multiobjetivo, estos enfocados hacia descripción del algoritmo genético de clasificación no dominada II (NSGA-II). Esta investigación llegó a las siguientes conclusiones:

- Esta técnica de optimización es una buena herramienta si se tiene plena comprensión del concepto de dominancia y una buena base de la forma en que operan los algoritmos genéticos.
- El algoritmo NSGA-II no tiene necesidad de almacenar las soluciones en un archivo adjunto, pues mantiene las soluciones pertenecientes al frente dominante dentro de los individuos de la población durante todas las generaciones del algoritmo.

Prasad & Park (2004), en su artículo científico: *"Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks"* cuyo objetivo fue presentar un enfoque de algoritmo genético multiobjetivo para un diseño optimizado de una red de distribución de agua potable. Considera como funciones objetivo el costo de la red y la máxima confiabilidad. En este estudio, se introdujo una nueva medida de confiabilidad llamada índice de resiliencia. Esta medida buscó evitar que la presión en los nudos sea menor que la permitida y la variación de diámetros en un nudo. Se utilizaron dos ejemplos de redes de las cuales se obtuvieron resultados que maximizaron las medidas de confiabilidad, asimismo se evidenció la sensibilidad del parámetro de diversidad de soluciones. Esta investigación llegó a las siguientes conclusiones:

- El aumento en el valor del índice de resiliencia de la red de distribución de agua potable mejora la confiabilidad de una red en condiciones de falla y posibles futuros eventos.

- La técnica de optimización produce un conjunto de soluciones óptimas de Pareto en el espacio de búsqueda de costo y resiliencia de la red.

Deb, Pratap, Agarwal & Meyarivan (2002), realizaron el artículo científico: *"A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II"* en Kanpur Genetic Algorithms Laboratory (KanGAL), Indian Institute of Technology Kanpur, cuyo objetivo fue proponer un algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominado, llamado NSGA-II. Este algoritmo genético mejoró a su antecesor en otorgar una complejidad computacional razonable, presenta un enfoque elitista de clasificación rápido no dominado con un operador de selección que crea un grupo de apareamiento combinando las poblaciones de padres y descendientes lo que permite preservar las mejores soluciones e incluye un parámetro de distancia de hacinamiento que garantiza la diversidad de soluciones. Se utilizaron nueve problemas de prueba, en los cuales el NSGA-II fue capaz de mantener una mejor distribución de soluciones y una mejor convergencia respecto al óptimo de Pareto frente a otros algoritmos genéticos multiobjetivo como PAES y SPEA. Esta investigación llegó a las siguientes conclusiones:

- La técnica de optimización NSGA-II es capaz de encontrar una mejor distribución de soluciones y una mejor convergencia cerca del verdadero frente óptimo de Pareto en comparación con otros algoritmos evolutivos multiobjetivo elitistas que se centran en la distribución del frente diverso óptimo de Pareto.

Todini (2000), realizó el artículo científico: *"Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach"*, en Department of Earth and Geo-Environmental Sciences, University of Bologna, que tuvo como objetivo introducir un índice de resiliencia para aumentar la confiabilidad hidráulica y la disponibilidad de agua durante

fallas en las tuberías. Formuló como un problema de optimización de objetivos considerando las funciones objetivo de costo y resiliencia. Esta investigación empleó una técnica heurística simple que trata de emular el razonamiento de un diseñador que apunta, por un lado, a reducir el costo y, por otro lado, a preservar un grado suficiente de resistencia en el sistema para hacer frente con posibles fallas. A partir de tres ejemplos utilizados, se mostró que las soluciones satisfactorias no corresponden ni a las soluciones de mínimo costo ni las soluciones clásicas, pero pueden mejorarse con un análisis multiobjetivo más sistemático. Esta investigación llegó a las siguientes conclusiones:

- Después de definir el problema en un espacio de dos objetivos, demostró que la técnica es capaz de describir rápidamente el conjunto óptimo de Pareto que permite encontrar soluciones satisfactorias como una compensación entre la resistencia del sistema y el costo.

2.1.2 A nivel nacional

Flores (2019), en su tesis de pregrado: *"Aplicación del algoritmo genético para el cálculo del diámetro de las tuberías de una red de distribución de agua potable en el distrito de Tarapoto 2018"* en Universidad Nacional de San Martín, precisó como objetivo desarrollar un sistema basado en el modelo del algoritmo genético para mejorar la adecuada selección de diámetros en el diseño de las redes de distribución de agua potable. El ámbito de estudio fue el distrito de Tarapoto-San Martín en la que la aplicación de un modelo de optimización basado en los algoritmos genéticos seleccionó tuberías que tienen el 100% de diámetros adecuados, en comparación con el método tradicional que alcanzó solo el 38% de diámetros adecuados. Concluyó que:

- Se determinó que la aplicación de los algoritmos genéticos para la selección de los diámetros óptimos de las tuberías de una red de distribución es efectiva.

Quevedo (2017), realizó la tesis de pregrado: *"Aplicación del Algoritmo Genético Multiobjetivo Strength Pareto Evolutionary Algorithm y su Efectividad en el Diseño de Redes de Agua Potable. Caso: Sector Viñani-Tacna"* en Universidad Privada de Tacna. Tuvo como objetivo demostrar la efectividad de la aplicación de un algoritmo genético en el diseño de redes de agua potable. Empleó la técnica de optimización Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA), que permitió minimizar el costo de la red y maximizar la confiabilidad las cuales estarán sujetas a las restricciones hidráulicas según lo indica la normatividad peruana. El ámbito de estudio fue la red de distribución de agua potable del sector Viñani-Tacna en el cual se hace una comparación de la aplicación del algoritmo genético (SPEA) con un diseño tradicional y el micro algoritmo genético multiobjetivo (MAGMO) elaborado por (Valle, 2014) y se evidencia que éste último tiene un mejor desempeño. Esta investigación llegó a las siguientes conclusiones:

- El Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo de Frente de Pareto (SPEA) es adecuado para el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable de gran tamaño ya que mediante la elección de diámetros se cumplen con las restricciones hidráulicas de presiones y velocidades máximas. Se evidencia notables mejoras respecto a los métodos tradicionales de diseño que sólo buscan verificar condiciones hidráulicas y dejan de lado la optimización.
- El Micro Algoritmo Genético Multiobjetivo (MAGMO) tiene mejor desempeño que el Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo de Frente de Pareto (SPEA) en costo y confiabilidad.

Choque y Arce (2016) realizaron la tesis de pregrado: *"Optimización de redes de distribución de agua con algoritmos genéticos en el Centro Poblado Jayllihuaya"* en Universidad Nacional del Altiplano. Fijaron como objetivo emplear algoritmos genéticos en el diseño de la red de distribución de agua potable que busca minimizar el costo y maximizar

la confiabilidad, cumpliendo con las restricciones y normativas. Usaron el módulo Darwin Designer que viene incluido en el software Watercad para buscar la optimización de una red de distribución de agua potable (RDAP) del centro poblado de Jayllihuya usando algoritmos genéticos, luego lo compararon con un diseño tradicional; este módulo buscó la mejor solución posible para un sistema dado, usando algoritmos genéticos eficientes de una manera más automatizada y teniendo como funciones objetivo el mínimo costo y la confiabilidad cinemática. Este trabajo llegó a las siguientes conclusiones:

- Lo resultados obtenidos, indicaron que el diseño tradicional de la RDAP tiene menor costo a comparación del diseño optimizado, dando a entender que no hay diferencia significativa entre ambos diseños.
- En el caso de la confiabilidad cinemática obtuvo valores muy bajos, llegando a la conclusión de que la red de menor costo no garantiza una buena confiablidad de la red.
- La selección de una buena RDAP dependerá mucho del diseñador, pues este estará encargado de la selección una red apropiada que asegure un servicio funcional.

Valle (2014), realizó la tesis de pregrado: *"Optimización del diseño de redes de distribución de agua potable, usando algoritmos genéticos con tres funciones objetivo. caso: Viñani - Tacna"* su objetivo fue la optimización multiobjetivo de una red de distribución de agua potable (RDAP), usando como técnica de optimización un micro algoritmo genético con tres funciones objetivo, buscando la máxima confiabilidad resiliente, el costo mínimo y la máxima confiabilidad cinemática. El lugar de estudio fue el sector Viñani-Tacna, se realizó el diseño optimizado de la red de distribución con el uso de un micro algoritmo genético y se comparó con un diseño tradicional. Este trabajo llegó a las siguientes conclusiones:

- Entre los resultados obtuvo un conjunto de soluciones con buenas funciones objetivo, de las cuales selecciona una RDAP óptima que presenta una mayor aptitud y que cumplía con los criterios de diseño.
- Se observó que el diseño optimizado tiene un costo superior al de un diseño tradicional, sin embargo, este diseño optimizado tiene una confiabilidad resiliente por encima de los rangos aceptables, teniendo una RDAP confiable y con menor probabilidad de fallas, garantizando un mejor servicio y capacidad del sistema para cumplir su función dentro del periodo de diseño.

2.1.3 A nivel local

Espinoza (2017), realizó la tesis de pregrado: *"Desempeño del algoritmo genético en las redes de distribución de agua potable"* en Universidad Nacional de Huancavelica, buscó determinar el desempeño de los algoritmos genéticos en el diseño de una red de distribución de agua potable, teniendo como función objetivo la minimización de costos. Para lo cual implementa un algoritmo genético usando el lenguaje de programación Cpp para la determinación de los diámetros óptimos en una red de distribución de agua potable. La investigación se efectuó en la Red de Hanoi (red patrón) y la Red de Barrio Alto ubicada en Ticrapo-Castrovirreyna, en las cuales se obtuvieron diámetros óptimos que permitieron que el flujo con velocidades y presiones se encuentren dentro de lo establecido. Esta investigación llegó a las siguientes conclusiones:

- El uso de este algoritmo genético demostró ser muy eficaz para la selección de diámetros óptimos en una red de distribución de agua potable, optimizando el costo de la red y las características hidráulicas.
- El empleo de un lenguaje de programación eficiente como es el Cpp, permitió reducir el tiempo de convergencia y procesamiento de datos.

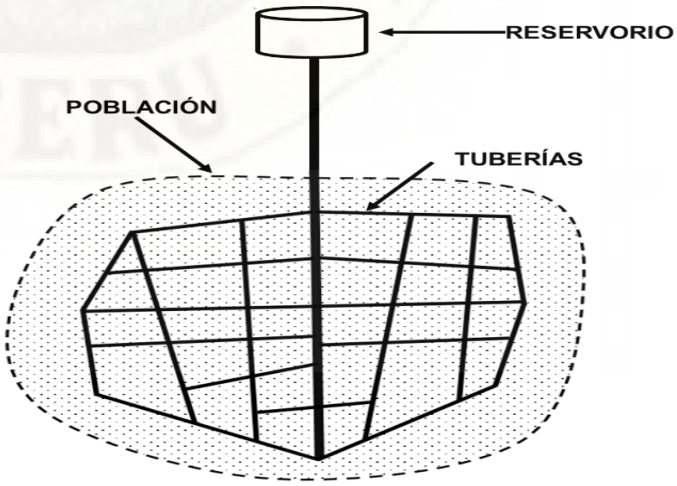
2.2 Bases teóricas

2.2.1 Red de distribución de agua potable

2.2.1.1 Definición de red de distribución de agua potable

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2009) a través de su Reglamento Nacional de Edificaciones en la norma OS.050 Redes de Distribución de Agua para Consumo Humano, define a una red de distribución de agua potable como un conjunto de tuberías subterráneas principales y ramales de distribución que conducen hasta la entrada de los predios de los usuarios. Su finalidad es dotar de agua para consumo doméstico, público, comercial, industrial e hidrantes contra incendios. Una red de distribución debe suministrar una cantidad de agua suficiente, de calidad, durante todo el tiempo requerido y a una presión apropiada. Según la forma del circuito de la localidad y el tamaño de la población se clasifican en redes abiertas o ramificadas y cerradas o malladas. Las redes abiertas son para poblaciones donde las viviendas se encuentren dispersas, las cerradas son para poblaciones urbanas cuyas viviendas formen manzanas.

Figura 1: *Red de distribución de agua potable*



Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.2 Metodología del gradiente hidráulico

Es un método desarrollado por Ezio Todini, en el año 1979 y posteriormente por Todini y Pilati en el año 1988, los cuales mencionan que es uno de los más robustos, rápidos y más utilizados para el análisis de redes de distribución de agua. Para Saldarriaga (2007) la utilización de este método requiere que la condición de la red de distribución sea de flujo permanente, así se garantiza el cumplimiento de las ecuaciones de conservación de la masa en cada nudo de la red y la ecuación de la conservación de la energía en cada una de las tuberías de la red. Ambas ecuaciones se combinan con la finalidad de conseguir una solución simultánea de los caudales en las tuberías y presiones en los nudos. Dichas condiciones son las siguientes:

Ecuación de conservación de la masa

Al tener un flujo permanente, el caudal en cualquier tubería de la red permanece constante y se cumple una condición de equilibrio, por lo cual no hay perdidas de caudal dentro de la red. Asimismo, el caudal que entra en un nudo es igual al que sale en un tiempo determinado. La ecuación esta representa de la siguiente forma:

$$\sum_{j=1}^{NT} Q_{ij} - Q_{Di} = 0$$

Donde:

NT: número de tuberías que llegan al nudo.

Q_{ij}: caudal que pasa por la tubería hacia el nudo i desde el nudo j (se toma positivo si se llega al nudo o negativo si sale del nudo).

Q_{Di}: caudal de demanda en el nudo (puede ser cero).

Ecuación de la conservación de energía

Siguiendo a Saldarriaga (2007), esta ecuación describe la perdida de carga ocasionada por la fricción entre el flujo en movimiento y la pared interna de la tubería. Está representada por medio de ecuaciones de fricción, que relacionan la energía que se pierde con el flujo, representado por la velocidad o el caudal que pasa a través de la tubería. Para cada tubería la ecuación se representa como:

$$H_f = h_f + \sum h_m$$

Donde:

h_f : pérdidas por fricción en la tubería.

h_m : pérdidas menores por accesorio.

El método de gradiente hidráulico requiere del uso de un modelo de perdida de carga. Se recomienda utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach junto con la ecuación de Colebrook-White puesto que, al ser un método iterativo en el cual no se tiene un control de las velocidades en cada iteración, puede existir velocidades que se encuentren fuera del rango aceptable para la utilización de la ecuación de Hazen-Williams.

a) Ecuación de Darcy-Weisbach

Conocida como la ecuación universal, es una de las ecuaciones más completas y recomendadas para determinar la perdida de carga en tuberías. Está relacionada con las características del fluido que fluye como con el material de la tubería y puede ser aplicado a cualquier tipo de material, además no tiene ningún tipo de restricción (Minhoni et al., 2020).

$$Hf = f\frac{l}{d}\frac{v^2}{2g}$$

Donde:

Hf: pérdida de carga debido a la fricción.

f: factor de fricción de Darcy.

v: velocidad media de flujo.

d: diámetro de la tubería.

g: constante gravitacional.

b) Ecuación de Colebrook-White

Ecuación desarrollada por Colebrook y White en el año 1937, la cual permite determinar el factor de fricción para flujos y requiere del número de Reynolds y la rugosidad absoluta de la pared interna de la tubería. Según Cohan (2012), La ecuación al ser implícita, proporciona una mejor aproximación del factor de fricción, especialmente para un régimen de flujo turbulento y solo se puede resolver mediante métodos numéricos de búsqueda de raíces. La ecuación está representada de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{Ks}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right)$$

Donde:

f: factor de fricción de Darcy.

Ks: rugosidad absoluta.

Re: número de Reynolds.

Si se tiene en consideración las perdidas menores por accesorios y la posible existencia de bombas en la red de distribución, la ecuación toma como:

$$H_t = \alpha . Q^n + \beta . Q + \gamma$$

Donde:

H_t: altura piezométrica del nudo.

H_t: caudal de la tubería.

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

n: exponente del caudal que depende de la ecuación de fricción utilizada (2.0 para el caso de la ecuación de Darcy-Weisbach).

Si en una tubería particular solo ocurren perdidas de carga por fricción y por accesorios, lo cual es el caso más común en tuberías de redes de distribución de agua, se puede utilizar para representar el parámetro α:

$$h_{ij} = \alpha Q^n$$

$$h_f + \sum h_m = \alpha Q^2$$

El valor de α es un parámetro característico de la tubería, que considera las pérdidas de carga por fricción y perdidas menores por accesorios. Utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach, esta ecuación se convierte en:

$$\left(f \frac{l}{d} + \sum k_m\right) \frac{Q^2}{2gA^2} = \alpha Q^2$$

Por lo tanto, despejando el valor del parámetro α, la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{\left(f\frac{l}{d} + \sum k_m\right)}{2gA^2}$$

Para el método de gradiente hidráulico se hacen las siguientes especificaciones con el fin de describir la topología de la red en forma matricial:

NT: número de tuberías de la red.

NN: número de nudos con altura piezométrica desconocida.

$[A12]$: matriz de conectividad asociada con cada uno de los nudos de la red. Su dimensión es NT x NN con solo dos elementos diferentes de cero, -1 correspondiente al nudo inicial de la tubería y 1 correspondiente al nudo final de la tubería.

NS: número de nudos de altura piezométrica conocida.

[A10]: matriz topológica tubería a nudo para los nudos con altura piezométrica conocida. Su dimensión es NT x NS con un valor igual a -1 en las filas correspondientes a los tramos conectados a nudos de altura piezométrica conocida.

Teniendo en cuenta las anteriores definiciones, la perdida carga en cada tramo de tubería que conecte dos nudos de la red es:

$$[A11][Q] + [A12][H] = -[A10][H_o]$$

Donde:

[A11]: matriz diagonal de NT x NT definida como sigue:

$[A11]$

$$= \begin{bmatrix} \alpha_1 Q_1^{(n_1-1)} + \beta_1 + \frac{\gamma_1}{Q_1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \alpha_2 Q_2^{(n_2-1)} + \beta_2 + \frac{\gamma_2}{Q_2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 Q_3^{(n_3-1)} + \beta_3 + \frac{\gamma_3}{Q_3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_{NT} Q_{NT}^{(n_{NT}-1)} + \beta_{NT} + \frac{\gamma_{NT}}{Q_{NT}} \end{bmatrix}$$

[Q]: vector de caudales con dimensión NT x 1.

[H]: vector de altura piezométricas desconocidas con dimensión NN x 1.

$[H_o]$: vector de alturas piezométricas fijas con dimensión NS x 1.

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

$$[A21][Q] = [q]$$

Donde:

$[A21]$: matriz transpuesta de [A12].

$[q]$: vector de demanda de cada nudo de la red, con dimensión NN x 1.

Las ecuaciones de continuidad y conservación de la energía se pueden expresar en un formato compacto en términos matriciales:

$$\begin{bmatrix} [A11] & [A12] \\ [A21] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Q] \\ [H] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[A10][H_o] \\ [q] \end{bmatrix}$$

En esta última ecuación, la parte superior del sistema de ecuaciones representa la relación perdida carga / flujo, mientras que la parte inferior corresponde al balance de flujo en cada nudo. Teniendo en cuenta que la parte superior es no lineal, se debe

recurrir a un algoritmo iterativo. Al operar simultáneamente sobre el campo ([Q], [H]) y aplicar el operador gradiente quedaría de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} [N][A11]' & [A12] \\ [A21] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [dQ] \\ [dH] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [dE] \\ [dq] \end{bmatrix}$$

Donde:

$[N]$: matriz diagonal cuya dimensión es NT x NT y presenta el valor de la ecuación de fricción seleccionada (2.0 para el caso de la ecuación de Darcy-Weisbach).

$[A11]'$: matriz con dimensión NT x NT definida como:

$$[A11]' = \begin{bmatrix} \alpha_1 Q_1^{(n_1-1)} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \alpha_2 Q_2^{(n_2-1)} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 Q_3^{(n_3-1)} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_{NT} Q_{NT}^{(n_{NT}-1)} \end{bmatrix}$$

En cada iteración se presentará un desbalance de altura piezométrica en cada tubería $[dE]$ y desbalance de caudal en cada nudo $[dq]$. Estos desbalances están representados por las siguientes ecuaciones:

$$[dE] = [A11][Q_i] + [A12][H_i] + [A10][H_o]$$

$$[dq] = [A21][Q_i] - [q]$$

Por consiguiente, teniendo en cuenta la ecuación de continuidad para todos los nudos, la solución puede calcularse resolviendo el siguiente sistema:

$$\begin{bmatrix}[dQ]\\[dH]\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}[N][A11]' & [A12]\\ [A21] & [0]\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}[dE]\\[dq]\end{bmatrix}$$

Finalmente, recurriendo al algebra matricial es posible demostrar que la solución está representada por las siguientes ecuaciones:

$$[H_{i+1}] = -\{[A21]([N][A11]')^{-1}[A12]\}\,\{[A21]([N][A11]')^{-1}([A11][Q_i] + [A10][H_o]) - ([A21][Q_i] - [q])\}$$

$$[Q_{i+1}] = \{[I] - ([N][A11]')^{-1} - [A11]\}[Q_i] - \{([N][A11]')^{-1}([A12][H_{i+1}] + [A10][H_o])\}$$

Características principales del gradiente hidráulico

El método de gradiente hidráulico, es uno de los más eficientes para el análisis de redes de distribución de agua. Tiene la facilidad de poder implementarse en cualquier lenguaje de programación. Tal es el caso de programas comerciales como WaterCAD y de acceso libre como Epanet. Estas son sus principales características:

- Se puede implementar un método de cálculo eficiente basado en el algoritmo de gradiente conjugado pre condicionado con la factorización incompleta de Cholesky y tratamiento de matrices dispersas.
- El anterior método de cálculo garantiza la solución en máximo NN (número de nudos de la red) iteraciones.
- Todo lo anterior no es posible en el método de la teoría lineal ya que en este sistema que tiene que ser resuelto no es simétrico.
- La manipulación de las matrices dispersas típicas del método del gradiente reduce la memoria requerida y el tiempo de cálculo en el computador.

- El método del gradiente resuelve un sistema de dimensión NN x NN, mientras que el método de la teoría lineal resuelve un sistema de NT x NT. Debido a que en todos los casos NN < NT, el método del gradiente es más veloz y requiere menos memoria en el computador, aun utilizando el mismo algoritmo de solución. El sistema de ecuaciones que se monta puede llegar a ser un 50% menor en el caso de redes grandes.
- El método del gradiente calcula y ajusta simultáneamente los caudales y las alturas piezométricas, ya que es el método más eficiente; esto reduce el número de iteraciones con respecto al método de la teoría lineal.

2.2.1.3 Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable

El diseño de una red de distribución, se basa en seleccionar, dentro de varias opciones de diámetros comerciales, la combinación de diámetros de las tuberías más económica para conducir el agua hasta los sitios de demanda de tal modo que las presiones sean las adecuadas. Una red está diseñada para satisfacer la demanda de agua potable de forma permanente, a su vez respetando las condiciones de operación. Para lograr la operación adecuada del sistema es necesario el correcto dimensionamiento de los componentes de la red, por ello, la selección de diámetros de las tuberías es un elemento importante para determinar los costos y regular la operación del sistema.

El diseño óptimo de una red de distribución de agua potable consiste en minimizar el costo cumpliendo las restricciones de presión mínima en los nudos, caudal, velocidad del agua, etc. (Pereyra et al., 2017). Cuando se refiere a un problema real como es el diseño de redes, no es suficiente optimizar sólo una variable como el costo, puesto que una red de menor costo puede no

garantizar las restricciones hidráulicas como presiones y velocidades. Para Saldarriaga (2007) el diseño óptimo de una red consiste en escoger los diámetros de las tuberías de tal manera que su costo sea mínimo. También se debe tener en cuenta la resiliencia de la red con la finalidad de evaluar la vulnerabilidad frente a eventuales daños.

Un diseño óptimo debe considerar las dimensiones de los diámetros de las tuberías y la operación del sistema, por tal motivo se debe realizar un análisis integral, donde además del costo se consideren variables como confiabilidad hidráulica, calidad del agua, operación del sistema entre otras.

2.2.1.4 Función objetivo de costo

Una red de distribución está compuesta por diversos elementos como tuberías, accesorios, válvulas, entre otros, de los cuales los elementos que requieren una inversión económica significativa son las tuberías. El costo de las tuberías se encuentra en función de su diámetro. De acuerdo con Saldarriaga (2007) la función de costo está dada por la siguiente ecuación:

$$C_T = K_1 \, L_T \, d_T^{K_2}$$

Donde:

C_T: costo de una tubería particular.

K_1: constante en unidades monetarias, por ejemplo, dólares.

L_T: longitud de la tubería particular

d_T: diámetro de la tubería particular

K_2: constante adimensional

Al obtener el valor de la constante adimensional mediante los métodos de regresión, pueden variar en cierta medida el resultado del costo total. Por ello, para un resultado más aproximado se utilizará la siguiente ecuación:

$$C_T = Cd_T L_T$$

Donde:

C_T: costo de una tubería particular.

Cd_T: costo del diámetro por metro lineal de una tubería particular.

L_T: longitud de la tubería particular

Por lo tanto, el costo total estará dada por:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^{NT} Cd_i L_i$$

Donde:

C_{total}: costo total de la red.

NT: número de tuberías de la red.

Cd_i: costo del diámetro por metro lineal de cada tubería particular.

L_i: longitud de cada tubería particular.

El costo total de la red está determinado por el índice de costo. El cual es un valor adimensional definido entre 0 y 1, la aproximación hacia el 0 indica la aproximación hacia el mínimo costo, mientras que hacia 1 indica la aproximación hacia el costo máximo.

El índice de costo está dado por:

$$I_c = \frac{C_{total} - C_{mín}}{C_{máx} - C_{mín}}$$

Donde:

I_c: índice de costo de la red.

C_{total}: costo total de la red.

$C_{máx}$: costo máximo de la red.

$C_{mín}$: costo mínimo de la red.

2.2.1.5 Función objetivo de confiabilidad resiliente

Las fallas que una red de distribución de agua potable puede presentar durante su vida útil son de tipo mecánicas e hidráulica, combinar ambos tipos de fallas para precisar una medida de confiabilidad requiere de un análisis global el cual todavía es un reto. Todini (2000) menciona que la confiabilidad de una red de distribución de agua potable en una función multiobjetivo es un concepto más integral el cual aún sigue siendo objeto de estudio. Por ende, introduce el concepto de resiliencia como una manera de tener control sobre la confiabilidad hidráulica y la disponibilidad de agua durante posibles fallas. La resiliencia se utiliza para incrementar la confiabilidad de una red que según su diseño convencional no garantiza un excedente de energía frente a fallas en las que las demandas en los nudos sufren aumentos o modificaciones.

Prasad y Park (2004) refieren que el índice de resiliencia incorpora los efectos tanto de la energía excedente como de los bucles confiables. Se puede garantizar bucles confiables si las

tuberías que están conectadas a un nudo no varían ampliamente de diámetro. Si los diámetros de tres tuberías son D1, D2 y D3 (D1 > D2 > D3) y se encuentran conectadas al nudo j, entonces la uniformidad del nudo se expresa por:

$$C_j = \frac{(D_1 + D_2 + D_3)}{3D_1}$$

De manera general, el coeficiente de conectividad se expresa como:

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^{NT_j} D_i}{NT_j \times \max\{D_i\}}$$

Donde:

C_j: coeficiente de conectividad.

NT_j: número de tuberías conectadas al nudo j.

D_i: i-ésimo diámetro conectado al nudo j

El coeficiente de conectividad de la red de distribución es 1 si los diámetros de las tuberías que llegan a un nudo son iguales o si sólo una tubería llega a un nudo, es menor a 1 si las tuberías que llegan a un nudo presentan variabilidad de diámetros. Entonces se deberá procurar tener un coeficiente de conectividad cercano a 1.

De esta manera, el índice de resiliencia considera la uniformidad de diámetros en las tuberías y las presiones excedentes en los nudos. Está definido por la siguiente ecuación:

$$I_r = \frac{\sum_{j=1}^{nn} C_j Q_j \left(H_j - H_j^*\right)}{\sum_{r=1}^{nr} Q_r H_r - \sum_{j=1}^{nn} Q_j H_j^*}$$

Donde:

I_r: índice de resiliencia de la red.

nn: número de nudos de la red.

nr: numero de reservorios de la red.

C_j: coeficiente de conectividad.

Q_j: caudal de demanda en cada nudo.

H_j: altura piezométrica real.

H_j^*: altura piezométrica ideal.

Q_r: caudal entregado por el reservorio.

H_r: altura piezométrica del reservorio.

Para la investigación, se busca minimizar las funciones objetivo, por ello el índice de resiliencia estará dado por:

$$I_R = 1 - I_r$$

El índice de resiliencia (I_R) es un valor adimensional definido entre 0 y 1, si el índice de resiliencia supera a 0.5 el sistema es muy vulnerable a fallas, fugas o rupturas en las tuberías.

2.2.1.6 Número de incumplimientos de la red

Conocida también como restricciones, estas representan el conjunto de relaciones que ciertas variables deberán satisfacer, se expresan en términos de ecuaciones e inecuaciones (Negrín y Nelly, 2018). Para el caso de redes de distribución de agua, son el número de restricciones incumplidas a los límites de presión y velocidad (Pino et al., 2017).

Velocidad

El valor máximo de la velocidad está determinado por la posible erosión o desgaste que pueda producir en el interior de las paredes de las tuberías y accesorios. Además, aumenta el riesgo de deterioro en los elementos control debido a la elevada presión generada durante la operación de apertura y cierre de válvulas. La norma OS.050 recomienda lo siguiente:

- La velocidad máxima será de 3 m/s.
- Una velocidad máxima de 5 m/s es aceptable siempre y cuando haya una justificación.
- La velocidad mínima no debe producir depósitos ni erosiones. Será de 0.6 m/s.

Presión

La presión es un factor importante a considerar en el diseño de una red de distribución de agua potable. Si la presión en una tubería es baja, los contaminantes de las zanjas cercanas y conexiones cruzadas pueden ingresar al sistema de agua. Asimismo, la presión alta puede generar rupturas en las tuberías.

La norma OS.050 recomienda que la presión estática no supere los 50 m.c.a. en cualquier nudo de la red. En condiciones de demanda máxima horaria, la presión dinámica no será menor de 10 m.c.a.

2.2.1.7 Optimización multiobjetivo

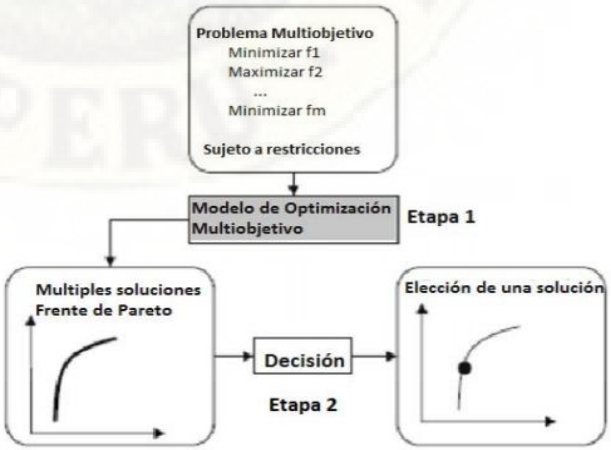
Un problema de optimización multiobjetivo se da de manera natural y encontrar la solución de manera eficiente es todavía un desafío. Cuando nos enfrentamos a una situación real con problemas de decisión, no se puede evaluar únicamente un

objetivo, sino que el éxito radica en determinar múltiples objetivos.

La solución de un problema de la realidad no puede centrarse únicamente en una función objetivo. La tarea de encontrar una o más soluciones óptimas cuando un problema de optimización presenta más de una función objetivo es denominada optimización multiobjetivo o toma de decisiones multicriterio. Distintas soluciones pueden dar origen a soluciones conflictivas entre diferentes objetivos. Una solución puede ser óptima con respecto a un objetivo, pero puede no serlo para el resto, por lo tanto, no se podría escoger dicha solución como óptima del problema y es necesario establecer un acuerdo entre los objetivos (Correa et al., 2008).

Dentro de la optimización multiobjetivo no existe una definición de "óptimo" que se acepte universalmente como en el caso de la optimización de un solo objetivo, ya que a diferencia de ellos encontrar el óptimo se vuelve relativo y será necesario la toma de decisión dentro de un universo de soluciones al problema.

Figura 2: *Modelo de optimización multiobjetivo*



Fuente: Diseño multiobjetivo de un sistema de abastecimiento de agua incluyendo la cosecha de agua de lluvia como recurso complementario, Luque (2013).

2.2.2 Algoritmos genéticos

2.2.2.1 Historia de los algoritmos genéticos

En la Universidad de Michigan, de la mano de colegas y estudiantes, Holland (1975) desarrolla un proyecto que busca explicar la capacidad de adaptación de los sistemas naturales a nuevos ambientes o situaciones adversas en el cual los individuos más capacitados sobrevivan, al adecuarse más rápido a los cambios que se producen, llamada selección natural según la Teoría de Evolución de Charles Darwin. También tiene como objetivo diseñar sistemas artificiales (programas) que emulen y mantengan los principales mecanismos de los sistemas naturales a través de un algoritmo. Es entonces que surge y se conoce el nombre de algoritmos genéticos, ya que incorporan la terminología de la genética natural, como una de las líneas más promisorias de la inteligencia artificial y se utilizan principalmente en problemas de búsqueda y optimización.

2.2.2.2 Metodología del algoritmo genético

Los algoritmos genéticos son algoritmos que se basan en la selección natural y la genética, donde prima la supervivencia de los más aptos, los cuales intercambian cadenas de información estructurada de manera aleatoria para formar un algoritmo de búsqueda en base a los principios de evolución humana. En cada nueva generación se crea un conjunto de individuos artificiales compuestos por genes de los individuos más aptos de la generación anterior. Mientras exista la aleatoriedad, se garantiza que el algoritmo genético sea no determinista (Goldberg ,1989).

El algoritmo genético es un algoritmo que transforma una población de individuos, cada uno asociado con un valor de aptitud, en una nueva población a través de una generación,

usando el principio de supervivencia y la reproducción Darwiniana de los más aptos en base a operaciones genéticas naturales como el cruce (recombinación sexual) y mutación. Cada individuo está conformado por una cadena de caracteres de longitud fija ajustados al modelo de cromosomas (Koza, 1994).

Para Laguna et al. (2016) un algoritmo se entiende como una secuencia de pasos para resolver un problema. Mencionan que Holland propuso un algoritmo que era capaz de resolver ciertos problemas mediante el principio de evolución de un conjunto (población) de diversas y posibles soluciones(individuos) para el mismo. La realización del proceso para la evolución y mejora de las posibles soluciones se realizaría mediante aproximaciones sucesivas. Cada aproximación es el producto de una iteración del algoritmo, haciendo que cada vez que se ejecute exista la posibilidad de que aparezcan mejores soluciones.

La estructura del algoritmo genético de Holland tiene los siguientes pasos:

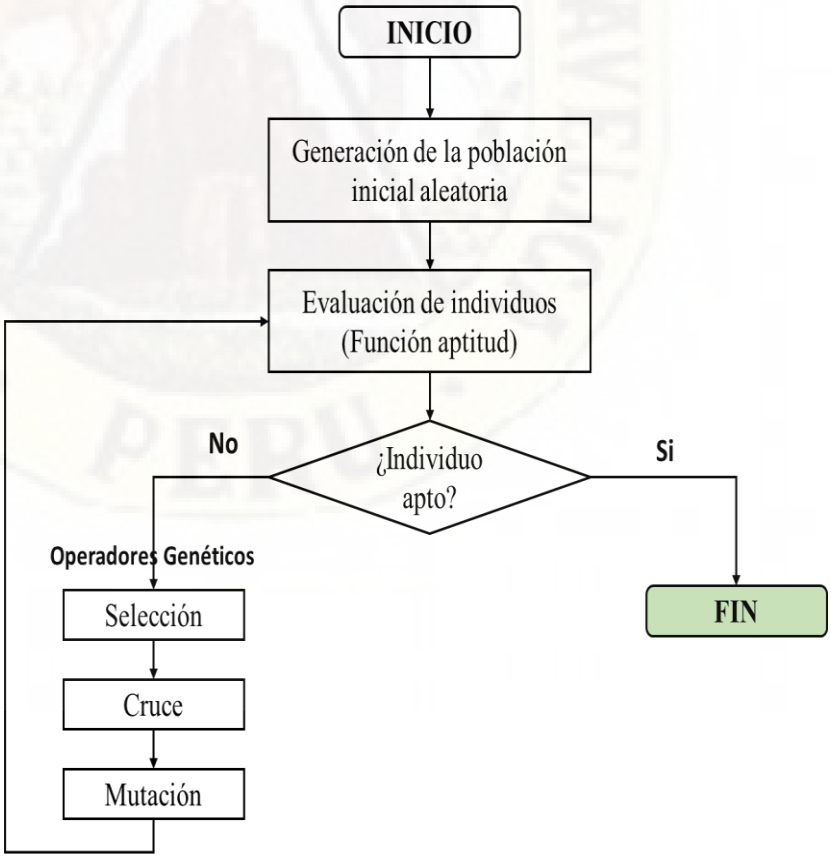
1. Inicialización. Generar en forma aleatoria una población inicial de individuos (cadenas de bits).
2. Manifestación de genotipos. Calcular la aptitud (fitness) de cada individuo en la generación actual.
3. Selección de padres. Seleccionar algunos individuos(padres), asignando mayor probabilidad de ser elegidos aquellos que presenten mejor aptitud, para generar nuevos individuos.
4. Cruza. Recombinar (cruzar) las cadenas de bits de los padres para producir nuevos individuos.
5. Mutación. Eventualmente modificar, en forma aleatoria, algunos bits de las cadenas de los nuevos individuos.

Como resultado se espera que existan cambios en la aptitud de los individuos.

6. Regeneración. Mediante cruza y mutación, producir una población del mismo tamaño a la original. Entonces la nueva población reemplaza a la anterior. Luego se retorna al paso 2.

Los algoritmos genéticos operan sobre un conjunto de soluciones al que se le llama población y que inicialmente se genera en forma aleatoria. A cada uno se le conoce como individuo o cromosoma y generalmente está representado por una cadena de bits. Los números que conforman esta cadena de bits son conocidos como genes. La población inicial ira mejorando por medio de los operadores genéticos hasta encontrar mejores soluciones.

Figura 3: *Diagrama de flujo de un algoritmo genético simple*



Fuente: Elaboración propia

2.2.2.3 Población

Tamaño

El tamaño idóneo de la población resulta aún una cuestión a tratar, pues al utilizar poblaciones de tamaño menor corren el riesgo de no cubrir de manera adecuada el espacio de búsqueda y por otro lado las poblaciones de gran tamaño pueden ocasionar alta carga computacional.

Población inicial

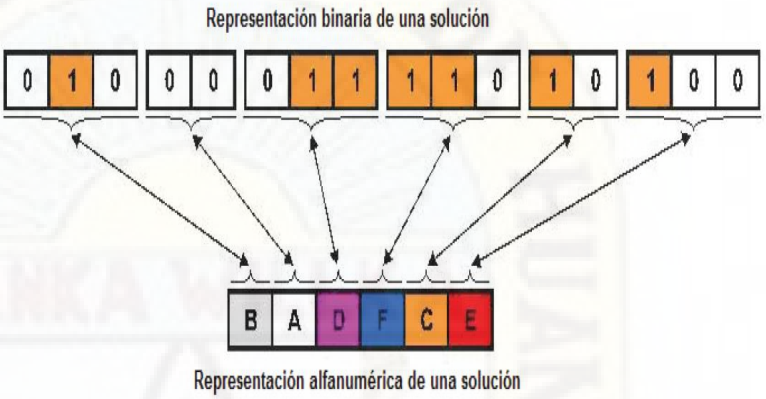
Existen dos formas de generar una población inicial, de manera aleatoria y no aleatoria. La primera es de uso habitual y se escoge al azar, pudiendo contener cada gen uno de los posibles valores del alfabeto con probabilidad uniforme. La segunda manera de la cual se conoce poco, trata de inicializar mediante optimización local lo que podría acelerar la convergencia del algoritmo genético; sin embargo, el inconveniente en algunos casos sería la convergencia prematura del algoritmo genético (Moujahid et al., 2008).

Representación

Tradicionalmente, la técnica de los algoritmos genéticos se formuló en codificación binaria ya que el alfabeto binario ofrece mayor número de esquemas posibles y resulta beneficioso en la diversidad lo que mejora el rendimiento del algoritmo genético. Si utilizaríamos codificación binaria para el caso de una red de distribución de muchas tuberías con una amplia gama de diámetros comerciales generaría cadenas extremadamente largas además de tener problemas a la hora de mapear adecuadamente el espacio de búsqueda en el espacio de representación. La naturaleza de cada problema nos lleva a buscar otras formas de

representación, es así que para una red de distribución de agua potable cada variable de decisión (diámetros comerciales) puede tener un rango de soluciones posibles diferentes, lo cual puede representarse mediante una variable alfanumérica (Mora, 2012).

Figura 4: *Representación de una solución*



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

2.2.2.4 Algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada

Deb et al. (2002) formulan el algoritmo genético Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II), el cual presenta un enfoque de clasificación rápida no dominada, también un operador de selección que permite obtener las mejores soluciones. Surge como una versión mejorada de su antecesor que fue criticado debido a su alta carga computacional, su enfoque de no elitismo y la necesidad de especificar un parámetro que asegure la diversidad de soluciones.

El algoritmo genético Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) presenta buenos resultados en problemas complejos, pues es capaz de encontrar una mejor distribución de soluciones, así como una mejor y más rápida convergencia cerca al frente óptimo de Pareto. Es el más utilizado

en problemas de optimización multiobjetivo al incorporar nuevas y mejores estrategias de búsqueda.

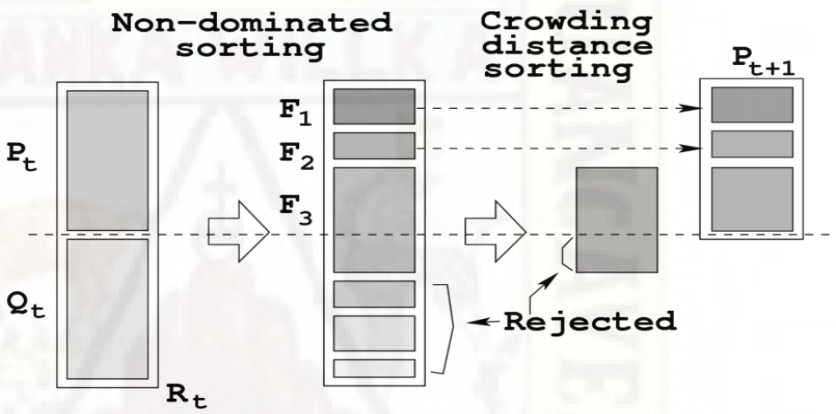
De acuerdo con Peñuela y Granada (2007) el pseudocódigo para el NSGA-II es:

1. Generar una población P de tamaño N.
2. Identificar los frentes de dominancia y evaluar las distancias de hacinamiento en cada frente.
3. Usar los operadores de selección, cruzamiento y mutación para generar una población descendiente de tamaño N.
4. Reunir padres y descendientes en un conjunto de tamaño 2N y clasificar los frentes de dominancia.
5. Determinar el conjunto descendiente final seleccionando los frentes de mejor rango. Si se supera el límite de población N, eliminar las soluciones con menor distancia de hacinamiento en el último frente seleccionado.
6. Retornar al paso 3 hasta que se cumpla el criterio de convergencia o finalizar el número de generaciones.

