



UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
Facultad de Ingeniería
Escuela Profesional de Ingeniería Civil

**“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 para optar el Título Profesional de Ingeniero:

BACH. ING. VIOLETA ZARELA QUEVEDO PORRAS

ASESOR:

Fermín Gárnica Tello

TACNA- PERÚ

2017

DEDICATORIA

A Dios por el camino recorrido, por lo aprendido y por la vida que nos ha dado para poderla compartir y vivirla. A mi asesor y docentes que me orientaron a través de sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación. Todo ello ha sido fundamental para mi formación como investigadora.

Y especialmente, con todo mi amor quiero agradecer a mis padres, a quienes estaré eternamente agradecida por su incansable amor y apoyo incondicional en cada momento de mi vida, ya que sin ellos no sería posible terminar este trabajo de investigación.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por darme mucha fuerza y constancia para culminar mi tesis titulada: “Aplicación del algoritmo genético multiobjetivo Strength Pareto Evolutionary Algorithm y su efectividad en el diseño de redes de agua potable. Caso: Sector Viñani-Tacna”; y permitir tener a mis padres María Soledad Porras Roque y Oscar Oswaldo Quevedo Berlanga y hermanas, que en toda mi etapa universitaria estuvieron presentes para guiarme en todo momento con su apoyo incondicional, el cual hizo sentirme segura para concretar esta primera meta de mi vida; y es que sin sus ánimos y dedicación no hubiese sido posible la realización de esta investigación.

Un agradecimiento al Ph.D. Edwin M. Pino Vargas por su desinteresada colaboración, dedicación, al poner a su disposición toda información, conocimientos, por su paciencia, su sostenido apoyo y motivación que ha inculcado en mi un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor investigativo para mi formación completa como investigador.

Por ello, muchas gracias a mis docentes formadores y a todas las personas que, de alguna forma, participaron de este proyecto de vida, el cual me hizo aprender mucho más y, sobre todo, a desarrollarme como persona.

VIOLETA ZARELA QUEVEDO PORRAS

RESUMEN

El diseño óptimo de redes de distribución es consecuencia de un estudio hidráulico detallado, el cual se ha adaptado a los criterios de ingeniería, a las exigencias económicas y a la normativa vigente. Yates, Templeman & Boffey (1984) afirman que se necesita encontrar el método aproximado más efectivo y que garantice calidad en los diseños para extender la cobertura del servicio de agua potable.

En este contexto se aplica el Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo de frente de Pareto (SPEA), propuesto por Zitzler & Thiele (1999) para el diseño óptimo de redes de distribución.

Además, se pretende mediante el proceso de optimización planteado la búsqueda de la red de mínimo costo y máxima confiabilidad, que a su vez está sujeta a múltiples restricciones hidráulicas y normativas. En tal sentido, para la comprobación de su efectividad en la red del Sector Viñani se ha establecido la comparación con el Micro Algoritmo Genético Multiobjetivo (MAGMO) y la red sin criterios de optimización.

Es importante indicar que se trata de una red de 1 reservorio, 20 circuitos, 91 nodos y 139 tuberías.

Los resultados indicaron que el Micro Algoritmo Genético Multiobjetivo (MAGMO) tiene un mejor desempeño que el SPEA. El algoritmo SPEA si bien no muestra mejores resultados con respecto al MAGMO, este presenta un mejor desempeño con la red sin criterios de optimización al tener mayor índice de confiabilidad. Esto significa que la red es vulnerable en menor grado a todo tipo de fallas.

Palabras clave: algoritmos genéticos; optimización multiobjetivo; redes de agua.

ABSTRACT

The optimum design of distribution networks is the result of a detailed hydraulic study, which has been adapted to the engineering criteria, the economic requirements and the current regulations. Yates, Templeman, & Boffey (1984) argue that it is necessary to find the most effective approximate method to ensure quality designs to extend drinking water service coverage.

In this context, the Pareto Multiobjective Evolutionary Algorithm (SPEA) is applied for the optimal distribution network design proposed by Zitzler & Thiele (1999).

In addition, it is intended through the optimization process proposed the search for the network with minimum cost and maximum reliability, which in turn is subject to multiple constraints of the hydraulic and regulatory type to verify its effectiveness in the network Viñani Sector compared to the network Applying the Micro Multiobjective Genetic Algorithm (MAGMO) and the network without optimization criteria.

It is a single reservoir network, with 20 circuits, 91 nodes and 139 pipes.

The results indicated that the Micro Multiobjective Genetic Algorithm (MAGMO) has a better performance than the SPEA. The SPEA algorithm, although it does not show better results with respect to the MAGMO, presents a better performance with the network without optimization criteria, having a higher reliability index that symbolizes a network that is not vulnerable to all types of faults.

Palabras clave: algoritmos genéticos; optimización multiobjetivo; redes de agua.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
1.2.1 Interrogante Principal	16
1.2.2 Problemas específicos	16
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.3.1 Objetivo general	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	20
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	21
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
2.2 BASES TEÓRICAS	26
2.2.1 Historia de la Computación Evolutiva	26
2.2.2 Optimización Multiobjetivo	29
2.2.3 Técnicas para la optimización con objetivos múltiples	37
2.2.4 Método del Gradiente	40
2.2.5 Funciones Objetivos	53
2.2.6 Algoritmo Genético	58
2.2.7 Strength Pareto Evolutionary Algorithm	62
2.2.8 Diseño Óptimo de Redes de Agua	73
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	78
2.3.1 Algoritmos genéticos	78
2.3.2 Optimización multiobjetivo	79
2.3.3 Redes de distribución	80
2.3.4 Confiabilidad hidráulica	81
2.3.5 Costo.....	81
2.4 HIPÓTESIS	82
2.4.1 Hipótesis general.....	82
2.4.2 Hipótesis específicas.....	82

2.5	VARIABLES	82
2.5.1	Definición conceptual de la variable	82
2.5.2	Definición operacional de la variable	83
2.5.3	Matriz de Consistencia	84
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA		86
3.1	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	86
3.2	DESCRIPCIÓN DEL AMBITO DE ESTUDIO.....	86
3.3	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	86
3.3.1	Población	86
3.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....	86
3.4.1	Técnicas.....	86
3.4.2	Instrumentos.....	87
3.5	PLAN DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	87
CAPÍTULO IV RESULTADOS		88
4.1	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA RED	88
4.2	RESULTADOS SIN OPTIMIZACIÓN	88
4.2.1	Costo de la red sin optimización	97
4.2.2	Confiabilidad de la red sin optimización.....	97
4.3	DISEÑO OPTIMIZADO CON MAGMO:	97
4.3.1	Costo de la red con optimización aplicando MAGMO	103
4.3.2	Confiabilidad de la red con optimización aplicando MAGMO..	103
4.4	DISEÑO OPTIMIZADO UTILIZANDO SPEA:	104
4.4.1	Costo de la red con optimización aplicando SPEA	112
4.4.2	Confiabilidad de la red con optimización aplicando SPEA	112
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....		113
CONCLUSIONES		116
RECOMENDACIONES.....		118
BIBLIOGRAFÍA.....		120
ANEXOS		126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Técnicas tradicionales en la Optimización Multiobjetivo	38
Tabla 2: Técnicas evolutivas en la Optimización Multiobjetivo.....	39
Tabla 3: Método de análisis y diseño de redes cerradas	41
Tabla 4: Rugosidad absoluta para materiales en tuberías.....	45
Tabla 5: Ecuaciones de fricción para tuberías.....	46
Tabla 6: Algoritmo Genético.....	59
Tabla 7: Características compartidas y exclusivas	64
Tabla 8: Matriz de consistencia	84
Tabla 9: Diámetros, caudal y velocidad en las tuberías de la red	88
Tabla 10: Cotas hidráulicas y presiones en los nodos de la red	94
Tabla 11: MAGMO para 02 objetivos: Tabla de nodos de las respuestas	97
Tabla 12: MAGMO para 02 objetivos: Tabla de tuberías de las respuestas	99
Tabla 13: SPEA para 02 objetivos: Tabla de nodos de las respuestas.....	105
Tabla 14: SPEA para 02 objetivos: Tabla de tuberías de las respuestas.....	108
Tabla 15: Comparación de Resultados	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Dominancia de Pareto	31
Figura 2: Óptimo de Pareto	32
Figura 3: Frente de Pareto	33
Figura 4: Dominancia	34
Figura 5: Frente de Pareto	36
Figura 6: Curva Función objetivo de costo.....	54
Figura 7: Pseudocódigo del SPEA.....	63
Figura 8: Diagrama de flujo del SPEA propuesto.....	65
Figura 9: Cromosoma con representación binaria	66
Figura 10: Representación del genotipo y fenotipo.....	67
Figura 11: Representación de cruzamiento en un punto.....	72
Figura 12: Iteración 1 al 25.....	113
Figura 13: Métodos de Optimización	114

INTRODUCCIÓN

“Así como la selección natural trabaja exclusivamente para y por el bien de cada ser viviente, todas las dotes mentales y corporales tienden a progresar en dirección a la perfección”.

Charles Darwin, *El origen de las especies* (1859).

Reconociendo la importancia del agua como recurso natural limitado y teniendo en cuenta la perspectiva de crecimiento de las poblaciones urbanas, a las que hay que implementar con las fuentes de agua que en líneas generales mantienen sus caudales medios, se hace necesario y urgente la presencia de un análisis integral que considere diversos factores que se hallan inmersos en esta problemática, tales como: presupuesto (costo), grado de confiabilidad aceptable y congruencia con la normativa para su posterior efectividad. Todo ello va a proporcionar y asegurar un diseño óptimo de redes de distribución, rentabilidad, disponibilidad de tuberías, velocidad, presión mínima y distribución de la demanda.

En la actualidad, la investigación en técnicas heurísticas es escasa, así como las herramientas para determinar el modelo de optimización con mejor desempeño y que se pueda complementar con el diseño de redes de agua. Por un lado, existen ciertas restricciones para la elección de los diámetros como variables de decisión; y por otro, se está empleando un diseño que solo garantiza el suministro a los usuarios en condiciones normales, dejando la red vulnerable ante situaciones de emergencia.

Por lo tanto, el diseño óptimo de redes de distribución debe operar de manera eficiente en términos hidráulicos y económicos, esto se traduce a una mayor complejidad para dar solución con técnicas tradicionales. En tal sentido, la experiencia ingenieril se convierte en un valor agregado, ya que ofrece una amplia metodología de trabajo y posibilita la búsqueda de la optimización del diseño, el cual sea de mínimo costo en un tiempo computacional razonable.

Es necesario señalar que para optimizar estos objetivos se han utilizado un sinnúmero de técnicas. En la última década se han popularizado las técnicas heurísticas, tal como se presenta en Sotelo & Barán (2001), donde el SPEA brinda un conjunto de soluciones óptimas en vez de una solución y permite predecir las consecuencias en caso de realizar cambios en las características de las bombas, capacidad del tanque y demanda de consumo mediante simulaciones hechas con el algoritmo.

Por tal motivo es que se apunta a minimizar la siguiente problemática: el costo de la energía eléctrica consumida; el costo de mantenimiento de las bombas; la potencia máxima alcanzada (relacionada con el costo del sistema eléctrico y la potencia reservada); y el desnivel en el reservorio, entre el inicio y el final del período de optimización.

Según Talavera Solalinde (2005), es importante plantear la optimización en un ambiente *multicast*, ya que pretende optimizar costo y retardo entre otras posibles métricas, donde el SPEA tiene un mejor rendimiento para la resolución del problema de ingeniería de tráfico *multicast*.

En cambio, en un ambiente estático; como para un sistema de distribución de energía según García & Mendoza (2011) y sistemas eléctricos de distribución según García, García, & Villada (2015); el SPEA es una de las herramientas más relevantes por su flexibilidad y alta selectividad, lo cual minimiza el problema y reduce los cálculos, así como el tiempo y la capacidad de cómputo requerido.

De la misma manera, Potti & Chitra (2011) manifiestan que el SPEA resulta superior, porque encuentra todas las soluciones posibles en una sola ejecución, ahorrando así tiempo de ejecución de la computadora. Además, agregan que el SPEA se aplica a redes de gran tamaño.

En el área de la optimización multiobjetivo no han abordado el estudio del desempeño del SPEA para el diseño óptimo de redes. Por lo tanto, se propone la implementación de un Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo de frente de Pareto (SPEA) propuesto por Zitzler & Thiele (1999), el cual sigue los principios de selección natural para generar una población inicial y una población externa. De este modo, ambas son evaluadas con el propósito de marcar las soluciones no dominadas de redes posibles; así como, calcular el *fitness* de los individuos y aplicar posteriormente los operadores genéticos de selección por torneo y cruza para obtener una óptima generación.

Este método se desarrolla con el fin de encontrar un conjunto óptimo de soluciones que satisfaga dos funciones objetivo: mayor confiabilidad y mínimo costo. Asimismo, deben cumplir con la conservación de la masa en los nudos y de la energía, y así se podrán concretar a partir del uso del método del Gradiente junto a las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White.

Adicionalmente, para garantizar límites de comportamiento hidráulico se introdujeron restricciones en cuanto a velocidad de circulación en las tuberías y a la presión de servicio en los puntos de salida. El cálculo requerido para llegar al conjunto de soluciones se ha desarrollado con Matlab R2012. Para ello, se demostró la efectividad del MAGMO en la red del Sector Viñani. Esta cuenta con 1 reservorio, 20 circuitos, 91 nodos y 139 tuberías.

La presente investigación abarca los siguientes capítulos. En el Capítulo I se plantea el problema de la investigación, caracterizándolo y delimitándolo en función a la problemática inmersa. Además, se formula el problema de estudio y consecuentemente los objetivos, la justificación y limitaciones correspondientes.

En el Capítulo II se presentan tanto los antecedentes del estudio como los fundamentos teóricos que enmarcan y sustentan la presente investigación. Asimismo, la definición de términos y las hipótesis. Por otro lado, las variables independiente y dependiente; así como la matriz de consistencia.