En este algoritmo, inicialmente se crea una población aleatoria P_0 (tamaño N) la cual para la primera generación se convierte en población padre P_t (tamaño N) la que mediante operadores genéticos de selección, cruzamiento y mutación origina una población descendiente Q_t (tamaño N). Luego ambas poblaciones se combinan y forman R_t (tamaño 2N). Después se realiza un ordenamiento no dominado para clasificar a la población R_t en distintos frentes de Pareto. Posteriormente la nueva población se obtiene a partir de la configuración de los frentes no dominados (tamaño 2N), iniciando con el mejor frente no dominado F_1, seguido del segundo frente F_2 , tercer frente F_3 y así sucesivamente hasta conformar la población descendiente

(tamaño N). Debido que en cada frente existe un conjunto de soluciones no dominados entre sí y estas pueden exceder las restantes para completar la población descendiente, se debe seleccionar las soluciones con mayor distancia de hacinamiento; es decir aquellas que se encuentren en un área alejada de otras soluciones, para así garantizar la diversidad. Solamente la mitad de soluciones de los frentes no dominados seguirán en el proceso, la otra mitad se descarta. La nueva población resultante P_{t+1} se convierte en la población padre P_t la cual repite el proceso.

Figura 5: *Proceso NSGA-II*



Fuente: A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, Deb et al. (2002).

2.2.2.5 Operadores genéticos

Selección

La selección es uno de los procesos más importantes de un algoritmo genético, esto debido a su gran influencia en su rendimiento y confiabilidad. Este operador permite determinar si un individuo en particular participará o no en el proceso de reproducción. Puede ajustarse mediante una presión de selección, el cual, una fuerte presión de selección puede hacer que el algoritmo permita encontrar un óptimo local, mientras que una baja presión de selección puede hacer que el algoritmo genético

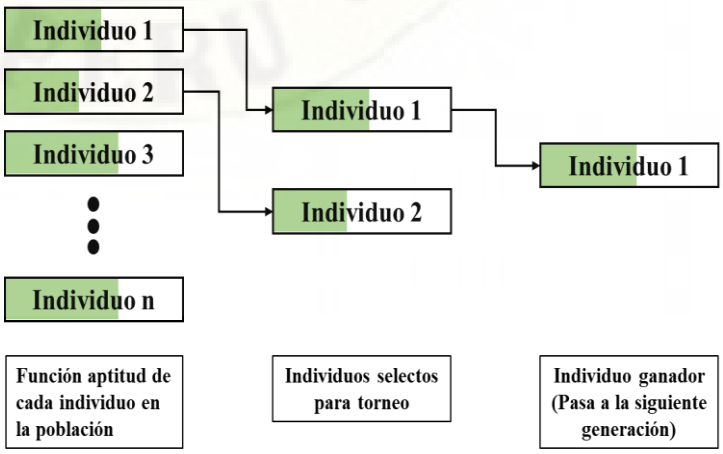
obtenga soluciones aleatorias y varíen de una generación a otra (Bäck, 1994).

El operador de selección tiene como finalidad aprovechar las mejores características de las buenas soluciones candidatas con el fin de mejorar estas soluciones en las siguientes generaciones, esto orientara a los algoritmos genéticos a poder encontrar un óptimo local aceptable y satisfactorio del problema de optimización en cuestión (Goldberg, 1989). Además, Para la selección es necesario evaluar a cada individuo con una función de aptitud. La función de aptitud producirá una puntuación numérica para describir la aptitud de cada individuo de la población. Existen varios métodos de selección, los más conocidos son:

a) Selección por torneo

Según Jebari y Madiafi (2013), el principio consiste en seleccionar aleatoriamente un conjunto de n individuos. Luego, estos individuos se clasifican de acuerdo con su función aptitud y se selecciona el individuo más apto para la siguiente generación.

Figura 6: *Proceso de Selección por torneo*



Fuente: Elaboración propia.

b) Selección por ruleta

La selección por ruleta es considerada como un método estocástico, donde la probabilidad de que un individuo sea seleccionado para el proceso de reproducción de la siguiente generación será afectada por su función aptitud (Lipowski y Lipowska, 2011). Cuanto mayor sea su aptitud, mayor será la oportunidad de ser seleccionado. Puede representarse de la siguiente manera:

$$p_{(i)} = \frac{w_{(i)}}{\sum_{j=1}^{N} w_{(i)}}$$

Donde:

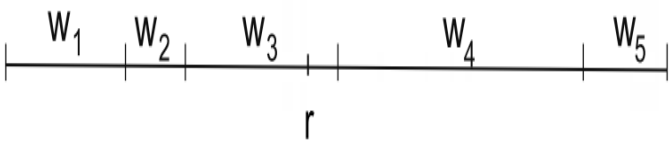
$P_{(i)}$: probabilidad de selección del individuo i.

$w_{(i)}$: función aptitud del individuo.

N: número total de individuos en la población.

En este tipo de selección, se construye un segmento de línea de longitud correspondiente a la sumatoria de las aptitudes de cada individuo. Luego, se divide con sectores consecutivos con longitudes iguales a la función aptitud de cada individuo.

Figura 7: *Selección por ruleta*



Fuente: Roulette - Wheel Selection via Stochastic Acceptance, Lipowski y Lipowska (2011).

Para la selección de un individuo, se genera un numero aleatorio r del intervalo del intervalo $[0,\sum_{j=1}^{N} F_{(i)}]$, y se ubica el sector correspondiente (w_3 en este caso), seleccionando así el individuo respectivo.

Es operador de selección puede ser adaptado a diversos problemas de optimización. Por ejemplo, el caso de redes de distribución de agua, donde el ganador se determina en primera instancia según la configuración de restricciones incumplidas respecto a los límites de presiones y velocidades; el ganador será el que tenga un mejor ordenamiento no dominado (Frente de Pareto) y si las configuraciones participantes de dicho torneo se encuentran en el mismo frente se utiliza la mejor distancia de hacinamiento para determinar la configuración ganadora (Correa et al., 2008).

Cruce

Una vez seleccionado el individuo más apto, se realiza un intercambio de características para producir la descendencia que se insertara en la siguiente generación mediante el operador de cruza. Kaya et al. (2011) menciona que la idea principal de este operador es que la descendencia pueda ser mejor que los padres si toma las mejores características de los padres. Este operador se produce durante la reproducción de acuerdo con una probabilidad de cruce definida por el usuario.

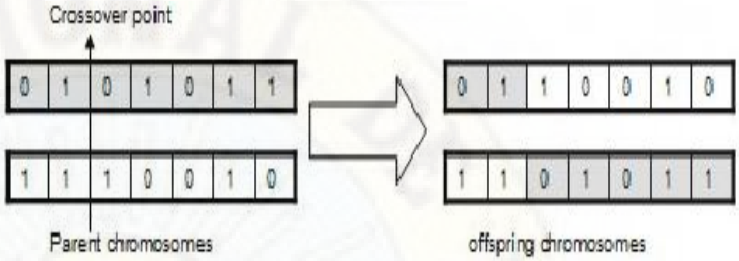
Existen varios tipos de cruce; sin embargo, los más utilizados son:

a) Cruce de un punto

Cuando se realiza un cruce, ambos padres se dividen en un punto de cruce determinado aleatoriamente. Luego, se crea un nuevo individuo combinando la primera parte del

primer padre con la segunda parte del segundo padre (Kellegöz et al., 2008). Se selecciona un único punto de cruce en los genes de ambos padres.

Figura 8: *Cruce de un solo punto*

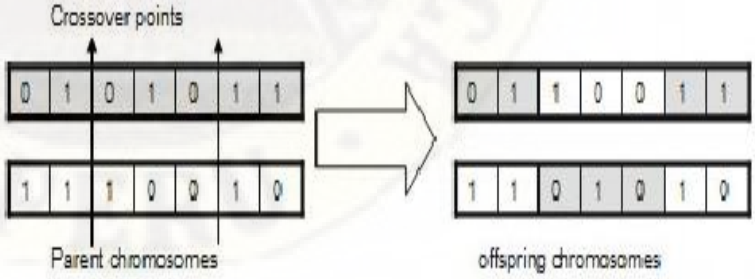


Fuente: A novel Crossover Operator for Genetic Algorithms: Ring Crossover, Kaya et al. (2011).

b) Cruce de dos puntos

El cruce de dos puntos requiere que se seleccione dos puntos de cruce en los genes de los padres. Todo lo que se encuentra entre los dos puntos se intercambian entre los genes de los individuos padres, produciendo dos individuos secundarios (Mehboob et al., 2016).

Figura 9: *Cruce de dos puntos*



Fuente: A novel Crossover Operator for Genetic Algorithms: Ring Crossover, Kaya et al. (2011).

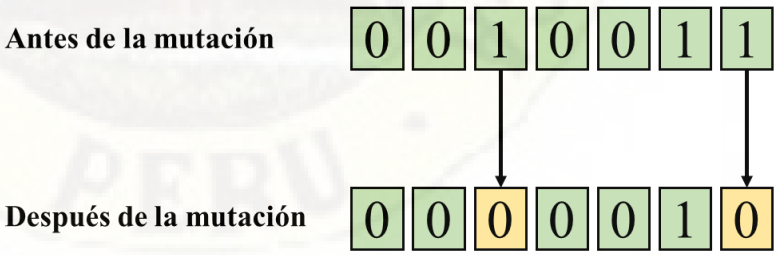
Es posible la adición de más puntos de cruce. Sin embargo, el problema principal es que posiblemente se pierdan las características de bondad que poseían conjuntamente. Aun así, añadiendo más puntos de cruce se consigue que el espacio de búsqueda del problema sea explorado más a fondo (Gestal, 2013).

Mutación

Se aplica el operador genético de mutación para mejorar la diversidad de la población generada del operador genético de cruzamiento a la nueva población a explorar. La diversidad es uno de los principios de evolución que mejoran el algoritmo para encontrar mejores soluciones finales. Se utiliza un punto o puntos de mutación aleatorios con una probabilidad de realización (Memari et al., 2016).

Generalmente, el proceso de mutación se realiza después del operador de cruce. Este operador modificara aleatoriamente a uno o más genes para la siguiente generación. La utilización sólo del operador de cruce para generar una descendencia para la siguiente generación, hace que las soluciones se queden atascadas en un óptimo local. Este operador se utiliza para evitar este problema y fomentar la diversidad en las soluciones (Hassanat et al., 2019). Es muy utilizado en la codificación binaria, en donde uno o más bits al azar puede ser reemplazados.

Figura 10: *Operador de mutación*



Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.6 Ordenamiento no dominado

La clasificación de la población R_t en diferentes frentes de Pareto es llamado ordenamiento no dominado. Este proceso verifica la dominancia entre la población padre y la población descendiente.

Para identificar las soluciones del primer frente no dominado cada solución se debe comparar con las demás para ver si ésta ejerce dominancia

Según Prasad y Park (2004) si un problema tiene más de una función objetivo, cualquiera de las dos soluciones p y q puede tener una de dos posibilidades: una domina a la otra, o ninguna dominar a la otra. Se dice que una solución p domina a la otra solución q si se cumple las siguientes condiciones:

- La solución p es mejor que q en todos los objetivos.
- La solución p es estrictamente mejor que q en al menos un objetivo.

Si p domina a q entonces se dice que p es una solución no dominada.

El pseudocódigo para el ordenamiento no dominado es:

Figura 11: *Pseudocódigo de ordenamiento no dominado*

```
fast-non-dominated-sort(P)
for each p ∈ P
   S_p = ∅
   n_p = 0
   for each q ∈ P
      if (p ≺ q) then
         S_p = S_p ∪ {q}
      else if (q ≺ p) then
         n_p = n_p + 1
   if n_p = 0 then
      p_rank = 1
      F_1 = F_1 ∪ {p}
i = 1
while F_i ≠ ∅
   Q = ∅
   for each p ∈ F_i
      for each q ∈ S_p
         n_q = n_q − 1
         if n_q = 0 then
            q_rank = i + 1
            Q = Q ∪ {q}
   i = i + 1
   F_i = Q
```

Fuente: A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, Deb et al. (2002).

En primer lugar, cada solución posee dos parámetros:

1. n_p : número de soluciones que dominan a la solución p
2. S_p : conjunto de soluciones que p domina

Se evalúa la solución p con cada solución q para determinar sus parámetros n_p y S_p, si el valor de n_p es igual a 0 entonces la solución p forma parte del primer frente no dominado. Este proceso se realiza hasta obtener los valores de n_p y S_p de todas las soluciones.

Cada evaluación de p con n_p = 0 se evalúa con cada miembro del conjunto S_p de q y reduce su cuenta de dominación en 1. Si para cualquier miembro el conteo de dominación llegase a 0, se le coloca en una lista Q. Estos miembros conforman el segundo frente no dominado. El procedimiento continúa con cada miembro de Q y se identifican los demás frentes sucesivamente.

Un frente no dominado puede estar conformado por una, dos a más soluciones no dominadas, mostrándose en las primeras generaciones del algoritmo que los primeros frentes tienen un conjunto reducido de soluciones no dominadas; sin embargo, cuando el proceso va tomando un mayor número de generaciones los primeros frentes van incrementando su conjunto.

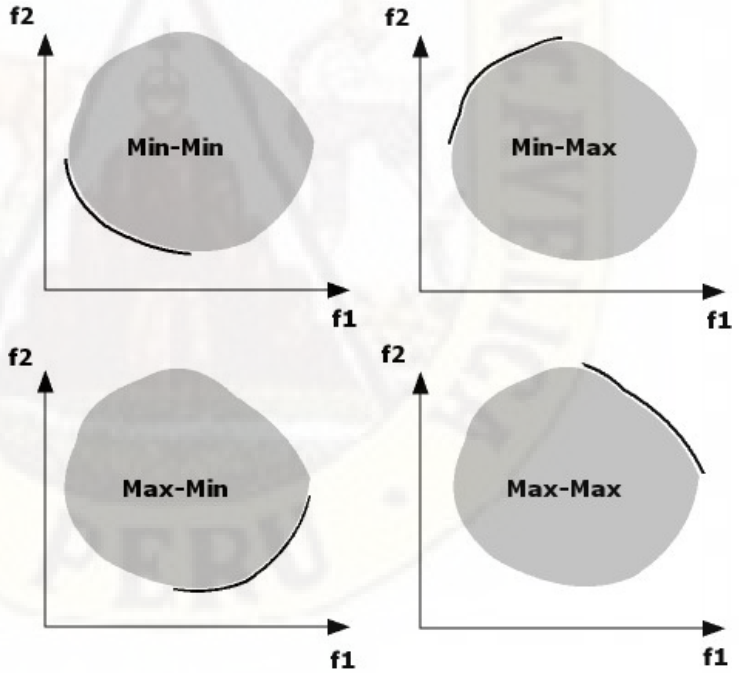
2.2.2.7 Frente de Pareto

Para Correa et al. (2008) cuando se realiza el criterio de dominancia entre dos soluciones y se detecta que la primera condición de dominancia no se cumple para ninguna de las dos soluciones, entonces no se puede concluir respecto a la dominancia de una sobre otra. Por lo tanto, se puede afirmar que ambas soluciones son no dominadas. En tal sentido, si se realiza

una comparación de todos los pares posibles de soluciones, al final se obtendrá un conjunto de soluciones que son no dominadas entre sí, el cual tendrá la propiedad de dominar al resto de soluciones las cuales no pertenezcan a dicho conjunto. Si se tiene un conjunto de soluciones P, el conjunto de soluciones P' lo conforman aquellas que no son dominadas por ningún elemento del conjunto P. Este conjunto es denominado como frente de Pareto.

Para un escenario con dos funciones objetivos el óptimo de Pareto estará conformado por las soluciones ubicadas al borde de la región de espacio de soluciones.

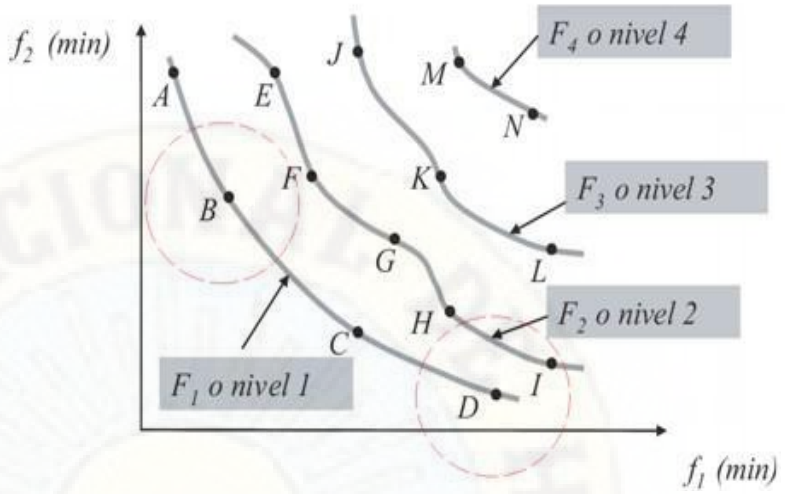
Figura 12: *Frentes Óptimos de Pareto para el mismo espacio de soluciones*



Fuente: Algoritmo multiobjetivo NSGA-II aplicado al problema de la mochila, Correa et al. (2008).

Para el caso en el que se busque minimizar ambas funciones objetivo, el frente F_1 o nivel 1 se denomina Frente Óptimo de Pareto, mientras que los otros frentes (F_2, F_3, etc.) son llamados Frentes No Óptimos.

Figura 13: *Frente Óptimo de Pareto y Frentes No Óptimos*



Fuente: Optimización Multiobjetivo, Escobar (2014).

2.2.2.8 Distancia de hacinamiento

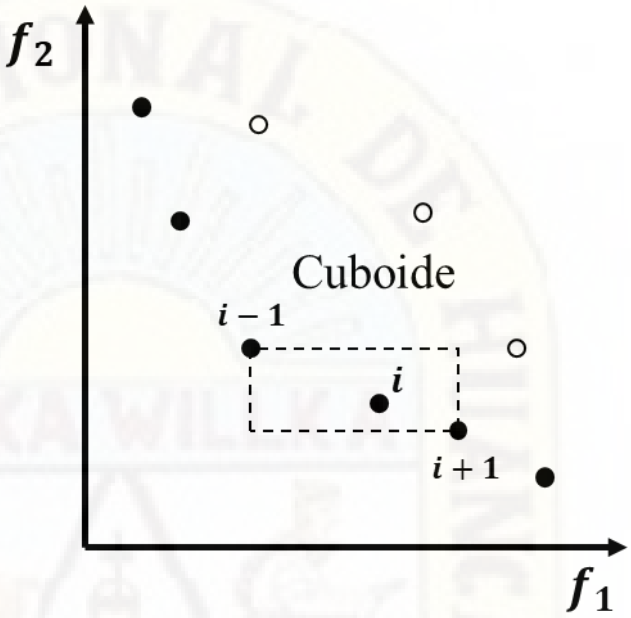
Peñuela y Granada (2007) manifiestan que los algoritmos genéticos multiobjetivo buscan el mayor número posible de soluciones que pertenezcan al frente de Pareto. Por lo que, es necesario que la población se mantenga diversa en la medida posible. La distancia de hacinamiento permite cuantificar el espacio alrededor de una alternativa que no se encuentre ocupada por ninguna otra solución. Esto asegura una mejor distribución de resultados en las siguientes generaciones, evitando la concentración de soluciones en zonas determinadas.

Estimación de densidad

La densidad de soluciones que rodean una solución particular en el conjunto de soluciones, se determina mediante la distancia promedio de dos puntos a cada lado de este punto a lo largo de cada uno de los objetivos. El valor obtenido permite estimar el perímetro del cuboide formado usando los vecinos más cercanos como los vértices. En la figura que se muestra a continuación, los círculos rellenos representan las soluciones de un mismo frente

no dominado, la distancia de hacinamiento de la solución i, es la longitud lateral promedio del cuboide.

Figura 14: *Cálculo de la distancia de hacinamiento*



Fuente: A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, Deb et al. (2002).

Operador de hacinamiento

El pseudocódigo que se muestra a continuación, describe el proceso de determinación de la distancia de hacinamiento para un conjunto de soluciones pertenecientes a un frente no dominado:

Figura 15: *Pseudocódigo de la distancia de hacinamiento*

```
crowding-distance-assignment(I)
l = |I|                                   Número de soluciones en I
for each i, set I[i]_distance = 0         Inicializar la distancia
for each objective m
  I = sort(I, m)                          Ordenar usando cada valor objetivo
  I[1]_distance = I[l]_distance = ∞       Para que los puntos límite siempre se seleccionen
  for i = 2 to (l − 1)                    Para todos los demás puntos
    I[i]_distance = I[i]_distance + (I[i+1].m − I[i−1].m)/(f_m^max − f_m^min)
```

Fuente: A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, Deb et al. (2002).

Según Deb et al. (2002), el cálculo de la distancia de hacinamiento, requiere clasificar el conjunto de soluciones de acuerdo con cada valor de función objetivo en orden ascendente.

Donde las soluciones con valores de función más pequeños y grandes tienen un valor de distancia de hacinamiento infinito. A todas las demás soluciones se les asigna el mismo valor de distancia de hacinamiento que se obtuvo inicialmente. El valor total de la distancia de hacinamiento es determinado como la suma de los valores de distancia individuales correspondiente a cada función objetivo. Estos valores individuales se obtienen con la siguiente ecuación:

$$d_i = \sum_{m=1}^{M} \left| \frac{f_m^{(I_{i+1}^m)} - f_m^{(I_{i-1}^m)}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \right|$$

Donde:

I^m: vector que indica la alternativa de solución vecina a la alternativa i.

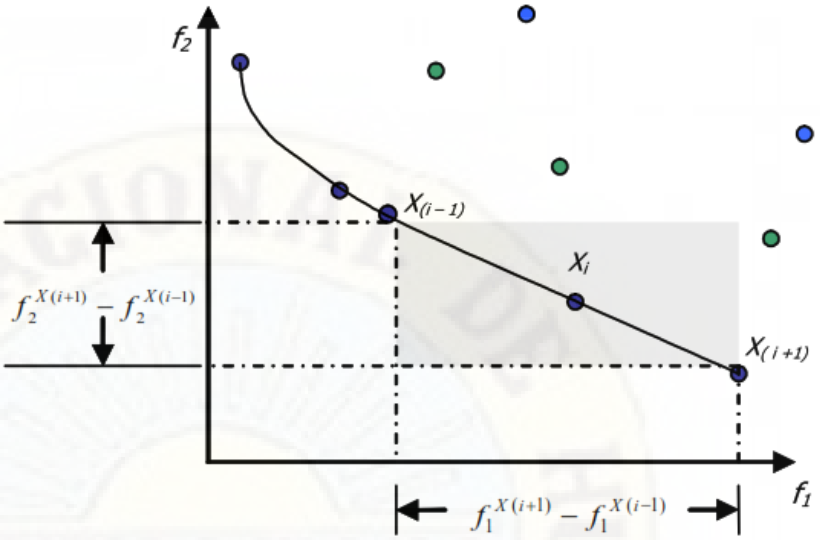
f_m^{max} : valores máximos sobre todo el espacio de solución de la función objetivo m.

f_m^{min}: valores mínimos sobre todo el espacio de solución de la función objetivo m.

M: número de funciones objetivo optimizadas.

Para el caso de optimización de dos funciones objetivo (f_1 y f_2), donde se desea evaluar la distancia de hacinamiento de una alternativa de solución X_i se muestra:

Figura 16: *Distancia de hacinamiento para la alternativa de selección Xi*



Fuente: Optimización multiobjetivo usando un algoritmo genético y un operador elitista basado en un ordenamiento no dominado (NSGA-II), Peñuela y Granada (2007).

Donde la distancia de hacinamiento está representada por:

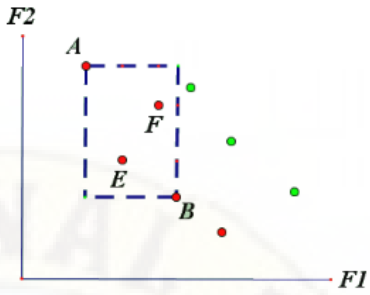
$$d_i = \left| \frac{f_1^{X(i+1)} - f_1^{X(i-1)}}{f_1^{max} - f_1^{min}} \right| + \left| \frac{f_2^{X(i+1)} - f_2^{X(i-1)}}{f_2^{max} - f_2^{min}} \right|$$

Por lo tanto, para un conjunto de soluciones en competencia, la alternativa que introduce mayor nivel de diversidad es la que tiene mayor distancia de hacinamiento.

2.2.2.9 Distancia de hacinamiento modificada

La distancia de hacinamiento tiene la ventaja de mejorar la distribución de soluciones y evitar la aglomeración de resultados. Sin embargo, la definición inicial puede llevar al hecho de que cualquier solución que se encuentre en el mismo cuboide tendrá la misma distancia de hacinamiento. Por ejemplo, en la figura 17 existen dos soluciones E y F dentro del cuboide delimitado por A y B; a simple vista, la solución E es mejor que la solución F, no obstante, ambas soluciones tienen la misma distancia de hacinamiento, lo que debe mejorarse en la definición inicial.

Figura 17: *Ilustración de la distancia de hacinamiento en la definición inicial*



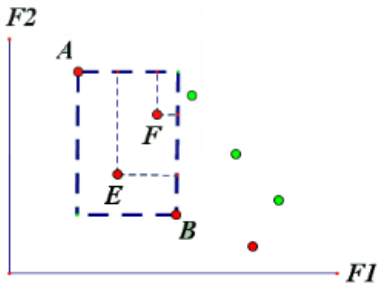
Fuente: Improved Crowding Distance for NSGA-II, Chu y Yu (2018).

Chu y Yu (2018) plantean una alternativa a la distancia de hacinamiento inicial, realizando una sola modificación en su ecuación. Esta nueva ecuación de define de la siguiente manera:

$$d_i = \sum_{m=1}^{M} \left| \frac{f_m^{(I_{i+1}^m)} - f_m^{(I_i^m)}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \right|$$

Comparado con la ecuación inicial, la nueva definición solamente convierte $f_m^{(I_{i-1}^m)}$ en $f_m^{(I_i^m)}$. Este cambio hereda todas las ventajas de la distancia de hacinamiento inicial, como la no utilización de parámetros, buena característica de distribución, etc. Si usamos el ejemplo anterior, la distancia de hacinamiento de la solución F es el pequeño rectángulo. En la nueva definición, ya sea que una solución se encuentre en el punto E o F hace la diferencia, la primera tendrá alta prioridad para ser seleccionado, lo que compensaría la desventaja de la ecuación inicial.

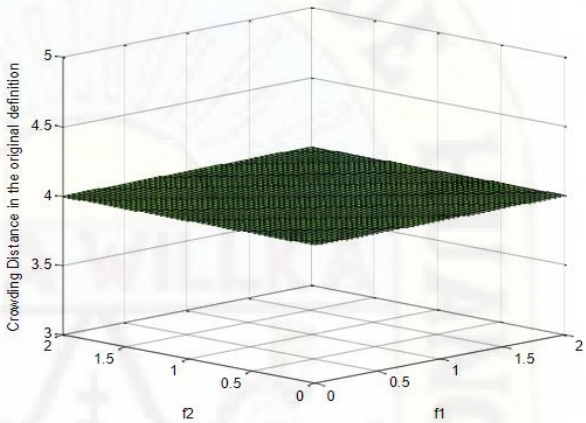
Figura 18: *Ilustración sobre la distancia de hacinamiento mejorada*



Fuente: Improved Crowding Distance for NSGA-II, Chu y Yu (2018).

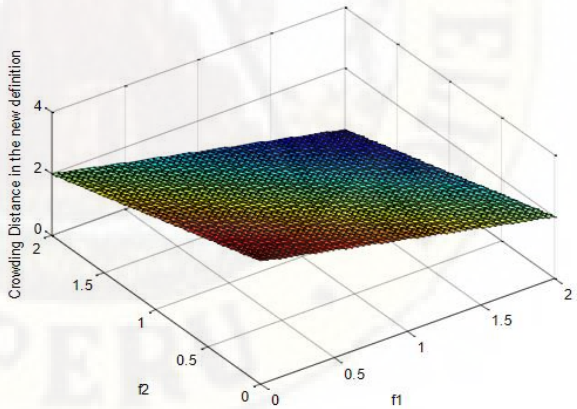
En la definición inicial, la distancia de hacinamiento en cualquier punto dentro del cuboide tiene el mismo valor, es decir, el conjunto de distancias del cuboide formaría un plano. por otra parte, la nueva definición es diferente, las distancias dentro del cuboide forman una pendiente.

Figura 19: *Distancia de hacinamiento en la definición inicial*



Fuente: Improved Crowding Distance for NSGA-II, Chu y Yu (2018).

Figura 20: *Distancia de hacinamiento en la definición mejorada*



Fuente: Improved Crowding Distance for NSGA-II, Chu y Yu (2018).

Finalmente, se demuestra que la distancia de hacinamiento modificada mejora el rendimiento de convergencia al tiempo que mantienen características de distribución similares, también hereda otras buenas propiedades de NSGA-II, como aplicación universal y la no utilización de parámetros, entre otros.

2.3 Hipótesis

2.3.1 Hipótesis general

- El algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye favorablemente en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable.

2.3.2 Hipótesis específicas

- El algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye favorablemente en el costo de redes de distribución de agua potable.
- El algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye favorablemente en la confiabilidad de redes de distribución de agua potable.

2.4 Definición de términos

- *Algoritmo:* Operaciones de cálculo que sirven para resolver un tipo de problema.
- *Clasificación:* Distribución sistemática en diversas categorías, basado en criterios precisos.
- *Confiabilidad:* Ausencia de errores a lo largo de procesos sucesivos.
- *Costo:* Gasto económico que representa la fabricación de un producto o la prestación de un servicio.
- *Cruzamiento:* Introducción de material genético no relacionado en una línea de reproducción.
- *Diseño óptimo:* Determinación de valores de las variables que intervienen en un proceso para que el resultado sea el mejor posible.
- *Dominado:* Que es sometido por una cosa de una mejor posición.
- *Genético:* Relacionado al proceso en el cual un padre transmite ciertos genes a sus hijos.

- *Mutación:* Cambio en la secuencia del genotipo.
- *Operadores genéticos:* Funciones empleadas para mantener la diversidad genética de una población.
- *Ordenamiento:* Manera de colocar las cosas según un determinado criterio o norma.
- *Población:* Conjunto de habitantes que comparten características similares.
- *Rendimiento:* Utilidad de algo en la realización de una actividad.
- *Red de distribución de agua potable:* Sistema compuesto por tuberías, válvulas, etc. Con el fin de conducir el agua hacia un usuario.
- *Selección:* Mecanismo evolutivo que define la reproducción de genotipos.

2.5 Variables

2.5.1 Variable independiente

Algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada

Es un algoritmo genético de optimización multiobjetivo, en la que la Población Inicial (Población Padre) mediante Operadores Genéticos de Selección, Cruzamiento y Mutación dan origen a una Población Descendiente, después ambas poblaciones son combinadas para que luego de un Ordenamiento No Dominado se clasifiquen en diferentes Frentes. La nueva Población Padre se genera a partir de los mejores frentes no dominados.

2.5.1.1 Dimensiones

- Población
- Ordenamiento no dominado
- Operadores genéticos

2.5.2 Variable dependiente

Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable

El diseño óptimo de una red consiste en escoger los diámetros de las tuberías de tal manera que su costo sea mínimo. También se debe tener en cuenta la resiliencia de la red con la finalidad de evaluar la vulnerabilidad frente a eventuales daños.

2.5.2.1 Dimensiones

- Costo
- Confiabilidad

2.6 Operacionalización de variables

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	SUBINDICADORES
Variable independiente: Algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada.	Población	Tamaño de la población	Diámetros comerciales disponibles
			Número de genes
		Población inicial	Aleatoria
			No aleatoria
	Ordenamiento no dominado	Dominancia	Niveles de dominancia
			Frentes de Pareto
		Distancia de hacinamiento	Rango de dominancia
			Perímetro del cuboide formado por soluciones vecinas
	Operadores genéticos	Selección	Por torneo
			Pares de cromosomas
		Cruzamiento	Probabilidad de cruce
			Punto de cruce
		Mutación	Probabilidad de mutación
			Punto de mutación
VARIABLES	**DIMENSIONES**	**INDICADORES**	**SUBINDICADORES**
Variable dependiente: Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable	Costo	Índice de costo	Número de tuberías de la red
			Longitud entre nudos de la red
			Costo de tuberías por metro lineal
	Confiabilidad	Índice de resiliencia	Coeficiente de conectividad
			Caudal de demanda en los nudos
			Altura piezométrica ideal en los nudos
			Caudal suministrado por los reservorios

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ámbito de estudio

El ámbito de estudio se desarrolló en los sectores 3 y 5 de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica, provincia de Huancavelica, ubicada en el departamento de Huancavelica.

3.2 Tipo y nivel de investigación

3.2.1 Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, porque se plantean problemas concretos que demandan soluciones inmediatas. Tiene como objeto de estudio un problema establecido que está destinado a la acción ya que dirige su atención en las posibilidades concretas de llevar a la práctica los conocimientos de las teorías generales para resolver un problema determinado de la sociedad (Baena, 2017). La investigación se centra en los lineamientos del tipo aplicada, ya que se basa en el estudio de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica y su servicio a la población, pues presenta de manera recurrente cortes y restricciones en distintas zonas. Es un problema que se ha arrastrado durante años, el cual inminentemente requiere intervención a través de

diseños adecuados por ser el agua un recurso indispensable en la vida diaria de los habitantes.

Es aplicada, ya que está encaminada a resolver de manera objetiva los problemas de producción, distribución, circulación y consumos de bienes o servicios de las actividades humanas de tipo industrial, infraestructural, comercial, comunicacional, etc. (Ñaupas et al., 2014).

3.2.2 Nivel de investigación

La investigación es de nivel explicativo, porque pretende establecer las causas de los fenómenos que se estudian; es decir, está orientado a explicar por qué ocurre un suceso y en qué condiciones se manifiesta (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). La tesis, trata de explicar que, con el empleo de algoritmos genéticos se obtienen diseños optimizados de redes de distribución de agua potable evaluando la función objetivo de costo y la función objetivo de confiabilidad resiliente simultáneamente.

Es de nivel explicativo, ya que no sólo se trata de describir un fenómeno, sino de establecer una relación de causa- efecto entre conceptos, este nivel está llamado a responder a las causas de los eventos, sucesos o fenómenos (Cabezas et al., 2018).

3.3 Método de investigación

3.3.1 Método general

El método científico es un proceso para descubrir las condiciones en las cuales se presenta un fenómeno. Es un conjunto de pasos que permiten plantear problemas para descubrir nuevos conocimientos a través de la aplicación de la lógica (Tamayo, 2003). El método científico no es un procedimiento formal para realizar un descubrimiento, más aún es una filosofía que proporciona una alineación según la cual se puede llegar a

deducir conceptos generales de las impresiones que el hombre percibe del mundo exterior y que permite hallar mejores soluciones a los problemas.

El método general de la investigación es el método científico ya que es un proceso que se produce en el tiempo e impone un orden a las actividades realizadas por los investigadores y también a los conocimientos que se obtienen, además que orienta la investigación mediante una secuencia de pasos hacia un fin determinado.

3.3.2 Método específico

El método específico de la investigación es el método experimental, debido a que el conocimiento teórico del problema dirige a los investigadores a formular hipótesis que a través de su contrastación permitan determinar la relación causal entre la variable independiente algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada y la variable dependiente diseño óptimo de redes de distribución de agua potable.

El método experimental no sólo se basa en la descripción de un fenómeno, sino las causas que lo originan; sin embargo, para determinar estas causas es necesario aislar la variable independiente y analizar su influencia respecto a la variable dependiente. Se deberá manipular o modificar la variable independiente para determinar si se da un cambio en la variable dependiente (Hernández et al., 2018).

3.4 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es preexperimental, ya que, a un grupo previamente se aplica una prueba y posteriormente se aplica una prueba al estímulo. La ventaja de este diseño es que posee un punto de referencia inicial para para ver el nivel de la variable dependiente antes del estímulo (Hernández, Fernandez y Baptista, 2014).

Para este diseño se requiere un grupo, Grupo Experimental (GE). El GE es aquel al que se aplicará el tratamiento o estímulo. Se aplica la variable independiente al grupo experimental, luego se evalúa a ambos grupos sobre la variable dependiente.

Se puede contrastar así, si hay alguna diferencia en los grupos después de aplicarse el estímulo.

GE: O1 X O2

Donde:

GE: Grupo Experimental

O1: Pre Test

O2: Post Test

X: Manipulación de la variable independiente

3.5 Población y muestra

3.5.1 Población

De acuerdo con Lerma (2016), la población es un conjunto conformado por elementos o unidades de análisis de la misma especie que comparten características similares o pertenecen a un mismo ámbito espacial.

Para la presente investigación, la población son las redes de distribución de agua potable.

3.5.2 Muestra

Según Cruz et al. (2014) la muestra es un subconjunto de la población donde se lleva a cabo la investigación. Normalmente, investigar a toda una población requiere gran cantidad de tiempo además de tener un alto costo, por lo que, se debe tener identificada a la población y a sus miembros para conformar la muestra y así generalizar posteriormente los resultados a toda la población.

En la presente investigación, se tomó como muestra a la red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica.

3.5.3 Muestreo

El muestreo de la investigación es no probabilístico, debido a que la selección de las unidades de análisis depende de la decisión de los investigadores (Ríos, 2017).

3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1 Técnicas

- Observación de campo
- Entrevista
- Análisis documental

3.6.2 Instrumentos

- Cámara fotográfica
- Cuaderno de campo
- Ficha de registro de datos
- Computadora con procesador Intel® Core™ i5 con 8.00 GB de RAM
- Herramientas de diseño asistido por computador AutoCAD Civil 3D.

- Hojas de cálculo

3.7 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.7.1 Toolkit de Epanet

El análisis de redes de distribución de agua son trabajos muy complejos por los diversos elementos que componen su sistema. Por ese motivo, en los últimos años se han desarrollado diversos programas, ya sean comerciales o de libre acceso que permiten conocer las características hidráulicas y realizar un seguimiento de la calidad del agua en los mismos. Uno de los programas más conocidos es EPANET (Rossman, 2000), un programa de acceso libre desarrollado por el Laboratorio Nacional de Investigación para la Prevención de Riegos (NRMRL) de la Agencia de Protección del Medio Ambiente Americana (EPA).

Los requerimientos técnicos y operativos en la operación y gestión de las redes de distribución de agua han aumentado notablemente, por ese motivo, cada problema particular requiere del empleo de nuevas herramientas específicas. Para el desarrollo de estos trabajos, EPA facilitó una caja de herramientas (Toolkit de EPANET) que permite a los usuarios desarrollar aplicaciones que requieran de la simulación hidráulica de una red de distribución de agua, y se pueda ejecutar rápidamente desde un entorno de programación cualquiera (Matlab, Visual Basic, Python, etc.).

La caja de herramientas (Toolkit del software EPANET 2.0) es una librería con extensión .dll constituida por una serie de funciones que facilitan a los programadores configurar el módulo de cálculo de EPANET según sus necesidades. Esta caja de herramientas está escrita en el lenguaje de programación ANSI C, y cuenta con funciones separadas para el análisis hidráulico, calidad de agua y generación de informes.

Para la investigación, el ingreso de datos se da mediante un fichero de entrada externo con extensión .INP. El contenido del fichero cuenta con las características topológicas e hidráulicas de la red de distribución de agua.

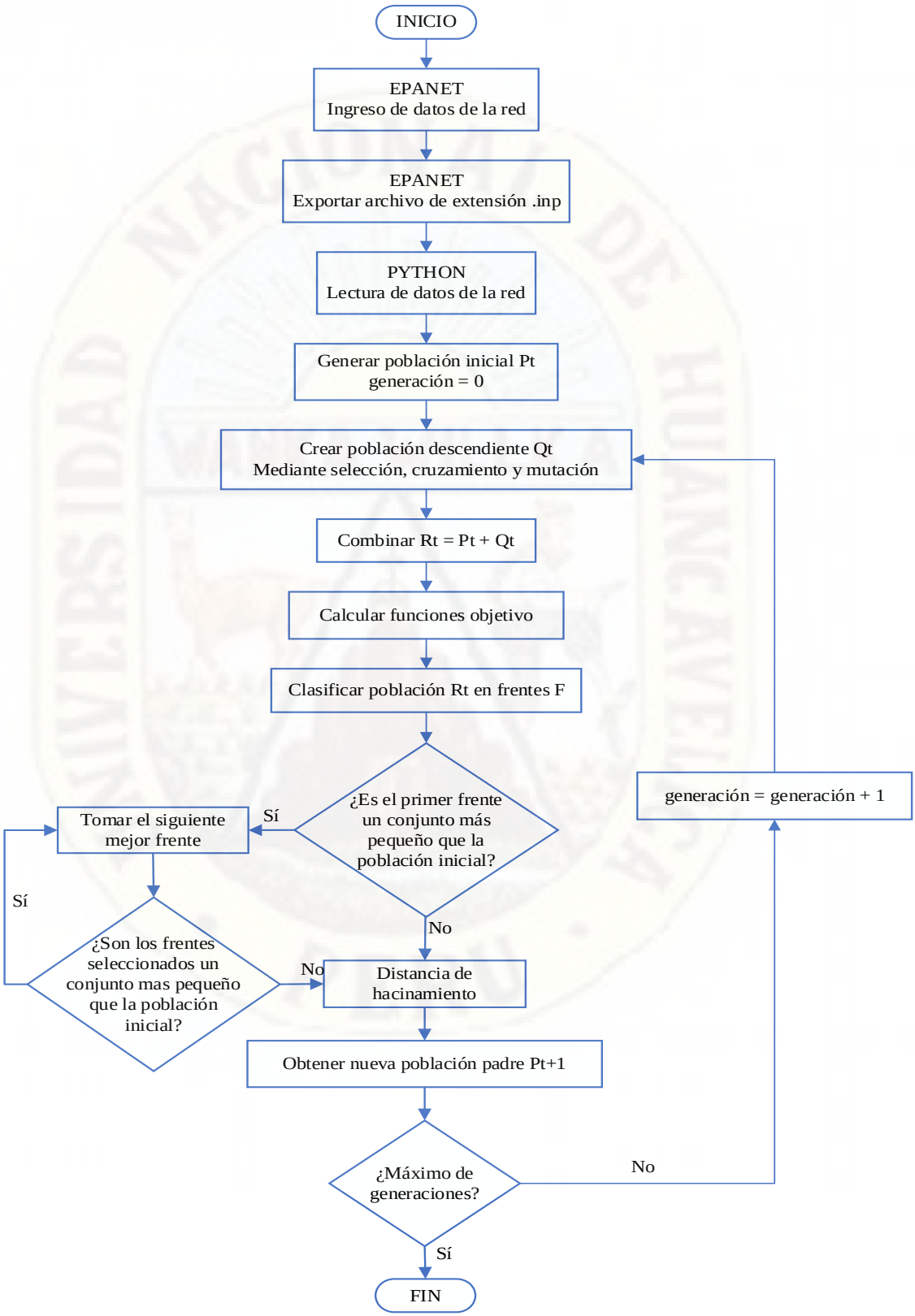
3.7.2 Programación en el lenguaje Python

Python es un lenguaje de programación interpretado multiplataforma de código abierto, gratuito, que facilita trabajar con Inteligencia Artificial entre otros campos de la actualidad.

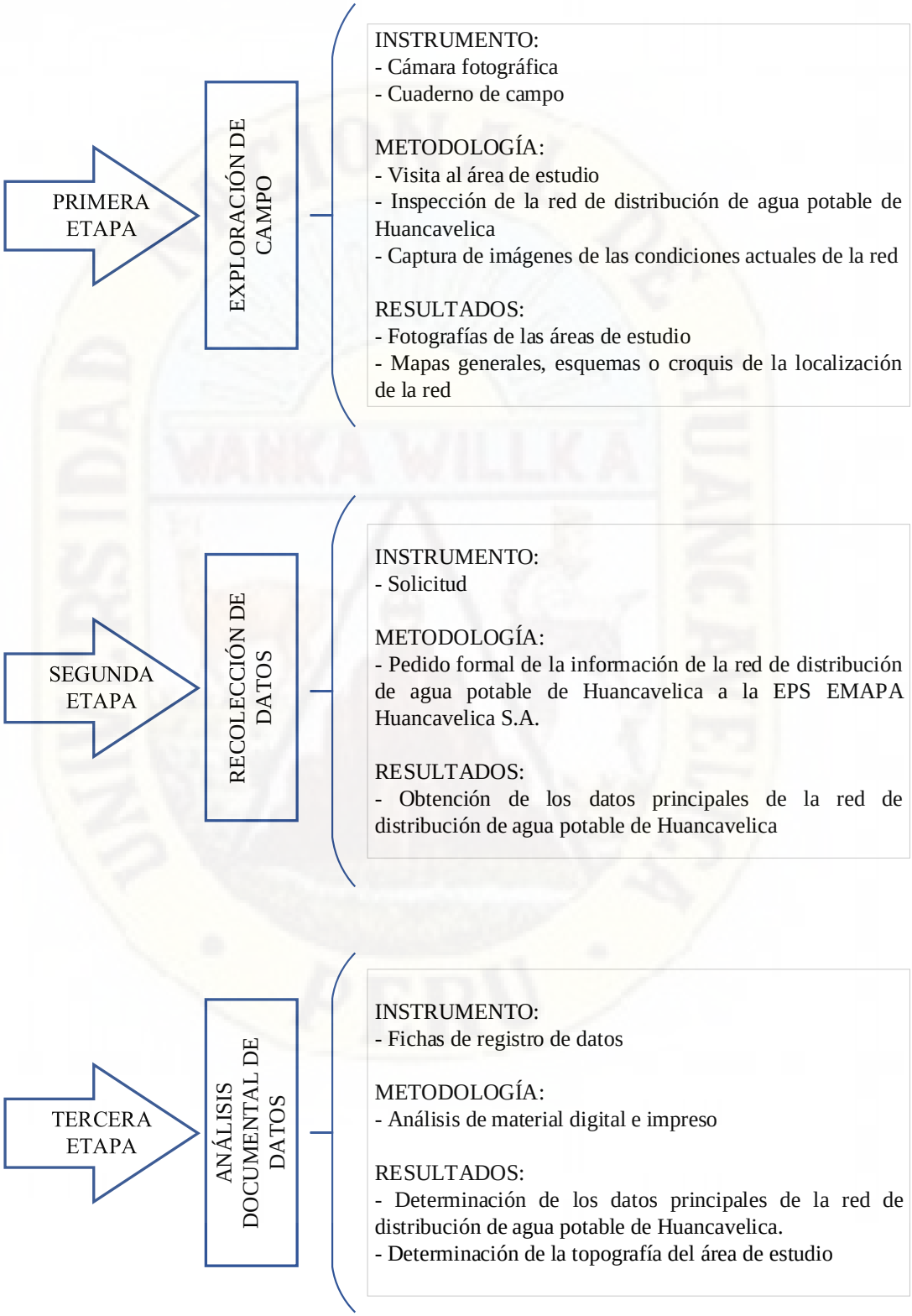
La programación se realizó en la versión Python 3.7 y en el editor de código IDE PyCharm 2021.3.2 en el que se utilizó las siguientes librerías elaboradas por terceros:

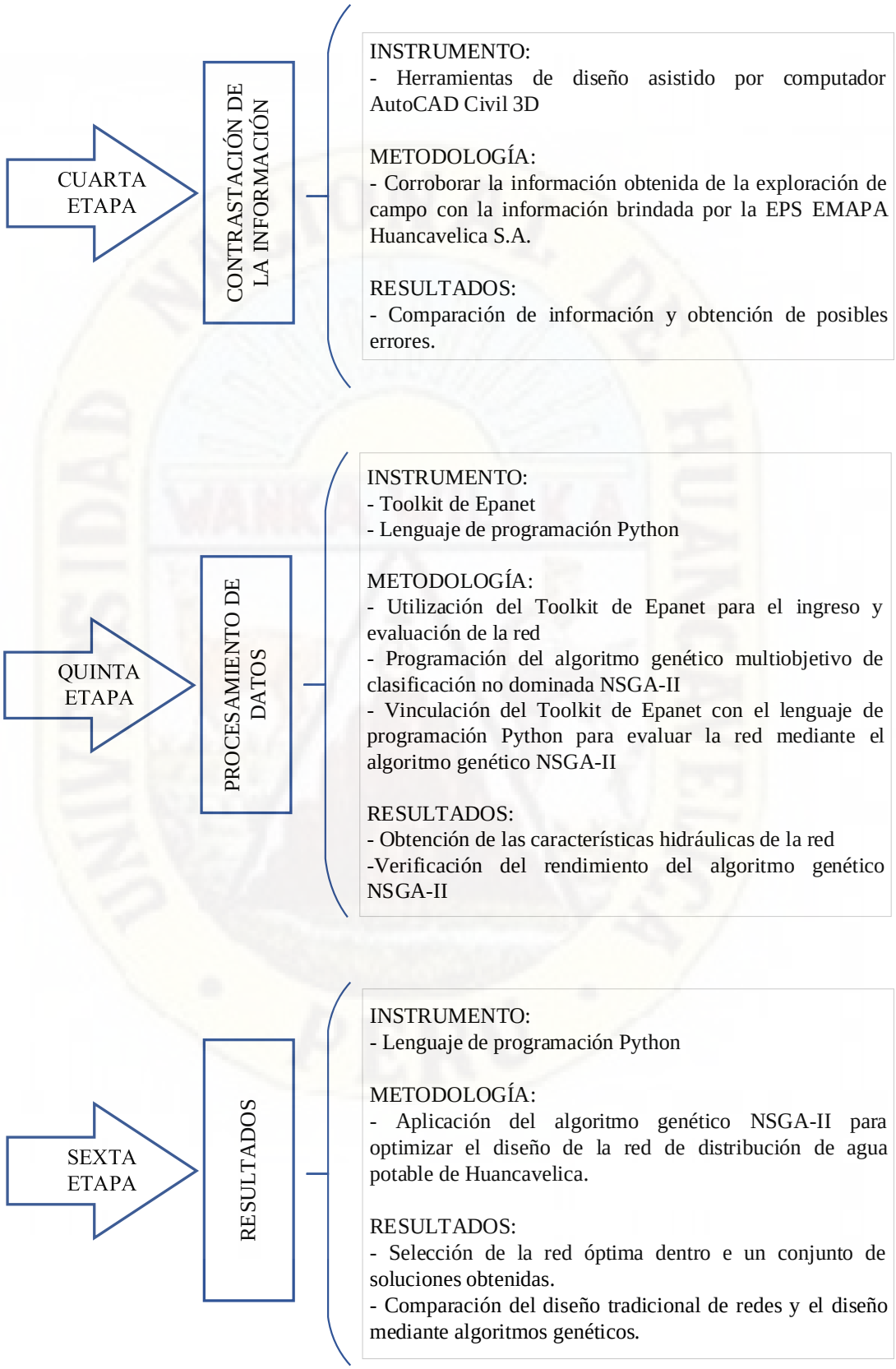
- Epanettools: Es un paquete que permite utilizar las funciones del Toolkit del software Epanet 2.0 dentro de los comandos de Python.
- Openpyxl: Es una librería para leer-escribir archivos xlsx, xlsm, xltm de Excel.
- PyQt5: Es un módulo para Qt (bibliotecas C++) utilizado para la creación de aplicaciones con interfaz gráfica en Python.
- PyQtGraph: Es una biblioteca de interfaz de usuario y gráficos para Python, que proporciona gráficos rápidos e interactivos para mostrar datos.

3.7.3 Diagrama de flujo



3.8 Esquema metodológico




CUARTA ETAPA
CONTRASTACIÓN DE LA INFORMACIÓN
INSTRUMENTO:
- Herramientas de diseño asistido por computador AutoCAD Civil 3D
METODOLOGÍA:
- Corroborar la información obtenida de la exploración de campo con la información brindada por la EPS EMAPA Huancavelica S.A.
RESULTADOS:
- Comparación de información y obtención de posibles errores.
QUINTA ETAPA
PROCESAMIENTO DE DATOS
INSTRUMENTO:
- Toolkit de Epanet
- Lenguaje de programación Python
METODOLOGÍA:
- Utilización del Toolkit de Epanet para el ingreso y evaluación de la red
- Programación del algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada NSGA-II
- Vinculación del Toolkit de Epanet con el lenguaje de programación Python para evaluar la red mediante el algoritmo genético NSGA-II
RESULTADOS:
- Obtención de las características hidráulicas de la red
-Verificación del rendimiento del algoritmo genético NSGA-II
SEXTA ETAPA
RESULTADOS
INSTRUMENTO:
- Lenguaje de programación Python
METODOLOGÍA:
- Aplicación del algoritmo genético NSGA-II para optimizar el diseño de la red de distribución de agua potable de Huancavelica.
RESULTADOS:
- Selección de la red óptima dentro e un conjunto de soluciones obtenidas.
- Comparación del diseño tradicional de redes y el diseño mediante algoritmos genéticos.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Validación del algoritmo genético

4.1.1 Red de Hanoi

Dentro de la literatura científica sobre redes de distribución de agua potable, existen diversas redes patrón las cuales se utilizan para comprobar los distintos métodos de diseño; una de las más populares es la red de Hanoi, presentada por Fujiwara y Khang en el año 1990, considerada una red estándar a nivel mundial con el propósito de verificación de código implementado de algoritmos para el diseño de redes de distribución de agua potable.

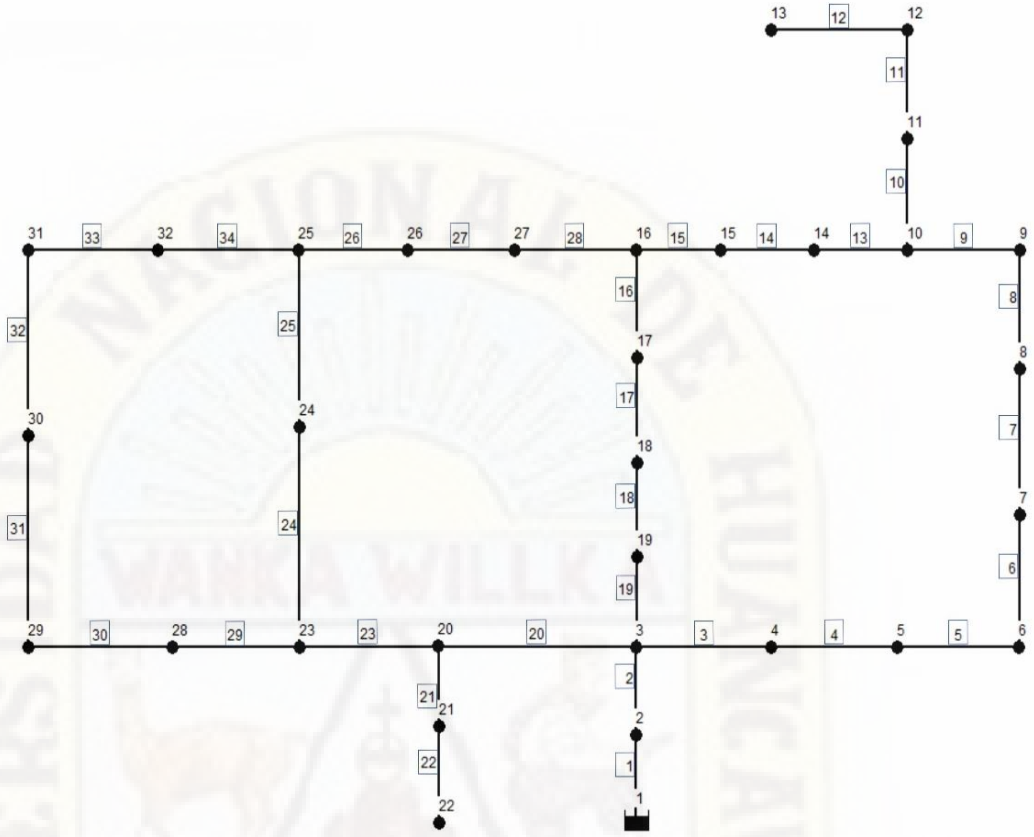
La red de Hanoi consta de 1 reservorio, 34 tuberías de conducción y 31 nudos de consumo, los cuales conforman 3 bucles y 2 terminaciones ramificadas. La disponibilidad de tuberías comerciales está restringida a 6, por lo tanto, el número de posibles combinaciones esta dado por:

$$NPC = (D_{com})^{NT} = 6^{34}$$

$$NPC = 2.862 \times 10^{26}$$

Los datos principales de la red de Hanoi se proporcionan a continuación:

Figura 21: *Modelo de la red de Hanoi*



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: *Datos de tuberías – red de Hanoi*

Tubería	Longitud (m)	Tubería	Longitud (m)	Tubería	Longitud (m)
1	100	13	800	25	1300
2	1350	14	500	26	850
3	900	15	550	27	300
4	1150	16	2730	28	750
5	1450	17	1750	29	1500
6	450	18	800	30	2000
7	850	19	400	31	1600
8	850	20	2200	32	150
9	800	21	1500	33	860
10	950	22	500	34	950
11	1200	23	2650		
12	3500	24	1230		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3: *Datos de nudos – red de Hanoi*

Nudo	Cota (m)	Demanda (L/s)	Nudo	Cota (m)	Demanda (L/s)	Nudo	Cota (m)	Demanda (L/s)
1	100	5538.89	12	0	155.56	23	0	290.28
2	0	247.22	13	0	261.11	24	0	227.78
3	0	236.11	14	0	170.83	25	0	47.22
4	0	36.11	15	0	77.78	26	0	250.00
5	0	201.39	16	0	86.11	27	0	102.78
6	0	279.17	17	0	240.28	28	0	80.56
7	0	375.00	18	0	373.61	29	0	100.00
8	0	152.78	19	0	16.67	30	0	100.00
9	0	145.83	20	0	354.17	31	0	29.17
10	0	145.83	21	0	258.33	32	0	223.61
11	0	138.89	22	0	134.72			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4: *Diámetros comerciales disponibles – red de Hanoi*

Diámetro (pulg)	Diámetro (mm)	Costo ($)
12	304.8	45.73
16	406.4	70.40
20	508	98.39
24	609.6	129.33
30	762	180.74
40	1016	278.28

Fuente: Elaboración propia.

Se realizarán modificaciones para el diseño de la red de Hanoi, las cuales son las siguientes:

- Se emplearán las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White en lugar de la ecuación de Hazen y Williams. Se considerará el valor de la viscosidad cinemática 1.14 x 10^{-6} m^2/s y rugosidad absoluta 0.0015 mm.

- Se considerará la presión mínima requerida en los nudos de 10 m.c.a. según lo establecido en la norma OS.050.
- No se considerará pérdidas menores en las tuberías.

Los parámetros para el empleo del algoritmo genético NSGA-II son:

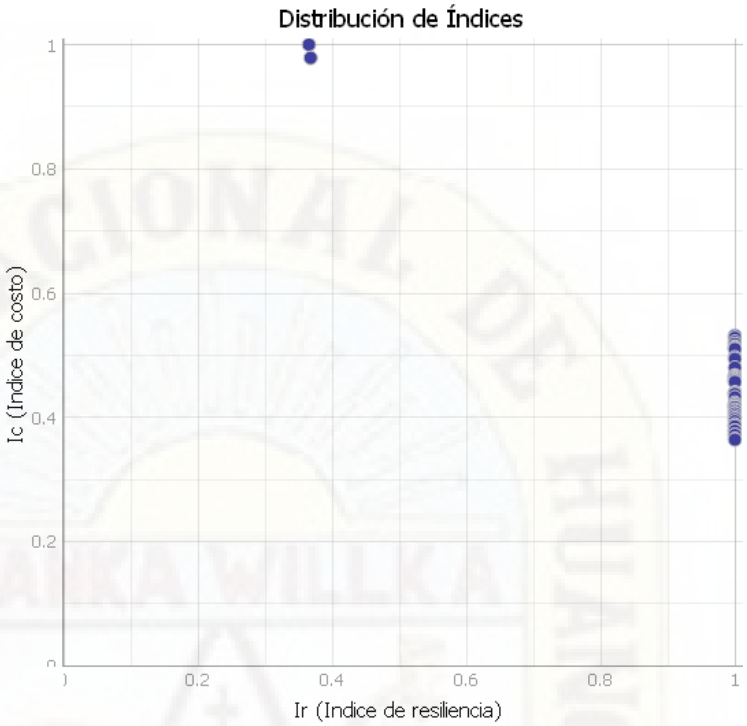
- Número de generaciones: 500
- Tamaño de la población: 50 (tendrá como datos de ingreso además de los pobladores aleatorios, a un poblador constituido por los mayores diámetros disponibles y otro con los menores diámetros disponibles)
- Probabilidad de cruzamiento: 35%
- Probabilidad de mutación: 5%

4.1.2 Simulación de la red de Hanoi

En primer lugar, se realiza el modelamiento de la red de Hanoi en el software Epanet 2.0 para luego exportarlo en un fichero llamado *Red_Hanoi.inp* el cual contiene sus características hidráulicas y topológicas. Después se procede a ejecutar el código el cual utiliza dicho fichero para su lectura y extracción de datos que serán utilizados durante cada generación. Seguidamente obtendremos gráficos de la distribución de índices de todas las generaciones y tablas de datos que contienen los índices de resiliencia, índices de costo, número de incumplimientos y costo total de las redes. Finalmente, se crea un archivo llamado *Resultados.xls* en el que se encuentra información sobre presiones en los nudos y velocidades en las tuberías de cada poblador de la última generación para facilitar la selección final entre el conjunto de soluciones.

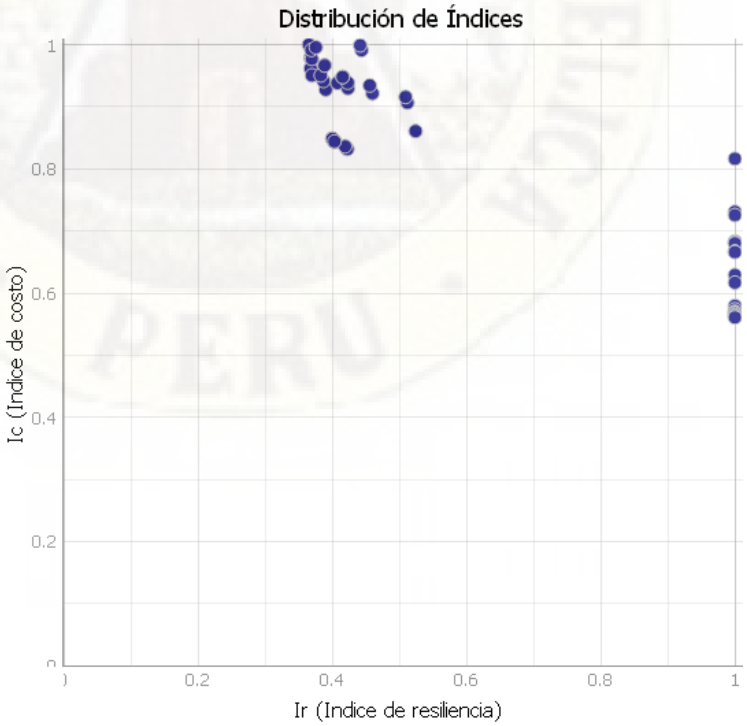
El tiempo promedio del procesamiento para los parámetros establecidos fue de 40 segundos, obteniéndose resultados satisfactorios como se aprecia en el siguiente historial de generaciones:

Figura 22: *Generación 1 – red de Hanoi*



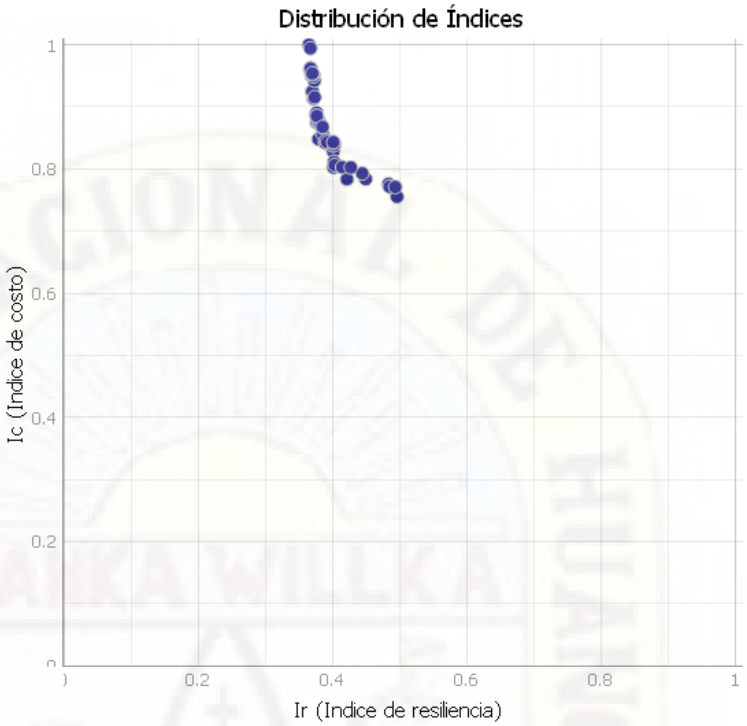
Fuente: Elaboración propia.

Figura 23: *Generación 5 – red de Hanoi*



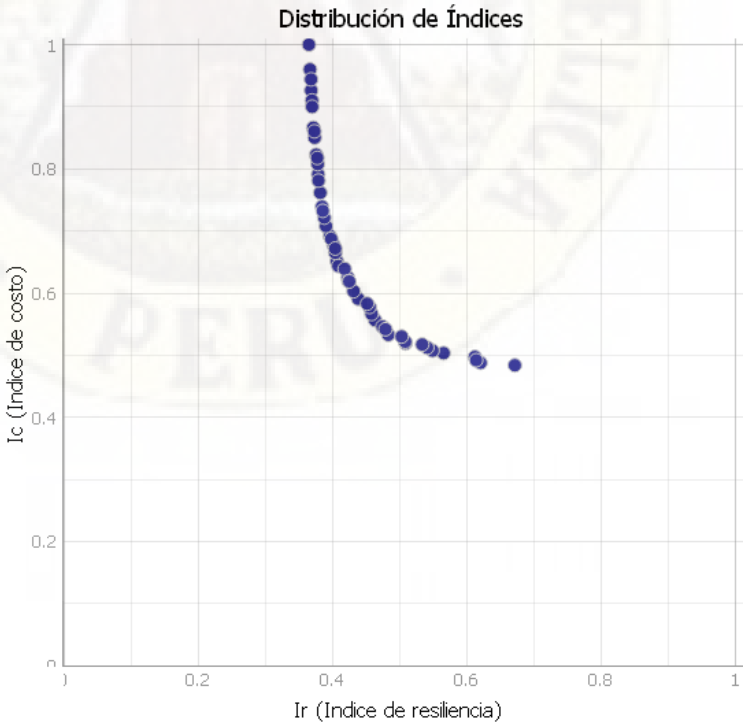
Fuente: Elaboración propia.

Figura 24: *Generación 10 – red de Hanoi*



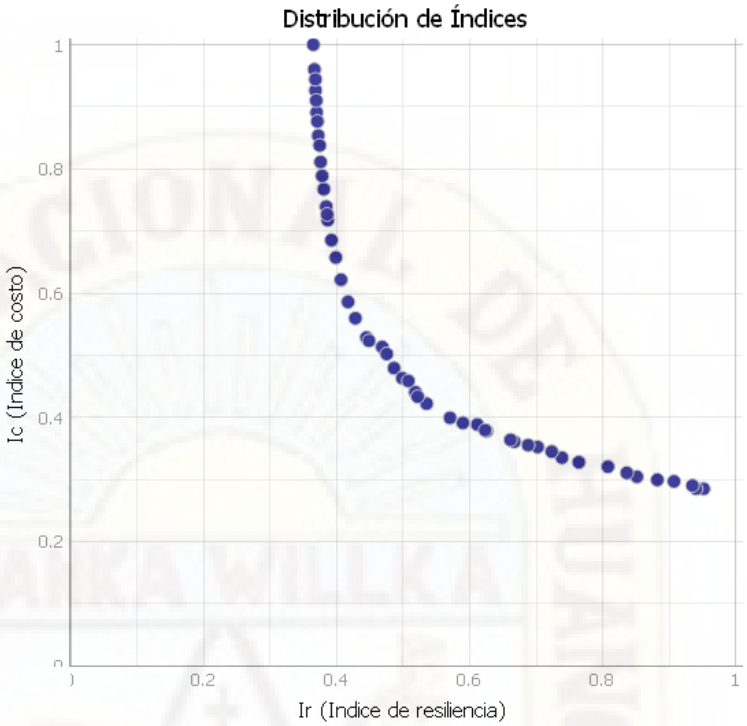
Fuente: Elaboración propia.

Figura 25: *Generación 50 – red de Hanoi*



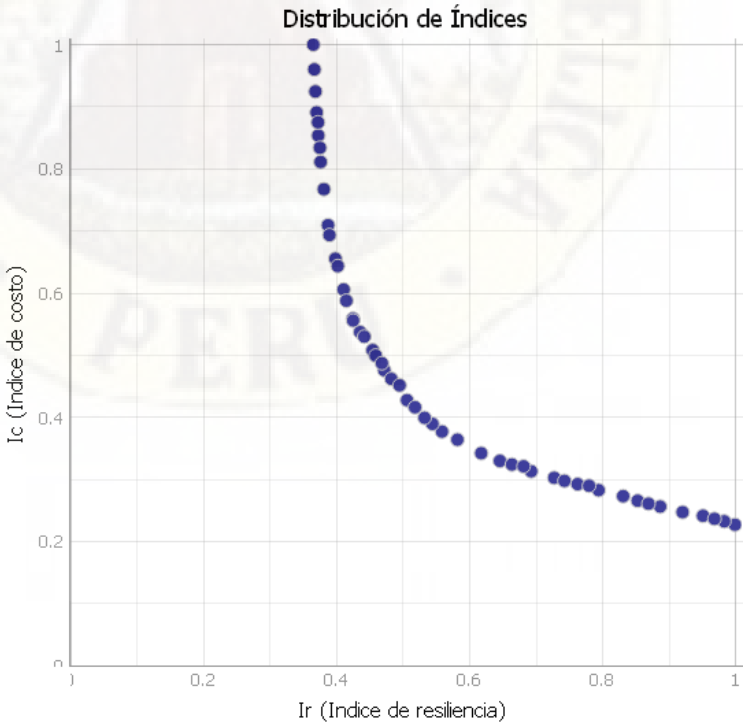
Fuente: Elaboración propia.

Figura 26: *Generación 100 – red de Hanoi*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 27: *Generación 500 – red de Hanoi*



Fuente: Elaboración propia.

Los datos de las soluciones obtenidas de la generación 500 (final) fueron las siguientes:

Tabla 5: *Soluciones de la generación 500 (final) – red de Hanoi*

Sol	Ir	Ic	Ninc	Costo	Sol	Ir	Ic	Ninc	Costo
1	0.37	1.00	20	$10,969,797.60	26	0.39	0.69	9	$8,159,400.00
2	1.00	0.23	38	$3,884,869.50	27	0.73	0.30	18	$4,576,645.10
3	0.39	0.71	10	$8,305,710.00	28	0.43	0.56	5	$6,926,324.70
4	0.79	0.28	22	$4,394,446.70	29	0.47	0.48	4	$6,164,064.80
5	0.38	0.77	13	$8,835,491.20	30	0.37	0.85	18	$9,628,219.20
6	0.92	0.25	34	$4,070,088.50	31	0.44	0.54	4	$6,727,137.70
7	0.89	0.26	31	$4,151,843.20	32	0.74	0.30	21	$4,531,385.60
8	0.40	0.66	7	$7,810,124.50	33	0.98	0.23	39	$3,933,852.00
9	0.37	0.96	20	$10,604,022.60	34	0.76	0.29	20	$4,482,982.60
10	0.69	0.31	13	$4,672,818.60	35	0.97	0.24	38	$3,971,908.20
11	0.56	0.38	4	$5,258,550.90	36	0.42	0.59	6	$7,190,509.20
12	0.62	0.34	5	$4,939,851.60	37	0.87	0.26	31	$4,194,489.70
13	0.37	0.92	18	$10,278,421.70	38	0.38	0.83	17	$9,448,284.20
14	0.37	0.89	18	$9,969,609.20	39	0.46	0.50	4	$6,381,740.50
15	0.83	0.27	29	$4,306,660.70	**40**	**0.48**	**0.46**	**4**	**$6,036,969.30**
16	0.65	0.33	6	$4,826,290.10	41	0.44	0.53	6	$6,660,040.50
17	0.51	0.43	5	$5,722,334.20	42	0.40	0.64	7	$7,701,834.50
18	0.58	0.36	7	$5,139,941.90	43	0.78	0.29	20	$4,459,546.10
19	0.38	0.81	16	$9,238,573.20	44	0.52	0.42	5	$5,618,436.20
20	0.41	0.61	6	$7,356,563.50	45	0.53	0.40	4	$5,462,377.60
21	0.45	0.51	4	$6,460,853.50	46	0.68	0.32	10	$4,746,195.60
22	0.54	0.39	4	$5,372,410.10	47	0.47	0.49	4	$6,268,376.00
23	0.85	0.27	30	$4,238,188.20	48	0.37	0.87	18	$9,823,299.20
24	0.66	0.32	8	$4,772,786.10	49	0.43	0.56	5	$6,898,049.20
25	0.95	0.24	36	$4,015,606.70	50	0.50	0.45	4	$5,941,299.70

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo un conjunto de soluciones igual al número de la población inicial como es característico del algoritmo. Se seleccionó la solución 40 la cual presenta un índice de resiliencia de Ir = 0.48 y un índice de costo de Ic= 0.46, cuyos datos de tuberías y nudos son:

Tabla 6: *Datos de tuberías de la solución seleccionada – red de Hanoi*

N°	Tuberías	Long(m)	Dia(mm)	Velo(m/s)	Caudal(L/s)	Estado
1	Tuber 1	100	1016	6.83	5538.89	Abierta
2	Tuber 2	1350	1016	6.53	5291.67	Abierta
3	Tuber 3	900	1016	2.45	1982.31	Abierta
4	Tuber 4	1150	1016	2.40	1946.20	Abierta
5	Tuber 5	1450	1016	2.15	1744.81	Abierta
6	Tuber 6	450	1016	1.81	1465.64	Abierta
7	Tuber 7	850	1016	1.35	1090.64	Abierta
8	Tuber 8	850	762	2.06	937.86	Abierta
9	Tuber 9	800	609.6	2.71	792.03	Abierta
10	Tuber 10	950	609.6	1.90	555.56	Abierta
11	Tuber 11	1200	508	2.06	416.67	Abierta
12	Tuber 12	3500	508	1.29	261.11	Abierta
13	Tuber 13	800	304.8	1.24	90.64	Abierta
14	Tuber 14	500	304.8	1.10	80.19	Abierta
15	Tuber 15	550	304.8	2.17	157.97	Abierta
16	Tuber 16	2730	762	1.78	812.79	Abierta
17	Tuber 17	1750	762	2.31	1053.07	Abierta
18	Tuber 18	800	1016	1.76	1426.68	Abierta
19	Tuber 19	400	1016	1.78	1443.35	Abierta
20	Tuber 20	2200	1016	2.01	1629.90	Abierta
21	Tuber 21	1500	609.6	1.35	393.06	Abierta
22	Tuber 22	500	609.6	0.46	134.72	Abierta
23	Tuber 23	2650	762	1.94	882.68	Abierta
24	Tuber 24	1230	508	2.21	448.73	Abierta
25	Tuber 25	1300	508	1.09	220.95	Abierta
26	Tuber 26	850	508	1.07	215.93	Abierta
27	Tuber 27	300	508	2.30	465.93	Abierta
28	Tuber 28	750	609.6	1.95	568.71	Abierta
29	Tuber 29	1500	304.8	1.97	143.67	Abierta
30	Tuber 30	2000	304.8	0.87	63.11	Abierta
31	Tuber 31	1600	304.8	0.51	36.89	Abierta
32	Tuber 32	150	304.8	1.88	136.89	Abierta
33	Tuber 33	860	508	0.82	166.05	Abierta
34	Tuber 34	950	508	1.92	389.66	Abierta

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7: *Datos de nudos de la solución seleccionada – red de Hanoi*

N°	Nudos	Elevac(m)	Dem(L/s)	H_Piezo(mca)	Presión(mca)
1	Nudo 2	0	247.22	97.92	97.92
2	Nudo 3	0	236.11	72.12	72.12

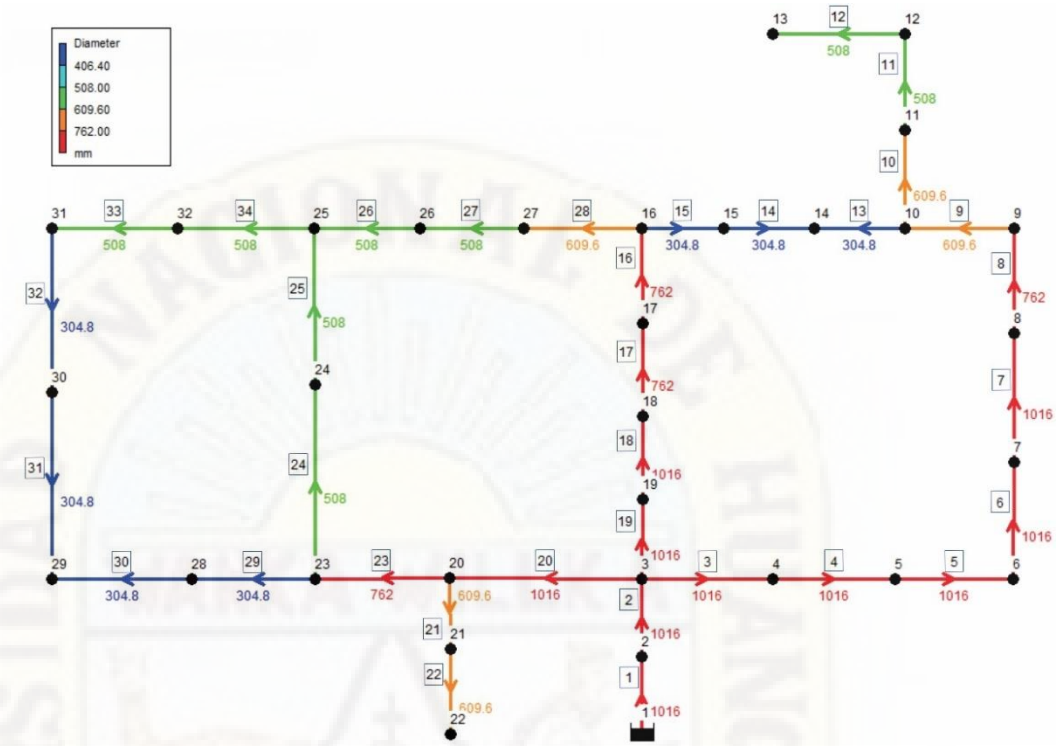
3	Nudo 4	0	36.11	69.33	69.33
4	Nudo 5	0	201.39	65.90	65.90
5	Nudo 6	0	279.17	62.35	62.35
6	Nudo 7	0	375.00	61.55	61.55
7	Nudo 8	0	152.78	60.68	60.68
8	Nudo 9	0	145.83	58.01	58.01
9	Nudo 10	0	145.83	52.58	52.58
10	Nudo 11	0	138.89	49.22	49.22
11	Nudo 12	0	155.56	43.17	43.17
12	Nudo 13	0	261.11	35.67	35.67
13	Nudo 14	0	170.83	49.65	49.65
14	Nudo 15	0	77.78	51.12	51.12
15	Nudo 16	0	86.11	56.68	56.68
16	Nudo 17	0	240.28	63.27	63.27
17	Nudo 18	0	373.61	70.08	70.08
18	Nudo 19	0	16.67	71.43	71.43
19	Nudo 20	0	354.17	67.37	67.37
20	Nudo 21	0	258.33	64.56	64.56
21	Nudo 22	0	134.72	64.43	64.43
22	Nudo 23	0	290.28	59.93	59.93
23	Nudo 24	0	227.78	52.82	52.82
24	Nudo 25	0	47.22	50.77	50.77
25	Nudo 26	0	250.00	52.06	52.06
26	Nudo 27	0	102.78	53.91	53.91
27	Nudo 28	0	80.56	47.20	47.20
28	Nudo 29	0	100.00	43.40	43.40
29	Nudo 30	0	100.00	44.56	44.56
30	Nudo 31	0	29.17	45.73	45.73
31	Nudo 32	0	223.61	46.53	46.53
32	Resvr 1	100	-5538.89	100	0

Fuente: Elaboración propia.

Las velocidades obtenidas oscilan entre 0.82 y 2.71 m/s, a excepción de cuatro que se encuentran fuera del rango establecido en la norma OS.050, esto se debe al planteamiento de la red como tal, que impide obtener las velocidades permisibles en todas las tuberías. Las presiones oscilan entre 35.67 y 97.92 m.c.a. cumpliéndose la presión mínima de servicio en todos los nudos.

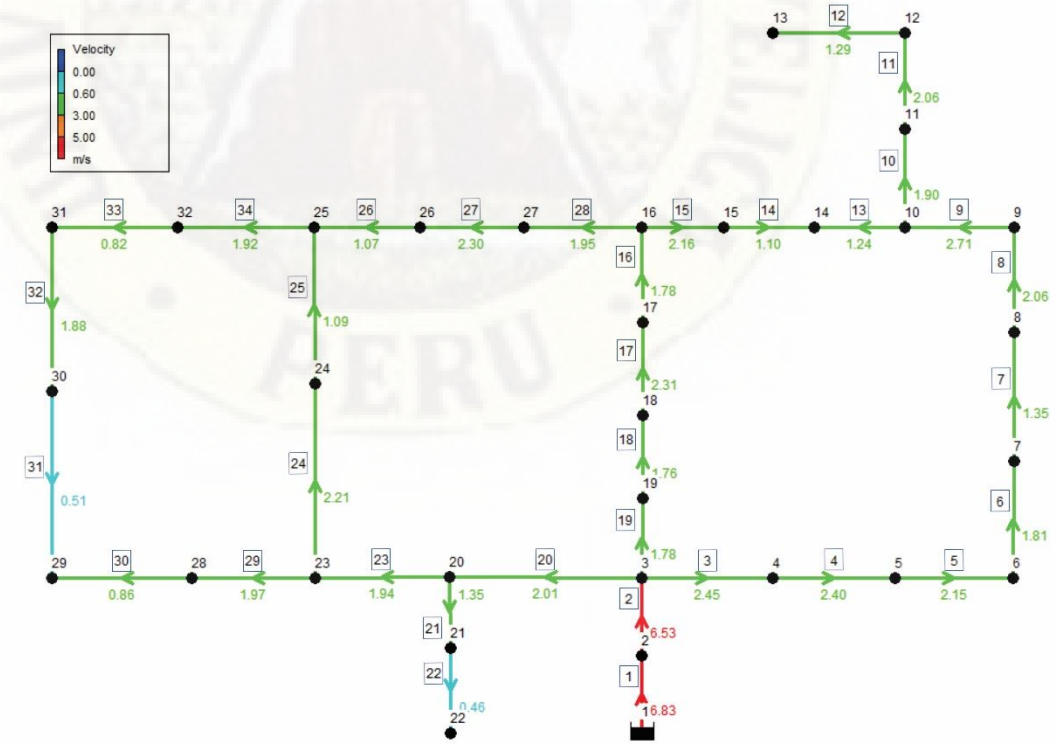
Seguidamente, para una mejor apreciación de la información de las tablas se muestran figuras de la distribución de diámetros, velocidades, caudales y presiones del diseño seleccionado la red de Hanoi:

Figura 28: *Distribución de diámetros de la solución seleccionada*



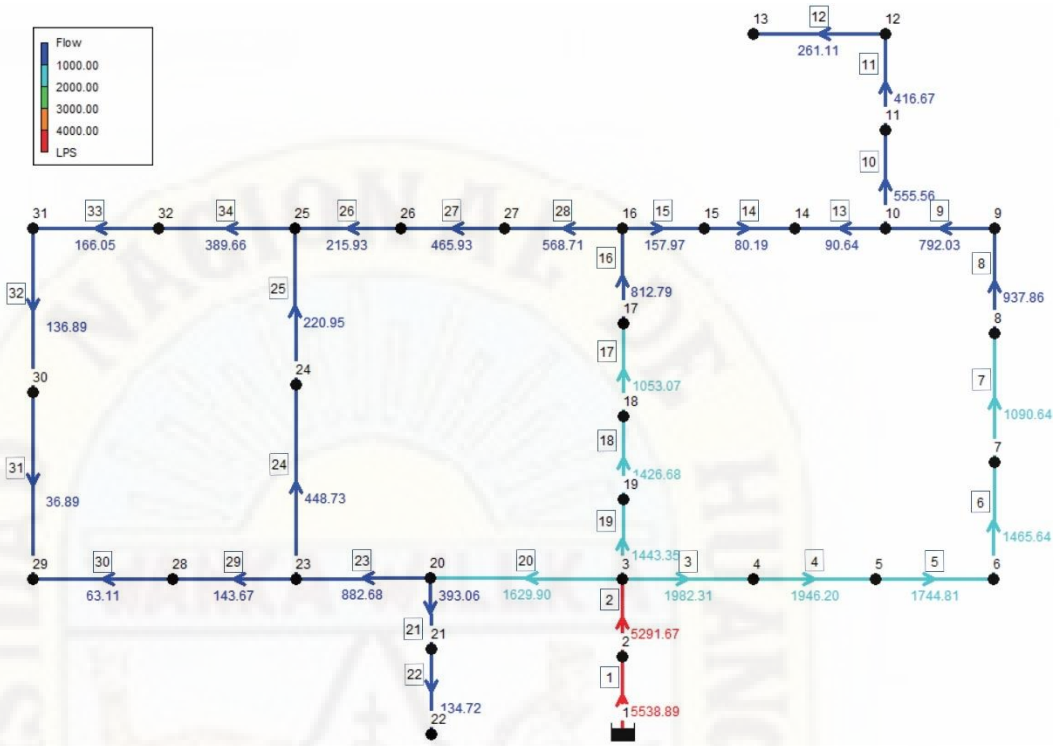
Fuente: Software Epanet 2.0.