En el Capítulo III se describe el proceso metodológico y se establece el tipo y nivel de investigación. En tal sentido, la población y muestra a estudiarse, las técnicas e instrumentos que sirvieron para la recolección de datos, los cuales se utilizaron durante el desarrollo de la investigación. Además, se presenta el procesamiento y análisis de los datos a estudiar.

En el Capítulo IV se comprueban los resultados obtenidos a partir de la aplicación del Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo de frente de Pareto (SPEA) con la comparación de la red sin criterios de optimización y la red aplicando el Micro Algoritmo Genético Multiobjetivo (MAGMO).

En el Capítulo V se desarrolla la discusión de los resultados obtenidos de la comparación del Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo de frente de Pareto (SPEA) con la red sin criterios de optimización y la red aplicando el Micro Algoritmo Genético Multiobjetivo (MAGMO).

Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos que se han utilizado en la elaboración del presente trabajo de investigación.

1 PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

“Una enorme proporción de los países en vías de desarrollo sufre aún problemas de abastecimiento, bien sea por falta de acceso al servicio o por su pésima calidad. De aquí que sea de vital importancia operar el sistema de distribución de manera eficiente en términos hidráulicos y económicos”. (Saldarriaga, Takahashi, Hernández & Escovar, 2010).

“Muchos problemas de optimización que aparecen en el ámbito de la ingeniería son muy difíciles de solucionar mediante técnicas tradicionales, por lo que a menudo se aplican algoritmos evolutivos, inspirados en la naturaleza, que recogen un conjunto de modelos basados en la evolución de los seres vivos (...), muchos problemas de la vida real no pueden definirse en términos de un único valor, sino que deben expresarse en términos de múltiples objetivos”. (Mateos Andaluz, 2014).

Martínez (2013) afirma que al momento de abordar más de un objetivo, estos pueden entrar en conflicto entre sí, lo que se traduce a una mayor complejidad. Además, la optimización multiobjetivo engloba un conjunto de técnicas que tratan de dar solución a los problemas, obteniendo soluciones óptimas que involucran la optimización de más de un objetivo.

El problema de diseño de redes de distribución de agua potable es bastante complicado debido a la relación no lineal entre el flujo y las pérdidas de carga; así como a la presencia de variables discretas, tales como los diámetros de las tuberías comerciales.

“La función de costos de las tuberías también posee una relación no lineal con los diámetros (...). Este problema es de complejidad NP-DURO, es decir, un problema intratable que carece de algún método determinístico para solucionarlo en un tiempo polinomial”. (Yates, Templeman & Boffey, 1984).

En nuestro país la investigación en técnicas heurísticas es escasa; además, existen diversos problemas debido a la falta de eficiencia. Tampoco se aplica el conocimiento de algunos requisitos de optimalidad para construir una estructura de control que garantice encontrar la mejor respuesta con metodologías de optimización que puedan aplicarse a los diseños de redes de distribución de agua; siendo el algoritmo genético multiobjetivo Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) una de las técnicas para optimización elegida, ya que la propiedad de convergencia es una característica importante del SPEA, la cual no siempre está presente en otros Algoritmos Evolutivos en Optimización Multiobjetivos (MOEA).

Además, prevalece la experiencia ingenieril sin tomar en cuenta los criterios de optimización como la base para el diseño, ampliación o rehabilitación de redes de distribución de agua provocando el colapso de las instalaciones de agua potable.

“El mayor problema radica en la elección de los diámetros como variables de decisión; puesto que en este caso las restricciones son funciones implícitas de estos mismos diámetros (...). En este punto, los métodos tradicionales basados en técnicas matemáticas quedan limitados a la ubicación de mínimos locales de la función objetivo, la cual depende del punto de inicio del proceso de convergencia”. (Mora Melia, 2012).

“El problema del diseño optimizado de redes de distribución de agua potable consiste en encontrar la combinación de diámetros de tuberías que minimice el costo constructivo del sistema, satisfaciendo restricciones hidráulicas y comerciales”. (Ochoa, Saldarriaga, Ñañez & Galvis, 2010).

Asimismo, el diseño de redes de distribución de agua potable se realiza tradicionalmente por prueba y error, buscando el mínimo costo. Aunque este diseño garantiza el suministro a los usuarios en condiciones normales, deja la red vulnerable ante situaciones de emergencia; siendo fundamental un nuevo método para el diseño multiobjetivo de redes de distribución.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:

1.2.1 Interrogante general:

¿Cuál es la efectividad de la aplicación del algoritmo genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) en el diseño de redes de agua potable Caso: Sector Viñani-Tacna?

1.2.2 Interrogantes específicas:

- a. ¿Cómo es la aplicación del algoritmo genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)?
- b. ¿Cuán efectiva es la aplicación del algoritmo genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) en la solución del problema propuesto?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN:

1.3.1 Objetivo general:

Demostrar la efectividad de la aplicación del algoritmo genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) en el diseño de redes de agua potable Caso: Sector Viñani-Tacna.

1.3.2 Objetivos específicos:

- a. Determinar cómo es la aplicación del algoritmo genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA).
- b. Evaluar la efectividad del algoritmo genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA).

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN:

“El diseño de Sistemas de Distribución de Agua Potable se encuentra entre una inmensa serie de combinaciones de diámetros discretos disponibles en el mercado (...). El problema radica en que no se conoce un algoritmo con complejidad de orden polinomial que lo resuelva, a pesar de que existe un número extraordinariamente amplio de posibles diseños para un sistema dado. Por ello, se requieren métodos aproximados que permitan encontrar el diseño de mínimo costo en un tiempo computacional razonable”. (Saldarriaga, Takahashi, Hernández & Escovar, 2010).

Resulta necesario investigar sobre el comportamiento de un algoritmo heurístico, ya que es escaso el número de investigaciones que comparan cuál es el mejor modelo de optimización aplicado al diseño de redes de agua.

Además, es imprescindible reconocer la importancia del agua como recurso natural limitado y considerar la perspectiva de crecimiento de las

poblaciones urbanas. Asimismo, es urgente realizar una investigación sobre la distribución de los sistemas de abastecimiento de agua para hacer frente a la infraestructura básica común en poblaciones de todo el mundo.

Por lo tanto, este método busca encontrar un conjunto óptimo de soluciones que satisfaga la conservación de la masa en los nudos, conservación de la energía en los circuitos, presión mínima en los nudos de consumo y diámetros comerciales adecuados en las tuberías.

En tal sentido, García, García & Villada (2015) afirman que el algoritmo evolutivo multiobjetivo más relevante es el SPEA debido a su flexibilidad y alta selectividad, el cual minimiza el problema y reduce los cálculos, así como el tiempo y la capacidad de cómputo requerida. Además, el algoritmo evolutivo multiobjetivo SPEA presenta enormes ventajas aplicadas a optimizar problemas que involucran varias funciones objetivos.

Del mismo modo, Coello, Veldhuizen & Lamont (2007) afirman que dentro de los algoritmos evolutivos basados en conceptos de optimalidad de Pareto, uno de los más destacados por su buen desempeño en aplicaciones prácticas es el SPEA.