Figura 29: *Velocidades en las tuberías de la solución seleccionada*



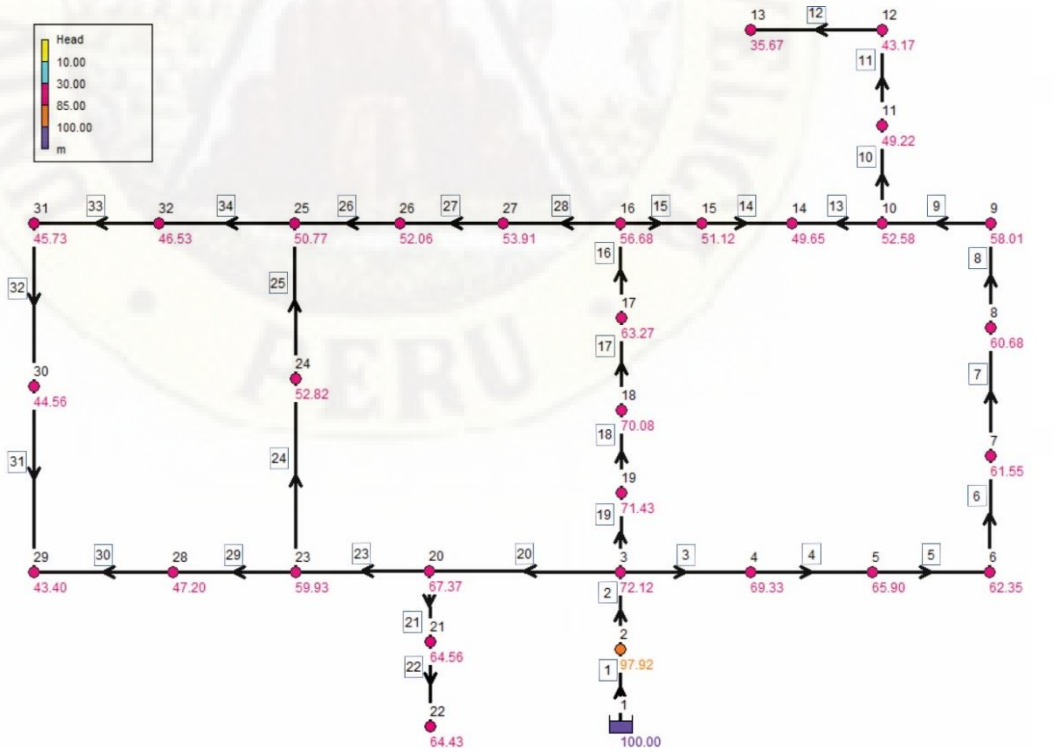
Fuente: Software Epanet 2.0.

Figura 30: *Caudales en las tuberías de la solución seleccionada*



Fuente: Software Epanet 2.0.

Figura 31: *Presiones en los nudos de la solución seleccionada*



Fuente: Software Epanet 2.0.

4.1.3 Rendimiento del NSGA-II en el diseño de la red de Hanoi

Mediante el empleo del NSGA-II en el diseño de la red de Hanoi se han obtenido índices satisfactorios de resiliencia y costo, así también, velocidades y presiones dentro del rango. A continuación, se muestra una comparación de este algoritmo con otros utilizados en el diseño de redes:

Tabla 8: *Comparación de diámetros NSGA – II respecto a otros algoritmos*

	Savic & Walters GA 1 (mm)	**Savic & Walters GA 2 (mm)**	**Cunha & Sousa (mm)**	**Liong & Atiquzzaman (mm)**	**Suribabu & Neelakantan (mm)**	**NSGA - II (mm)**
Tuber 1	1016	1016	1016	1016	1016	1016
Tuber 2	1016	1016	1016	1016	1016	1016
Tuber 3	1016	1016	1016	1016	1016	1016
Tuber 4	1016	1016	1016	1016	1016	1016
Tuber 5	1016	1016	1016	1016	1016	1016
Tuber 6	1016	1016	1016	1016	1016	1016
Tuber 7	1016	1016	1016	1016	1016	1016
Tuber 8	1016	1016	1016	762	1016	762
Tuber 9	1016	762	1016	762	1016	609.6
Tuber 10	762	762	762	762	762	609.6
Tuber 11	609.6	762	609.6	762	609.6	508
Tuber 12	609.6	609.6	609.6	609.6	609.6	508
Tuber 13	508	406.4	508	406.4	508	304.8
Tuber 14	406.4	406.4	406.4	304.8	406.4	304.8
Tuber 15	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8
Tuber 16	304.8	406.4	304.8	609.6	304.8	762
Tuber 17	406.4	508	406.4	762	406.4	762
Tuber 18	508	609.6	508	762	609.6	1016
Tuber 19	508	609.6	508	762	508	1016
Tuber 20	1016	1016	1016	1016	1016	1016
Tuber 21	508	508	508	508	508	609.6
Tuber 22	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8	609.6
Tuber 23	1016	1016	1016	762	1016	762
Tuber 24	762	762	762	762	762	508
Tuber 25	762	762	762	609.6	762	508
Tuber 26	508	508	508	304.8	508	508
Tuber 27	304.8	304.8	304.8	508	304.8	508
Tuber 28	304.8	304.8	304.8	609.6	304.8	609.6
Tuber 29	406.4	406.4	406.4	406.4	406.4	304.8
Tuber 30	406.4	406.4	304.8	406.4	304.8	304.8
Tuber 31	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8
Tuber 32	304.8	304.8	406.4	406.4	406.4	304.8
Tuber 33	406.4	406.4	406.4	508	406.4	508
Tuber 34	508	508	609.6	609.6	609.6	508

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9: *Comparación de velocidades NSGA – II respecto a otros algoritmos*

	Savic & Walters GA 1 (m/s)	**Savic & Walters GA 2 (m/s)**	**Cunha & Sousa (m/s)**	**Liong & Atiquzzaman (m/s)**	**Suribabu & Neelakantan (m/s)**	**NSGA -II (m/s)**
Tuber 1	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83
Tuber 2	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53
Tuber 3	2.76	2.62	2.76	2.54	2.74	2.45
Tuber 4	2.71	2.58	2.71	2.50	2.70	2.40
Tuber 5	2.46	2.33	2.47	2.25	2.45	2.15
Tuber 6	2.12	1.98	2.12	1.91	2.11	1.81
Tuber 7	1.66	1.52	1.66	1.44	1.64	1.35
Tuber 8	1.47	1.33	1.47	2.23	1.46	2.06
Tuber 9	1.29	2.05	1.29	1.91	1.28	2.71
Tuber 10	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.90
Tuber 11	1.43	0.91	1.43	0.91	1.43	2.06
Tuber 12	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	1.29
Tuber 13	1.69	1.79	1.70	1.32	1.64	1.24
Tuber 14	1.32	0.48	1.34	0.00	1.25	1.10
Tuber 15	1.28	0.22	1.32	1.06	1.16	2.17
Tuber 16	0.09	1.10	0.12	1.84	0.45	1.78
Tuber 17	1.90	1.89	1.92	1.71	2.11	2.31
Tuber 18	3.06	2.59	3.07	2.52	2.22	1.76
Tuber 19	3.14	2.65	3.16	2.56	3.27	1.78
Tuber 20	2.69	2.66	2.69	2.25	2.67	2.01
Tuber 21	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.35
Tuber 22	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	0.46
Tuber 23	1.77	1.74	1.77	2.36	1.75	1.94
Tuber 24	2.05	2.00	2.14	1.35	2.11	2.21
Tuber 25	1.56	1.50	1.64	1.32	1.62	1.09
Tuber 26	1.67	1.54	1.65	0.29	1.58	1.07
Tuber 27	1.21	0.86	1.15	1.34	0.98	2.30
Tuber 28	0.20	0.55	0.26	1.28	0.43	1.95
Tuber 29	1.62	1.60	1.28	1.34	1.27	1.97
Tuber 30	1.00	0.98	1.17	0.72	1.16	0.87
Tuber 31	0.40	0.38	0.20	0.09	0.21	0.51
Tuber 32	0.97	0.99	0.88	0.82	0.89	1.88
Tuber 33	0.77	0.78	1.11	0.67	1.11	0.82
Tuber 34	1.60	1.60	1.26	1.23	1.26	1.92

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: *Comparación de presiones NSGA – II respecto a otros algoritmos*

	Savic & Walters GA 1 (mm)	**Savic & Walters GA 2 (mm)**	**Cunha & Sousa (mm)**	**Liong & Atiquzzaman (mm)**	**Suribabu & Neelakantan (mm)**	**NSGA -II (mm)**
Nudo 2	97.92	97.92	97.92	97.92	97.92	97.92
Nudo 3	72.12	72.12	72.12	72.12	72.12	72.12
Nudo 4	68.65	68.95	68.64	69.12	68.67	69.33
Nudo 5	64.34	65.04	64.32	65.42	64.40	65.90
Nudo 6	59.80	60.94	59.77	61.57	59.89	62.35

Nudo 7	58.73	60.00	58.70	60.69	58.84	61.55
Nudo 8	57.45	58.90	57.41	59.69	57.57	60.68
Nudo 9	56.42	58.04	56.38	56.58	56.56	58.01
Nudo 10	55.66	55.55	55.62	54.39	55.81	52.58
Nudo 11	54.52	54.41	54.48	53.24	54.67	49.22
Nudo 12	52.02	53.56	51.97	52.39	52.17	43.17
Nudo 13	48.91	50.45	48.86	49.28	49.06	35.67
Nudo 14	52.85	51.47	52.76	52.06	53.13	49.65
Nudo 15	51.40	51.24	51.26	52.06	51.81	51.12
Nudo 16	49.26	51.33	49.01	53.59	50.02	56.68
Nudo 17	49.36	57.00	49.14	62.67	51.64	63.27
Nudo 18	59.32	64.54	59.25	66.57	63.63	70.08
Nudo 19	67.71	69.52	67.69	70.23	67.37	71.43
Nudo 20	63.98	64.15	64.01	66.28	64.10	67.37
Nudo 21	57.18	57.36	57.22	59.48	57.30	64.56
Nudo 22	53.41	53.58	53.44	55.71	53.53	64.43
Nudo 23	59.45	59.77	59.51	55.52	59.67	59.93
Nudo 24	55.59	56.09	55.35	53.75	55.60	52.82
Nudo 25	53.15	53.80	52.65	51.40	52.98	50.77
Nudo 26	50.22	51.27	49.80	51.62	50.32	52.06
Nudo 27	49.16	50.70	48.84	52.31	49.61	53.91
Nudo 28	53.11	53.53	55.38	51.02	55.57	47.20
Nudo 29	49.61	50.11	48.81	49.09	49.10	43.40
Nudo 30	48.84	49.43	49.04	49.14	49.34	44.56
Nudo 31	49.19	49.79	49.25	49.33	49.56	45.73
Nudo 32	50.13	50.76	51.07	49.89	51.40	46.53
Resvr 1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11: *Comparación del algoritmo NSGA – II respecto a otros algoritmos*

	Savic & Walters (1997) GA 1	**Savic & Walters (1997) GA 2**	**Cunha & Sousa (1999**	**Liong & Atiquzzaman (2004)**	**Suribabu & Neelakantan (2006)**	**NSGA - II**
Índice de resiliencia (Ir)	0.51	0.49	0.51	0.49	0.51	0.48
Índice de costo (Ic)	0.47	0.48	0.46	0.48	0.47	0.46
Costo total ($ 10^6)	6.07	6.19	6.06	6.22	6.08	6.04
Número de incumplimientos	7	6	7	5	6	4

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que, mediante el diseño empleando el NSGA – II se obtienen mejores resultados tanto en el índice de resiliencia como el índice de costo, también el costo total resulta menor que los otros diseños y se obtuvo un numero de incumplimientos menor que los demás. Lo cual demuestra la efectividad del algoritmo genético utilizado.

4.2 Análisis de la red de distribución de Huancavelica

4.2.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra delimitado dentro del sistema de abastecimiento de agua potable de los distritos de Huancavelica y Ascensión, provincia de Huancavelica, departamento de Huancavelica. El sistema de abastecimiento principal comprende 10 sectores operacionales o zonas de suministro autónomas, con el fin de facilitar su operación. De esta manera, es mucho más simple poder controlar los caudales de entrada en cada sector, obtener el balance hídrico, control de pérdidas de agua por fugas, medición y control de presiones internas dentro de la red de distribución. A continuación, se detalla las características de cada sector operacional:

Tabla 12: *Características de los sectores operacionales*

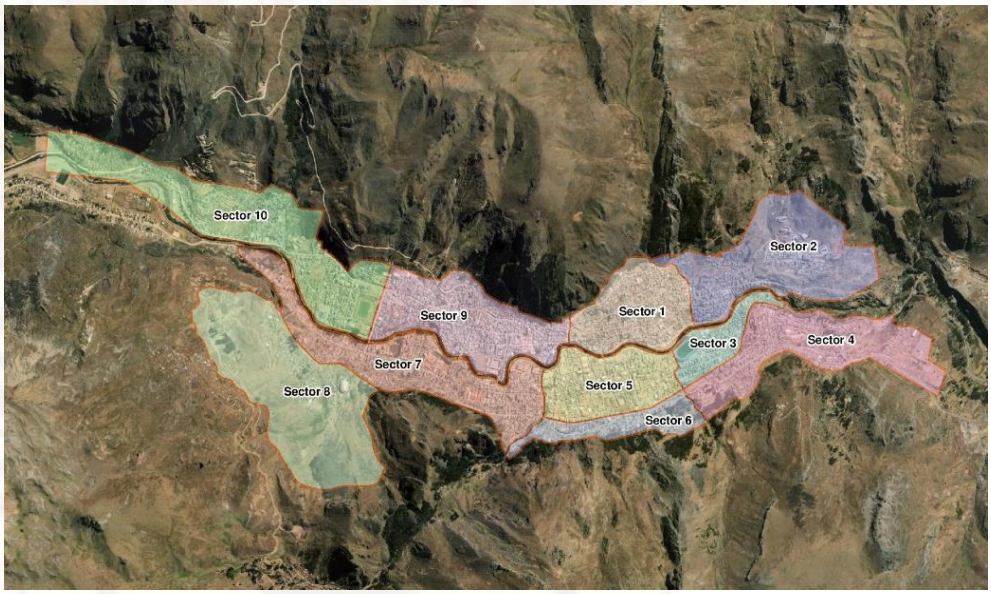
Sector Operacional	Total de lotes Año 2020	Área (ha)
Sector 1	1706	41.27
Sector 2	774	72.59
Sector 3	594	17.81
Sector 4	1307	61.90
Sector 5	1601	39.71
Sector 6	689	21.84
Sector 7	1681	67.48
Sector 8	105	97.65
Sector 9	2109	58.00
Sector 10	1106	91.52
Total	11672	569.77

Fuente: Elaboración propia.

Los sectores operacionales están administrados y operados por la empresa prestadora de servicios de saneamiento EMAPA Huancavelica S.A., la cual está encargada de los servicios de agua potable y alcantarillado de los distritos de Huancavelica y Ascensión.

Esta empresa está regulada por la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), la cual debe cumplir gran parte de sus actividades con el objetivo estratégico de lograr un producto de calidad y brindar un servicio continuo, sujeto a una serie de requisitos de entrega y restricciones operativas. Entre sus actividades principales se encuentran la captación, potabilización y distribución de agua para consumo doméstico, industrial y comercial, también el servicio de alcantarillado sanitario y disposición final de las aguas servidas. Por estos servicios se cobran tarifas y se toman acciones para sean sostenibles en el tiempo.

Figura 32: *Sectores operacionales de los distritos de Huancavelica y Ascensión*



Fuente: Elaboración propia

Los sectores operacionales seleccionados para el presente trabajo de investigación, son los sectores 3 y 5. Ambos vienen siendo abastecidos por una sola entrada de caudal ubicado al noroeste del sector 5. Estos sectores son zonas céntricas consolidadas donde se desarrollan mayor actividad comercial y existe un mayor número de instituciones públicas y privadas. Estos factores contribuyen a un mayor consumo considerándolos vulnerables ante cualquier evento que afecte la continuidad del servicio de agua potable.

Figura 33: *Sectores operacionales 3 y 5 del área de estudio*

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Periodo de diseño

Uno de los requisitos principales es definir el tiempo para el cual se estima que un sistema mantendrá un correcto funcionamiento. La determinación del periodo de diseño dependió de factores como el crecimiento poblacional, factibilidad de construcción y posibilidades de financiamiento. Asimismo, se tuvo como referencia la norma técnica "Guía de Diseños Estandarizados para Infraestructura Sanitaria Menor en Proyectos de Saneamiento en el Ámbito Urbano" elaborado por el Programa Nacional de Saneamiento Urbano. Esta norma recomienda utilizar un periodo de diseño máximo de 20 años para redes de distribución de agua potable en zonas urbanas.

Teniendo en consideración los aspectos mencionados, el periodo de diseño para la red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica será de 20 años.

4.2.3 Población censal INEI

Los distritos de Huancavelica y Ascensión durante los años 1981 contaban con una población total de 23,828 habitantes y para el año 2017 ha crecido hasta los 52,351 habitantes, según lo indica las estadísticas censales del INEI. Para efectos del estudio de proyección de la población se utilizó cuadros censales del INEI como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 13: *Información censal de los distritos de Huancavelica y Ascensión*

Año Censal	Huancavelica (hab.)	Ascensión (hab.)	Población Total (hab.)
1981	23828	-	23828
1993	36826	-	36826
2007	32245	9086	41331
2017	36975	15376	52351

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Proyección de la población

La información obtenida de los datos censales del INEI, sirvió para realizar la proyección de la población utilizando diversos modelos como son el método aritmético, geométrico, parabólico, ajuste lineal y Wappus. Estos métodos se desarrollan a continuación para su verificación.

4.2.4.1 Método aritmético

Ecuación:

$$P_f = P_o * (1 + r * t)$$

Donde:

P_f: población al tiempo “t”, en habitantes.

P_o: población del año base o último censo, en habitantes.

r: tasa de crecimiento poblacional, en tanto por año.

t: tiempo en que se desea estimar la población.

Combinación con dos censos

Tabla 14: *Método Aritmético – Combinación con dos censos*

N°	Años		Tasa (r)
1	1981	1993	4.55%
2	1981	2007	2.83%
3	1981	2017	3.33%
4	1993	2007	0.87%
5	1993	2017	1.76%
6	2007	2017	2.67%

Fuente: Elaboración propia

Combinación con tres censos

Tabla 15: *Método Aritmético – Combinación con tres censos*

N°	Años			Tasa (r)
r1	1981	1993	2007	2.57%
r2	1981	1993	2017	2.69%
r3	1981	2007	2017	2.78%
r4	1993	2007	2017	1.62%

Fuente: Elaboración propia

Combinación con cuatro censos

Tabla 16: *Método aritmético – Combinación con cuatro censos*

N°	Años				Tasa (r)
r5	1981	1993	2007	2017	2.60%

Fuente: Elaboración propia

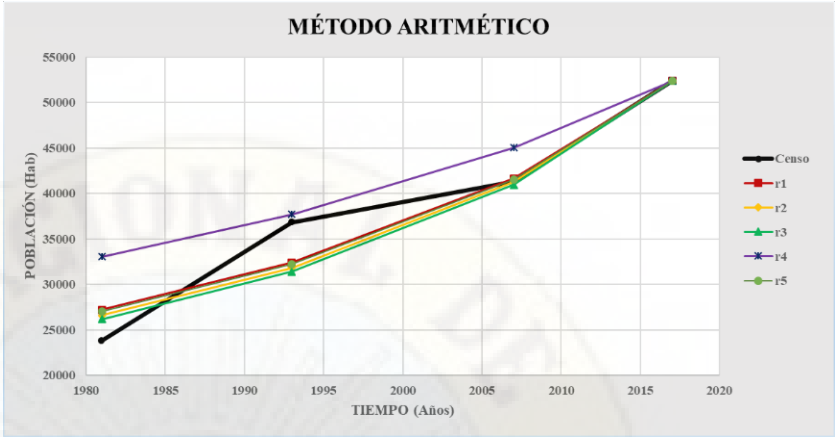
Selección de la tasa de crecimiento por el método aritmético

Tabla 17: *Tasas de crecimiento – método aritmético*

Curva	Tasa	Años				Sumatoria	Diferencia Absoluta
		1981	1993	2007	2017		
Censo	**r**	**23828**	**36826**	**41331**	**52351**	**154336**	**0**
r1	2.57%	27200	32386	41652	52351	153590	746
r2	2.69%	26614	31830	41266	52351	152060	2276
r3	2.78%	26160	31396	40960	52351	150867	3469
r4	1.62%	33062	37691	45050	52351	168153	13817
r5	2.60%	27062	32256	41563	52351	153232	1104

Fuente: Elaboración propia

Figura 34: *Ajuste de la información censal – Método aritmético*



Fuente: Elaboración propia

4.2.4.2 Método geométrico

Ecuación:

$$P_f = P_o * (1 + r)^t$$

Donde:

P_f: población al tiempo "t", en habitantes.

P_o: población del año base o último censo, en habitantes.

r: tasa de crecimiento poblacional, en tanto por año.

t: tiempo en que se desea estimar la población.

Combinación con dos censos

Tabla 18: *Método geométrico – combinación con dos censos*

N°	Años		Tasa (r)
1	1981	1993	3.69%
2	1981	2007	2.14%
3	1981	2017	2.21%
4	1993	2007	0.83%
5	1993	2017	1.48%
6	2007	2017	2.39%

Fuente: Elaboración propia

Combinación con tres censos

Tabla 19: *Método geométrico – combinación con tres censos*

N°	Años			Tasa (r)
r1	1981	1993	2007	1.65%
r2	1981	1993	2017	2.00%
r3	1981	2007	2017	2.21%
r4	1993	2007	2017	1.29%

Fuente: Elaboración propia

Combinación con cuatro censos

Tabla 20: *Método geométrico – combinación con cuatro censos*

N°	Años				Tasa (r)
r5	1981	1993	2007	2017	1.83%

Fuente: Elaboración propia

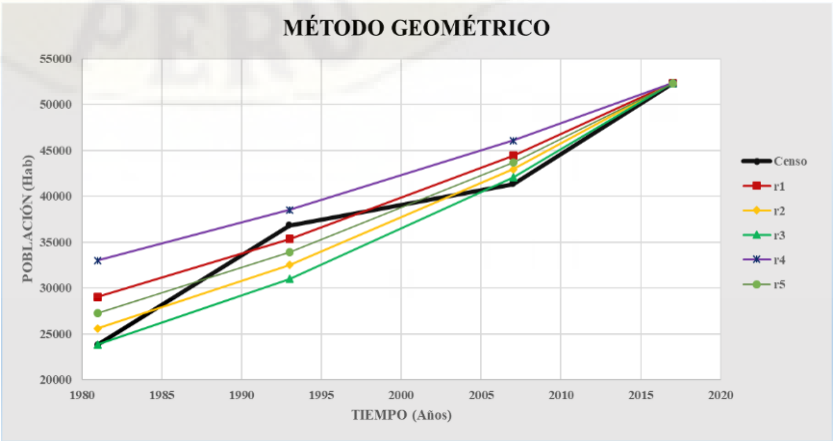
Selección de la tasa de crecimiento por el método geométrico

Tabla 21: *Tasas de crecimiento – Método geométrico*

Curva	Tasa	Años				Sumatoria	Diferencia Absoluta
		1981	1993	2007	2017		
Censo	**r**	**23828**	**36826**	**41331**	**52351**	**154336**	**0**
r1	1.65%	29034	35338	44444	52351	161167	6831
r2	2.00%	25623	32513	42927	52351	153415	921
r3	2.21%	23851	30996	42081	52351	149279	5057
r4	1.29%	33025	38507	46062	52351	169945	15609
r5	1.83%	27252	33877	43668	52351	157148	2812

Fuente: Elaboración propia

Figura 35: *Ajuste de la información censal – Método geométrico*



Fuente: Elaboración propia

4.2.4.3 Método parabólico

Ecuación:

$$P_f = A + B * t + C * t^2$$

Donde:

P_f: población al tiempo "t", en habitantes.

$A, B\ y\ C$: constantes de ecuación.

t: tiempo en que se desea estimar la población.

Combinación con tres censos

Tabla 22: *Método parabólico – Combinación de tres censos 1*

Año	Censo	t
1981	23828	-36
1993	36826	-24
2007	41331	-10

A	37520.73
B	-673.87
C	-29.28

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23: *Método parabólico – Combinación de tres censos 2*

Año	Censo	t
1981	23828	-36
1993	36826	-24
2017	52351	0

A	52351.00
B	356.01
C	-12.12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24: *Método parabólico – Combinación de tres censos 3*

Año	Censo	t
1981	23828	-36
2007	41331	-10
2017	52351	0

A	52351.00
B	1221.11
C	11.91

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25: *Método parabólico – Combinación de tres censos 4*

Año	Censo	t
1993	36826	-24
2007	41331	-10
2017	52351	0

A	52351.00
B	1427.09
C	32.51

Fuente: Elaboración propia

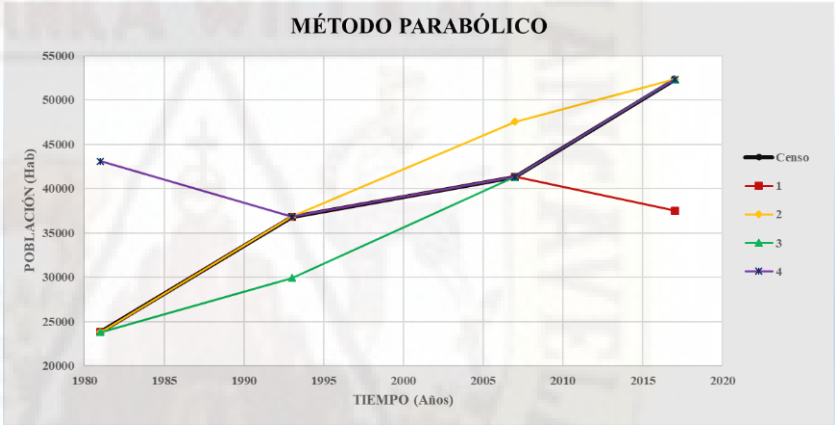
Selección de la tasa de crecimiento por el método parabólico

Tabla 26: *Tasas de crecimiento – Método parabólico*

Curva	Constantes			Años				Sumatoria	Diferencia Absoluta
				1981	1993	2007	2017		
Censo	**A**	**B**	**C**	**23828**	**36826**	**41331**	**52351**	**154336**	**0**
1	37521	-674	-29	23828	36826	41331	37521	139506	14830
2	52351	356	-12	23828	36826	47579	52351	160584	6248
3	52351	1221	12	23828	29905	41331	52351	147415	6921
4	52351	1427	33	43107	36826	41331	52351	173615	19279

Fuente: Elaboración propia

Figura 36: *Ajuste de la información censal – método parabólico*



Fuente: Elaboración propia

4.2.4.4 Curva exponencial modificada

Ecuación:

$$P_f = a + b * t$$

Donde:

P_f: población al tiempo "t", en habitantes.

$a\ y\ b$: constantes de ecuación.

t: tiempo en que se desea estimar la población.

Tabla 27: *Información para el método de curva exponencial modificada*

Año	Población	t	t*P	t^2	P^2
1981	23828	-36	-857808	1296	567773584
1993	36826	-24	-883824	576	1356154276
2007	41331	-10	-413310	100	1708251561
2017	52351	0	0	0	2740627201
Sumatoria	**154336**	**-70**	**-2154942**	**1972**	**6372806622**

Fuente: Elaboración propia

Se reemplaza la información en las siguientes formulas:

$$a = \frac{\sum P_i - b * \sum t_i}{N}$$

$$b = \frac{N * \sum t_i * P_i - \sum t_i * \sum P_i}{N * \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2}$$

$$r = \frac{N * \sum t_i * P_i - \sum t_i * \sum P_i}{\sqrt{[N * \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2] * [N * \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2]}}$$

Finalmente, se obtiene los siguientes valores:

$a = 51373.71$, $b = 730.84$ y $r = 0.97711$

4.2.4.5 Método de Wappus

Ecuación:

$$P_f = P_o * \left(\frac{200 + i * t}{200 - i * t}\right)$$

Donde:

P_f: población al tiempo “t”, en habitantes.

P_o: población del año base o último censo, en habitantes.

i: tasa de crecimiento poblacional.

t: tiempo en que se desea estimar la población.

Combinación con dos censos

Tabla 28: *Método de Wappus – Combinación con dos censos*

N°	Años		Tasa (i)
1	1981	1993	3.57
2	1981	2007	2.07
3	1981	2017	2.08
4	1993	2007	0.82
5	1993	2017	1.45
6	2007	2017	2.35

Fuente: Elaboración propia

Combinación con tres censos

Tabla 29: *Método de Wappus – Combinación con tres censos*

N°	Años			Tasa (i)
i1	1981	1993	2007	2.20
i2	1981	1993	2017	2.51
i3	1981	2007	2017	2.21
i4	1993	2007	2017	1.59

Fuente: Elaboración propia

Combinación con cuatro censos

Tabla 30: *Método de Wappus – Combinación con cuatro censos*

N°	Años				Tasa (i)
i5	1981	1993	2007	2017	2.25

Fuente: Elaboración propia

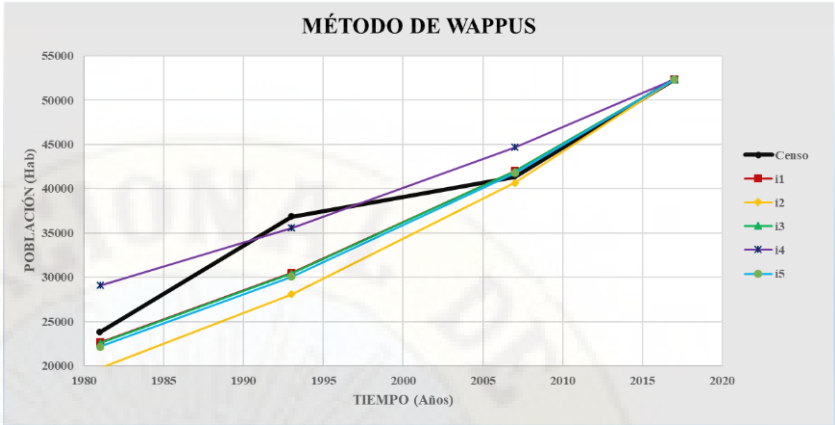
Selección de la tasa de crecimiento por el método parabólico

Tabla 31: *Tasas de crecimiento – Método de Wappus*

Curva	Tasa	Años				Sumatoria	Diferencia Absoluta
		1981	1993	2007	2017		
Censo	i	**23828**	**36826**	**41331**	**52351**	**154336**	**0**
i1	2.20	22674	30502	41986	52351	147513	6823
i2	2.51	19757	28106	40671	52351	140885	13451
i3	2.21	22559	30408	41935	52351	147253	7083
i4	1.59	29076	35592	44649	52351	161668	7332
i5	2.25	22177	30097	41766	52351	146392	7944

Fuente: Elaboración propia

Figura 37: *Ajuste de información censal – Método de Wappus*



Fuente: Elaboración propia

4.2.4.6 Comparación de curvas obtenidas

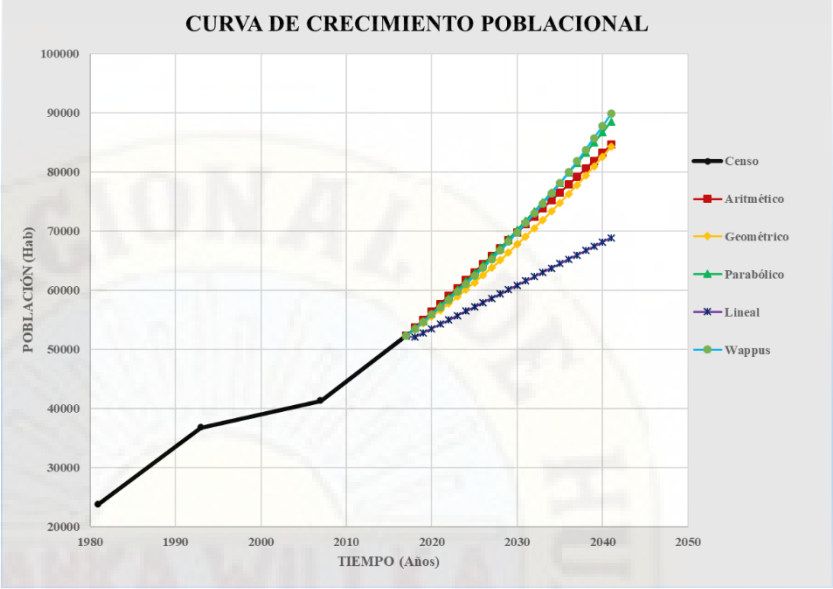
El resumen de los métodos aplicados en base a la información censal se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 32: *Resumen de métodos utilizados para determinar la población futura*

Año	Método Aritmético	Método Geométrico	Método Parabólico	Ajuste lineal	Método de Wappus
2017	52351	52351	52351	52351	52351
2018	53696	53400	53584	52105	53514
2019	55040	54471	54841	52835	54704
2020	56385	55563	56122	53566	55920
2021	57730	56676	57426	54297	57164
2022	59074	57812	58754	55028	58438
2023	60419	58971	60106	55759	59741
2024	61764	60153	61482	56490	61075
2025	63108	61359	62882	57220	62441
2026	64453	62589	64306	57951	63841
2027	65798	63844	65753	58682	65275
2028	67142	65123	67225	59413	66745
2029	68487	66429	68720	60144	68253
2030	69832	67760	70238	60875	69799
2031	71176	69119	71781	61605	71385
2032	72521	70504	73348	62336	73013
2033	73866	71917	74938	63067	74684
2034	75210	73359	76552	63798	76400
2035	76555	74829	78190	64529	78164
2036	77900	76329	79852	65260	79976
2037	79244	77859	81538	65991	81840
2038	80589	79420	83247	66721	83757
2039	81934	81012	84981	67452	85729
2040	83278	82636	86738	68183	87759
2041	84623	84292	88519	68914	89850

Fuente: Elaboración propia

Figura 38: *Curva de crecimiento población*



Fuente: Elaboración propia

De todos los métodos de proyección futura, se pudo verificar que el más alineado a la información censal es el método geométrico. Por lo cual, la tasa de crecimiento a utilizar para la determinación de la población futura es de 2.00%.

Por consiguiente, en base a la cantidad de conexiones existentes en los sectores 3 y 5, que comprenden de 2195 conexiones durante el año 2020, se puede determinar la población de ambos sectores multiplicándolo por la densidad habitacional de 3.25 hab/viv. obtenido de la base de datos del INEI. Adicionalmente, al número total de conexiones de ambos sectores, se le agrega 45 conexiones pertenecientes al sector 6 que vienen siendo abastecidos mediante un ramal perteneciente al sector 5. Esta información se obtuvo del área comercial de EMAPA Huancavelica S.A.

Finalmente, teniendo en cuenta estas consideraciones se obtiene una población base de 6376 habitantes para el año 2020 en los sectores 3 y 5. A partir de esta población, se determina la población futura del área de estudio:

Tabla 33: *Población futura del área de estudio*

Año		Población
Base	2020	6376
0	2021	6504
1	2022	6634
2	2023	6767
3	2024	6903
4	2025	7041
5	2026	7182
6	2027	7326
7	2028	7473
8	2029	7623
9	2030	7776
10	2031	7932
11	2032	8091
12	2033	8253
13	2034	8418
14	2035	8587
15	2036	8759
16	2037	8935
17	2038	9114
18	2039	9296
19	2040	9483
20	2041	9673

Fuente: Elaboración propia

4.2.5 Consumos

El análisis de consumos según el tipo de usuario se determina en función al volumen facturado por la empresa prestadora de servicios de saneamiento EMAPA Huancavelica S.A. Esta información se solicitó al área comercial y se obtuvo una base de datos con información de cada usuario por sector. Los tipos de usuarios están clasificados de la siguiente manera:

Tabla 34: *Tipos de usuarios*

Tarifa	Descripción
T01	Doméstico
T02	Doméstico2
T03	Comercial
T04	Estatal
T05	Industrial
T06	Social

Fuente: Elaboración propia

Mediante el análisis de la información base, se obtuvo la cantidad de conexiones según el tipo de usuario correspondiente al área de estudio:

Tabla 35: *Número de conexiones según tipo de usuario*

Conexión por tipo de usuario	Agua potable	
	N° de Conex.	%
Doméstico	1574	70.27%
Doméstico2	20	0.89%
Comercial	558	24.91%
Estatal	75	3.35%
Industrial	4	0.18%
Social	9	0.40%
TOTAL	**2240**	**100%**

Fuente: Elaboración propia

Los consumos se determinaron procesando la información base según tipo de usuario, de los cuales se evitó utilizar valores que se encuentren fuera de la desviación estándar, debido a que estos volúmenes pueden ser producto de fugas, fallas en el medidor de agua o errores de medición. La siguiente tabla muestra los consumos por cada tipo de usuario:

Tabla 36: *Consumo por conexión según tipo de usuario*

Datos de consumo por conexión según categoría	(m3/mes/conex.)
Conexión doméstica	17.10
Conexión comercial	39.37
Conexión estatal	293.04
Conexión industrial	64.71
Conexión social	182.68

Fuente: Elaboración propia

4.2.6 Demanda de agua potable

La demanda total de agua para cada año se determinó mediante la sumatoria de demandas domésticas, comerciales, estatales y sociales dentro del área de estudio. Además, se considera un porcentaje de pérdidas de agua potable por consumo del 20% para la red de distribución. A continuación, se presentan los parámetros utilizados para la determinación del caudal de demanda para el periodo de diseño determinado:

Tabla 37: *Parámetros para la determinación del caudal de demanda*

Parámetros	**Proyecto**
Método de proyección población	Geométrico
Tasa de crecimiento (%)	2.00%
Densidad habitacional (hab./viv.)	3.25
Porcentaje de pérdidas en el sistema (%)	20
Conexiones Domiciliarias	1594
Población base al año 2020 (hab.)	6376

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, los coeficientes de variación para el diseño, se definieron según la norma técnica OS-100 del Reglamento Nacional de Edificaciones, utilizando los siguientes coeficientes:

Tabla 38: *Coeficientes de varios para la determinación del caudal de demanda*

Coeficiente de variación	**Coeficiente**
Coeficiente de variación diaria (K1)	1.3
Coeficiente de variación horaria (K2)	2.0

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se obtienen los caudales de demanda por año utilizando el siguiente formato de tabla:

Tabla 39: *Cuadro de demanda total para la red de distribución de agua del área de estudio*

Ítem	Año	Población Total	N° Viviendas	Conexiones por tipo de usuario					Consumo de agua por tipo de usuario					Consumo total (m3/día)	Perdidas (%)	Qp	Qmd	Qmh	Qd
				Doméstico	Comercial	Estatal	Industrial	Social	Doméstico (m3/día)	Comercial (m3/día)	Estatal (m3/día)	Industrial (m3/día)	Social (m3/día)						
Base	2020	6376	1594	1594	558	75	4	9	908.58	732.28	732.60	8.63	54.80	2436.89	20%	35.26	45.84	70.52	**70.52**
0	2021	6504	1626	1626	553	75	4	9	926.82	725.72	732.60	8.69	55.21	2449.04	20%	35.43	46.06	70.86	**70.86**
1	2022	6635	1659	1659	564	76	4	9	945.63	740.16	742.37	8.87	56.33	2493.35	20%	36.07	46.89	72.14	**72.14**
2	2023	6768	1692	1692	575	78	4	9	964.44	754.59	761.90	9.04	57.45	2547.43	20%	36.86	47.92	73.72	**73.72**
3	2024	6903	1726	1726	587	79	4	10	983.82	770.34	771.67	9.23	58.61	2593.67	20%	37.52	48.78	75.04	**75.04**
4	2025	7042	1761	1761	599	81	4	10	1003.77	786.09	791.21	9.41	59.80	2650.27	20%	38.34	49.84	76.68	**76.68**
5	2026	7183	1796	1796	611	83	4	10	1023.72	801.84	810.74	9.60	60.98	2706.88	20%	39.16	50.91	78.32	**78.32**
6	2027	7327	1832	1832	623	84	5	10	1044.24	817.58	820.51	9.79	62.21	2754.34	20%	39.85	51.81	79.70	**79.70**
7	2028	7474	1869	1869	635	86	5	10	1065.33	833.33	840.05	9.99	63.46	2812.16	20%	40.69	52.90	81.38	**81.38**
8	2029	7623	1906	1906	648	88	5	11	1086.42	850.39	859.58	10.19	64.72	2871.30	20%	41.54	54.00	83.08	**83.08**
9	2030	7776	1944	1944	661	89	5	11	1108.08	867.45	869.35	10.39	66.01	2921.29	20%	42.26	54.94	84.52	**84.52**
10	2031	7932	1983	1983	674	91	5	11	1130.31	884.51	888.89	10.60	67.33	2981.64	20%	43.14	56.08	86.28	**86.28**
11	2032	8091	2023	2023	688	93	5	11	1153.11	902.89	908.42	10.81	68.69	3043.93	20%	44.04	57.25	88.08	**88.08**
12	2033	8253	2064	2064	702	95	5	12	1176.48	921.26	927.96	11.03	70.08	3106.82	20%	44.95	58.44	89.90	**89.90**
13	2034	8419	2105	2105	716	97	5	12	1199.85	939.63	947.50	11.25	71.48	3169.71	20%	45.86	59.62	91.72	**91.72**
14	2035	8587	2147	2147	730	99	5	12	1223.79	958.00	967.03	11.48	72.90	3233.20	20%	46.78	60.81	93.56	**93.56**
15	2036	8760	2190	2190	745	101	5	12	1248.30	977.69	986.57	11.71	74.36	3298.63	20%	47.72	62.04	95.44	**95.44**
16	2037	8935	2234	2234	760	103	6	12	1273.38	997.37	1006.10	11.94	75.86	3364.66	20%	48.68	63.28	97.36	**97.36**
17	2038	9114	2279	2279	775	105	6	13	1299.03	1017.06	1025.64	12.18	77.38	3431.30	20%	49.64	64.53	99.28	**99.28**
18	2039	9297	2325	2325	791	107	6	13	1325.25	1038.06	1045.18	12.43	78.95	3499.86	20%	50.63	65.82	101.26	**101.26**
19	2040	9483	2371	2371	806	109	6	13	1351.47	1057.74	1064.71	12.67	80.51	3567.11	20%	51.61	67.09	103.22	**103.22**
20	2041	9673	2419	2419	822	111	6	13	1378.83	1078.74	1084.25	12.93	82.14	3636.89	20%	52.62	68.41	105.24	**105.24**

Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Consumo en los nudos

La demanda en cada nudo se determinó mediante el método de áreas, donde se obtiene un caudal unitario dividiendo el caudal máximo horario con el área total del área de estudio. El caudal unitario se obtuvo de la siguiente expresión:

$$Q_u = \frac{Q_{máx-h}}{A_{total}}$$

Donde:

Q_u: caudal unitario en l/s-ha.

$Q_{máx-h}$: caudal máximo horario en l/s.

A_{total}: área total de influencia del proyecto en ha.

El área de influencia de cada nudo se determinó trazando mediatrices y formando figuras geométricas a su alrededor. El área de cada nudo se multiplica por el caudal unitario obteniéndose el caudal de demanda en cada nudo. Estos valores se obtuvieron de la siguiente expresión:

$$Q_{nudo\ i} = Q_u * A_i$$

Donde:

$Q_{nudo\ i}$: caudal en el nudo i en l/s.

Q_u: caudal unitario superficial en l/s-ha.

A_i: área de influencia del nudo i en ha.

También, se agrega un caudal adicional a nudos específicos que abastecen a campos deportivos, parques de atracción y áreas verdes. A continuación, se muestran las demandas de consumo en cada nudo:

Tabla 40: *Demanda de consumo en cada nudo*

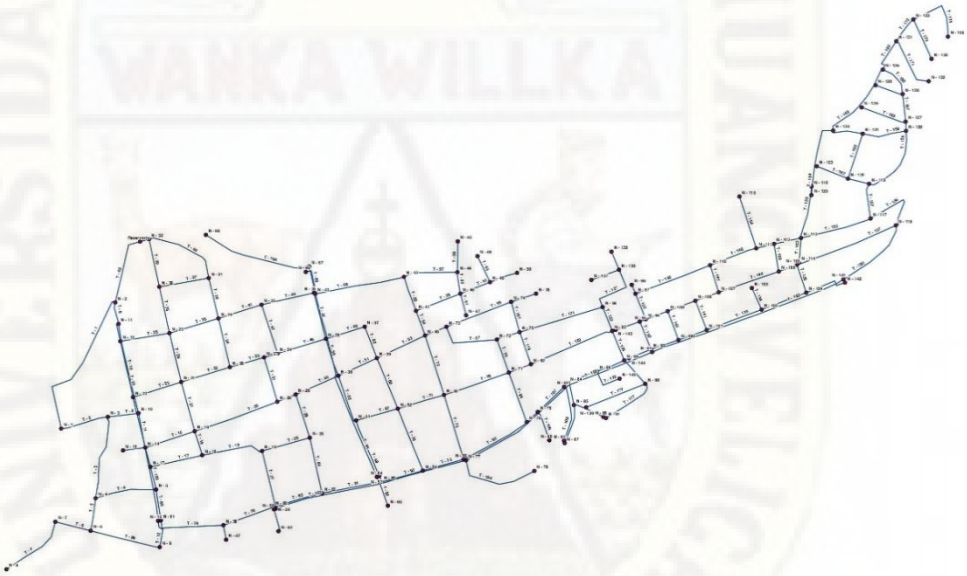
Etiqueta	Elevación (m)	Caudal (l/seg)	Etiqueta	Elevación (m)	Caudal (l/seg)	Etiqueta	Elevación (m)	Caudal (l/seg)	Etiqueta	Elevación (m)	Caudal (l/seg)
Nudo 1	3674.00	1.51	Nudo 37	3672.25	1.01	Nudo 73	3674.00	0.62	Nudo 109	3675.75	0.38
Nudo 2	3670.87	1.84	Nudo 38	3676.03	0.85	Nudo 74	3673.00	0.52	Nudo 110	3674.00	0.90
Nudo 3	3679.09	1.56	Nudo 39	3674.79	1.23	Nudo 75	3673.53	0.88	Nudo 111	3674.00	0.89
Nudo 4	3684.22	1.98	Nudo 40	3674.00	0.89	Nudo 76	3672.00	0.73	Nudo 112	3673.00	0.63
Nudo 5	3681.49	0.92	Nudo 41	3674.00	0.99	Nudo 77	3682.47	0.00	Nudo 113	3672.00	0.72
Nudo 6	3688.05	1.20	Nudo 42	3670.73	1.94	Nudo 78	3686.82	1.38	Nudo 114	3675.29	0.18
Nudo 7	3687.73	0.56	Nudo 43	3669.93	1.01	Nudo 79	3677.28	0.52	Nudo 115	3670.87	1.77
Nudo 8	3687.64	0.33	Nudo 44	3673.20	0.65	Nudo 80	3681.94	0.41	Nudo 116	3666.34	0.93
Nudo 9	3687.44	0.96	Nudo 45	3672.70	0.78	Nudo 81	3678.33	0.00	Nudo 117	3673.10	0.62
Nudo 10	3679.28	0.68	Nudo 46	3673.65	0.50	Nudo 82	3676.00	0.29	Nudo 118	3681.49	0.58
Nudo 11	3675.34	0.48	Nudo 47	3673.70	0.52	Nudo 83	3684.45	0.30	Nudo 119	3672.00	0.90
Nudo 12	3684.45	0.00	Nudo 48	3673.03	0.53	Nudo 84	3676.44	0.34	Nudo 120	3673.61	0.60
Nudo 13	3677.08	1.16	Nudo 49	3673.00	0.56	Nudo 85	3678.24	0.10	Nudo 121	3669.68	0.84
Nudo 14	3679.00	0.43	Nudo 50	3672.95	0.63	Nudo 86	3686.09	0.29	Nudo 122	3670.28	0.73
Nudo 15	3680.49	0.52	Nudo 51	3677.53	1.14	Nudo 87	3684.00	0.10	Nudo 123	3665.69	0.34
Nudo 16	3678.12	1.44	Nudo 52	3676.82	1.62	Nudo 88	3677.00	0.40	Nudo 124	3665.30	1.40
Nudo 17	3679.91	0.32	Nudo 53	3682.00	0.00	Nudo 89	3678.54	0.20	Nudo 125	3668.15	0.71
Nudo 18	3680.50	1.54	Nudo 54	3682.24	1.59	Nudo 90	3684.72	0.66	Nudo 126	3667.55	0.30
Nudo 19	3680.14	1.49	Nudo 55	3675.84	2.00	Nudo 91	3686.34	0.18	Nudo 127	3673.16	0.33
Nudo 20	3678.00	1.52	Nudo 56	3682.28	1.12	Nudo 92	3674.50	0.95	Nudo 128	3671.04	0.50
Nudo 21	3676.01	1.46	Nudo 57	3688.22	0.25	Nudo 93	3675.68	0.58	Nudo 129	3667.00	0.32
Nudo 22	3679.00	1.05	Nudo 58	3685.58	1.24	Nudo 94	3674.66	0.62	Nudo 130	3667.05	0.23
Nudo 23	3677.00	1.41	Nudo 59	3685.69	0.00	Nudo 95	3675.84	0.09	Nudo 131	3669.12	0.52
Nudo 24	3685.69	0.00	Nudo 60	3685.46	1.24	Nudo 96	3675.09	0.19	Nudo 132	3681.61	0.31
Nudo 25	3678.67	1.14	Nudo 61	3684.25	1.16	Nudo 97	3674.69	0.31	Nudo 133	3673.85	0.33
Nudo 26	3677.29	0.60	Nudo 62	3690.00	0.35	Nudo 98	3674.23	0.10	Nudo 134	3681.24	0.30
Nudo 27	3672.80	0.74	Nudo 63	3683.83	1.78	Nudo 99	3678.00	0.50	Nudo 135	3681.00	0.82
Nudo 28	3673.86	1.37	Nudo 64	3682.00	0.00	Nudo 100	3677.68	0.62	Nudo 136	3674.00	0.22
Nudo 29	3672.49	1.21	Nudo 65	3690.16	0.50	Nudo 101	3677.00	0.81	Nudo 137	3673.42	1.02
Nudo 30	3673.00	1.60	Nudo 66	3668.34	0.41	Nudo 102	3678.20	0.77	Nudo 138	3673.00	0.17
Nudo 31	3671.35	1.61	Nudo 67	3668.12	0.00	Nudo 103	3676.34	0.30	Nudo 139	3681.62	0.42
Nudo 32	3670.00	0.82	Nudo 68	3667.26	0.96	Nudo 104	3682.00	0.39	Nudo 140	3680.79	0.27
Nudo 33	3671.00	1.49	Nudo 69	3682.75	1.32	Nudo 105	3675.46	0.67	Nudo 141	3682.50	0.34
Nudo 34	3672.64	0.90	Nudo 70	3677.64	1.13	Nudo 106	3675.70	0.49	Nudo 142	3683.48	0.00
Nudo 35	3669.81	0.53	Nudo 71	3674.70	1.05	Nudo 107	3675.70	0.64	Nudo 143	3675.79	0.09
Nudo 36	3671.79	1.15	Nudo 72	3673.98	0.86	Nudo 108	3675.72	0.39	Nudo 144	3678.51	0.20

Fuente: Elaboración propia

4.3 Características de la red de distribución actual de Huancavelica

La información base para la simulación hidráulica, se obtuvo de la gerencia técnica de la empresa prestadora de servicios de saneamiento EMAPA Huancavelica. El conjunto de datos obtenidos está integrado por diversos planos con información de longitud de tuberías, diámetros, elevaciones, elementos de control y válvulas de contorno que delimitan los sectores operacionales del área de estudio.

Figura 39: *Modelo de la red de distribución del área de estudio*



Fuente: Elaboración propia

La red de distribución actual esta abastecido por una sola fuente de suministro identificado como M-05. La presión de este punto es regulada mediante una válvula reguladora de presión, debido a la elevada presión de entrada. La presión de consigna predefinida para esta válvula es de 40 m.c.a. Las características de esta fuente de suministro se definen en la siguiente tabla:

Tabla 41: *Características de la fuente de suministro*

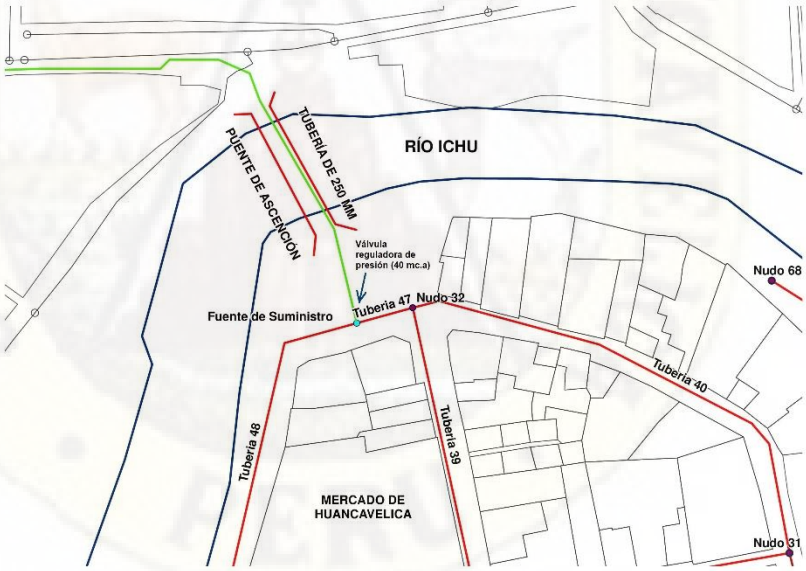
Nombre	Serie	Dirección	Presión (mca)
M05	06W703305	Puente Ascensión	40

Fuente: Elaboración propia

Figura 40: *Red de distribución de los sectores operacionales 3 y 5*

Fuente: Elaboración propia

Figura 41: *Ubicación de la fuente de suministro*



Fuente: Elaboración propia

El procesamiento de la información con el apoyo de la gerencia técnica, permitió determinar las características geométricas de la red de distribución, obteniéndose un total de 186 de tuberías y 144 nudos interconectados en la red de distribución de agua de los sectores 3 y 5. En la siguiente tabla se muestra las características de las tuberías:

Tabla 42: *Características de tuberías en la red de distribución*

Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Tubería	Diámetro (mm)	Longitud (m)
1	90	252.24	39	200	79.31	77	200	3.81	115	110	47.92	153	90	40.03
2	110	78.66	40	110	130.14	78	110	86.27	116	90	51.39	154	90	88.44
3	110	136.91	41	110	73.51	79	110	112.68	117	90	91.65	155	90	86
4	110	100.32	42	110	83.58	80	110	50.68	118	110	38.39	156	110	108.7
5	110	53.47	43	110	22.87	81	110	4.3	119	110	55.33	157	110	57.78
6	110	59.27	44	110	87.5	82	200	39.12	120	110	143.54	158	110	119.41
7	90	115.78	45	110	77.26	83	160	82.46	121	110	141.04	159	110	72.09
8	110	50.26	46	110	82.21	84	110	92.34	122	110	41.98	160	110	76.81
9	200	35.87	47	200	15.01	85	160	316.15	123	110	41.31	161	110	35.31
10	200	148.83	48	200	115.68	86	110	50.08	124	110	10.34	162	110	54.79
11	200	177.97	49	110	66.26	87	110	4.22	125	110	44.88	163	110	51.79
12	200	47.16	50	110	63.62	88	110	48.97	126	110	15.71	164	75	124.28
13	110	31.74	51	110	69.07	89	110	115.73	127	110	92.6	165	110	133.26
14	110	36.54	52	110	54.71	90	110	10.09	128	110	51.64	166	110	14.94
15	110	84.72	53	110	86.55	91	160	98.87	129	110	38.98	167	110	45.15
16	110	32.46	54	110	42.55	92	160	69.61	130	110	48.67	168	110	55.61
17	110	86.49	55	110	58.75	93	160	119.92	131	110	47.29	169	110	75.95
18	200	40.98	56	110	147.15	94	110	85.87	132	110	48.58	170	110	46.65
19	200	102.28	57	110	88.53	95	110	111.57	133	110	95.42	171	75	91.45
20	110	142.95	58	110	50.05	96	110	56.91	134	110	38.42	172	110	45.38
21	200	82.92	59	110	77.39	97	110	100.5	135	110	77.77	173	75	70.56
22	110	82.31	60	110	35.29	98	110	37.43	136	110	73.15	174	110	103.34
23	110	93.24	61	110	36.39	99	110	113.04	137	110	173.48	175	90	47.97
24	110	84.35	62	110	51.88	100	110	40.09	138	110	47.42	176	110	31.9
25	110	80.96	63	110	46.95	101	110	51.2	139	110	31.4	177	90	103.53
26	200	81.81	64	110	46.7	102	110	42.86	140	110	103.6	178	110	53.48
27	200	96.54	65	110	75.68	103	200	319.71	141	110	50.88	179	110	4.88
28	110	80.63	66	110	81.74	104	160	137.18	142	110	50.06	180	110	128.01
29	110	73.95	67	110	70.29	105	160	23.94	143	110	38.37	181	110	5.96
30	110	32.22	68	110	89.04	106	90	50.26	144	110	48.07	182	160	333.46
31	110	75.19	69	110	98.03	107	110	59.34	145	110	40.39	183	110	37.95
32	110	82.86	70	110	108.65	108	200	354.95	146	110	130.04	184	90	179.79
33	110	57.85	71	110	78.62	109	110	92.14	147	90	46.3	185	110	57.08
34	110	81.45	72	110	101.42	110	110	8.61	148	110	80.17	186	160	45.3
35	110	83.39	73	110	109.6	111	90	37.55	149	110	29.74			
36	200	77.04	74	160	68.85	112	90	52.21	150	110	45.42			
37	110	81.68	75	110	24.11	113	90	65.09	151	110	45.08			
38	110	67.35	76	200	3.36	114	110	51.44	152	110	117.65			

Fuente: Elaboración propia

4.4 Red de distribución actual de Huancavelica

La empresa prestadora de servicios de saneamiento EMAPA elaboró un Plan Maestro Optimizado (PMO) para el periodo 2018 – 2047. Este documento tiene como finalidad el planeamiento a largo plazo con un horizonte de 30 años, donde comprende la programación de inversiones y proyecciones económicas para el sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Huancavelica.

En el capítulo de inversiones y financiamiento del PMO, se plantea la ejecución de una serie de obras de renovación y rehabilitación de tuberías del sistema de abastecimiento de agua potable. Estos proyectos tienen como finalidad sustituir las tuberías antiguas por otras nuevas de la misma clase, manteniendo las dimensiones de los diámetros de la red actual.

Asimismo, se menciona en el PMO que varios proyectos de saneamientos ejecutados por el gobierno regional y local, reemplazaron las tuberías actuales con diámetros menores o pendientes no adecuadas sin opinión técnica de la EPS EMAPA Huancavelica, afectando el funcionamiento hidráulico de la red de distribución.

Teniendo en consideración los aspectos mencionados, se mantendrán las actuales características geométricas y físicas de la red de distribución para los sectores 3 y 5. Asimismo, los parámetros empleados para simulación hidráulica son los siguientes:

- Las pérdidas de carga se determinarán mediante la ecuación de Darcy-Weisbach.
- El valor de la viscosidad del fluido será de 1.14 x 10-6 m2/s.
- El tipo de material empleado para las tuberías es de PVC con una rugosidad de 0.0015 mm.

Finalmente, se hace uso del software Epanet para la simulación hidráulica. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 43: *Resultado de tuberías de la simulación – Red actual*

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción	Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción	Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción
1	252.24	85.6	3.08	0.53	0.022	32	82.86	104.6	5.64	0.66	0.020	63	46.95	104.6	0.56	0.07	0.037
2	78.66	104.6	1.57	0.18	0.027	33	57.85	104.6	10.77	1.25	0.018	64	46.70	104.6	0.63	0.07	0.034
3	136.91	104.6	4.74	0.55	0.021	34	81.45	104.6	6.50	0.76	0.019	65	75.68	104.6	7.21	0.84	0.019
4	100.32	104.6	3.44	0.40	0.022	35	83.39	104.6	7.39	0.86	0.019	66	81.74	104.6	6.22	0.72	0.020
5	53.47	104.6	0.67	0.08	0.033	36	77.04	190.2	45.52	1.60	0.015	67	70.29	104.6	3.56	0.41	0.022
6	59.27	104.6	0.89	0.10	0.032	37	81.68	104.6	4.67	0.54	0.021	68	89.04	104.6	4.02	0.47	0.022
7	115.78	85.6	0.33	0.06	0.039	38	67.35	104.6	12.07	1.40	0.017	69	98.03	104.6	1.52	0.18	0.027
8	50.26	104.6	4.73	0.55	0.021	39	79.31	190.2	51.79	1.82	0.014	70	108.65	104.6	1.29	0.15	0.029
9	35.87	190.2	38.94	1.37	0.015	40	130.14	104.6	9.01	1.05	0.018	71	78.62	104.6	4.66	0.54	0.021
10	148.83	190.2	25.91	0.91	0.017	41	73.51	104.6	11.75	1.37	0.017	72	101.42	104.6	1.63	0.19	0.027
11	177.97	190.2	20.50	0.72	0.017	42	83.58	104.6	3.58	0.42	0.022	73	109.60	104.6	1.78	0.21	0.026
12	47.16	190.2	3.72	0.13	0.026	43	22.87	104.6	5.51	0.64	0.020	74	68.85	152	10.28	0.57	0.019
13	31.74	104.6	12.55	1.46	0.017	44	87.50	104.6	6.67	0.78	0.019	75	24.11	104.6	0.25	0.03	0.030
14	36.54	104.6	0.52	0.06	0.037	45	77.26	104.6	5.73	0.67	0.020	76	3.36	190.2	4.96	0.17	0.022
15	84.72	104.6	4.93	0.57	0.021	46	82.21	104.6	8.19	0.95	0.019	77	3.81	190.2	4.61	0.16	0.033
16	32.46	104.6	0.81	0.09	0.034	47	15.01	190.2	61.62	2.17	0.014	78	86.27	104.6	8.75	1.02	0.018
17	86.49	104.6	6.76	0.79	0.019	48	115.68	190.2	43.86	1.54	0.015	79	112.68	104.6	10.24	1.19	0.018
18	40.98	190.2	31.71	1.12	0.016	49	66.26	104.6	6.80	0.79	0.019	80	50.68	104.6	5.37	0.63	0.020
19	102.28	190.2	36.92	1.30	0.015	50	63.62	104.6	5.97	0.69	0.020	81	4.30	104.6	16.77	1.95	0.016
20	142.95	104.6	6.68	0.78	0.019	51	69.07	104.6	6.11	0.71	0.020	82	39.12	190.2	0.35	0.01	0.187
21	82.92	190.2	34.90	1.23	0.016	52	54.71	104.6	5.79	0.67	0.020	83	82.46	152	12.12	0.67	0.018
22	82.31	104.6	1.94	0.23	0.026	53	86.55	104.6	6.65	0.77	0.019	84	92.34	104.6	5.85	0.68	0.020
23	93.24	104.6	8.06	0.94	0.019	54	42.55	104.6	3.76	0.44	0.022	85	316.15	152	5.31	0.29	0.022
24	84.35	104.6	5.07	0.59	0.021	55	58.75	104.6	0.54	0.06	0.037	86	50.08	104.6	0.50	0.06	0.040
25	80.96	104.6	3.33	0.39	0.023	56	147.15	104.6	3.34	0.39	0.023	87	4.22	104.6	5.81	0.68	0.020
26	81.81	190.2	40.06	1.41	0.015	57	88.53	104.6	1.94	0.23	0.026	88	48.97	104.6	0.41	0.05	0.038
27	96.54	190.2	30.32	1.07	0.016	58	50.05	104.6	0.78	0.09	0.033	89	115.73	104.6	2.76	0.32	0.024
28	80.63	104.6	5.11	0.60	0.021	59	77.39	104.6	2.23	0.26	0.025	90	10.09	104.6	4.30	0.50	0.021
29	73.95	104.6	1.88	0.22	0.026	60	35.29	104.6	0.51	0.06	0.039	91	98.87	152	16.19	0.89	0.017
30	32.22	104.6	9.68	1.13	0.018	61	36.39	104.6	0.52	0.06	0.037	92	69.61	152	10.58	0.58	0.019
31	75.19	104.6	4.52	0.53	0.021	62	51.88	104.6	1.72	0.20	0.026	93	119.92	152	7.38	0.41	0.021

Fuente: Elaboración propia

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción	Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción	Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción
94	85.87	104.6	2.07	0.24	0.025	125	44.88	104.6	4.03	0.47	0.022	156	108.70	104.6	6.14	0.71	0.020
95	111.57	104.6	2.82	0.33	0.024	126	15.71	104.6	0.10	0.01	0.000	157	57.78	104.6	9.48	1.10	0.018
96	56.91	104.6	1.28	0.15	0.028	127	92.60	104.6	1.41	0.16	0.028	158	119.41	104.6	3.86	0.45	0.022
97	100.50	104.6	1.36	0.16	0.028	128	51.64	104.6	0.30	0.03	0.039	159	72.09	104.6	0.18	0.02	0.037
98	37.43	104.6	3.64	0.42	0.022	129	38.98	104.6	0.20	0.02	0.029	160	76.81	104.6	3.65	0.42	0.022
99	113.04	104.6	1.66	0.19	0.027	130	48.67	104.6	6.73	0.78	0.019	161	35.31	104.6	4.72	0.55	0.021
100	40.09	104.6	1.79	0.21	0.026	131	47.29	104.6	7.49	0.87	0.019	162	54.79	104.6	0.34	0.04	0.036
101	51.20	104.6	0.41	0.05	0.038	132	48.58	104.6	4.63	0.54	0.021	163	51.79	104.6	2.99	0.35	0.023
102	42.86	104.6	0.73	0.08	0.034	133	95.42	104.6	2.46	0.29	0.024	164	124.28	71.2	0.71	0.18	0.030
103	319.71	190.2	25.36	0.89	0.017	134	38.42	104.6	0.30	0.03	0.039	165	133.26	104.6	0.88	0.10	0.032
104	137.18	152	1.38	0.08	0.031	135	77.77	104.6	1.39	0.16	0.028	166	14.94	104.6	3.08	0.36	0.023
105	23.94	152	4.18	0.23	0.023	136	73.15	104.6	3.82	0.44	0.022	167	45.15	104.6	2.43	0.28	0.024
106	50.26	85.6	0.41	0.07	0.037	137	173.48	104.6	1.83	0.21	0.026	168	55.61	104.6	1.70	0.20	0.027
107	59.34	104.6	3.25	0.38	0.023	138	47.42	104.6	4.82	0.56	0.021	169	75.95	104.6	0.32	0.04	0.035
108	354.95	190.2	23.98	0.84	0.017	139	31.40	104.6	2.33	0.27	0.025	170	46.65	104.6	0.23	0.03	0.037
109	92.14	104.6	0.30	0.03	0.033	140	103.60	104.6	2.93	0.34	0.023	171	91.45	71.2	0.31	0.08	0.038
110	8.61	104.6	2.66	0.31	0.024	141	50.88	104.6	1.35	0.16	0.028	172	45.38	104.6	1.45	0.17	0.028
111	37.55	85.6	0.49	0.09	0.035	142	50.06	104.6	2.25	0.26	0.025	173	70.56	71.2	0.30	0.08	0.038
112	52.21	85.6	0.29	0.05	0.041	143	38.37	104.6	2.33	0.27	0.025	174	103.34	104.6	0.82	0.10	0.032
113	65.09	85.6	0.10	0.02	0.051	144	48.07	104.6	4.20	0.49	0.021	175	47.97	85.6	1.02	0.18	0.029
114	51.44	104.6	1.83	0.21	0.026	145	40.39	104.6	5.16	0.60	0.020	176	31.90	104.6	0.17	0.02	0.049
115	47.92	104.6	1.16	0.13	0.029	146	130.04	104.6	3.62	0.42	0.022	177	103.53	85.6	0.42	0.07	0.036
116	51.39	85.6	1.26	0.22	0.027	147	46.30	85.6	1.59	0.28	0.026	178	53.48	104.6	0.27	0.03	0.035
117	91.65	85.6	0.18	0.03	0.028	148	80.17	104.6	4.31	0.50	0.021	179	4.88	104.6	14.93	1.74	0.016
118	38.39	104.6	2.55	0.30	0.024	149	29.74	104.6	1.65	0.19	0.027	180	128.01	104.6	4.89	0.57	0.021
119	55.33	104.6	0.17	0.02	0.028	150	45.42	104.6	4.77	0.55	0.021	181	5.96	104.6	3.82	0.44	0.022
120	143.54	104.6	1.43	0.17	0.028	151	45.08	104.6	5.79	0.67	0.020	182	333.46	152	9.05	0.50	0.020
121	141.04	104.6	1.48	0.17	0.028	152	117.65	104.6	3.96	0.46	0.022	183	37.95	104.6	7.89	0.92	0.019
122	41.98	104.6	0.55	0.06	0.036	153	40.03	85.6	0.18	0.03	0.026	184	179.79	85.6	0.96	0.17	0.029
123	41.31	104.6	0.09	0.01	0.000	154	88.44	85.6	1.77	0.31	0.025	185	57.08	104.6	2.28	0.27	0.025
124	10.34	104.6	6.55	0.76	0.019	155	86.00	85.6	0.93	0.16	0.029	186	45.30	152	0.96	0.05	0.028

Fuente: Elaboración propia

Tabla 44: *Resultado de nudos de la simulación – Red actual*

Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)	Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)	Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)
1	3674.00	1.51	3707.95	33.95	26	3677.29	0.60	3705.57	28.28	51	3677.53	1.14	3704.67	27.14
2	3670.87	1.84	3708.90	38.03	27	3672.80	0.74	3706.14	33.34	52	3676.82	1.62	3704.54	27.72
3	3679.09	1.56	3707.92	28.83	28	3673.86	1.37	3706.92	33.06	53	3682.00	0.00	3704.63	22.63
4	3684.22	1.98	3707.49	23.27	29	3672.49	1.21	3707.36	34.87	54	3682.24	1.59	3704.50	22.26
5	3681.49	0.92	3707.32	25.83	30	3673.00	1.60	3708.71	35.71	55	3675.84	2.00	3704.30	28.46
6	3688.05	1.20	3707.50	19.45	31	3671.35	1.61	3708.47	37.12	56	3682.28	1.12	3704.36	22.08
7	3687.73	0.56	3707.49	19.76	32	3670.00	0.82	3709.73	39.73	57	3688.22	0.25	3706.14	17.91
8	3687.64	0.33	3707.48	19.84	33	3671.00	1.49	3706.21	35.21	58	3685.58	1.24	3706.14	20.56
9	3687.44	0.96	3707.64	20.20	34	3672.64	0.90	3706.05	33.41	59	3685.69	0.00	3705.34	19.65
10	3679.28	0.68	3708.07	28.79	35	3669.81	0.53	3705.71	35.90	60	3685.46	1.24	3705.34	19.88
11	3675.34	0.48	3708.62	33.28	36	3671.79	1.15	3705.37	33.58	61	3684.25	1.16	3707.52	23.27
12	3684.45	0.00	3707.64	23.19	37	3672.25	1.01	3704.98	32.73	62	3690.00	0.35	3705.34	15.34
13	3677.08	1.16	3708.06	30.98	38	3676.03	0.85	3705.08	29.05	63	3683.83	1.78	3705.11	21.28
14	3679.00	0.43	3707.02	28.02	39	3674.79	1.23	3704.74	29.95	64	3682.00	0.00	3704.61	22.61
15	3680.49	0.52	3707.02	26.53	40	3674.00	0.89	3704.25	30.25	65	3690.16	0.50	3704.60	14.44
16	3678.12	1.44	3706.74	28.62	41	3674.00	0.99	3704.17	30.17	66	3668.34	0.41	3705.71	37.37
17	3679.91	0.32	3707.03	27.12	42	3670.73	1.94	3704.16	33.43	67	3668.12	0.00	3704.41	36.29
18	3680.50	1.54	3706.53	26.03	43	3669.93	1.01	3704.41	34.48	68	3667.26	0.96	3704.32	37.06
19	3680.14	1.49	3705.81	25.67	44	3673.20	0.65	3704.10	30.90	69	3682.75	1.32	3704.65	21.90
20	3678.00	1.52	3705.93	27.93	45	3672.70	0.78	3704.10	31.40	70	3677.64	1.13	3704.22	26.58
21	3676.01	1.46	3707.26	31.25	46	3673.65	0.50	3704.10	30.45	71	3674.70	1.05	3704.16	29.46
22	3679.00	1.05	3707.32	28.32	47	3673.70	0.52	3704.10	30.40	72	3673.98	0.86	3704.15	30.17
23	3677.00	1.41	3707.93	30.93	48	3673.03	0.53	3704.08	31.05	73	3674.00	0.62	3704.18	30.18
24	3685.69	0.00	3705.34	19.65	49	3673.00	0.56	3704.07	31.07	74	3673.00	0.52	3704.13	31.13
25	3678.67	1.14	3705.53	26.86	50	3672.95	0.63	3704.07	31.12	75	3673.53	0.88	3704.12	30.59

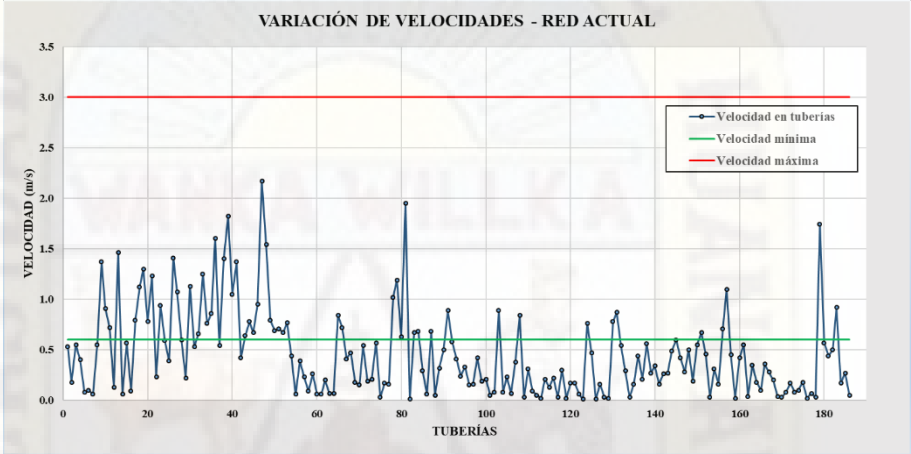
Fuente: Elaboración propia

Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)	Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)	Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)
76	3672.00	0.73	3704.12	32.12	101	3677.00	0.81	3702.48	25.48	126	3667.55	0.30	3700.61	33.06
77	3682.47	0.00	3704.21	21.74	102	3678.20	0.77	3702.39	24.19	127	3673.16	0.33	3700.68	27.52
78	3686.82	1.38	3704.20	17.38	103	3676.34	0.30	3702.38	26.04	128	3671.04	0.50	3700.64	29.60
79	3677.28	0.52	3704.21	26.93	104	3682.00	0.39	3702.36	20.36	129	3667.00	0.32	3700.68	33.68
80	3681.94	0.41	3704.21	22.27	105	3675.46	0.67	3702.21	26.75	130	3667.05	0.23	3700.64	33.59
81	3678.33	0.00	3703.07	24.74	106	3675.70	0.49	3702.18	26.48	131	3669.12	0.52	3700.56	31.44
82	3676.00	0.29	3704.12	28.12	107	3675.70	0.64	3702.32	26.62	132	3681.61	0.31	3700.54	18.93
83	3684.45	0.30	3704.12	19.67	108	3675.72	0.39	3702.46	26.74	133	3673.85	0.33	3700.54	26.69
84	3676.44	0.34	3704.11	27.67	109	3675.75	0.38	3702.58	26.83	134	3681.24	0.30	3700.53	19.29
85	3678.24	0.10	3704.11	25.87	110	3674.00	0.90	3702.26	28.26	135	3681.00	0.82	3700.53	19.53
86	3686.09	0.29	3704.10	18.01	111	3674.00	0.89	3702.05	28.05	136	3674.00	0.22	3704.03	30.03
87	3684.00	0.10	3704.10	20.10	112	3673.00	0.63	3702.04	29.04	137	3673.42	1.02	3704.01	30.59
88	3677.00	0.40	3704.08	27.08	113	3672.00	0.72	3701.84	29.84	138	3673.00	0.17	3704.03	31.03
89	3678.54	0.20	3704.07	25.53	114	3675.29	0.18	3701.84	26.55	139	3681.62	0.42	3704.02	22.40
90	3684.72	0.66	3704.03	19.31	115	3670.87	1.77	3701.93	31.06	140	3680.79	0.27	3704.08	23.29
91	3686.34	0.18	3704.03	17.69	116	3666.34	0.93	3701.80	35.46	141	3682.50	0.34	3702.52	20.02
92	3674.50	0.95	3704.12	29.62	117	3673.10	0.62	3701.57	28.47	142	3683.48	0.00	3702.51	19.03
93	3675.68	0.58	3704.07	28.39	118	3681.49	0.58	3702.11	20.62	143	3675.79	0.09	3702.67	26.88
94	3674.66	0.62	3704.07	29.41	119	3672.00	0.90	3700.96	28.96	144	3678.51	0.20	3702.95	24.44
95	3675.84	0.09	3702.67	26.83	120	3673.61	0.60	3700.70	27.09	Fuente R-1	3710.00	-105.48	3710.00	0.00
96	3675.09	0.19	3702.61	27.52	121	3669.68	0.84	3700.70	31.02					
97	3674.69	0.31	3702.51	27.82	122	3670.28	0.73	3700.85	30.57					
98	3674.23	0.10	3702.51	28.28	123	3665.69	0.34	3700.85	35.16					
99	3678.00	0.50	3702.95	24.95	124	3665.30	1.40	3700.63	35.33					
100	3677.68	0.62	3702.62	24.94	125	3668.15	0.71	3700.54	32.39					

Fuente: Elaboración propia

Las velocidades obtenidas de la simulación hidráulica oscilan entre 0.01 a 2.17 m/s, de los cuales 132 tuberías tienen velocidades por debajo del mínimo recomendado por la norma OS-050. Estas bajas velocidades representan el 70.97% del total de tuberías en la red, y pueden ser causadas por una inadecuada selección del diámetro o la tubería está abasteciendo a un porcentaje bajo de viviendas.

Tabla 45: *Variación de velocidades – Red actual*



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las presiones obtenidas de la simulación hidráulica, estas oscilan entre 14.95 y 39.76 m.c.a., de los cuales todas las presiones están por encima de la mínima de 10 m.c.a. recomendada por la norma técnica OS-050.

Tabla 46: *Variación de presiones – Red actual*

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a los índices del costo y resiliencia de la red actual, se obtuvieron los siguientes valores:

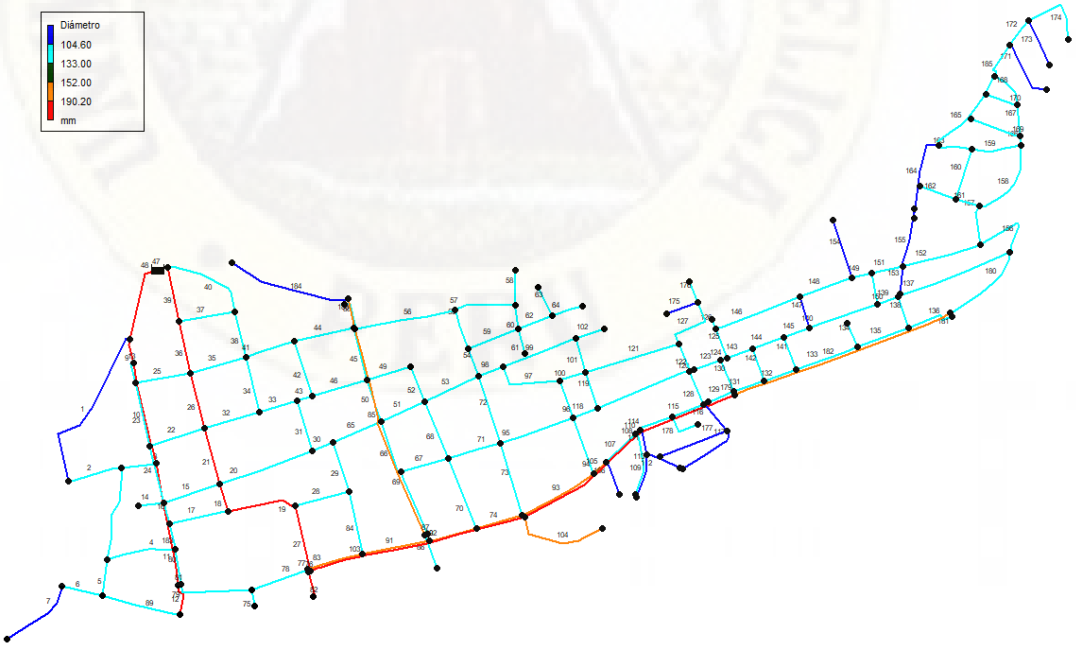
Tabla 47: *Índices de la red actual*

Red de distribución	Índice de costo (Ic)	Índice de resiliencia (Ir)	Costo (S/.)
Red actual	0.31	0.25	S/ 539,384.56

Fuente: Elaboración propia

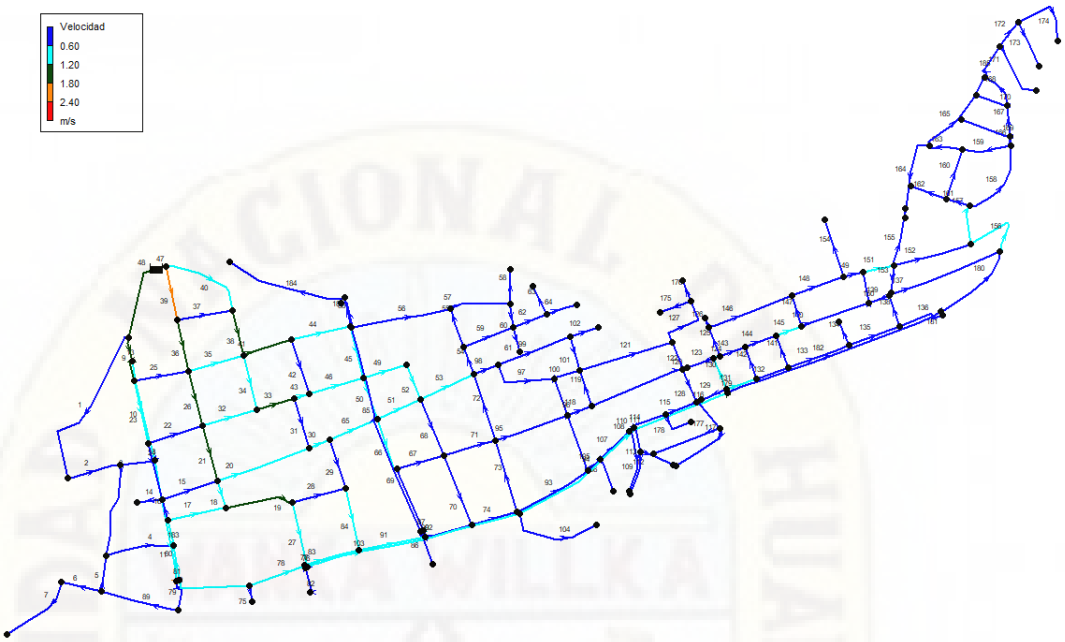
El índice de costo al igual que el índice de resiliencia tienen valores por debajo del 0.5, lo cual indicaría que es una red resiliente con un nivel aceptable de presión. La razón de un índice de resiliencia por debajo del 0.5, se debe a las presiones obtenidas de la simulación hidráulica que se encuentran por encima del mínimo recomendado. Las presiones obtenidas garantizaran un adecuado funcionamiento durante la operación del sistema. Asimismo, el costo obtenido se debe en gran parte a la distribución de diámetros, de los cuales el más predominante en la red de distribución son los diámetros de 110 mm.