García & Mendoza (2011), después de explorar diferentes operadores evolutivos que afectan el rendimiento del algoritmo SPEA, se evidencia que la eficiencia en la operación es buena, a pesar de que estos influyen en el tiempo de ejecución y su efecto es despreciable, considerando que el tiempo de ejecución se ejecuta en segundos.

“La aplicación ingenieril del diseño realizado mediante métodos clásicos tenía utilidad cuando no existía la posibilidad de realizar cálculos complejos con ordenadores, pero las posibilidades que ofrece hoy en día la informática posibilita el desarrollo de nuevas técnicas de optimización que hace años eran inviables (...). El objetivo es minimizar los costes de inversión necesarios para la implantación de un determinado sistema, partiendo de la situación topológica de la red, la demanda en cada nudo de

consumo y unos requerimientos de presión mínima en los nudos”. (Mora Melia, 2012).

“Los algoritmos genéticos constituyen una técnica poderosa de búsqueda y optimización con un comportamiento altamente paralelo, inspirado en el principio darwiniano de selección natural y reproducción genética, importantes por su potencial como una técnica para la solución de problemas complejos en ingeniería. En este principio de selección de los individuos más aptos, tienen mayor longevidad y mayor probabilidad de reproducción. Los individuos descendientes de estos individuos tienen una mayor posibilidad de transmitir sus códigos genéticos a las próximas generaciones (...). Los algoritmos evolutivos, por otro lado, han demostrado su efectividad al escapar de los óptimos locales y descubrir el óptimo global, incluso en paisajes adaptativos muy escabrosos y complejos. Los cuatro componentes principales de los AGs –paralelismo, selección, mutación y cruzamiento– trabajan juntos para conseguir esto”. (Mateos Andaluz, 2014).

Es por ello, que con la metodología de optimización denominada algoritmo genético multiobjetivo Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) permitirá buscar a través de la matemática la manera más óptima de diseñar redes hidráulicas completas, definiendo el mejor funcionamiento y la operación de una red; en el cual, a comparación de otros algoritmos evolutivos, asegura una mejor distribución entre las soluciones no dominadas obtenidas; además el proceso de asignación de aptitud en el SPEA es fácil de calcular.

A todo esto, es fundamental un análisis integral que considere el costo para garantizar un grado de confiabilidad aceptable; así como la eficiencia dentro del rango normativo que asegura un diseño óptimo de redes de distribución, rentabilidad, disponibilidad de tuberías y distribución de la demanda.

Es por ello que con esta técnica se quiere evaluar la efectividad del algoritmo SPEA comparando sus resultados con aquellos obtenidos mediante la técnica Micro Algoritmo Genético Multiobjetivo (MAGMO), la cual también fue aplicada en el diseño óptimo de redes de agua del Sector Viñani.

Todo ello se realizó con el propósito de identificar el modelo de optimización más apropiado y lograr una perspectiva global del problema de diseño óptimo de redes de distribución al intervenir variables de naturaleza hidráulica como económicas.

1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN:

- a. Asignación de recursos:** Existe escasa bibliografía que contenga información respecto a los algoritmos genéticos multiobjetivo, los cuales se hayan aplicado en el ámbito regional y nacional.
- b. Uso del Matlab:** Bastante conocimiento de la herramienta Matlab para realizar los cálculos que demuestren la efectividad del algoritmo propuesto.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN:

Montesinos, García & Ayuso (1996); en su trabajo de investigación “*Optimización de redes de distribución de agua utilizando un algoritmo genético*” de la Universidad de Córdoba; concluyen que el algoritmo genético propuesto es un método idóneo en la búsqueda de soluciones óptimas referidas a problemas de diseño en ingeniería, siendo aplicado en el presente trabajo para la obtención de una red de distribución de agua de coste mínimo, con una topología y condición de carga fijas.

Duarte (2001); en su tesis “*Optimización multiobjetivo de redes empleando algoritmos evolutivos paralelos*” de la Escuela Profesional de Ingeniería Informática de la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción; sustenta que el SPEA se desempeña mejor que el NSGA para el problema propuesto, el cual consiste en comparar las relaciones de dominancia entre las mismas, la aproximación hacia el frente de Pareto que estas representan, la cantidad de soluciones encontradas y el tiempo de ejecución de ambos algoritmos, ya que este factor resulta clave para permitir la escalabilidad anhelada; incluso, la posibilidad de la realización de búsquedas interactivas.

Sotelo & Barán (2001); en su trabajo de investigación “*Optimización de los costos de bombeo en sistemas de suministro de agua mediante un algoritmo evolutivo multiobjetivo combinado*” de la Universidad Nacional de Asunción; sostienen que el SPEA proporciona un conjunto de soluciones óptimas en vez de una solución; así como predecir las consecuencias a causa de introducir cambios en las características de las bombas, capacidad del tanque y demanda de consumo mediante simulaciones hechas con el algoritmo.

Sotelo, Basulado, Doldán & Barán (2001); en su trabajo de investigación *“Algoritmos evolutivos multiobjetivos combinados para la optimización de la programación de bombeo en sistemas de suministro de agua”* de la Universidad Nacional de Asunción; afirman que el problema de la programación óptima de bombeo es presentado y resuelto en el presente trabajo a través de la utilización de dos algoritmos evolutivos multiobjetivos: el SPEA y el NSGA; cuyo resultado final demuestra que el SPEA se presenta como una poderosa herramienta para solucionar los problemas hidráulicos, tales como: la programación óptima de bombeo. Por otro lado, logra incrementar sus funcionalidades en la medida de que se disponga de una computadora de alto desempeño.

Peña (2002); en su tesis *“Desarrollo de un Applet en Java del micro algoritmo genético usando optimización multiobjetivo”* de la Universidad Autónoma de Yucatán; concluye que la importancia de este tipo de algoritmos en la actualidad se debe a que facilitan la solución de problemas con muy poca información; además, ayudan en la optimización de ciertas funciones sumamente complejas. Por lo tanto, se puede destacar que sus principales objetivos son: mejorar la calidad de sus soluciones y aumentar la velocidad de ejecución.

De Freitas, Do Nascimento, Fernandes & Márcio (2003); en su trabajo de investigación *“Algoritmos evolucionarios aplicados ao planejamento florestal com objetivos múltiplos”*; sustentan que la aplicación de algoritmos evolucionados y del SPEA, en particular, es una alternativa idónea para la solución de problemas de planificación forestal. Su performance se comprobó satisfactoriamente sobre el conjunto de problemas-prueba, donde varios parámetros fueron definidos por medio de datos reales asociados a una empresa del área forestal.

Talavera (2005); en su trabajo de investigación *“Comparación de algoritmos evolutivos multiobjetivos en un ambiente multicast”* de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción; señala que se codificaron los algoritmos NSGA, NSGA2, cNSGA2, SPEA y SPEA2; y sostiene que existe un mejor rendimiento de dos algoritmos para la resolución del problema de ingeniería de tráfico multicast en un ambiente estático: el SPEA y el SPEA2.