Figura 42: *Resultado de diámetros – Red actual*



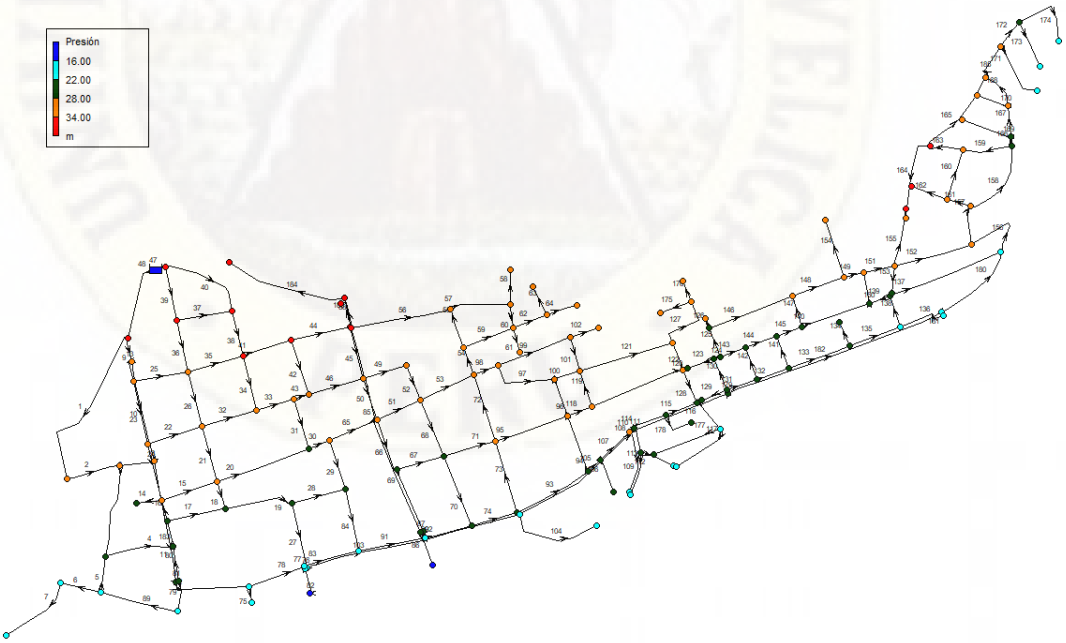
Fuente: Software Epanet 2.0.

Figura 43: *Resultado de velocidades – Red actual*



Fuente: Software Epanet 2.0.

Tabla 48: *Resultado de presiones – Red actual*



Fuente: Software Epanet 2.0.

4.5 Red de distribución optimizada de Huancavelica

La red de distribución actual se optimiza mediante el algoritmo genético de clasificación no dominada (NSGA-II). El fichero de entrada será *Red_Huancavelica.inp*, formato procedente del programa Epanet para la ejecución del código principal. Este fichero conservara las características hidráulicas y topológicas de la red actual. Asimismo, se consideran los diámetros de la red actual como población inicial, esto permitirá reducir el número de búsqueda dentro del espacio de solución, mejorará la capacidad convergencia y el rendimiento del algoritmo de optimización. Los parámetros utilizados para el empleo del algoritmo genético NSGA-II son:

- Numero de generaciones: 2000
- Tamaño de la población: 50 (tendrá como datos de ingreso además de los pobladores aleatorios, a un poblador constituido por los mayores diámetros y otro con los diámetros de la red actual)
- Probabilidad de cruzamiento: 35%
- Probabilidad de mutación: 5%

Los parámetros de cálculo que se utilizarán son los siguientes:

- Ecuación de perdida: Darcy-Weisbach
- Viscosidad cinemática: 1.14 x 10-6 m2/s
- Rugosidad absoluta (PVC): 1.5 x 10-6 m.
- Presión mínima requerida en los nudos de 10 m.c.a. según los establecido en la norma técnica OS-050.

De igual forma, el código principal requiere el ingreso de diámetros comerciales y sus respectivos costos por metro lineal. Los diámetros utilizados para la optimización de la red son los siguientes:

Tabla 49: *Diámetros comerciales disponibles*

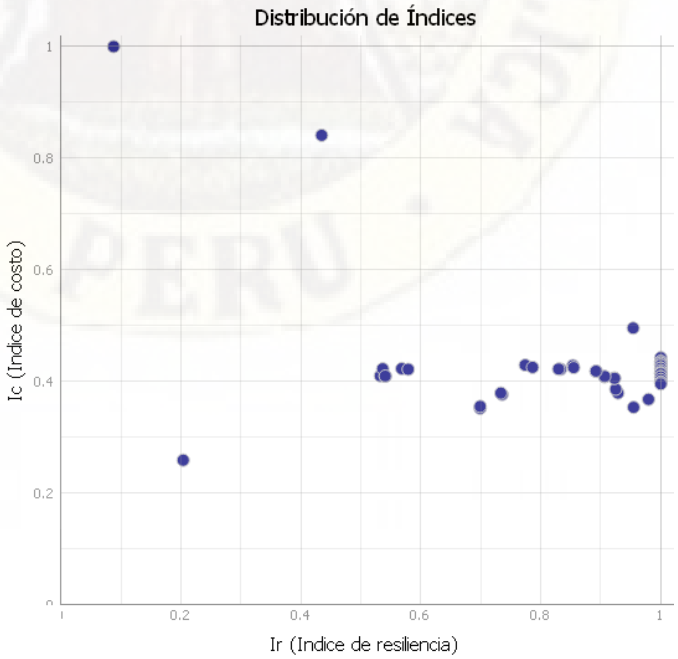
Diámetro (pulg)	Diámetro interno (mm)	Costo (S/.)
2 1/2	71.2	13.16
3	85.6	18.78
4	104.6	28.17
5	133	47.27
6	152	59.2
8	190.2	92.5

Fuente: Elaboración propia

4.5.1 Ejecución del código principal NSGA-II

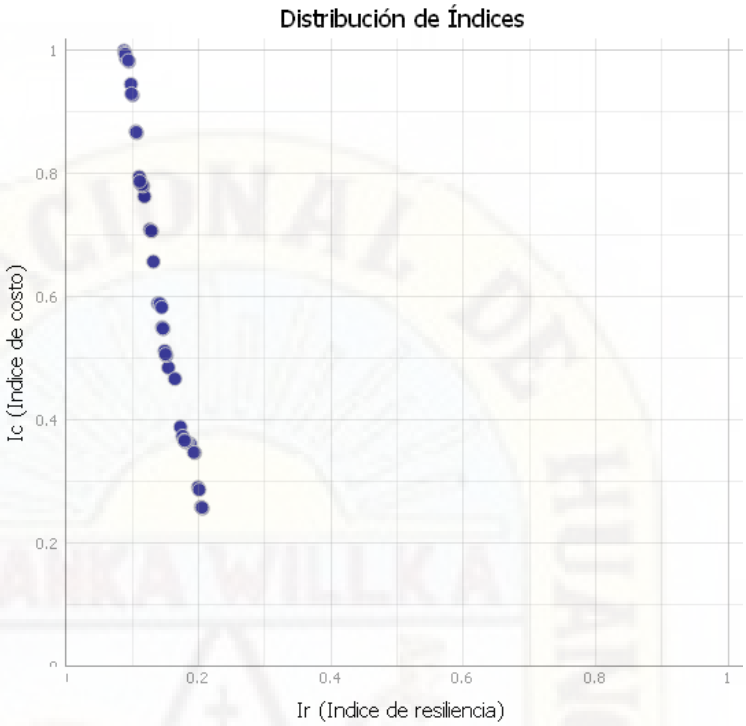
Luego de ejecutar el código principal se obtienen gráficos y datos de los índices de costo, resiliencia, numero de incumplimiento y costo total de cada generación. También, se obtiene un archivo Resultados.xls con información de cada solución para que el diseñador escoja la que considere más adecuada. El tiempo de procesamiento fue de 19 minutos 20 segundos, obteniéndose una buena distribución de soluciones en el Frente de Pareto. La evolución de soluciones se muestra en el siguiente historial de generaciones:

Figura 44: *Generación 1 – Red optimizada*



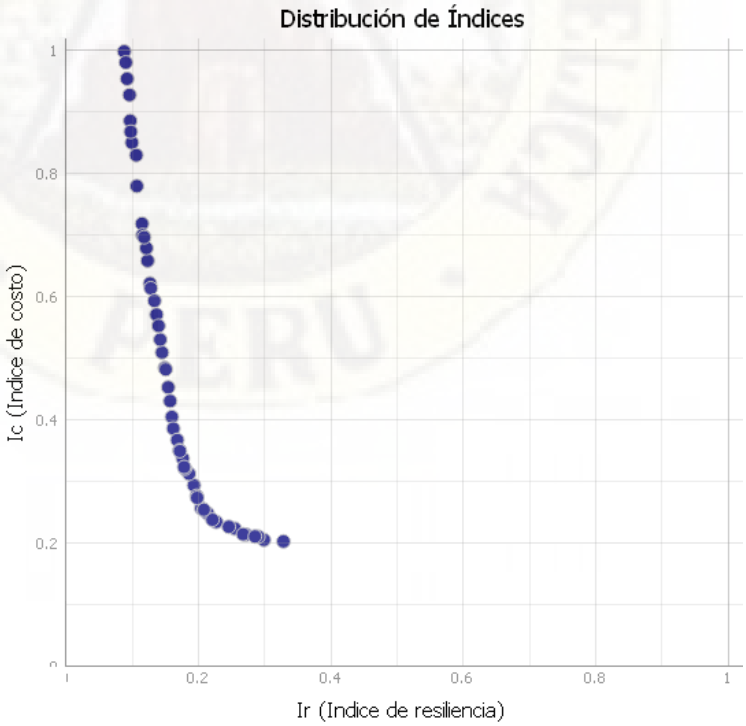
Fuente: Elaboración propia

Figura 45: *Generación 10 – Red optimizada*



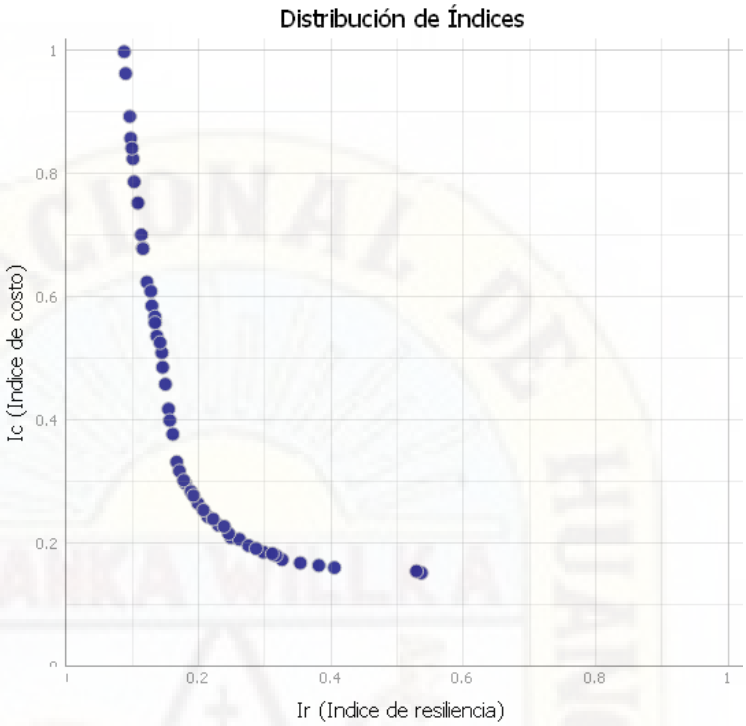
Fuente: Elaboración propia

Figura 46: *Generación 100 – Red optimizada*



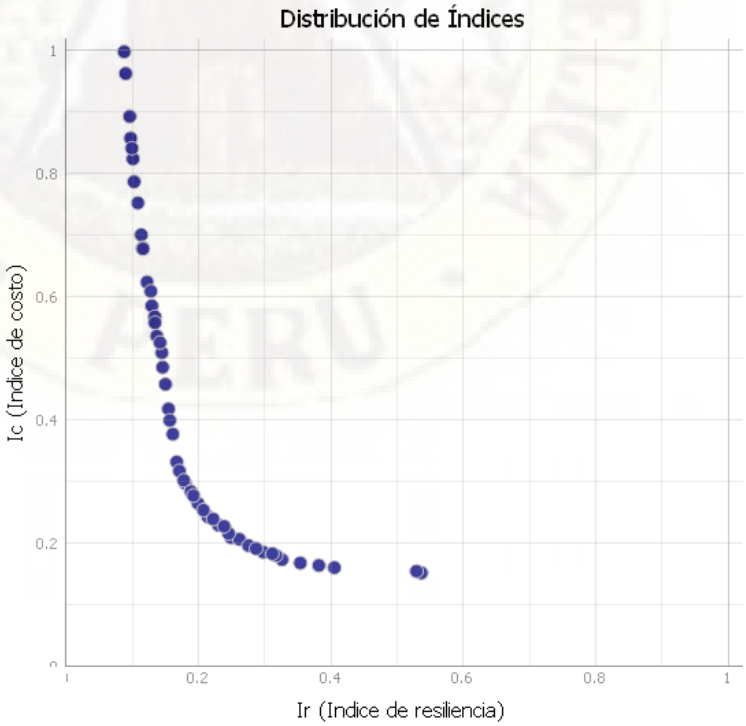
Fuente: Elaboración propia

Figura 47: *Generación 250 – Red optimizada*



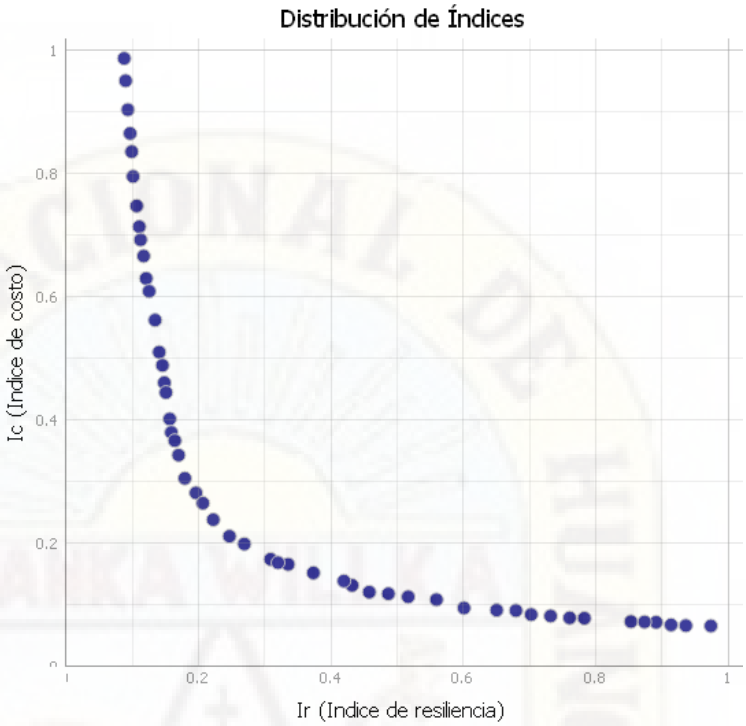
Fuente: Elaboración propia

Figura 48: *Generación 500 – Red optimizada*



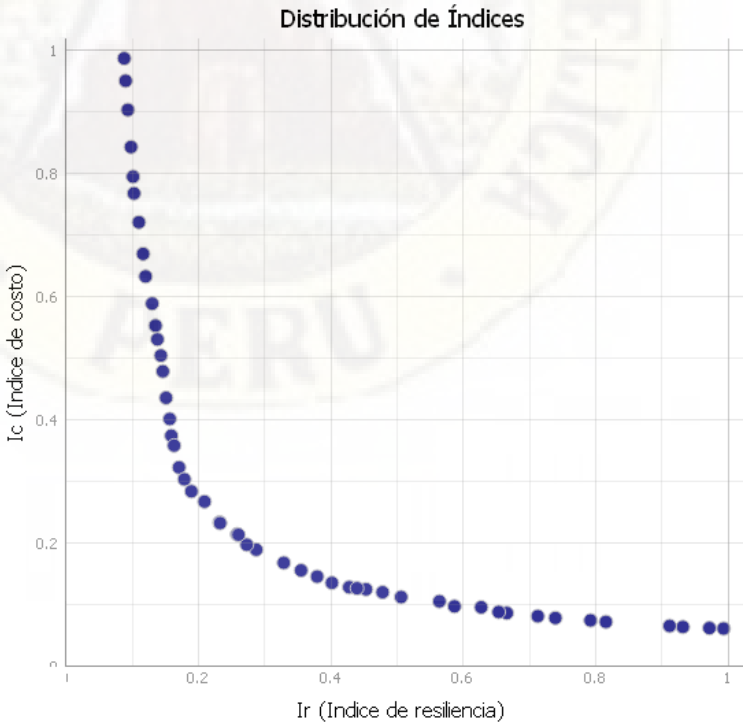
Fuente: Elaboración propia

Figura 49: *Generación 750 – Red optimizada*



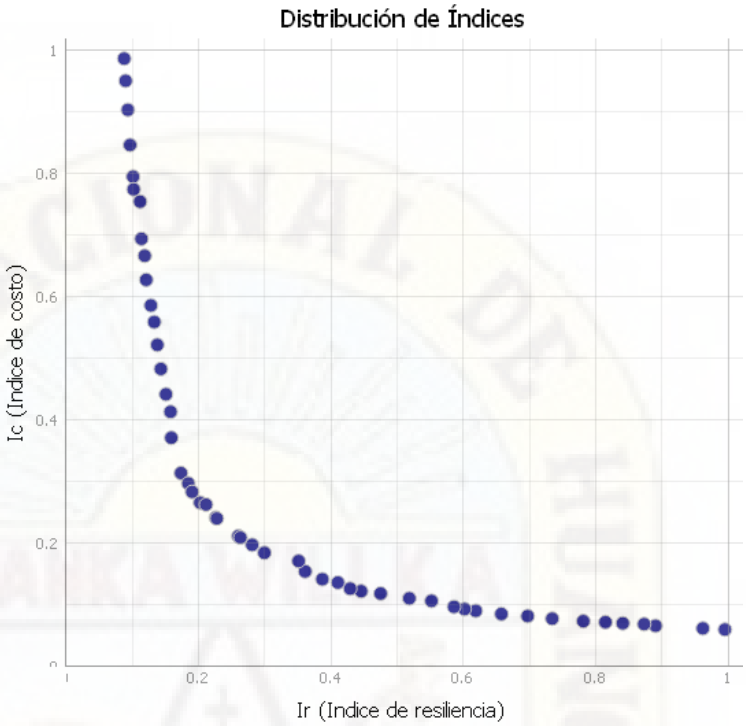
Fuente: Elaboración propia

Figura 50: *Generación 1000 – Red optimizada*



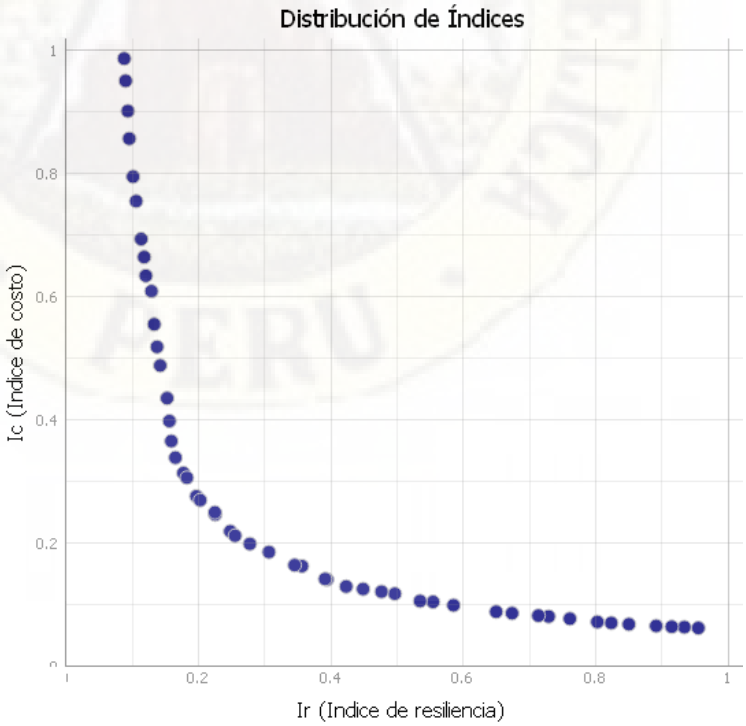
Fuente: Elaboración propia

Figura 51: *Generación 1250 – Red optimizada*



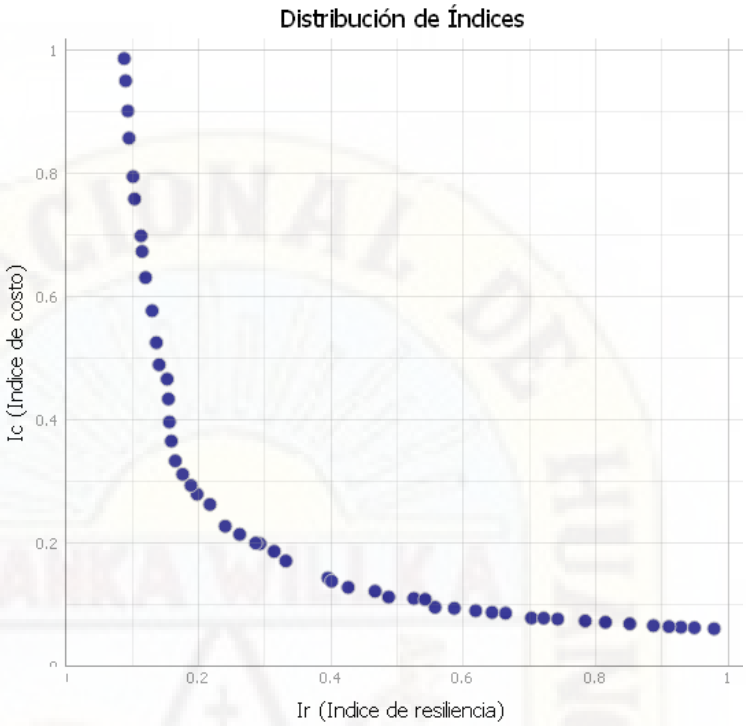
Fuente: Elaboración propia

Figura 52: *Generación 1500 – Red optimizada*



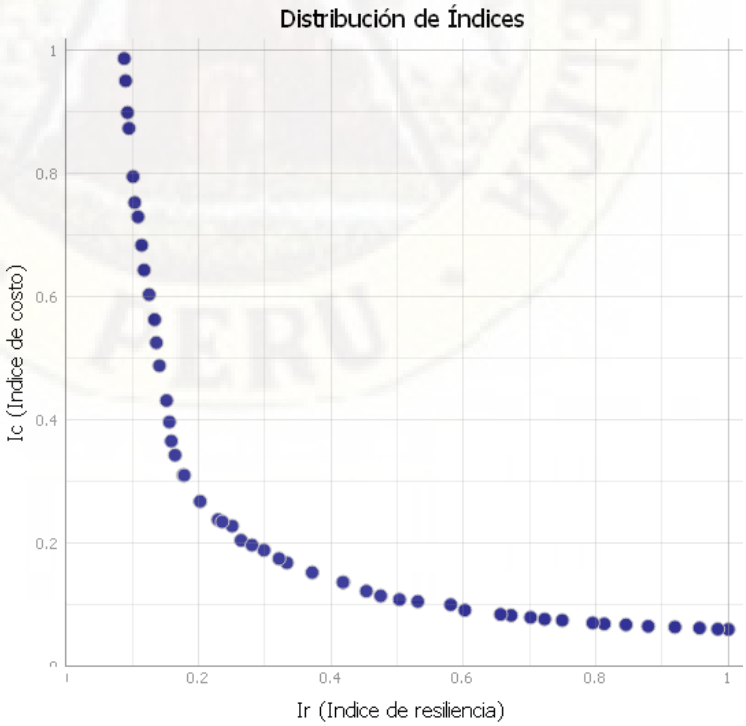
Fuente: Elaboración propia

Figura 53: *Generación 1750 – Red optimizada*



Fuente: Elaboración propia

Figura 54: *Generación 2000 – Red optimizada*



Fuente: Elaboración propia

Las soluciones obtenidas en la última generación fueron:

Tabla 50: *Soluciones de la generación 2000 (final) – Red optimizada*

Solución	Ir	Ic	Ninc	Costo	Solución	Ir	Ic	Ninc	Costo
1	0.09	0.99	172	S/1,294,240.77	26	0.26	0.20	105	S/414,997.33
2	1.00	0.06	167	S/252,557.68	27	0.18	0.31	128	S/533,975.97
3	0.10	0.80	167	S/1,078,895.53	28	0.50	0.11	108	S/307,083.18
4	**0.20**	**0.26**	**119**	**S/475,967.30**	29	0.16	0.37	140	S/596,239.59
5	0.60	0.09	113	S/287,589.58	30	0.48	0.11	100	S/313,798.68
6	0.37	0.15	105	S/356,306.27	31	0.16	0.34	142	S/570,589.00
7	0.15	0.43	144	S/670,294.10	32	0.67	0.08	120	S/278,132.19
8	0.09	0.90	171	S/1,195,720.15	33	0.30	0.19	108	S/397,046.02
9	0.11	0.68	161	S/953,642.50	34	0.42	0.14	101	S/338,505.46
10	0.75	0.07	145	S/269,109.41	35	0.72	0.08	147	S/271,206.56
11	0.33	0.17	107	S/374,115.35	36	0.96	0.06	160	S/255,011.06
12	0.88	0.06	158	S/258,209.80	37	0.09	0.87	170	S/1,166,974.43
13	0.53	0.10	102	S/303,592.34	38	0.11	0.73	168	S/1,005,474.39
14	0.10	0.75	168	S/1,031,524.16	39	0.28	0.20	103	S/406,432.31
15	0.12	0.64	161	S/908,366.15	40	0.32	0.17	105	S/381,684.31
16	0.13	0.56	153	S/817,840.23	41	0.70	0.08	138	S/274,422.20
17	0.92	0.06	162	S/256,815.01	42	0.18	0.31	128	S/533,824.54
18	0.13	0.60	158	S/863,567.23	43	0.80	0.07	144	S/264,318.75
19	0.09	0.95	172	S/1,253,676.85	44	0.58	0.10	130	S/297,644.48
20	0.14	0.49	154	S/733,839.48	45	0.45	0.12	106	S/322,302.42
21	0.23	0.24	111	S/452,721.95	46	0.25	0.23	109	S/441,165.78
22	0.85	0.07	149	S/261,072.00	47	0.24	0.23	110	S/448,931.72
23	0.16	0.40	143	S/631,164.39	48	0.98	0.06	164	S/253,057.51
24	0.14	0.53	157	S/775,748.12	49	0.66	0.08	121	S/279,852.76
25	0.81	0.07	146	S/262,543.46	50	0.42	0.14	101	S/338,563.57

Fuente: Elaboración propia

La selección de la solución óptima dependerá de las necesidades del diseñador, ya sea que se busque una red con alta confiabilidad y elevado costo o una red con índices equilibrados. Ambos índices están representados numéricamente en el rango de 0 a 1, siendo el índice más cercano de 0 el más óptimo. Para la investigación, se seleccionó una red de distribución con índices equilibrados tanto en costo como en resiliencia, teniendo como criterio adicional que la red pueda satisfacer simultáneamente las restricciones de la presión mínima en todos los nudos durante alguna falla. La red seleccionada es la solución N° 4 que cuenta con un índice de resiliencia de Ir = 0.20 y un índice de costo de Ic = 0.26, los resultados de tuberías y nudos de la solución seleccionada son los siguientes:

Tabla 51: *Resultados de tuberías de la solución seleccionada – Red optimizada*

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción	Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción	Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción
1	252.24	71.2	2.30	0.58	0.023	32	82.86	190.2	9.97	0.35	0.020	63	46.95	71.2	0.56	0.14	0.033
2	78.66	71.2	0.79	0.20	0.030	33	57.85	190.2	27.17	0.96	0.016	64	46.70	71.2	0.63	0.16	0.031
3	136.91	71.2	1.30	0.33	0.026	34	81.45	190.2	18.56	0.65	0.018	65	75.68	152	5.12	0.28	0.022
4	100.32	71.2	-2.16	0.54	0.023	35	83.39	190.2	13.54	0.48	0.019	66	81.74	85.6	4.97	0.86	0.020
5	53.47	71.2	-1.49	0.37	0.025	36	77.04	190.2	29.29	1.03	0.016	67	70.29	71.2	1.64	0.41	0.024
6	59.27	71.2	0.89	0.22	0.029	37	81.68	190.2	6.88	0.24	0.022	68	89.04	85.6	4.66	0.81	0.020
7	115.78	71.2	0.33	0.08	0.038	38	67.35	190.2	34.76	1.22	0.016	69	98.03	71.2	2.19	0.55	0.023
8	50.26	71.2	2.08	0.52	0.023	39	79.31	190.2	37.77	1.33	0.015	70	108.65	71.2	2.02	0.51	0.023
9	35.87	190.2	33.27	1.17	0.016	40	130.14	190.2	29.48	1.04	0.016	71	78.62	71.2	2.66	0.67	0.022
10	148.83	85.6	4.24	0.74	0.020	41	73.51	190.2	28.52	1.00	0.016	72	101.42	71.2	-2.36	0.59	0.022
11	177.97	71.2	1.48	0.37	0.025	42	83.58	190.2	12.17	0.43	0.019	73	109.60	71.2	-1.23	0.31	0.026
12	47.16	71.2	1.56	0.39	0.025	43	22.87	190.2	5.09	0.18	0.024	74	68.85	71.2	1.95	0.49	0.023
13	31.74	190.2	28.55	1.00	0.016	44	87.50	190.2	14.86	0.52	0.019	75	24.11	71.2	0.25	0.06	0.039
14	36.54	71.2	0.52	0.13	0.033	45	77.26	190.2	13.92	0.49	0.019	76	3.36	71.2	2.31	0.58	0.022
15	84.72	133	3.45	0.25	0.024	46	82.21	190.2	16.37	0.58	0.018	77	3.81	71.2	1.96	0.49	0.023
16	32.46	133	-10.18	0.73	0.019	47	15.01	190.2	68.07	2.40	0.014	78	86.27	71.2	0.24	0.06	0.040
17	86.49	133	3.81	0.27	0.023	48	115.68	190.2	37.41	1.32	0.015	79	112.68	71.2	1.73	0.43	0.024
18	40.98	133	9.35	0.67	0.019	49	66.26	152	14.98	0.83	0.018	80	50.68	71.2	-2.97	0.75	0.021
19	102.28	133	11.61	0.84	0.018	50	63.62	152	14.16	0.78	0.018	81	4.30	71.2	-0.08	0.02	0.000
20	142.95	152	7.32	0.40	0.021	51	69.07	152	13.46	0.74	0.018	82	39.12	71.2	0.35	0.09	0.037
21	82.92	152	14.66	0.81	0.018	52	54.71	152	13.97	0.77	0.018	83	82.46	71.2	0.96	0.24	0.028
22	82.31	152	5.16	0.28	0.022	53	86.55	152	21.53	1.19	0.016	84	92.34	71.2	2.74	0.69	0.022
23	93.24	190.2	20.79	0.73	0.017	54	42.55	133	8.30	0.60	0.019	85	316.15	71.2	0.77	0.19	0.030
24	84.35	152	14.58	0.80	0.018	55	58.75	104.6	4.84	0.56	0.021	86	50.08	71.2	0.50	0.13	0.033
25	80.96	152	6.60	0.36	0.021	56	147.15	71.2	-1.20	0.30	0.026	87	4.22	71.2	1.27	0.32	0.026
26	81.81	190.2	20.93	0.74	0.017	57	88.53	71.2	1.70	0.43	0.024	88	48.97	71.2	0.41	0.10	0.035
27	96.54	190.2	27.67	0.97	0.016	58	50.05	71.2	0.78	0.20	0.030	89	115.73	71.2	0.60	0.15	0.032
28	80.63	190.2	-17.55	0.62	0.018	59	77.39	71.2	2.47	0.62	0.022	90	10.09	71.2	-0.92	0.23	0.028
29	73.95	190.2	21.42	0.75	0.017	60	35.29	71.2	0.27	0.07	0.041	91	98.87	71.2	1.92	0.48	0.024
30	32.22	190.2	27.14	0.96	0.016	61	36.39	71.2	0.52	0.13	0.033	92	69.61	71.2	1.52	0.38	0.025
31	75.19	190.2	21.34	0.75	0.017	62	51.88	71.2	1.72	0.43	0.024	93	119.92	71.2	2.06	0.52	0.023

Fuente: Elaboración propia

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción	Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción	Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Caudal (Lps)	Velocidad (m/s)	Factor de Fricción
94	85.87	71.2	-1.94	0.49	0.023	125	44.88	71.2	2.55	0.64	0.022	156	108.70	104.6	5.40	0.63	0.020
95	111.57	71.2	1.79	0.45	0.024	126	15.71	71.2	0.10	0.03	0.042	157	57.78	104.6	9.48	1.10	0.018
96	56.91	71.2	-2.50	0.63	0.022	127	92.60	71.2	1.41	0.35	0.025	158	119.41	104.6	5.45	0.63	0.020
97	100.50	104.6	5.97	0.70	0.020	128	51.64	71.2	1.61	0.40	0.025	159	72.09	71.2	1.57	0.39	0.025
98	37.43	133	9.97	0.72	0.019	129	38.98	71.2	0.20	0.05	0.034	160	76.81	71.2	2.06	0.52	0.023
99	113.04	85.6	3.38	0.59	0.022	130	48.67	104.6	6.71	0.78	0.019	161	35.31	71.2	3.13	0.79	0.021
100	40.09	71.2	2.62	0.66	0.022	131	47.29	152	14.59	0.80	0.018	162	54.79	71.2	0.34	0.09	0.037
101	51.20	71.2	2.13	0.53	0.023	132	48.58	133	10.48	0.75	0.019	163	51.79	71.2	2.79	0.70	0.022
102	42.86	71.2	0.73	0.18	0.030	133	95.42	104.6	7.13	0.83	0.019	164	124.28	71.2	0.71	0.18	0.030
103	319.71	190.2	25.36	0.89	0.017	134	38.42	71.2	0.30	0.08	0.040	165	133.26	71.2	0.68	0.17	0.031
104	137.18	71.2	1.38	0.35	0.025	135	77.77	104.6	6.06	0.71	0.020	166	14.94	71.2	3.28	0.82	0.021
105	23.94	71.2	2.87	0.72	0.021	136	73.15	104.6	-0.40	0.05	0.042	167	45.15	71.2	2.63	0.66	0.022
106	50.26	71.2	0.41	0.10	0.035	137	173.48	104.6	3.94	0.46	0.022	168	55.61	71.2	1.90	0.48	0.024
107	59.34	71.2	1.94	0.49	0.023	138	47.42	104.6	5.27	0.61	0.020	169	75.95	71.2	0.32	0.08	0.038
108	354.95	190.2	23.98	0.84	0.017	139	31.40	104.6	0.66	0.08	0.033	170	46.65	71.2	0.23	0.06	0.040
109	92.14	71.2	0.30	0.08	0.039	140	103.60	104.6	5.66	0.66	0.020	171	91.45	71.2	0.31	0.08	0.039
110	8.61	71.2	1.35	0.34	0.026	141	50.88	71.2	2.54	0.64	0.022	172	45.38	71.2	1.45	0.36	0.025
111	37.55	71.2	0.49	0.12	0.034	142	50.06	85.6	3.49	0.61	0.021	173	70.56	71.2	0.30	0.08	0.038
112	52.21	71.2	0.29	0.07	0.039	143	38.37	104.6	3.79	0.44	0.022	174	103.34	71.2	0.82	0.21	0.029
113	65.09	71.2	0.10	0.03	0.041	144	48.07	104.6	6.90	0.80	0.019	175	47.97	71.2	1.02	0.26	0.028
114	51.44	71.2	0.52	0.13	0.033	145	40.39	104.6	9.05	1.05	0.018	176	31.90	71.2	0.17	0.04	0.036
115	47.92	71.2	-0.15	0.04	0.031	146	130.04	71.2	2.14	0.54	0.023	177	103.53	71.2	0.42	0.11	0.035
116	51.39	71.2	1.26	0.32	0.026	147	46.30	85.6	2.75	0.48	0.023	178	53.48	71.2	0.27	0.07	0.041
117	91.65	71.2	0.18	0.05	0.031	148	80.17	85.6	3.99	0.69	0.021	179	4.88	190.2	22.00	0.77	0.017
118	38.39	71.2	1.30	0.33	0.026	149	29.74	85.6	1.33	0.23	0.027	180	128.01	71.2	2.04	0.51	0.023
119	55.33	71.2	-1.61	0.40	0.025	150	45.42	104.6	5.83	0.68	0.020	181	5.96	71.2	-0.40	0.10	0.034
120	143.54	71.2	1.96	0.49	0.023	151	45.08	104.6	6.53	0.76	0.019	182	333.46	71.2	1.98	0.50	0.023
121	141.04	71.2	2.26	0.57	0.023	152	117.65	104.6	4.70	0.55	0.021	183	37.95	104.6	-6.05	0.70	0.020
122	41.98	71.2	-0.23	0.06	0.041	153	40.03	71.2	0.18	0.05	0.031	184	179.79	71.2	0.96	0.24	0.028
123	41.31	71.2	0.09	0.02	0.039	154	88.44	71.2	1.77	0.44	0.024	185	57.08	71.2	2.28	0.57	0.023
124	10.34	104.6	6.53	0.76	0.019	155	86.00	71.2	0.93	0.23	0.028	186	45.30	71.2	0.96	0.24	0.028

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52: *Resultados de nudos de la solución seleccionada – Red optimizada*

Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)	Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)	Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)
1	3674.00	1.51	3707.82	33.82	26	3677.29	0.60	3707.93	30.64	51	3677.53	1.14	3707.17	29.64
2	3670.87	1.84	3709.17	38.30	27	3672.80	0.74	3708.26	35.46	52	3676.82	1.62	3706.96	30.14
3	3679.09	1.56	3707.75	28.66	28	3673.86	1.37	3708.49	34.63	53	3682.00	0.00	3706.69	24.69
4	3684.22	1.98	3707.48	23.26	29	3672.49	1.21	3708.66	36.17	54	3682.24	1.59	3706.50	24.26
5	3681.49	0.92	3707.97	26.48	30	3673.00	1.60	3709.10	36.10	55	3675.84	2.00	3706.42	30.58
6	3688.05	1.20	3707.35	19.30	31	3671.35	1.61	3709.08	37.73	56	3682.28	1.12	3706.22	23.94
7	3687.73	0.56	3707.29	19.56	32	3670.00	0.82	3709.68	39.68	57	3688.22	0.25	3707.17	18.95
8	3687.64	0.33	3707.27	19.63	33	3671.00	1.49	3708.33	37.33	58	3685.58	1.24	3707.17	21.59
9	3687.44	0.96	3707.41	19.97	34	3672.64	0.90	3708.25	35.61	59	3685.69	0.00	3707.18	21.49
10	3679.28	0.68	3707.98	28.70	35	3669.81	0.53	3708.21	38.40	60	3685.46	1.24	3707.16	21.70
11	3675.34	0.48	3708.97	33.63	36	3671.79	1.15	3708.12	36.33	61	3684.25	1.16	3707.54	23.29
12	3684.45	0.00	3707.54	23.09	37	3672.25	1.01	3707.85	35.60	62	3690.00	0.35	3707.17	17.17
13	3677.08	1.16	3708.83	31.75	38	3676.03	0.85	3707.89	31.86	63	3683.83	1.78	3707.06	23.23
14	3679.00	0.43	3708.27	29.27	39	3674.79	1.23	3707.66	32.87	64	3682.00	0.00	3706.68	24.68
15	3680.49	0.52	3708.26	27.77	40	3674.00	0.89	3706.99	32.99	65	3690.16	0.50	3706.66	16.50
16	3678.12	1.44	3708.22	30.10	41	3674.00	0.99	3706.88	32.88	66	3668.34	0.41	3708.20	39.86
17	3679.91	0.32	3708.15	28.24	42	3670.73	1.94	3706.69	35.96	67	3668.12	0.00	3706.38	38.26
18	3680.50	1.54	3708.09	27.59	43	3669.93	1.01	3706.43	36.50	68	3667.26	0.96	3706.17	38.91
19	3680.14	1.49	3707.59	27.45	44	3673.20	0.65	3706.41	33.21	69	3682.75	1.32	3706.68	23.93
20	3678.00	1.52	3708.06	30.06	45	3672.70	0.78	3706.37	33.67	70	3677.64	1.13	3705.69	28.05
21	3676.01	1.46	3708.55	32.54	46	3673.65	0.50	3706.40	32.75	71	3674.70	1.05	3706.03	31.33
22	3679.00	1.05	3708.60	29.60	47	3673.70	0.52	3706.39	32.69	72	3673.98	0.86	3706.38	32.40
23	3677.00	1.41	3708.75	31.75	48	3673.03	0.53	3706.24	33.21	73	3674.00	0.62	3706.85	32.85
24	3685.69	0.00	3707.19	21.50	49	3673.00	0.56	3706.21	33.21	74	3673.00	0.52	3706.35	33.35
25	3678.67	1.14	3707.74	29.07	50	3672.95	0.63	3706.21	33.26	75	3673.53	0.88	3706.11	32.58

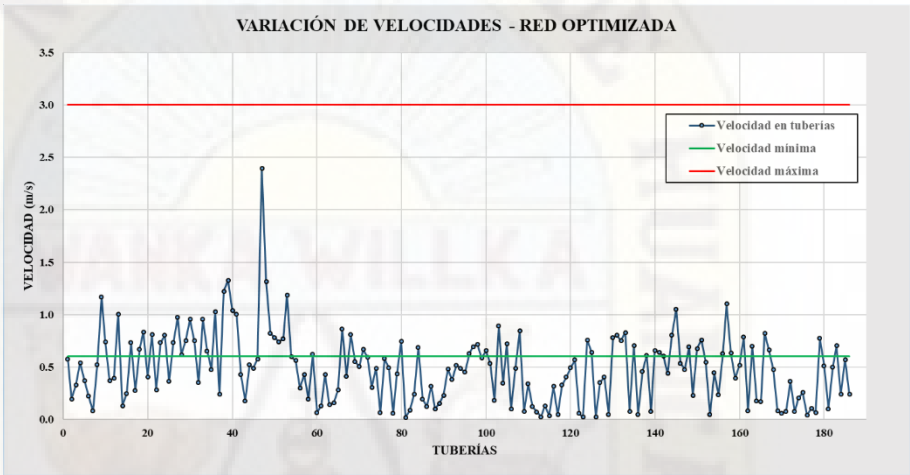
Fuente: Elaboración propia

Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)	Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)	Nudo	Elevación (m)	Demanda (Lps.)	H Piezométrica (mca)	Presión (mca)
76	3672.00	0.73	3706.32	34.32	101	3677.00	0.81	3704.53	27.53	126	3667.55	0.30	3700.80	33.25
77	3682.47	0.00	3706.06	23.59	102	3678.20	0.77	3703.92	25.72	127	3673.16	0.33	3701.32	28.16
78	3686.82	1.38	3705.76	18.94	103	3676.34	0.30	3703.92	27.58	128	3671.04	0.50	3701.01	29.97
79	3677.28	0.52	3705.50	28.22	104	3682.00	0.39	3703.55	21.55	129	3667.00	0.32	3701.31	34.31
80	3681.94	0.41	3705.48	23.54	105	3675.46	0.67	3703.37	27.91	130	3667.05	0.23	3701.01	33.96
81	3678.33	0.00	3704.93	26.60	106	3675.70	0.49	3703.37	27.67	131	3669.12	0.52	3700.50	31.38
82	3676.00	0.29	3705.26	29.26	107	3675.70	0.64	3703.81	28.11	132	3681.61	0.31	3700.48	18.87
83	3684.45	0.30	3705.24	20.79	108	3675.72	0.39	3704.21	28.49	133	3673.85	0.33	3700.39	26.54
84	3676.44	0.34	3705.24	28.80	109	3675.75	0.38	3704.50	28.75	134	3681.24	0.30	3700.38	19.14
85	3678.24	0.10	3705.23	26.99	110	3674.00	0.90	3703.67	29.67	135	3681.00	0.82	3700.30	19.30
86	3686.09	0.29	3705.22	19.13	111	3674.00	0.89	3703.19	29.19	136	3674.00	0.22	3705.16	31.16
87	3684.00	0.10	3705.23	21.23	112	3673.00	0.63	3703.17	30.17	137	3673.42	1.02	3705.10	31.68
88	3677.00	0.40	3705.22	28.22	113	3672.00	0.72	3702.92	30.92	138	3673.00	0.17	3705.16	32.16
89	3678.54	0.20	3705.22	26.68	114	3675.29	0.18	3702.92	27.63	139	3681.62	0.42	3705.10	23.48
90	3684.72	0.66	3705.13	20.41	115	3670.87	1.77	3702.89	32.02	140	3680.79	0.27	3705.21	24.42
91	3686.34	0.18	3705.12	18.78	116	3666.34	0.93	3702.83	36.49	141	3682.50	0.34	3703.55	21.05
92	3674.50	0.95	3705.95	31.45	117	3673.10	0.62	3702.56	29.46	142	3683.48	0.00	3703.55	20.07
93	3675.68	0.58	3705.37	29.69	118	3681.49	0.58	3702.99	21.50	143	3675.79	0.09	3704.63	28.84
94	3674.66	0.62	3705.37	30.71	119	3672.00	0.90	3701.95	29.95	144	3678.51	0.20	3704.91	26.40
95	3675.84	0.09	3704.63	28.79	120	3673.61	0.60	3701.47	27.86	Fuente R-1	3710.00	-105.48	3710.00	0.00
96	3675.09	0.19	3704.58	29.49	121	3669.68	0.84	3701.28	31.60					
97	3674.69	0.31	3704.29	29.60	122	3670.28	0.73	3701.62	31.34					
98	3674.23	0.10	3704.29	30.06	123	3665.69	0.34	3701.61	35.92					
99	3678.00	0.50	3704.91	26.91	124	3665.30	1.40	3700.89	35.59					
100	3677.68	0.62	3704.73	27.05	125	3668.15	0.71	3700.80	32.65					

Fuente: Elaboración propia

Las velocidades obtenidas en la solución 4 oscilan entre 0.02 a 2.40 m/s, de los cuales 119 tuberías tienen velocidades por debajo del mínimo recomendado por la norma OS-050. Estas bajas velocidades representan el 63.98% del total de tuberías en la red. Los resultados presentan mejoras en la disminución de incumplimientos por velocidades bajas:

Figura 55: *Variación de velocidades de la solución seleccionada – Red optimizada*



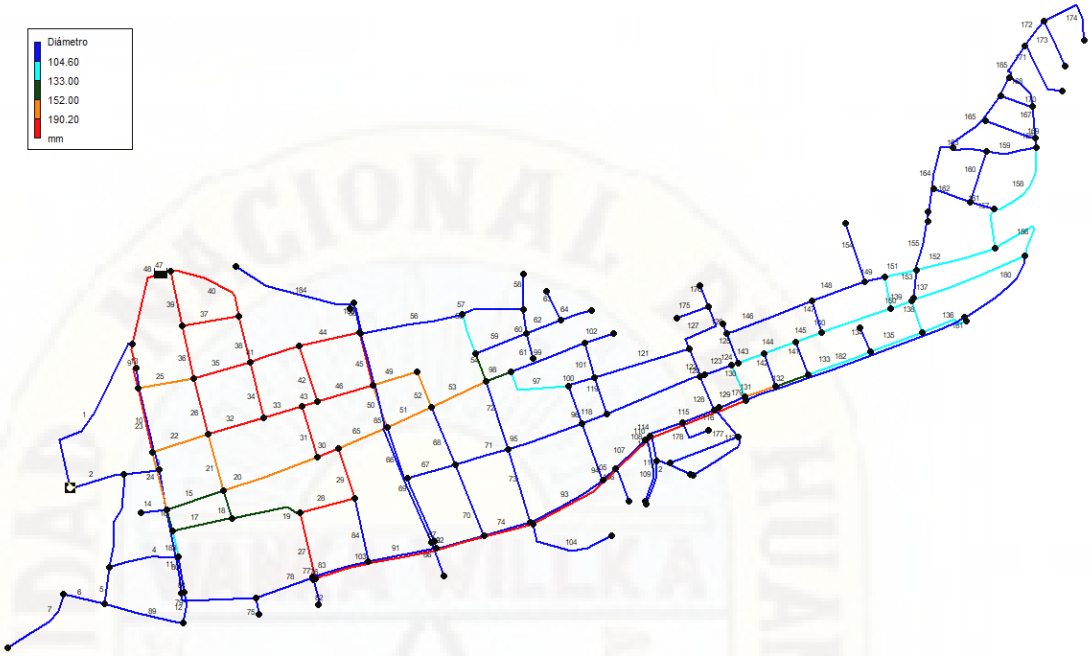
Fuente: Elaboración propia

Con respecto a las presiones de la solución 4, estas oscilan entre 16.50 y 39.86 m.c.a., obteniendo presiones por encima de lo recomendado por la norma técnica OS-050.