Rodríguez, Fuentes, Jiménez & De Luna (2006); en su trabajo de investigación *“Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético multiobjetivo”*, presentado en el VI Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua (SEREA); afirman que la optimización de una red de tuberías para la distribución de agua potable es un problema común en la ingeniería civil. Obtener diseños que cumplan con los requisitos hidráulicos y que, además, sean económicos, permitirá atender un mayor número de aspectos ingenieriles con un menor presupuesto. Las técnicas de optimización pueden extenderse a redes construidas que requieren modificaciones con un mínimo de inversión (...). Asimismo, la optimización con AG representa un avance significativo en el diseño de sistemas de distribución de agua potable.

Mendoza & Saldarriaga (2010); en su trabajo de investigación *“Diseño optimizado de redes de distribución de agua potable incluyendo análisis de costo mínimo versus resiliencia en la red”*, presentado en el XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, realizado en Punta del Este (Uruguay); concluyen que encontrar un diseño de redes de distribución de agua potable (RDAP) no garantiza un nivel de confiabilidad deseable, ya que en la mayoría de casos las RDAP de mínimo costo presentan índices de resiliencia muy bajos, es decir, no cuentan con superávit de energía suficiente que garantice el suministro en caso de presentarse una cualquier inconveniente o problemática. Los resultados obtenidos muestran que en todas las RDAP se logró aumentar la confiabilidad entre 36% y 57% (en comparación con la red de mínimo costo), generando un incremento en los

costos entre 6% y 11%. De este modo, los beneficios encontrados oscilaron entre cuatro y siete veces los costos generados. Esto prueba que la metodología presentó un buen desempeño.

Espinoza & Pino (2011); en su trabajo de investigación *“Uso de algoritmos genéticos multiobjetivos aplicados al diseño de redes de agua potable. Caso AA.HH. Puente Camiara del distrito Locumba-Tacna”* de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; sustentan, basados en el método NSGA-II, que la red planteada es económicamente superior a la optimizada (S/. 15 970 048 vs. S/. 18 932 024). Al finalizar se observó cierto grado de confiabilidad en el parámetro optimizado del diseño de la red de agua potable. De esta manera, se hizo evidente que la red más confiable es la optimizada con un índice de resiliencia de 0.638 contra un índice de resiliencia de 0.28 para la red diseñada de manera tradicional sin criterios de optimización. Por tal motivo, se recomienda un índice de resiliencia superior a 0.50, ya que se podrán evitar fugas o rupturas en las tuberías.

García & Mendoza (2011); en su trabajo de investigación *“Implementación de un algoritmo evolutivo en la planeación de inversiones de un sistema de distribución de energía”* del Área de Distribución Eléctrica del Centro de Empresas Públicas de Medellín; sostienen que el algoritmo SPEA implementado demuestra ser una herramienta eficiente y útil para la toma de decisiones.

Potti & Chitra (2011); en su trabajo de investigación *“Strength Pareto Evolutionary Algorithm based Multiobjective Optimization for Shortest Path Routing Problem in Computer Networks”*; afirman que el SPEA es capaz de explorar soluciones más eficientes y no inferiores. Esto indica que la búsqueda de SPEA se extiende sobre todo el comercio de superficie. Además, el rendimiento del SPEA ha sido comparado con el método de la suma ponderada. De esta manera, los resultados obtenidos mediante el SPEA son superiores al método de suma ponderada; asimismo, encuentra todas las soluciones posibles en una sola ejecución, ahorrando tiempo en

la ejecución. El SPEA se aplica a redes de varios tamaños y es evidente que el algoritmo funciona bien en grandes tamaños de red.

Mora Melia (2012); en su tesis doctoral *“Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia”* de la Universidad Politécnica de Valencia; concluye que las ventajas de este tipo de los algoritmos evolutivos son evidentes, puesto que permite la búsqueda de soluciones más allá de los mínimos locales que suelen alcanzar las técnicas de diseño basadas únicamente en criterios hidráulicos. Este tipo de técnicas de optimización permite ampliar el campo de búsqueda; así como la capacidad de encontrar mejores soluciones.

Pino & Alfaro (2013); en su trabajo de investigación *“Propuesta de actualización Norma RNE OS 050 para el Diseño óptimo de redes de Agua para consumo humano”* de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; presentado en el IV Congreso Nacional del Agua en Lima sostiene usar como motor de análisis el método del gradiente por requerir menor tiempo de procesamiento debido a la capacidad del soporte de programación en el entorno de MATLAB, lo cual hace eficiente su empleo en los algoritmos genéticos multiobjetivo. Además afirma que La metodología desarrollada, basada en las rutinas creadas en el entorno de programación descrito, permitirá obtener el diseño optimizado de una red de agua potable siguiendo el proceso del principio de selección natural y así sustentar el dimensionamiento de los diámetros de la red propuesta.

Valle (2014); en su tesis titulada *“Optimización del diseño de redes de distribución de agua potable usando algoritmos genéticos con tres funciones objetivo. Caso: Viñani-Tacna”* de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; sostiene que se logró evaluar y comparar la red de agua potable existente sin criterios de optimización con la resultante de la aplicación del método de Micro Algoritmos Genéticos con dos funciones objetivo de optimización: minimización de costo y maximización de la confiabilidad. De esta manera, se obtuvo un costo de S/. 1 933 745 061; el cual si bien es mayor que el

costo sin optimización, o sea, S/. 1 311 550 083; posee un índice de confiabilidad resiliente optimizado de 0.391, valor menor que aquel sin optimización de 0.70.

García, García, & Villada (2015); en su trabajo de investigación *“Implementación del Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo de Frente de Pareto (SPEA) para la planeación de sistemas eléctricos de distribución incluyendo Huecos de Voltaje”* de la Revista Scielo Analytics, Volumen 26 (5); sustentan que la implementación de SPEA para la planeación de sistemas de distribución reales es una buena y eficiente herramienta computacional cuando se requiere considerar varias funciones objetivo.

Valle & Pino (2017); en su trabajo de investigación *“Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Usando Un Software Basado En Microalgoritmos Genéticos Multiobjetivos”* de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; publicado en la revista RIBAGUA-Revista Iberoamericana del Agua sostiene el empleo de algoritmos genéticos en la solución de las RDA ha permitido lograr obtener un conjunto de soluciones, del cual el diseñador finalmente deberá decidir de un grupo de redes de distribución de agua optimizadas en confiabilidad y costo. Trabajo de investigación aplicado en la red de Hanoi con el uso de la aplicación del software Magmoredes que permite a los actuales diseñadores diseñarse redes óptimas sin excusa.

2.2 BASES TEÓRICAS:

2.2.1 Historia de la Computación Evolutiva:

Hoy en día para abastecer de agua a una población se requiere de instalaciones que permitan captar, purificar, almacenar y finalmente distribuir el agua en las poblaciones. Por la creciente demanda de consumo de agua en las ciudades hace que los sistemas de suministro se tornen cada vez más complejos que necesitan metodologías especiales para la optimización de una red

de agua, las cuales permiten obtener una configuración de diámetros apropiados. Esto se soluciona gracias al uso de algoritmos evolutivos en Optimización Multiobjetivos, los cuales tienen su origen en los principios de evolución del científico inglés, Charles Darwin. De esta manera, se presenta la historia de la Computación Evolutiva.

El Neodarwinismo (1930) considera la fusión de la teoría de la evolución por selección natural, las leyes de la herencia de Mendel y la hipótesis del plasma germinal de Weismann. El pensamiento evolutivo actual gira en torno al Neodarwinismo, el cual establece que toda la vida en el planeta puede ser explicada a través de: reproducción, mutación, competencia y selección:

2.2.1.1 Reproducción: Mediante este mecanismo se asegura que el material genético se herede de una generación a otra.

2.2.1.2 Mutación: Se produce cuando ocurre un error en la copia del material genético durante la reproducción. Pueden resultar mutaciones benéficas donde el organismo se adapta mejor a su medio ambiente.

2.2.1.3 Competencia: Es un proceso natural, en la que los organismos tienen una lucha continua por sobrevivir y heredar su código genético a otra generación.

2.2.1.4 Selección: Los organismos más aptos tendrán más oportunidad de sobrevivir, por ende, de reproducirse.

Por tal razón, Darwin aseveró que si se cumple el proceso de selección natural con intensidad suficiente y durante bastante tiempo va a causar cambios muy perceptibles en una población que culmina con la aparición de una nueva especie.

El inicio de la utilización de las estrategias evolutivas en la solución de este tipo de problemas data del año 1960, cuando John Holland planteó la posibilidad de incorporar los mecanismos naturales de selección y supervivencia a la resolución de problemas del campo de la Inteligencia Artificial.

Esta investigación fue fundamentalmente académica, siendo su realización práctica en aquella época muy difícil. La simulación de procesos de evolución natural de las especies da como resultado una técnica de optimización estocástica que posteriormente fue llamada algoritmos evolutivos, los cuales fueron enmarcados dentro de las técnicas no convencionales de optimización para problemas del mundo real.

“A partir de la creación de estas estrategias evolutivas aparecieron otras vías de investigación como: Algoritmos Genéticos (Goldberg), Programación Genética (Koza), Programación Evolutiva (Fogel), y Estrategias de Evolución (Rechenberg/Schwefel); en donde la estrategia de evolución más conocida hoy en día son los algoritmos genéticos”. (Mateos Andaluz, 2014).

John Holland (1960), investigador de la Universidad de Michigan, consciente de la importancia de la selección natural, desarrolló –a fines de los años 60– una técnica que permitió incorporarla a un programa. Su objetivo era lograr que las computadoras aprendieran por sí mismas. A la técnica que inventó Holland se le llamó originalmente "planes reproductivos", pero se hizo popular bajo el nombre "algoritmo genético" tras la publicación de su libro en 1975.

Es así que David Goldberg entra en contacto con Holland y empieza a estudiar sus métodos. Goldberg fue uno de los primeros que trató de aplicar los algoritmos genéticos a problemas

industriales. Goldberg escribió un Algoritmo Genético en un ordenador personal Apple II. Esta y otras aplicaciones creadas por estudiantes de Holland convirtieron a los algoritmos genéticos en un campo con base suficiente como para celebrar, en 1985, la International Conference on Genetic Algorithms (ICGA), evento que sigue celebrándose bianualmente.

De la misma manera, Michael Lynn Cramer (1985) y, posteriormente, John R. Koza (1989) propusieron de forma independiente el uso de una representación en árbol sobre la que se implementó un operador de cruce que permitía intercambiar subárboles entre los diferentes programas de una población generada al azar.

La propuesta de Koza fue la que se acabó imponiendo y, más tarde, se denominó Programación Genética. En 1992 empleó los algoritmos genéticos para hacer evolucionar programas para realizar ciertas tareas.

A partir de entonces, en la comunidad científica internacional se despertó un creciente interés hacia esta nueva técnica de optimización y búsqueda, la cual ha cobrado gran popularidad

Según Melia (2012) hay que destacar los distintos trabajos de M.H. Afshar (2006), los cuales consisten en la aplicación de los Algoritmos Genéticos en el diseño de redes de saneamiento. Es en esta temática donde se hace más complicado encontrar redes de referencia que permitan comparar resultados entre distintos investigadores, si bien algunos de ellos consideran como referencia la red propuesta por Larry W. Mays (1975).

2.2.2 Optimización Multiobjetivo:

Optimizar es encontrar la mejor solución posible a un determinado problema, dado un cierto conjunto de condiciones.

“En este trabajo de investigación, realizar un diseño que cumpla con todos los requerimientos de desempeño y que sea lo más económico posible se conoce como diseño optimizado”. (Saldarriaga, Takahashi, Hernández & Escovar, 2010).

“Un problema multiobjetivo no tiene una única solución eficiente, más bien, tiene un conjunto de soluciones eficientes que no pueden ser consideradas diferentes entre sí. A este conjunto de soluciones se le denomina Frontera de Pareto. Una solución es eficiente cuando no es dominada, es decir, cuando es al menos tan buena como las otras en todos sus objetivos y es mejor en al menos uno de ellos”. (Abbass et al., 2001) (Citado por Cuartas, 2009).

Según Martínez (2013) los problemas de optimización multiobjetivo están formados por distintas funciones objetivo que están expresadas en unidades diferentes y pueden encontrarse en conflicto entre sí. Este tipo de problemas tienen la particularidad de no tener una solución única, sino un conjunto de soluciones. A este conjunto se le conoce como conjunto óptimo de Pareto.

“Para lograr la aplicación de las técnicas de optimización es necesario, en primera instancia, identificar los objetivos. El segundo elemento a identificar son los parámetros que permiten ajustar las características del problema. Finalmente, se deben definir las restricciones que deben cumplir los parámetros”. (Gutiérrez Méndez, 2011).

Zitzler (1999) (citado por Luque Gonzáles, 2013) señala que un problema de optimización multiobjetivo incluye un conjunto de n parámetros (variables de decisión); un conjunto de K funciones objetivo y m restricciones; funciones de las variables de decisión (...). Generalmente, los objetivos son conflictivos, y en consecuencia, una solución que es óptima para una función dada no es óptima para las otras funciones. Por lo tanto, los objetivos no

pueden ser optimizados simultáneamente, al contrario, lo que se pretende es buscar una relación satisfactoria, también denominada como solución de compromiso, entre las funciones.

2.2.2.1 Optimalidad de Pareto:

Según Duarte (2001) una solución $x \in X_f$ es Pareto óptima si es no dominada, es decir, si no existe ninguna otra solución $x' \in X_f$ que la domine.

“Para que una solución domine a otra, esta necesita ser estrictamente mejor en al menos un objetivo, y no peor en ninguno de ellos. Esto es, al comparar dos soluciones como A y B, solo pueden existir tres posibles soluciones”. (Martínez, 2013):

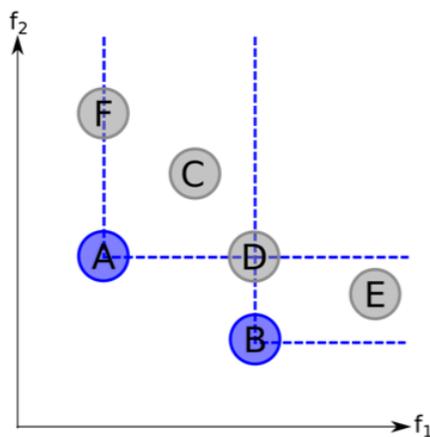


Figura 1. Dominancia de Pareto

Fuente: Martínez, M. (2013). *Un estudio empírico de dos algoritmos evolutivos para clustering multiobjetivo*. (Tesis de Maestría). México: Fondo Editorial de la Universidad Veracruzana.