Figura 56: *Variación de presiones de la solución seleccionada – red optimizada*

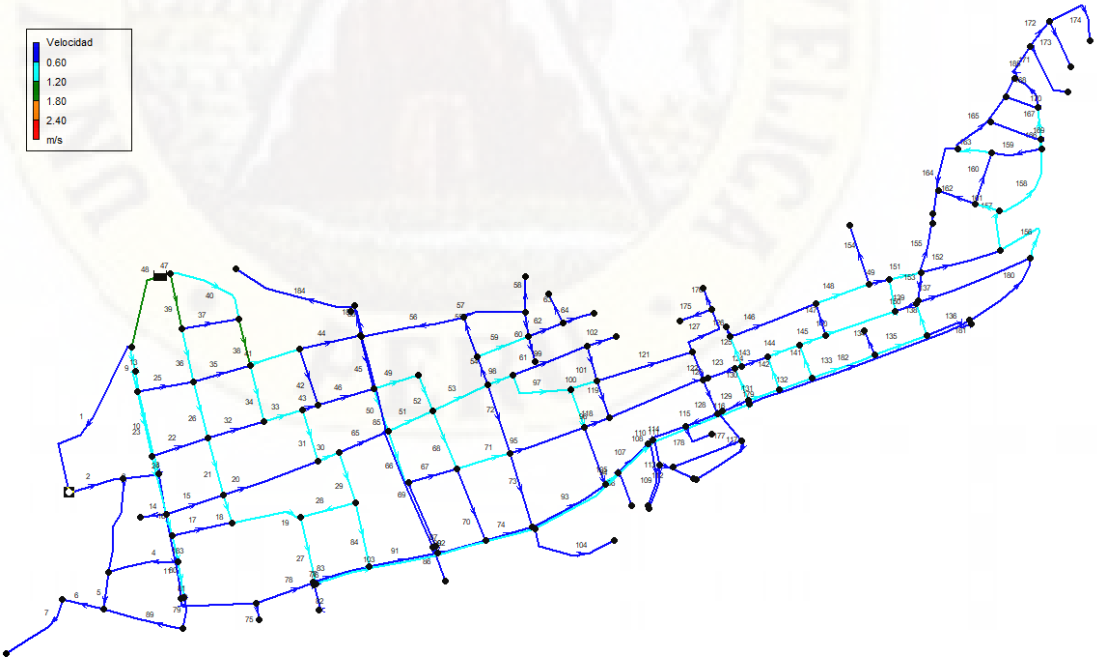
Fuente: Elaboración propia

Figura 57: *Resultados de diametros – Red optimizada*



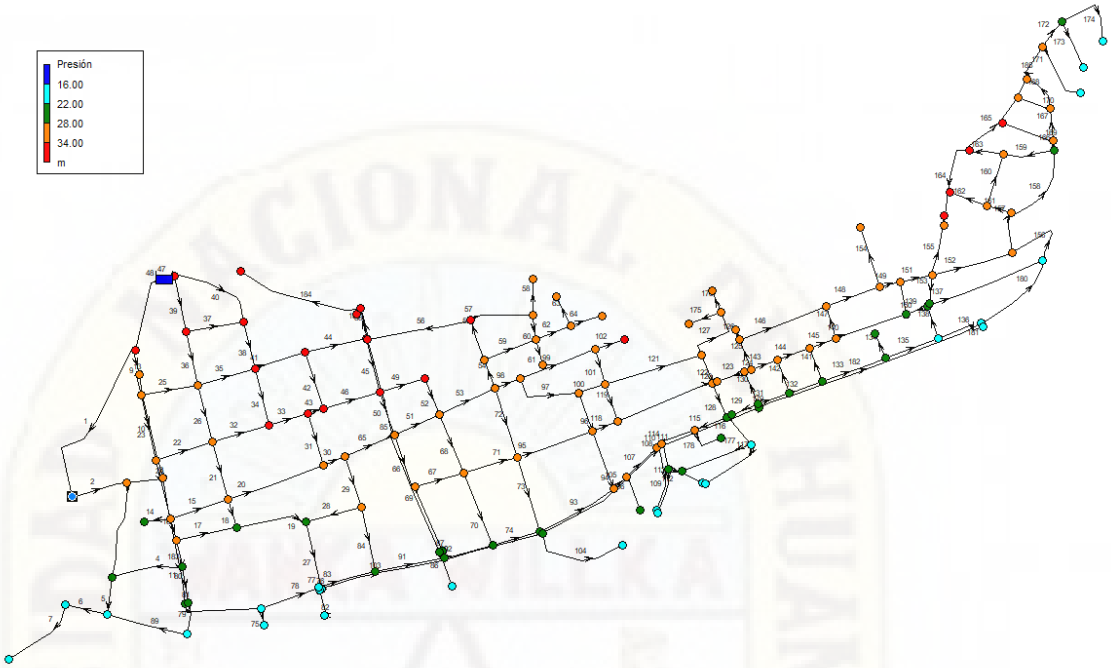
Fuente: Elaboración propia

Figura 58: *Resultados de velocidades – Red optimizada*



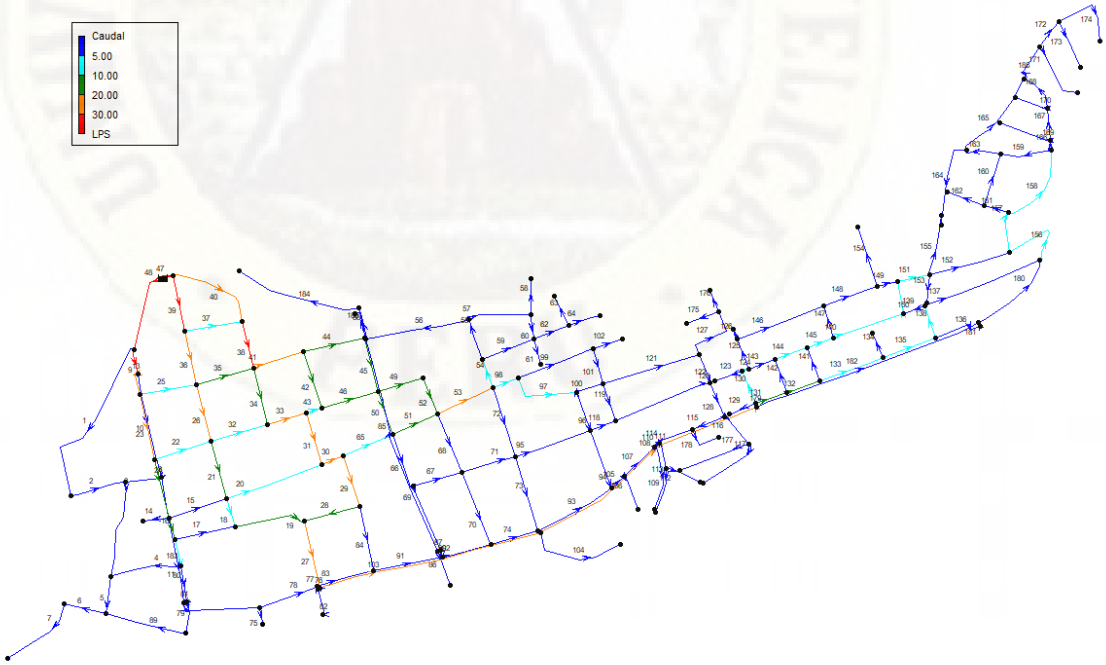
Fuente: Elaboración propia

Figura 59: *Resultado de presiones – Red optimizada*



Fuente: Elaboración propia

Figura 60: *Resultado de caudales – Red optimizada*



Fuente: Elaboración propia

4.6 Comparación entre la red actual y la red optimizada

Los resultados obtenidos se evaluaron mediante el índice de resiliencia, índice de costo, variación de diámetros y características hidráulicas. La red actual y optimizada presentan índices satisfactorios de resiliencia y costo por debajo del 0.5, considerándose resultados aceptables. Sin embargo, la red optimizada supera a la red actual, tanto en índice de resiliencia como costo total. A continuación, se muestra una comparación de ambos resultados:

Tabla 53: *Comparación de índices entre la red optimizada y no optimizada*

	Red actual	**Red optimizada**
Índice de resiliencia	0.25	0.20
Índice de costo	0.31	0.26
Costo total	S/ 539,384.56	S/ 475,967.30
Número de incumplimientos	132	119

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvieron resultados aceptables con la utilización de la técnica de optimización NSGA–II, tanto en índice de resiliencia con un valor de 0.20 como el índice de costo con un valor de 0.26. Asimismo, la diferencia de costos entre ambas redes es amplia, teniendo un costo de diferencia de S/63,417.26 solamente en tuberías. De la misma forma, la técnica utilizada disminuye el número de incumplimientos adecuándose a la norma técnica OS-050. A continuación, se muestran las diferencias entre diámetros, velocidades y presiones entra ambas redes de distribución:

Tabla 54: *Comparación de diámetros internos entre la red actual y la optimizada*

Tubería	Red actual (mm)	Red optimizada (mm)	Tubería	Red actual (mm)	Red optimizada (mm)	Tubería	Red actual (mm)	Red optimizada (mm)	Tubería	Red actual (mm)	Red optimizada (mm)	Tubería	Red actual (mm)	Red optimizada (mm)	Tubería	Red actual (mm)	Red optimizada (mm)
1	85.6	71.2	32	104.6	190.2	63	104.6	71.2	94	104.6	71.2	125	104.6	71.2	156	104.6	104.6
2	104.6	71.2	33	104.6	190.2	64	104.6	71.2	95	104.6	71.2	126	104.6	71.2	157	104.6	104.6
3	104.6	71.2	34	104.6	190.2	65	104.6	152.0	96	104.6	71.2	127	104.6	71.2	158	104.6	104.6
4	104.6	71.2	35	104.6	190.2	66	104.6	85.6	97	104.6	104.6	128	104.6	71.2	159	104.6	71.2
5	104.6	71.2	36	190.2	190.2	67	104.6	71.2	98	104.6	133.0	129	104.6	71.2	160	104.6	71.2
6	104.6	71.2	37	104.6	190.2	68	104.6	85.6	99	104.6	85.6	130	104.6	104.6	161	104.6	71.2
7	85.6	71.2	38	104.6	190.2	69	104.6	71.2	100	104.6	71.2	131	104.6	152.0	162	104.6	71.2
8	104.6	71.2	39	190.2	190.2	70	104.6	71.2	101	104.6	71.2	132	104.6	133.0	163	104.6	71.2
9	190.2	190.2	40	104.6	190.2	71	104.6	71.2	102	104.6	71.2	133	104.6	104.6	164	71.2	71.2
10	190.2	85.6	41	104.6	190.2	72	104.6	71.2	103	190.2	190.2	134	104.6	71.2	165	104.6	71.2
11	190.2	71.2	42	104.6	190.2	73	104.6	71.2	104	152.0	71.2	135	104.6	104.6	166	104.6	71.2
12	190.2	71.2	43	104.6	190.2	74	152.0	71.2	105	152.0	71.2	136	104.6	104.6	167	104.6	71.2
13	104.6	190.2	44	104.6	190.2	75	104.6	71.2	106	85.6	71.2	137	104.6	104.6	168	104.6	71.2
14	104.6	71.2	45	104.6	190.2	76	190.2	71.2	107	104.6	71.2	138	104.6	104.6	169	104.6	71.2
15	104.6	133.0	46	104.6	190.2	77	190.2	71.2	108	190.2	190.2	139	104.6	104.6	170	104.6	71.2
16	104.6	133.0	47	190.2	190.2	78	104.6	71.2	109	104.6	71.2	140	104.6	104.6	171	71.2	71.2
17	104.6	133.0	48	190.2	190.2	79	104.6	71.2	110	104.6	71.2	141	104.6	71.2	172	104.6	71.2
18	190.2	133.0	49	104.6	152.0	80	104.6	71.2	111	85.6	71.2	142	104.6	85.6	173	71.2	71.2
19	190.2	133.0	50	104.6	152.0	81	104.6	71.2	112	85.6	71.2	143	104.6	104.6	174	104.6	71.2
20	104.6	152.0	51	104.6	152.0	82	190.2	71.2	113	85.6	71.2	144	104.6	104.6	175	85.6	71.2
21	190.2	152.0	52	104.6	152.0	83	152.0	71.2	114	104.6	71.2	145	104.6	104.6	176	104.6	71.2
22	104.6	152.0	53	104.6	152.0	84	104.6	71.2	115	104.6	71.2	146	104.6	71.2	177	85.6	71.2
23	104.6	190.2	54	104.6	133.0	85	152.0	71.2	116	85.6	71.2	147	85.6	85.6	178	104.6	71.2
24	104.6	152.0	55	104.6	104.6	86	104.6	71.2	117	85.6	71.2	148	104.6	85.6	179	104.6	190.2
25	104.6	152.0	56	104.6	71.2	87	104.6	71.2	118	104.6	71.2	149	104.6	85.6	180	104.6	71.2
26	190.2	190.2	57	104.6	71.2	88	104.6	71.2	119	104.6	71.2	150	104.6	104.6	181	104.6	71.2
27	190.2	190.2	58	104.6	71.2	89	104.6	71.2	120	104.6	71.2	151	104.6	104.6	182	152.0	71.2
28	104.6	190.2	59	104.6	71.2	90	104.6	71.2	121	104.6	71.2	152	104.6	104.6	183	104.6	104.6
29	104.6	190.2	60	104.6	71.2	91	152.0	71.2	122	104.6	71.2	153	85.6	71.2	184	85.6	71.2
30	104.6	190.2	61	104.6	71.2	92	152.0	71.2	123	104.6	71.2	154	85.6	71.2	185	104.6	71.2
31	104.6	190.2	62	104.6	71.2	93	152.0	71.2	124	104.6	104.6	155	85.6	71.2	186	152.0	71.2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55: *Comparación de velocidades entre la red actual y la optimizada*

Tubería	Red actual (m/s)	Red optimizada (m/s)	Tubería	Red actual (m/s)	Red optimizada (m/s)	Tubería	Red actual (m/s)	Red optimizada (m/s)	Tubería	Red actual (m/s)	Red optimizada (m/s)	Tubería	Red actual (m/s)	Red optimizada (m/s)	Tubería	Red actual (m/s)	Red optimizada (m/s)
1	0.53	0.58	32	0.66	0.35	63	0.07	0.14	94	0.24	0.49	125	0.47	0.64	156	0.71	0.63
2	0.18	0.20	33	1.25	0.96	64	0.07	0.16	95	0.33	0.45	126	0.01	0.03	157	1.10	1.10
3	0.55	0.33	34	0.76	0.65	65	0.84	0.28	96	0.15	0.63	127	0.16	0.35	158	0.45	0.63
4	0.40	0.54	35	0.86	0.48	66	0.72	0.86	97	0.16	0.70	128	0.03	0.40	159	0.02	0.39
5	0.08	0.37	36	1.60	1.03	67	0.41	0.41	98	0.42	0.72	129	0.02	0.05	160	0.42	0.52
6	0.10	0.22	37	0.54	0.24	68	0.47	0.81	99	0.19	0.59	130	0.78	0.78	161	0.55	0.79
7	0.06	0.08	38	1.40	1.22	69	0.18	0.55	100	0.21	0.66	131	0.87	0.80	162	0.04	0.09
8	0.55	0.52	39	1.82	1.33	70	0.15	0.51	101	0.05	0.54	132	0.54	0.75	163	0.35	0.70
9	1.37	1.17	40	1.05	1.04	71	0.54	0.67	102	0.08	0.18	133	0.29	0.83	164	0.18	0.18
10	0.91	0.74	41	1.37	1.00	72	0.19	0.59	103	0.89	0.89	134	0.03	0.08	165	0.10	0.17
11	0.72	0.37	42	0.42	0.43	73	0.21	0.31	104	0.08	0.35	135	0.16	0.71	166	0.36	0.82
12	0.13	0.39	43	0.64	0.18	74	0.57	0.49	105	0.23	0.72	136	0.44	0.05	167	0.28	0.66
13	1.46	1.00	44	0.78	0.52	75	0.03	0.06	106	0.07	0.10	137	0.21	0.46	168	0.20	0.48
14	0.06	0.13	45	0.67	0.49	76	0.17	0.58	107	0.38	0.49	138	0.56	0.61	169	0.04	0.08
15	0.57	0.25	46	0.95	0.58	77	0.16	0.49	108	0.84	0.84	139	0.27	0.08	170	0.03	0.06
16	0.09	0.73	47	2.17	2.40	78	1.02	0.06	109	0.03	0.08	140	0.34	0.66	171	0.08	0.08
17	0.79	0.27	48	1.54	1.32	79	1.19	0.43	110	0.31	0.34	141	0.16	0.64	172	0.17	0.36
18	1.12	0.67	49	0.79	0.83	80	0.63	0.75	111	0.09	0.12	142	0.26	0.61	173	0.08	0.08
19	1.30	0.84	50	0.69	0.78	81	1.95	0.02	112	0.05	0.07	143	0.27	0.44	174	0.10	0.21
20	0.78	0.40	51	0.71	0.74	82	0.01	0.09	113	0.02	0.03	144	0.49	0.80	175	0.18	0.26
21	1.23	0.81	52	0.67	0.77	83	0.67	0.24	114	0.21	0.13	145	0.60	1.05	176	0.02	0.04
22	0.23	0.28	53	0.77	1.19	84	0.68	0.69	115	0.13	0.04	146	0.42	0.54	177	0.07	0.11
23	0.94	0.73	54	0.44	0.60	85	0.29	0.19	116	0.22	0.32	147	0.28	0.48	178	0.03	0.07
24	0.59	0.80	55	0.06	0.56	86	0.06	0.13	117	0.03	0.05	148	0.50	0.69	179	1.74	0.77
25	0.39	0.36	56	0.39	0.30	87	0.68	0.32	118	0.30	0.33	149	0.19	0.23	180	0.57	0.51
26	1.41	0.74	57	0.23	0.43	88	0.05	0.10	119	0.02	0.40	150	0.55	0.68	181	0.44	0.10
27	1.07	0.97	58	0.09	0.20	89	0.32	0.15	120	0.17	0.49	151	0.67	0.76	182	0.50	0.50
28	0.60	0.62	59	0.26	0.62	90	0.50	0.23	121	0.17	0.57	152	0.46	0.55	183	0.92	0.70
29	0.22	0.75	60	0.06	0.07	91	0.89	0.48	122	0.06	0.06	153	0.03	0.05	184	0.17	0.24
30	1.13	0.96	61	0.06	0.13	92	0.58	0.38	123	0.01	0.02	154	0.31	0.44	185	0.27	0.57
31	0.53	0.75	62	0.20	0.43	93	0.41	0.52	124	0.76	0.76	155	0.16	0.23	186	0.05	0.24

Fuente: Elaboración propia

Tabla 56: *Comparación de presiones entre la red actual y optimizada*

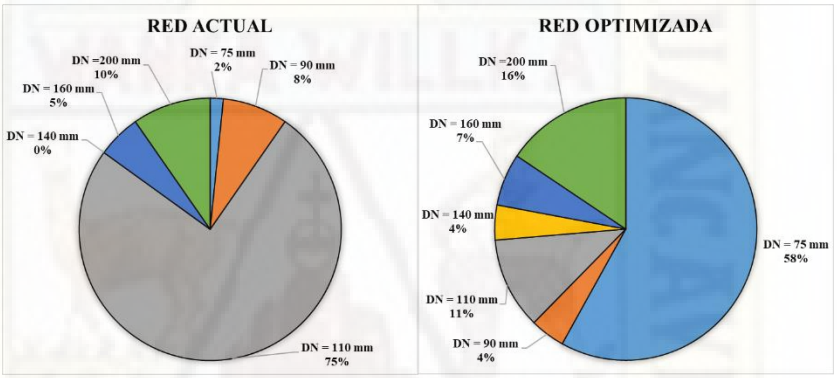
Nudo	Red actual (m.c.a.)	Red optimizada (m.c.a)	Nudo	Red actual (m.c.a.)	Red optimizada (m.c.a)	Nudo	Red actual (m.c.a.)	Red optimizada (m.c.a)	Nudo	Red actual (m.c.a.)	Red optimizada (m.c.a)	Nudo	Red actual (m.c.a.)	Red optimizada (m.c.a)
1	33.95	33.82	32	39.73	39.68	63	21.28	23.23	94	29.41	30.71	125	32.39	32.65
2	38.03	38.30	33	35.21	37.33	64	22.61	24.68	95	26.83	28.79	126	33.06	33.25
3	28.83	28.66	34	33.41	35.61	65	14.44	16.50	96	27.52	29.49	127	27.52	28.16
4	23.27	23.26	35	35.90	38.41	66	37.37	39.86	97	27.82	29.60	128	29.60	29.97
5	25.83	26.48	36	33.58	36.33	67	36.29	38.26	98	28.28	30.06	129	33.68	34.31
6	19.45	19.30	37	32.73	35.60	68	37.06	38.91	99	24.95	26.91	130	33.59	33.96
7	19.76	19.56	38	29.05	31.86	69	21.90	23.93	100	24.94	27.05	131	31.44	31.38
8	19.84	19.63	39	29.95	32.87	70	26.58	28.05	101	25.48	27.53	132	18.93	18.87
9	20.20	19.97	40	30.25	32.99	71	29.46	31.33	102	24.19	25.72	133	26.69	26.54
10	28.79	28.70	41	30.17	32.88	72	30.17	32.40	103	26.04	27.58	134	19.29	19.14
11	33.28	33.63	42	33.43	35.96	73	30.18	32.85	104	20.36	21.55	135	19.53	19.30
12	23.19	23.09	43	34.48	36.50	74	31.13	33.35	105	26.75	27.91	136	30.03	31.16
13	30.98	31.75	44	30.90	33.21	75	30.59	32.58	106	26.48	27.67	137	30.59	31.68
14	28.02	29.27	45	31.40	33.67	76	32.12	34.32	107	26.62	28.11	138	31.03	32.16
15	26.53	27.77	46	30.45	32.75	77	21.74	23.59	108	26.74	28.49	139	22.40	23.48
16	28.62	30.10	47	30.40	32.69	78	17.38	18.94	109	26.83	28.75	140	23.29	24.42
17	27.12	28.24	48	31.05	33.21	79	26.93	28.22	110	28.26	29.67	141	20.02	21.05
18	26.03	27.59	49	31.07	33.21	80	22.27	23.54	111	28.05	29.19	142	19.03	20.07
19	25.67	27.45	50	31.12	33.26	81	24.74	26.60	112	29.04	30.17	143	26.88	28.84
20	27.93	30.06	51	27.14	29.64	82	28.12	29.26	113	29.84	30.92	144	24.44	26.40
21	31.25	32.54	52	27.72	30.14	83	19.67	20.79	114	26.55	27.63			
22	28.32	29.60	53	22.63	24.69	84	27.67	28.80	115	31.06	32.02			
23	30.93	31.75	54	22.26	24.26	85	25.87	26.99	116	35.46	36.49			
24	19.65	21.50	55	28.46	30.58	86	18.01	19.13	117	28.47	29.46			
25	26.86	29.07	56	22.08	23.94	87	20.1	21.23	118	20.62	21.50			
26	28.28	30.64	57	17.91	18.95	88	27.08	28.22	119	28.96	29.95			
27	33.34	35.46	58	20.56	21.59	89	25.53	26.68	120	27.09	27.86			
28	33.06	34.63	59	19.65	21.49	90	19.31	20.41	121	31.02	31.60			
29	34.87	36.17	60	19.88	21.70	91	17.69	18.78	122	30.57	31.34			
30	35.71	36.11	61	23.27	23.29	92	29.62	31.45	123	35.16	35.92			
31	37.12	37.73	62	15.34	17.17	93	28.39	29.69	124	35.33	35.59			

Fuente: Elaboración propia

Diámetros

La variación entre los diámetros de la red actual y la red optimizada es considerable. Gran parte de diámetros que componen la red actual son de 110 mm representando el 75% del total de tuberías, seguido del 10% diámetros de 200 mm. De igual manera, la red optimizada está compuesta de un 58% diámetros de 75 mm (mínimo recomendado por la norma técnica OS-050), seguido del 16% con 200 mm de diámetro. En el siguiente grafico se muestra una comparación entre ambas redes:

Figura 61: *Comparativa de porcentaje de tuberías según diámetros*



Fuente: Elaboración propia

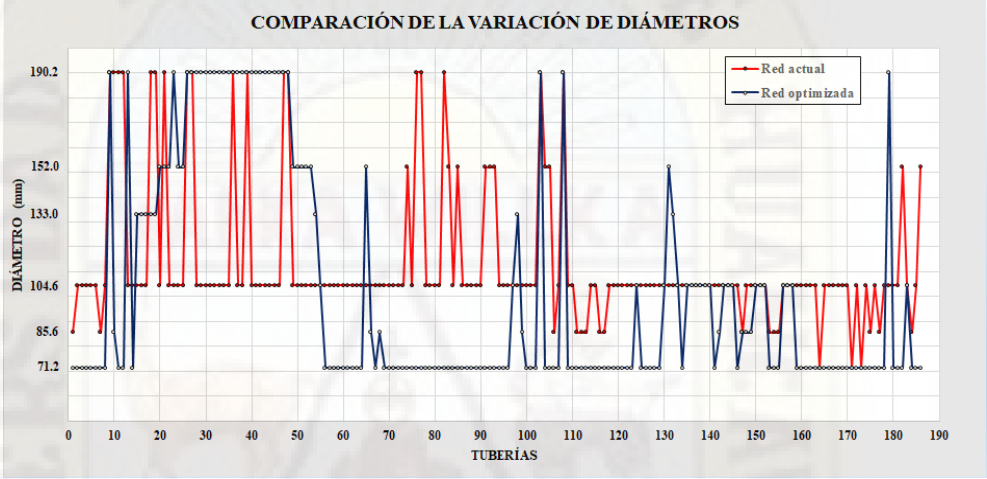
A diferencia de la red actual, la optimizada distribuye los máximos diámetros en zonas cercanas a la fuente de suministro y los menores diámetros se distribuyen en las zonas de menor consumo, ramales y límites de cada sector operacional.

Figura 62: *Distribución de tuberías cercanas a la fuente de suministro (Red optimizada)*

Fuente: Elaboración propia

La adecuada selección del índice de resiliencia, permite obtener una distribución uniforme de tuberías, lo cual es característico de su coeficiente de conectividad, este permite obtener uniformidad de los diámetros en las tuberías conectadas a un nudo. La uniformidad de diámetros facilitara el proceso constructivo y se evitara cambios bruscos de diámetro. A continuación, se muestra la variación de diámetros entre ambas redes:

Figura 63: *Comparación de la variación de diámetros entre ambas redes*



Fuente: Elaboración propia

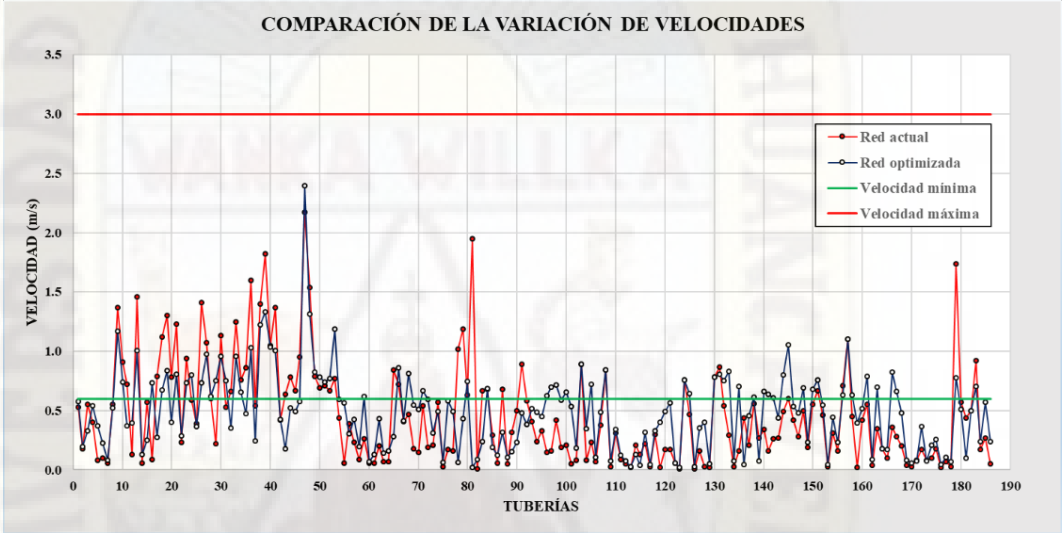
Velocidades

Múltiples tuberías de la red actual y la optimizada tienen velocidades muy bajas a 0.6, valor recomendado por la norma técnica OS-050. Esto se debe a su planteamiento de la red como tal, el cual el caudal de demanda y el diámetro mínimo recomendado por las normas, influyen en las velocidades y no permiten que estas se encuentren dentro de un rango aceptable. También, se debe considerar que la ecuación de perdida de carga está influenciada por la velocidad del flujo; mientras mayor sea la velocidad de flujo, mayor será la perdida de carga en un tramo y viceversa. Teniendo en cuenta este criterio, mediante la resiliencia se busca garantizar presiones adecuadas para un buen funcionamiento.

Las velocidades de la red actual se encuentran en el rango de 0.01 a 2.17 m/s a diferencia de la red optimizada que cuenta con velocidades de 0.02 a 2.40 m/s.

La utilización de este algoritmo de optimización mejora las velocidades y los equilibra evitando valores excesivos y muy bajos a comparación de la red actual, asimismo, se reduce el número total de incumplimientos en velocidades de 132 a 119. teniendo en consideración estos valores, se puede asumir que la red optimizada mejoró las velocidades de la red actual. Para una mejor visualización de las velocidades entre ambas redes de distribución se muestra la siguiente figura:

Figura 64: *Comparación de la variación de velocidades entre ambas redes*

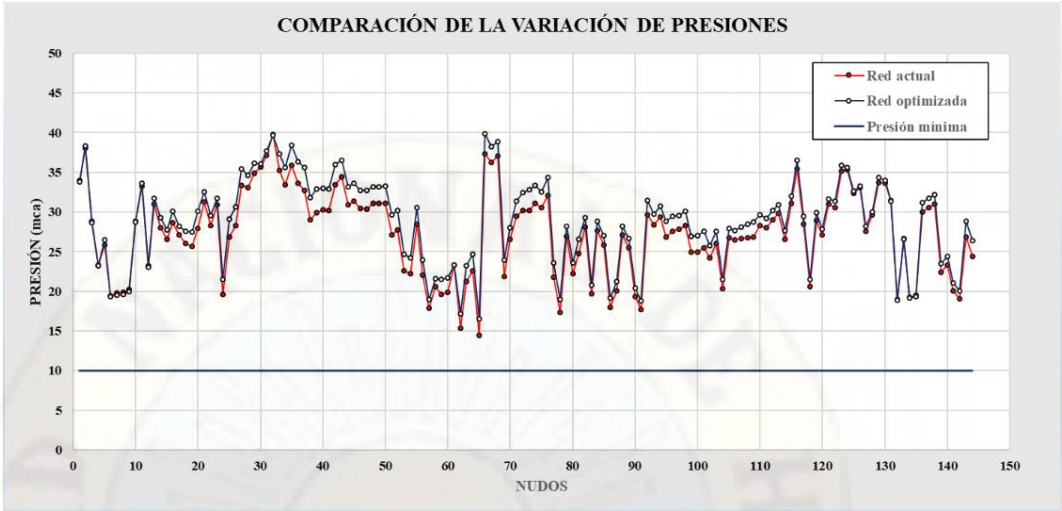


Fuente: Elaboración propia

Presiones

Las presiones obtenidas en la red actual y la optimizada se encuentran por encima de 10 m.c.a, valor recomendado por la norma técnica OS-050. La red actual cuenta con presiones en el rango de 14.95 a 39.76 m.c.a. y la red optimizada cuenta con presiones en el rango de 16.50 a 39.86 m.c.a., por lo cual, la utilización del algoritmo de optimización multiobjetivo NSGA-II permitió mejorar la presión en los nudos de la red actual. Esto permitirá satisfacer simultáneamente las restricciones de la presión mínima en todos los nudos durante alguna falla. Para una mejor visualización de las presiones entre ambas redes de distribución se muestra la siguiente figura:

Figura 65: *Comparación de presiones entre la red actual y la optimizada*



Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

- Se ha determinado, que el algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada NSGA-II, es favorable para el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable considerando dos funciones objetivo de costo y confiabilidad resiliente, ya que mediante su proceso iterativo de selección de diámetros permite simultáneamente minimizar el costo y aumentar la confiabilidad, a su vez que cumple con las restricciones hidráulicas de presiones y velocidades de acuerdo con la Norma OE.050. El buen rendimiento del algoritmo genético multiobjetivo se debe en gran medida a sus componentes de diversificación. La adecuada utilización de estos componentes (ordenamiento rápido y distancia de hacinamiento) permitió encontrar una buena compensación entre las funciones objetivo de costo y confiabilidad resiliente. Finalmente, la utilización de este algoritmo de optimización proporcionó un conjunto de soluciones para la elección de una red de distribución según criterios técnicos.
- Mediante la aplicación del algoritmo genético NSGA-II, se ha logrado obtener diseños de red con un índice de costo reducido de un intervalo entre 0 y 1, siendo 1 el costo máximo. En la red de Hanoi se obtuvo un diseño con un índice de costo de 0.46 equivalente a un costo total de US $6.04 millones siendo menor que diseños realizados por otros algoritmos como: Savic & Walters GA1 con 0.47 - US $6.07 millones, Savic & Walters GA2 con 0.48 - US $6.19 millones, Cunha & Sousa con 0.46 - US $6.06 millones, Liong & Atiquzzaman con 0.48 - US $6.22 millones y Suribabu & Neelakantan con 0.47 - US $6.08 millones. En la red actual de Huancavelica se tiene un índice de costo igual a 0.31 que equivale a S/539,384.56, este índice es mayor que el diseño optimizado, el cual tiene un valor de 0.26 equivalente a S/475,967.30. La diferencia de costos entre ambas redes de distribución es amplia teniendo una variación de S/. 63,417.26; esto en gran parte se debe a la uniformización y reducción de diámetros obtenidos del algoritmo de optimización. En mayor escala, la red actual está constituida por el 75% de tuberías con diámetros de 110 mm, seguido por el 10% de tuberías con diámetros de 200 mm. a

comparación de la red optimizada que está constituido por tuberías con diámetros de 75 mm representando el 58%, seguido del 16% de tuberías con diámetros de 200 mm. La reducción de diámetros se debe a que una de las características principales del algoritmo de optimización es la búsqueda de uniformidad en los diámetros conectados a un nudo. La uniformidad de diámetros reducirá la perdida de carga generada en las uniones debido a una ampliación brusca o gradual de los diámetros; la disminución de perdidas garantizará mejoría de presiones en el sistema durante su funcionamiento.

- El algoritmo genético NSGA-II ha conseguido diseños de red con alta confiabilidad; es decir, un índice de resiliencia por debajo de 0.5, que es lo recomendable, de un rango entre 0 y 1. En la red de Hanoi se ha obtenido un índice de resiliencia de 0.48 lo cual la hace una red mucha más confiable y menos vulnerable a fallas que diseños hechos por algoritmos como Savic & Walters GA1 con 0.51, Savic & Walters GA2 con 0.49, Cunha & Sousa con 0.51, Liong & Atiquzzaman con 0.49 y Suribabu & Neelakantan con 0.51. En la red de Huancavelica se obtuvo una mejor solución en comparación al diseño actual; la solución seleccionada tiene un índice de resiliencia de 0.20 y la red actual cuenta con un índice de 0.25, lo cual la hace una red mucho más confiable y permitirá satisfacer simultáneamente las restricciones de presión mínima en todos los nudos, además de garantizar una capacidad de soportar condiciones de falla durante su operación. El buen rendimiento del algoritmo de optimización permitió mejorar 129 presiones de 144 nudos de la red de Huancavelica; asimismo el algoritmo permitió mejorar y equilibrar las velocidades del diseño actual disminuyendo el número de incumplimientos por velocidades mínimas de 132 a 119, el resto de incumplimientos son improbables de mejorar debido a la configuración topológica de la red, múltiples ramales y demanda mínima del sistema.

Recomendaciones

- Para determinar la pérdida de carga, utilizar el método de gradiente hidráulico junto con la ecuación de Darcy-Weisbach y Colebrook-White, debido a que durante el proceso de diseño de la red se itera una y otra vez distintos diámetros en los tramos de tubería y no se tiene control sobre el número de Reynolds en todas ellas, es muy probable que aparezcan velocidades fuera del rango e impida utilizar la ecuación de Hazen- Williams.
- Para obtener un mejor rendimiento del algoritmo genético se debe utilizar el coeficiente de conectividad en redes malladas o en bucle, debido a que en las redes ramificadas existen nudos que tienen una o dos conexiones de tuberías lo cual no expresa realmente el valor de dicho coeficiente.
- Cuando se tenga una solución que sea óptima respecto a la función objetivo de costo, puede no serlo respecto a la función objetivo de confiabilidad resiliente; por ello, es necesario establecer un acuerdo entre las funciones objetivo para seleccionar la red apropiada.
- Al momento de seleccionar la red se debe tener en cuenta también que las velocidades en las tuberías deben estar en un rango apropiado, pues un índice de resiliencia relativamente bajo no siempre garantiza que dichas velocidades sean las adecuadas.
- El tiempo de convergencia del algoritmo genético puede ser mejorado de acuerdo al sistema operativo usado y mediante el empleo de lenguajes de programación más eficientes como C, C++, Fortran, Java, entre otros.
- En los últimos años, la comunidad científica ha desarrollado múltiples funciones objetivo como calidad de agua, operación de bombas y válvulas, superávit, etc. las cuales se deben considerar para obtener diseños integrales.