- A domina a B.
- A es dominada por B.
- A y B no se dominan (son no dominadas entre sí).

La imagen del conjunto Pareto Óptimo se conoce como frente de Pareto Óptimo. El objetivo consiste en hallar la solución (o soluciones) que tengan los valores óptimos (máximos o mínimos) de f .

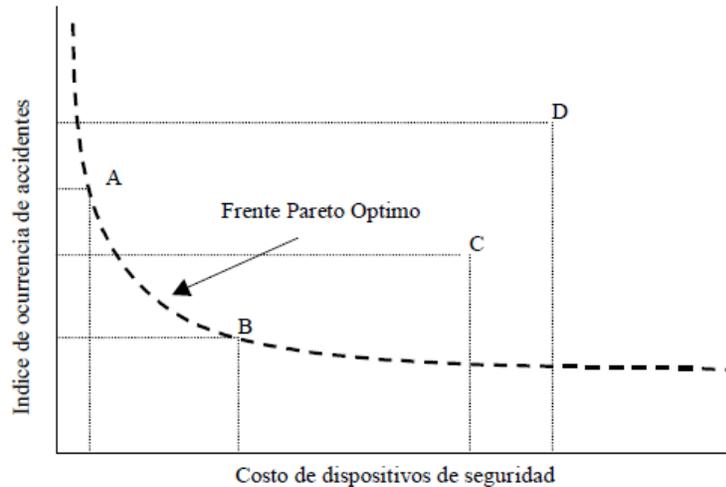


Figura 9. Óptimo de Pareto

Fuente: Duarte, S. (2001). *Optimización multiobjetivo de redes empleando algoritmos evolutivos paralelos*. (Tesis de Maestría). Paraguay: Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción.

“En el caso de múltiples objetivos, una solución que optimice un objetivo no optimizará los objetivos restantes en general. Esto lleva a un nuevo concepto denominado “punto eficiente”, también conocido como punto inferior o no dominado. Además, en la optimización con objetivos múltiples no existe una solución óptima única, sino un conjunto de soluciones no dominadas, para las cuales no existen soluciones mejores en todos los objetivos del problema”. (Pareto, 1986).

2.2.2.2 Dominancia de Pareto:

En la Figura 1 se considera que las funciones f_1 y f_2 deben ser maximizadas. La solución representada por el punto B es mejor

que la solución representada por C, porque B presenta mayor valor que C para f_1 y f_2 . Comparando C y D, C es mejor que D porque el valor C para f_1 es mayor; y para f_2 las soluciones se igualan.

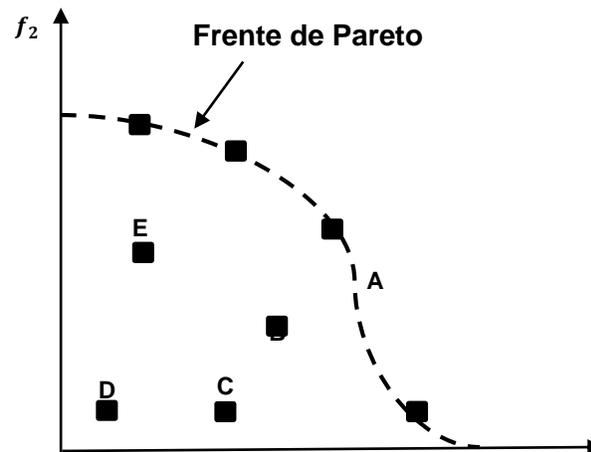


Figura 25. Frente de Pareto

Fuente: Luque Gonzáles, G. (2013). *Diseño Multiobjetivo de un sistema de abastecimiento de agua incluyendo la cosecha de agua de lluvia como recurso complementario*. España: Universidad Politécnica de Valencia.

Se puede garantizar que $B > C$, $C > D$ implica que $B > D$. Sin embargo, cuando B y E son comparados entre sí, no se puede identificar directamente cuál solución es superior, si se da que $B > E$ o que $E > B$.

En cualquier caso puede observarse que la solución E tiene mayor valor de f_2 que el de la solución B. Respecto al valor de la función f_1 , la solución E tiene menor valor que la solución B. Por lo tanto, dos variables de decisión cualesquiera a y b pueden tener 3 posibilidades en los problemas multiobjetivo.

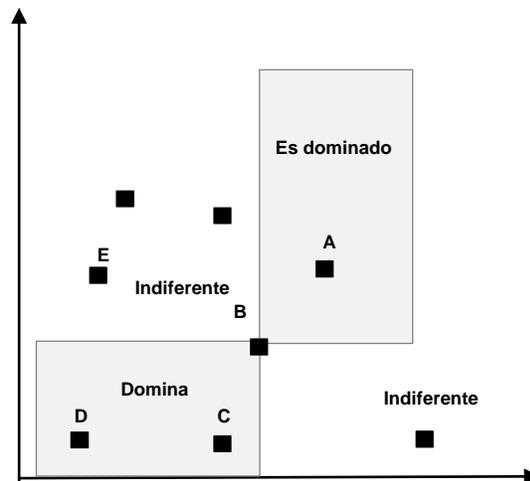


Figura 38. Dominancia

Fuente: Luque Gonzáles, G. (2013). *Diseño Multiobjetivo de un sistema de abastecimiento de agua incluyendo la cosecha de agua de lluvia como recurso complementario*. España: Universidad Politécnica de Valencia.

En el rectángulo referenciado con el texto “Domina” el vector solución B domina todo el espacio objetivo que contiene las soluciones C y D. El otro rectángulo referenciado con el texto “Es dominado” significa que el vector solución A domina el vector solución B. Todas las otras soluciones que pertenecen al espacio objetivo son indiferentes en relación al vector solución B.

Así, se puede introducir el criterio de optimalidad basado en el concepto de dominancia de Pareto. El vector solución A es el único de entre las otras soluciones (C, D y E) no dominado por ningún otro vector en el espacio objetivo.

“Los problemas reales usualmente requieren la búsqueda de soluciones que satisfagan de forma simultánea múltiples criterios de desempeño u objetivos, los cuales pueden ser contradictorios. (...). En este caso, para obtener la solución del problema basta con encontrar el mínimo o el máximo de una única función que resume todos los objetivos que se desean optimizar”. (Zitzler, Deb & Thiele, 2000)

Por lo general, en los problemas del mundo real nos enfrentamos a un alto nivel de complejidad, y en ciertas ocasiones dicha complejidad puede consistir en que se deben de satisfacer varios objetivos y restricciones.

En su forma general, encontrar un vector:

$$\vec{x}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$$

El cual debe satisfacer las m restricciones de desigualdad:

$$g_i(\vec{x}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

Y las p restricciones de igualdad:

$$h_i(\vec{x}) = 0, i = 1, 2, \dots, p$$

Y optimiza la función vector:

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T$$

Donde $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ es un vector de variables de decisión.