Referencias bibliográficas

Bäck, T. (1994). Selective Pressure in Evolutionary Algorithms: A Characterization of Selection Mechanisms. *IEEE Conference on Evolutionary Computation*, 57-62. https://doi.org/10.1109/ICEC.1994.350042

Baena, G. (2017). *Metodología de la investigación*. (3ª ed.). Grupo Editorial Patria.

Cabezas, E. D., Andrade, D. y Torres, J. (2018). *Introducción a la metodología de la investigación científica*. (1ª ed.). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Choque, J. H. y Arce, E. A. (2016*). Optimización de redes de distribución de agua con algoritmos genéticos en el Centro Poblado Jayllihuaya* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano]. http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5901

Chu, X. y Yu, X., (2018). Improved Crowding Distance for NSGA-II. *CoRR*. https://arxiv.org/abs/1811.12667

Coban, M. T. (2012). Error Analysis of Non-Iterative Friction Factor Formulas Relative to Colebrook-White Equation for The Calculation of Pressure Drop in Pipes. *Journal of Naval Science and Engineering*, 8(1), 1-13.

Correa, C. A., Andrés, R. y Molina, A. (2008). Algoritmo multiobjetivo NSGA-II aplicado al problema de la mochila. *Scientia et Technica*, 2(39), 206-211. https://doi.org/10.22517/23447214.3205

Cruz, C., Olivares, S. y González, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. (1ª ed.). Grupo Editorial Patria.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. https://doi.org/10.1109/4235.996017

EPS EMAPA Huancavelica S.A. (2017). *Plan Maestro (2018-2047).*

Espinoza, W. (2017). *Desempeño del algoritmo genético en las redes de distribución de agua potable.* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Huancavelica].

Flores, I. A. (2019). *Aplicación del algoritmo genético para el cálculo del diámetro de las tuberías de una red de distribución de agua potable en el distrito de Tarapoto 2018* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Martín]. http://hdl.handle.net/11458/3280

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.* Addison-Wesley.

Hassanat, A., Almohammadi, K., Alkafaween, E., Abunawas, E., Hammouri, A. y Prasath, V. (2019). Choosing Mutation and Crossover Ratios for Genetic Algorithms - A Review with a New Dynamic Approach. *Information*, 10(12), 2078-2489. https://doi.org/10.3390/info10120390

Hernández, A. A., Ramos, M. P., Placencia, B. M., Indacochea, B., Quimis, A. J. y Moreno, L. A. (2018). *Metodología de la investigación científica*. (1ª ed.). 3Ciencias. http://dx.doi.org/10.17993/CcyLl.2018.15

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. P. (2014). *Metodología de la investigación.* (6ª ed.). McGraw Hill.

Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. (1ª ed.). Bradford Books.

Jebari, K. y Madiafi, M. (2013). Selection Methods for Genetic Algorithms. International Journal of Emerging Sciences, 3(4), 333-344.

Kaya, Y., Uyar, M. y Tekín, R. (2011). A Novel Crossover Operator for Genetic Algorithms: Ring Crossover. *AWER Inf. Comput. Sci.*, 1286-1292.

Kellegöz, T., Toklu, B. y Wilson, J. (2008). Comparing Efficiencies of Genetic Crossover Operators for One Machine Total Weighted Tardiness Problem. *Applied Mathematics and Computation*, 199(2008), 590–598. https://doi.org/doi:10.1016/j.amc.2007.10.013

Koza, J. R. (1994). *Genetic Programming II: Automatic Discovery of Reusable Programs*. (1ª ed.). A Bradford Book.

Laguna, G. A., Marcelín, R., Patrick, G. A. y Vázquez, G. (2016). *Complejidad y sistemas complejos: Un acercamiento multidimensional*. CopIt-arXives y EditoraC3.

Lerma, H. D. (2016). *Metodología de la investigación: propuesta, anteproyecto y proyecto*. (5ª ed.). Ecoe Ediciones.

Lipowski, A. y Lipowska, D. (2012). Roulette-Wheel Selection Via Stochastic Acceptance. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(6), 2193-2196. https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.12.004

Mehboob, U., Qadir, J., Ali, S. y Vasilakos, A. (2016). Genetic Algorithms in Wireless Networking: Techniques, Applications, and Issues. *Soft Computing*, 20(6), 2467–2501. https://doi.org/10.1007/s00500-016-2070-9

Memari, A., Abdul, A.R., Hassan, A. y Ahmad, R. (2016). A Tuned NSGA-II to Optimize the Total Cost and Service Level for A Just-In-Time Distribution Network. *Neural Computing and Applications*, 28(11), 3413–3427. https://doi.org/10.1007/s00521-016-2249-0

Minhoni, R., Pereira, F., da Silva, T., Castro, E. y Saad, J. (2020). The Performance of Explicit Formulas for Determining the Darcy – Weisbach Friction Factor. *Engenharia Agrícola*, 40(2), 258–265. https://doi.org/10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V40N2P258-265/2020

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *Redes de distribución de agua para consumo humano* (OS.050).

Mora, D. (2012). *Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia*. [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Valencia. https://riunet.upv.es/handle/10251/16803

Moujahid, A., Inza, I. y Larrañaga P. (2008). *Tema 2. Algoritmos Genéticos*. Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, Universidad del País Vasco.

Negrín, L.I. y Nelly, E. C. (2018). *Optimización en Ingeniería*. (1ª ed.). Editorial Feijóo.

Ñaupas, H., Mejía, E., Novoa, E. y Villagómez, A. (2014). *Metodología de la investigación cuantitativa cualitativa y redacción de la tesis*. (4ª ed.). Ediciones de la U.

Peñuela, C. y Granada, M. (2007). Optimización Multiobjetivo Usando un Algoritmo Genético y un Operador Elitista basado en un Ordenamiento No-Dominado (NSGA-II). *Scientia et Technica*, 3(35), 175-180. https://doi.org/10.22517/23447214.5393

Pereyra, G., Pandolfi, D. y Villagra, A. (2017). Diseño y optimización de redes de distribución de agua utilizando algoritmos genéticos. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 9(1), 37-63. https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v9i1.236

Pino, E., Valle, A., Condori, F., Mejia, J., Chavarri, E. & Alfaro, L. (2017). Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Usando Un Software Basado En Microalgoritmos Genéticos Multiobjetivos. *Ribagua*, 4(1), 6-23. https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1317087

Posada, A. y Saldarriaga, J. (2018). *Comparación entre diseños optimizados y diseños reales en RDAP. Efecto del aumento de la población a lo largo de la vida útil del proyecto.* XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina, 18 al 21de septiembre de 2018. 134-143.

Prasad, T. D. & Park, N. (2004). Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 73-82. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2004)130:1(73)

Quevedo, V. Z. (2017). *Aplicación del Algoritmo Genético Multiobjetivo Strength Pareto Evolutionary Algorithm y su Efectividad en el Diseño de Redes de Agua Potable. Caso: Sector Viñani-Tacna* [Tesis de grado, Universidad Privada de Tacna]. http://localhost:8080/xmlui/handle/UPT/159

Ríos, R. R. (2017). *Metodología para la investigación y redacción*. (1ª ed.). Servicios Académicos Intercontinentales S.L.

Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías: Abastecimiento de agua, redes, riegos.* (1ª ed.). ALFAOMEGA.

Saldarriaga, J., Takahashi, S., Hernández, F. y Escovar, M. (2010). Diseño optimizado de sistemas de distribución de agua: Una nueva perspectiva. *ACODAL, Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, (226), 28-39. https://issuu.com/clickfeliz/docs/revista_acodal_226

Takahashi, S. y Ñañez, P. (2012). *Nueva metodología para diseño de redes internas de distribución de agua potable*. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica, 9 al 12 de setiembre de 2012.

Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigación científica incluye evaluación y administración de proyectos de investigación*. (4ª ed.). Editorial Limusa.

Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115-122. https://doi.org/10.1016/s1462-0758(00)00049-2

Valle, A. P. (2014). *Optimización del diseño de redes de distribución de agua potable, usando algoritmos genéticos con tres funciones objetivo. Caso: Viñani – Tacna* [Tesis de grado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann].

Apéndice

Apéndice A - MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: "Rendimiento del algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable"

Problema	Objetivo	Marco teórico	Hipótesis	Variables	Metodología
Problema general ¿De qué manera el algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable? **Problemas específicos** **a.** ¿De qué manera el algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye en el costo de redes de distribución de agua potable? **b.** ¿De qué manera el algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye en la confiabilidad de redes de distribución de agua potable?	**Objetivo general** Determinar la influencia del algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable. **Objetivos específicos** **a.** Determinar la influencia del algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada en el costo de redes de distribución de agua potable. **b.** Determinar la influencia del algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada en la confiabilidad de redes de distribución de agua potable.	**Antecedentes:** Internacional: • Pereyra, G., Pandolfi, D. y Villagra, A. (2017): Diseño y optimización de redes de distribución de agua utilizando algoritmos genéticos. • Pino, E., Valle, A., Condori, F., Mejía, J., Chavarri, E. y Alfaro, L. (2017): Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Usando Un Software Basado En Microalgoritmos Genéticos Multiobjetivos. • Peñuela, C. y Granada, M. (2007): Optimización multiobjetivo usando un algoritmo genético y un operador elitista basado en un ordenamiento no-dominado (NSGA-II). • Prasad, D. & Park, N. (2004): Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. • Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T. (2002): A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. • Todini, E. (2000): Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. Nacional: • Flores, I. (2019): Aplicación del algoritmo genético para el cálculo del diámetro de las tuberías de una red de distribución de agua potable en el distrito de Tarapoto 2018.	**Hipótesis general** El algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye favorablemente en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable. **Hipótesis específicas** **a.** El algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye favorablemente en el costo de redes de distribución de agua potable. **b.** El algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada influye favorablemente en la confiabilidad de redes de distribución de agua potable.	**Variable independiente** Algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada **Dimensiones:** • Población • Ordenamiento no dominado • Operadores genéticos **Variable dependiente** Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable **Dimensiones:** • Costo • Confiabilidad	**Tipo:** Aplicada **Nivel de investigación:** Explicativo **Diseño**: Preexperimental GE: O1 X O2 Donde: GE: Grupo Experimental O1: Pre Test O2: Post Test X: Manipulación de la variable independiente **Población:** Redes de distribución de agua potable **Muestra:** Red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica **Muestreo:** No probabilístico **Técnicas e instrumentos de recolección de datos** **Técnicas:** • Observación de campo • Entrevista • Análisis documental

		• Quevedo, V. (2017): Aplicación del Algoritmo Genético Multiobjetivo Strength Pareto Evolutionary Algorithm y su Efectividad en el Diseño de Redes de Agua Potable. Caso: Sector Viñani-Tacna. • Choque, J. & Arce, E. (2016): Optimización de redes de distribución de agua con algoritmos genéticos en el Centro Poblado Jayllihuaya. • Valle, A. (2014): Optimización del diseño de redes de distribución de agua potable, usando algoritmos genéticos con tres funciones objetivo. Caso: Viñani – Tacna. Local: • Espinoza, W. (2017): Desempeño del algoritmo genético en las redes de distribución de agua potable. Marco teórico referencial: • Red de distribución de agua potable • Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable • Número de incumplimientos de la red • Funciones objetivo • Optimización multiobjetivo • Dominancia • Frente de Pareto • Distancia de hacinamiento • Algoritmo genético • Algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominada • Operadores genéticos			**Instrumentos:** • Cámara fotográfica • Cuaderno de campo • Ficha de registro de datos • Computadora con procesador Intel® Core™ i5 con 8.00 GB de RAM • Herramientas de diseño asistido por computador AutoCAD Civil 3D. • Hojas de cálculo **Técnicas de procesamiento y análisis de datos** • Toolkit del software Epanet 2.0 • Programación en el lenguaje de programación Python 3.7

Apéndice B - LIBRERÍAS UTILIZADAS

```
import os, pprint
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link, Network,
Nodes, Links, Patterns, Pattern, Controls,
import random
from openpyxl import Workbook
from openpyxl import load_workbook
from openpyxl.chart import ScatterChart, Reference,Series
from openpyxl.styles import Font
from itertools import zip_longest
from PyQt5 import QtCore, QtGui, QtWidgets
from pyqtgraph import PlotWidget
from timeit import default_timer
```

Apéndice C - BUCLE PRINCIPAL NSGA - II

```
for gen in range(Num_Generacion):
    print(f"Generación : {gen + 1}")

    Pt_cruzada = Cruzamiento(Pt)
    Qt = Mutacion(Pt_cruzada)
    Parametros_Qt = Parametros(Qt)
    Ninc_Qt = Parametros_Qt[2]
    Ic_Qt = Parametros_Qt[1]
    Ir_Qt = Parametros_Qt[0]
    Costo_Qt = Parametros_Qt[3]
    Ninc = Ninc_Pt + Ninc_Qt
    Rt = Pt + Qt
    Ic = Ic_Pt + Ic_Qt
    Ir = Ir_Pt + Ir_Qt
    Costo = Costo_Pt + Costo_Qt
    Frentes = Ndsorting(Ic,Ir)
    Idistancia = Cdsorting(Ic,Ir,Frentes)
    Pt = [Rt[i] for i in Idistancia[:Num_Poblacion]]
    Ninc_Pt = [Ninc[i] for i in Idistancia[:Num_Poblacion]]
    Ic_Pt = [Ic[i] for i in Idistancia[:Num_Poblacion]]
    Ir_Pt = [Ir[i] for i in Idistancia[:Num_Poblacion]]
    Costo_Pt = [Costo[i] for i in Idistancia[:Num_Poblacion]]

    if gen in Intervalo:
        Ir_grafico.append(Ir_Pt)
        Ic_grafico.append(Ic_Pt)
        Ninc_grafico.append(Ninc_Pt)
        Costo_grafico.append(Costo_Pt)
    gen = gen + 1
```

Apéndice D – PANEL FOTOGRÁFICO

Visita a las Plantas de Tratamiento Millpo e Ichu, sector Millpo.

Cámara Rompe Presión que recibe aguas del Río Ichu y Río Callqui.

Tubería de 12” de ingreso al pre sedimentador.

Pre sedimentador utilizado de la planta de tratamiento antigua.

Tubería y cámara de control de ingreso a la Unidad de Mezcla Rápida.

Mezclador hidráulico tipo rampa. Adición de Sulfato de Aluminio.

Proceso de Floculación, 3 tramos donde se consolidan los flóculos.

Proceso de Decantación, 3 decantadores con orificios de recolección.

Proceso de Filtración, consta de 8 baterías de filtros de N°1 a N°8.

Cámara de control de proceso de Filtración.

Capacidad de producción de la planta de 100L/s y de operación actual 85 L/s.

Proceso de Desinfección, opera con dosificadores, balanza, bomba de agua e inyector.

Cámara de contacto, conducción al almacenamiento.

Reservorio de Regulación de concreto armado “Cconchopata o Chuncuymarca”.

Reservorio de tipo apoyado de capacidad de 1700 m^3, ubicado a 3730 m.s.n.m.

Línea de aducción que provee de agua potable a los sectores 03 y 05.

Macroregulador de Presión MR-03, ubicado en el distrito de Ascensión.

Control de la Presión de Ingreso MR-03.

Control de la Presión de Salida MR-03.

Inspección del Macromedidor M-05, ubicado a la altura del Puente de Ascensión.

Ubicación del Macromedidor M-08, Jr. Francisco de Angulo a la altura de la DRTC.

Inspección del Macromedidor M-08, conjuntamente con personal de EMAPA.

Inspección de antiguas conexiones con tuberías de Hormigón.

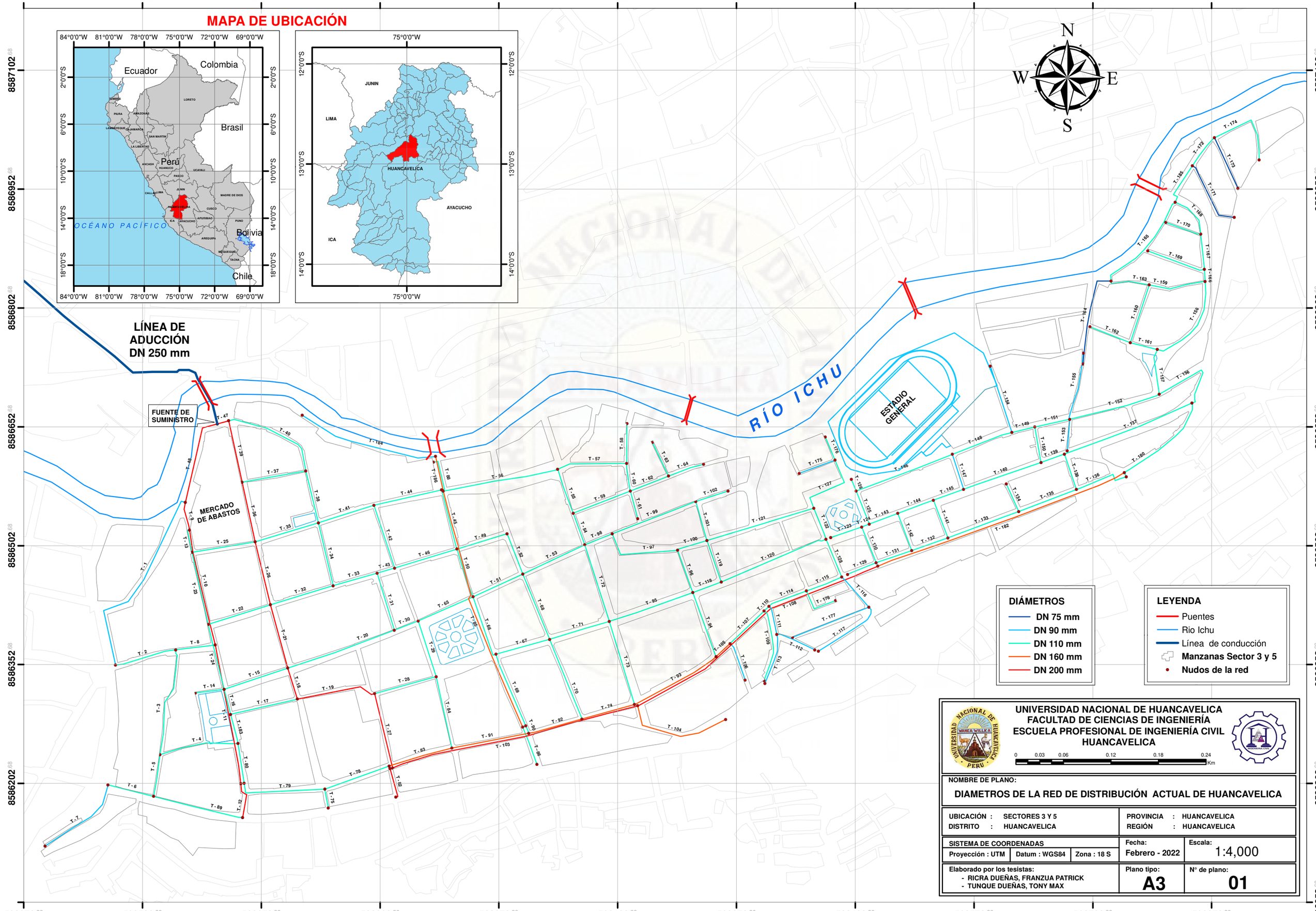
Las tuberías antiguas se reponen por tuberías de PVC con el mismo diámetro interno.

Inspección de la profundidad de instalación de tuberías.

Observación del diámetro de tubería instalada en los distintos tramos.

Apéndice E - PLANOS

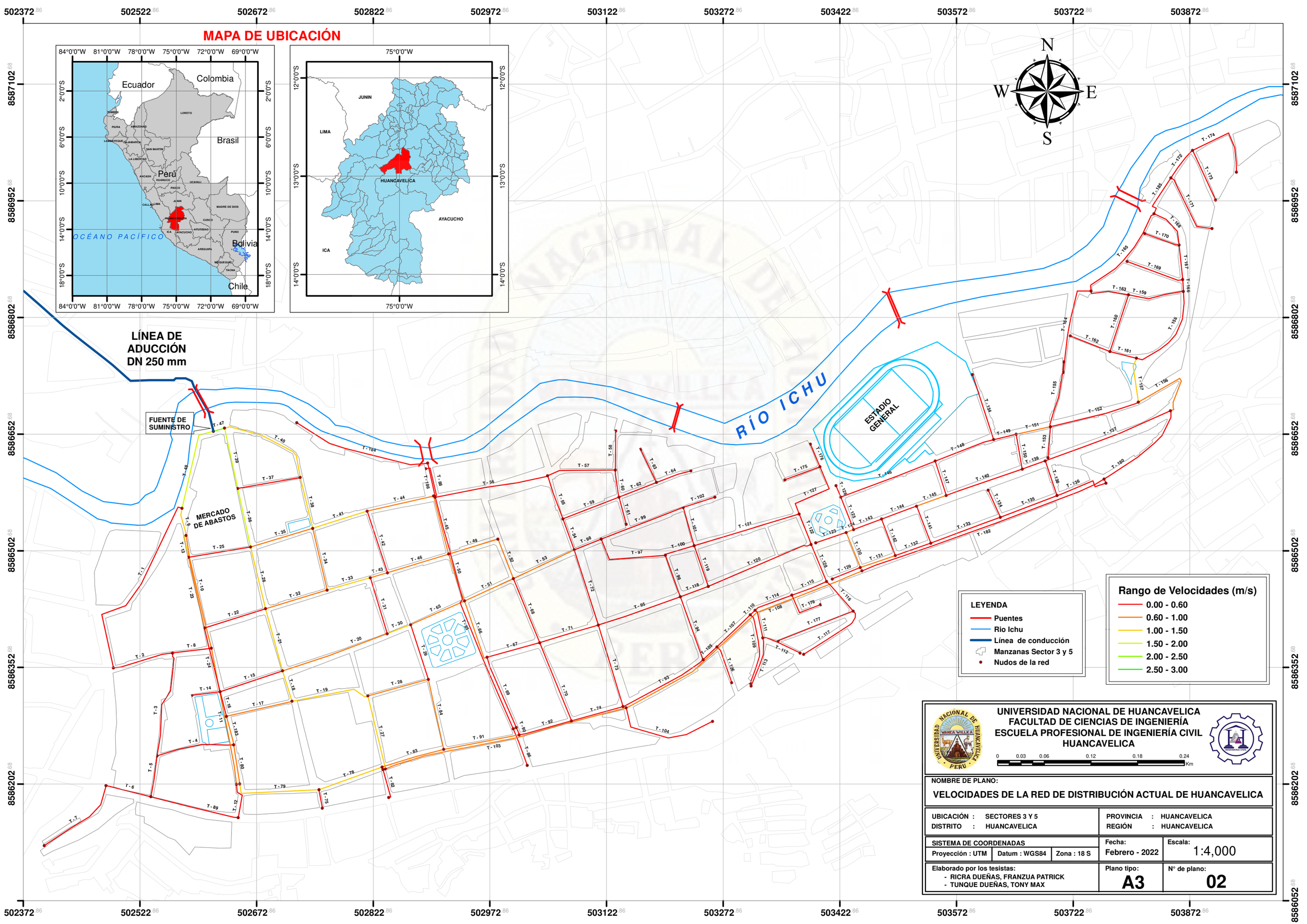
MAPA DE UBICACIÓN



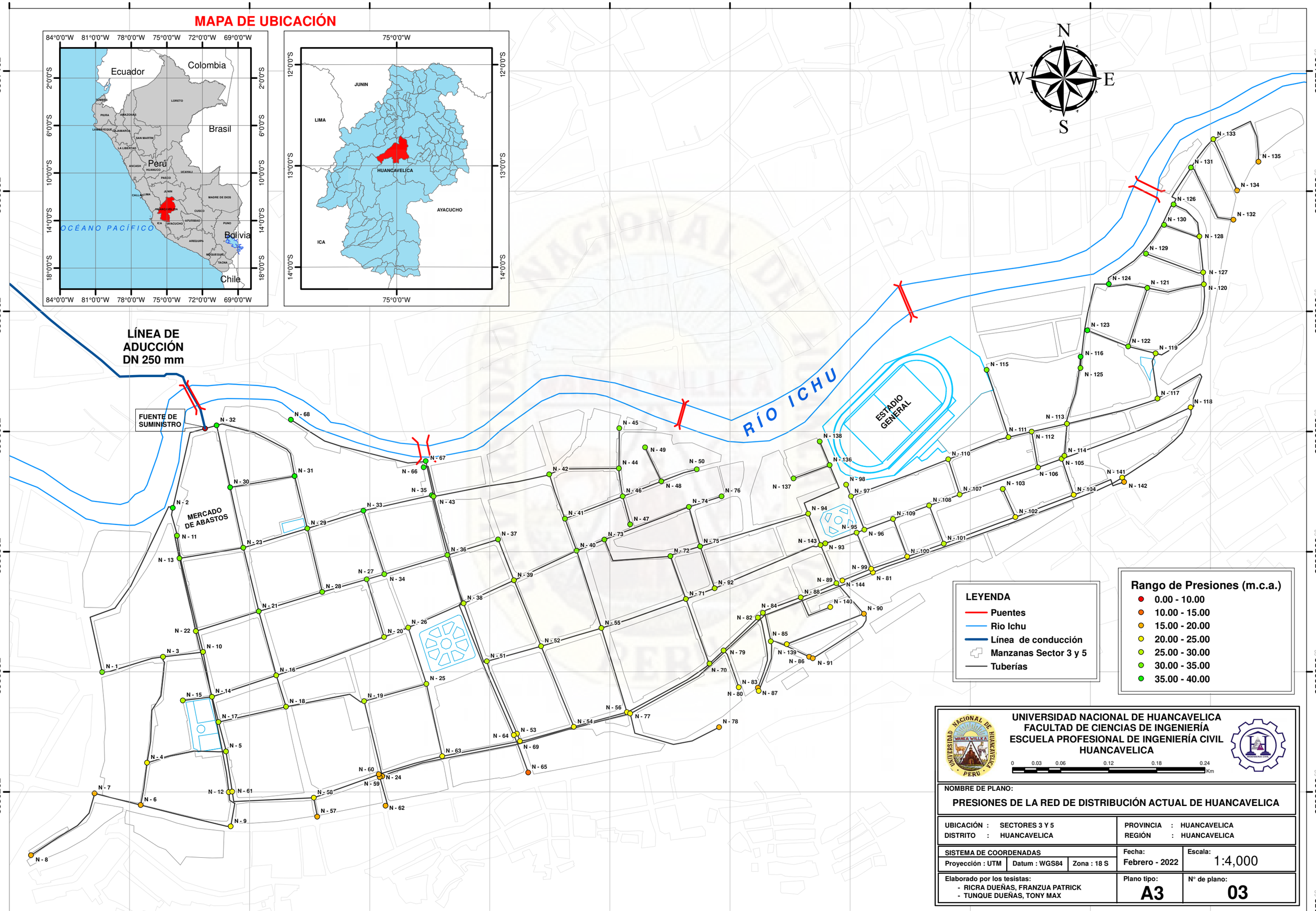
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
HUANCAVELICA

NOMBRE DE PLANO:
DIAMETROS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE HUANCAVELICA

UBICACIÓN : SECTORES 3 Y 5 DISTRITO : HUANCAVELICA	PROVINCIA : HUANCAVELICA REGIÓN : HUANCAVELICA
SISTEMA DE COORDENADAS Proyección : UTM · Datum : WGS84 · Zona : 18 S	Fecha: Febrero - 2022 · Escala: 1:4,000
Elaborado por los tesistas: - RICRA DUEÑAS, FRANZUA PATRICK - TUNQUE DUEÑAS, TONY MAX	Plano tipo: A3 · N° de plano: 01


MAPA DE UBICACIÓN
Ecuador
Colombia
Brasil
Perú
Bolivia
Chile
OCÉANO PACÍFICO
JUNIN
LIMA
HUANCAVELICA
AYACUCHO
ICA
LÍNEA DE ADUCCIÓN DN 250 mm
FUENTE DE SUMINISTRO
MERCADO DE ABASTOS
RÍO ICHU
ESTADIO GENERAL
N
S
E
W
LEYENDA
Puentes
Rio Ichu
Línea de conducción
Manzanas Sector 3 y 5
Nudos de la red
Rango de Velocidades (m/s)
0.00 - 0.60
0.60 - 1.00
1.00 - 1.50
1.50 - 2.00
2.00 - 2.50
2.50 - 3.00
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
HUANCAVELICA
0 0.03 0.06 0.12 0.18 0.24 Km
NOMBRE DE PLANO:
VELOCIDADES DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE HUANCAVELICA
UBICACIÓN : SECTORES 3 Y 5
DISTRITO : HUANCAVELICA
PROVINCIA : HUANCAVELICA
REGIÓN : HUANCAVELICA
SISTEMA DE COORDENADAS
Proyección : UTM
Datum : WGS84
Zona : 18 S
Fecha:
Febrero - 2022
Escala:
1:4,000
Elaborado por los tesistas:
- RICRA DUEÑAS, FRANZUA PATRICK
- TUNQUE DUEÑAS, TONY MAX
Plano tipo:
A3
N° de plano:
02

MAPA DE UBICACIÓN



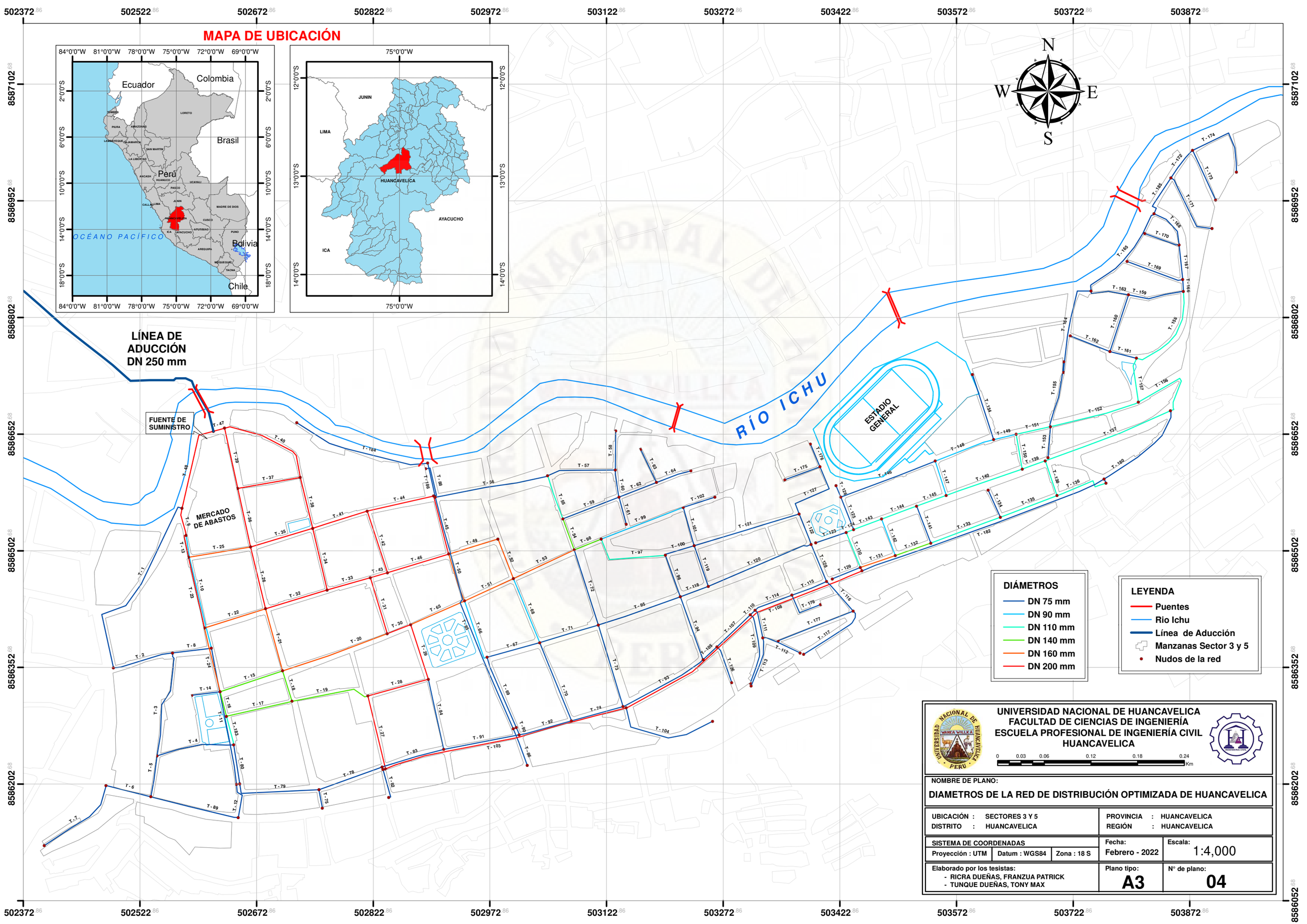
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
HUANCAVELICA

NOMBRE DE PLANO:

PRESIONES DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE HUANCAVELICA

UBICACIÓN : SECTORES 3 Y 5 DISTRITO : HUANCAVELICA	PROVINCIA : HUANCAVELICA REGIÓN : HUANCAVELICA
SISTEMA DE COORDENADAS Proyección : UTM · Datum : WGS84 · Zona : 18 S	Fecha: Febrero - 2022 · Escala: 1:4,000
Elaborado por los tesistas: - RICRA DUEÑAS, FRANZUA PATRICK - TUNQUE DUEÑAS, TONY MAX	Plano tipo: A3 · N° de plano: 03

MAPA DE UBICACIÓN



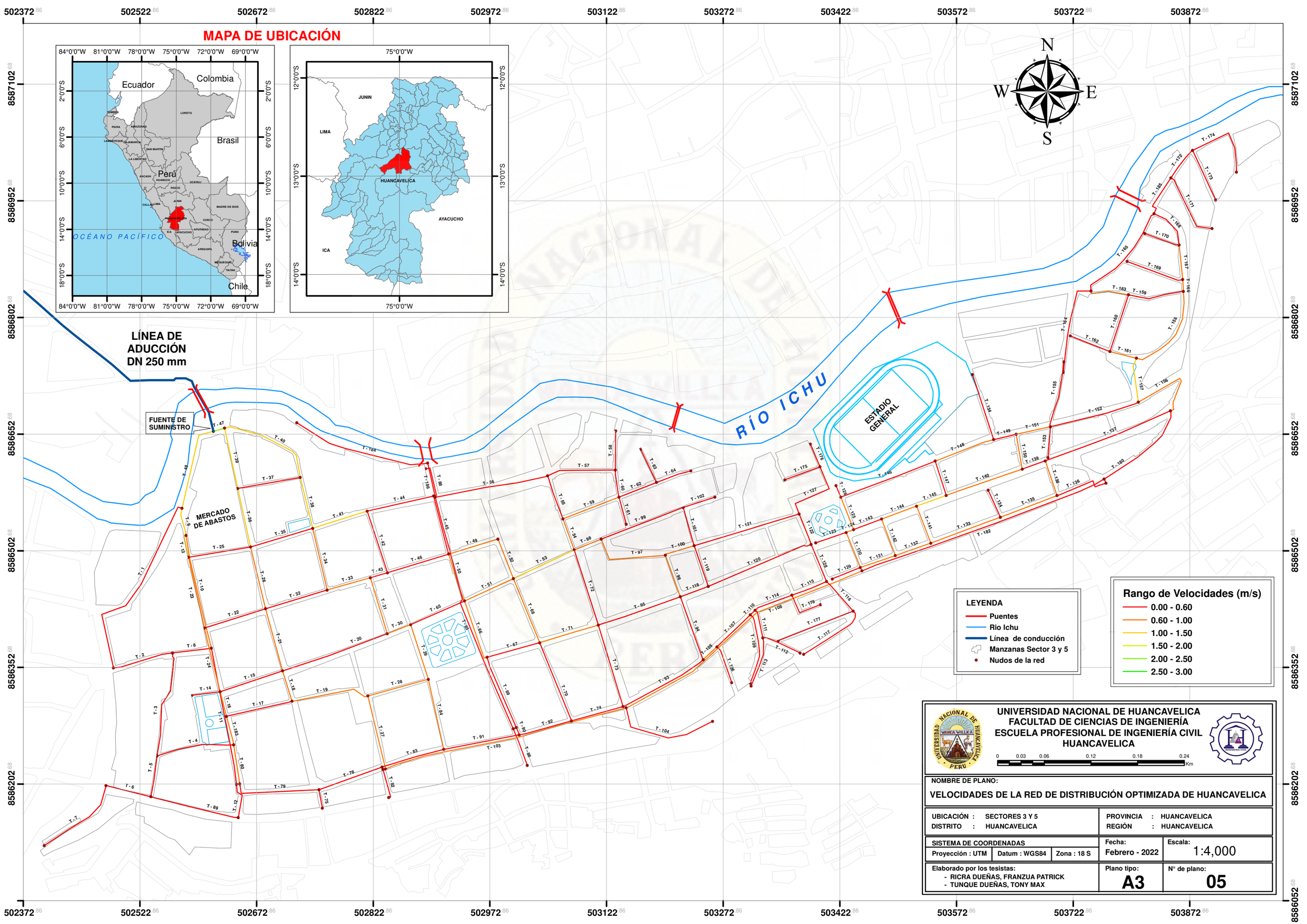
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
HUANCAVELICA

NOMBRE DE PLANO:

DIAMETROS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN OPTIMIZADA DE HUANCAVELICA

UBICACIÓN : SECTORES 3 Y 5 DISTRITO : HUANCAVELICA	PROVINCIA : HUANCAVELICA REGIÓN : HUANCAVELICA
SISTEMA DE COORDENADAS Proyección : UTM · Datum : WGS84 · Zona : 18 S	Fecha: Febrero - 2022 · Escala: 1:4,000
Elaborado por los tesistas: - RICRA DUEÑAS, FRANZUA PATRICK - TUNQUE DUEÑAS, TONY MAX	Plano tipo: A3 · N° de plano: 04

MAPA DE UBICACIÓN



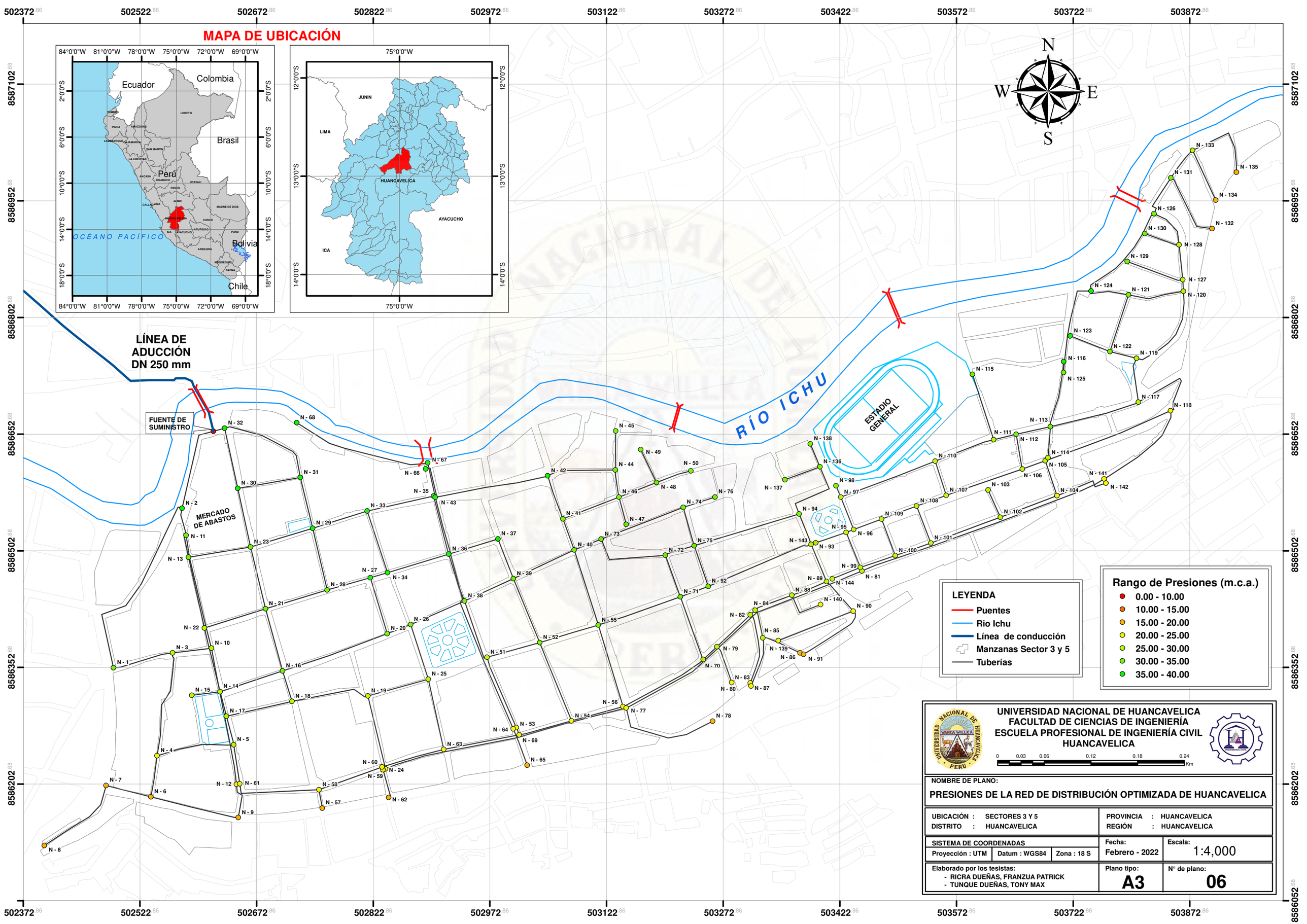
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
HUANCAVELICA

NOMBRE DE PLANO:

VELOCIDADES DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN OPTIMIZADA DE HUANCAVELICA

UBICACIÓN : SECTORES 3 Y 5 DISTRITO : HUANCAVELICA	PROVINCIA : HUANCAVELICA REGIÓN : HUANCAVELICA
SISTEMA DE COORDENADAS Proyección : UTM · Datum : WGS84 · Zona : 18 S	Fecha: Febrero - 2022 · Escala: 1:4,000
Elaborado por los tesistas: - RICRA DUEÑAS, FRANZUA PATRICK - TUNQUE DUEÑAS, TONY MAX	Plano tipo: A3 · N° de plano: 05

MAPA DE UBICACIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
HUANCAVELICA

0 0.03 0.06 0.12 0.18 0.24 Km

NOMBRE DE PLANO:

PRESIONES DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN OPTIMIZADA DE HUANCAVELICA

UBICACIÓN : SECTORES 3 Y 5 DISTRITO : HUANCAVELICA	PROVINCIA : HUANCAVELICA REGIÓN : HUANCAVELICA
SISTEMA DE COORDENADAS Proyección : UTM · Datum : WGS84 · Zona : 18 S	Fecha: Febrero - 2022 · Escala: 1:4,000
Elaborado por los tesistas: - RICRA DUEÑAS, FRANZUA PATRICK - TUNQUE DUEÑAS, TONY MAX	Plano tipo: A3 · N° de plano: 06