“Al conjunto de todos los vectores de decisión x que satisfacen las $m + p$ restricciones se le conoce como: Conjunto de Soluciones Factibles”. (Duarte Flores, 2001).

Según Martínez (2013) se requieren determinar los números que pertenecen a la zona factible F que satisfacen las restricciones de igualdad y desigualdad, y que obtienen el valor óptimo para todas las funciones objetivo de la función vector.

Existen 3 tipos de problemas multiobjetivo:

- a. Minimizar todas las funciones objetivo.
- a. Maximizar todas las funciones objetivo.
- b. Minimizar algunas y maximizar las funciones objetivo que restan.

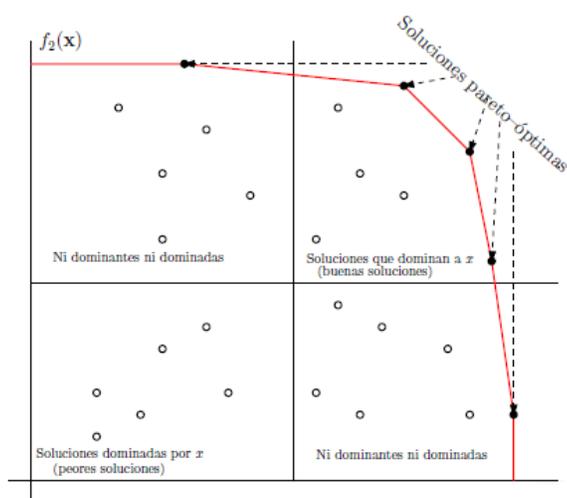


Figura 47. Frente de Pareto

Fuente: *Optimización Multiobjetivo basada en Metaheurísticas*. Recuperado de http://www.dia.fi.upm.es/~ajimenez/Docu_Metaheurísticas/Transparencias/Tema5Evolutivos.pdf

La noción de óptimo que es más comúnmente adoptada es la que originalmente fue propuesta por Francis Ysidro Edgeworth (1881). La noción de Óptimo en Multiobjetivos fue generalizada por Pareto (1896), y se basa en la definición de dominancia.

2.2.3 Técnicas para la optimización con objetivos múltiples:

Según Coello (1999) (citado por Peña, 2002) se pueden clasificar en dos grandes grupos tradicionales y alternativas.

2.2.3.1 Técnicas tradicionales:

Coello (1999) (citado en Peña 2002) afirma que las técnicas tradicionales ha sido desarrolladas por la comunidad de I.O. y son consideradas altamente limitadas y costosas para obtener una respuesta a medida que crece el problema. Además, en caso de hallar soluciones no dominadas, estas resultan ser la única solución o la porción limitada del frente de Pareto esperado.

Tabla 1

Técnicas tradicionales empleadas en la optimización multiobjetivo

TÉCNICAS TRADICIONALES	
MÉTODOS SIN PREFERENCIAS	Método del Criterio Global Método Multiobjetivo de los Paquetes Próximos
MÉTODOS A PRIORI	Método de la Función Valor Método Lexicográfico Programación de Metas
MÉTODOS A POSTERIORI	Método de Suma de Pesos Método de ε Restricciones
MÉTODOS INTERACTIVOS	Método Interactivo de Compromisos Valuados Método de Satisfacción de Compromisos Método de Geoffrion-Dyer-Feinberg Técnica Secuencial de Optimización Próxima Método de Tchebycheff Método de Punto de Referencia Método GUESS Búsqueda Light Beam Enfoque de Referencia de Dirección Método Nimbus

Fuente: Peña, J.J. (2002). *Desarrollo de un Applet en Java del micro algoritmo genético usando optimización multiobjetivo*. (Tesis de Pregrado). Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán.

2.2.3.2 Técnicas evolutivas:

Según Coello (1999) (citado por Peña, 2002) las principales técnicas evolutivas para optimización multiobjetivo son:

Tabla 2

Técnicas evolutivas empleadas en la optimización multiobjetivo

TÉCNICAS EVOLUTIVAS	
FORMAS SIMPLISTAS	Suma de Pesos Programación de Metas Satisfacción de Metas Método de ε Restricciones
TÉCNICAS NO BASADAS EN ÓPTIMOS DE PARETO	Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA) Ordenamiento Lexicográfico Uso de Géneros para Identificar Objetivos Uso de Min. / Máx. con Pesos Algoritmo Genético No Generacional Uso de Pesos Generados Aleatoriamente y Elitismo
TÉCNICAS BASADAS EN ÓPTIMOS DE PARETO	Multiobjetivo Genetic Algorithm (MOGA) Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) Niched Pareto Genetic Algorithm (NPGA / NSGA II) Pareto Archived Evolution Strategy (PAES) Strength Pareto Evolutionary Algorithm

Fuente: Peña, J.J. (2002). *Desarrollo de un Applet en Java del micro algoritmo genético usando optimización multiobjetivo*. (Tesis de Pregrado). Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán.

Según Valle (2014) la optimización de una red de agua, debido a su complejidad, está asociada al problema combinatorio llamado NP-Duro, lo que significa que no es posible utilizar un método determinístico para resolverlo, sino que requiere de metodologías especiales que haciendo uso de un tiempo computacional razonable permita obtener una configuración de diámetros que cumpla con las limitaciones (velocidad y presión); así como, alcanzar valores aceptables en los objetivos que se buscan (menor costo y mayor confiabilidad). El uso de algoritmos genéticos multiobjetivos permite solucionar este tipo de problemas combinatorios NP-Duro; y consecuentemente, optimiza una red de agua.

2.2.4 Método del Gradiente:

Para la evaluación de la configuración de la red se empleará el método del gradiente. Valle (2014) afirma que el Método de la Gradiente comprende la elaboración de un motor de cálculo que permite, en base a la estructura de sus genes (diámetros) de cada individuo, obtener sus características hidráulicas para un entorno ya definido (topología, caudales de consumo, fuentes de agua, entre otros). Este proceso permitirá la obtención de los datos necesarios para el cálculo de las funciones objetivos. Del mismo modo, proporcionará el número de restricciones incumplidas.

Por su parte, Saldarriaga (2007) manifiesta que el Método del Gradiente para el cálculo de redes de distribución de agua; desarrollado por los profesores Todini y Conell (1987) en la Universidad de Newscatle, Upon Tyne; considera que al tenerse un flujo permanente se garantiza el cumplimiento de la ecuación de conservación de la masa en cada uno de los nodos de la red y la ecuación de conservación de la energía en cada uno de los circuitos de esta.

Se puede utilizar para calcular casi cualquier tipo de tuberías, desde una tubería simple hasta redes complejas; así como las de distribución de agua potable con cualquier topología o las redes de abastecimiento.

Además, se requiere un menor número de iteraciones. El Método del Gradiente es el más apropiado para programar y no es necesario establecer cambios de energía. Asimismo, es tan poderoso que puede resolver la hidráulica de cualquier tipo de sistemas de tuberías, desde una tubería simple hasta la red de distribución más compleja que en comparación a otros métodos de análisis y diseño de redes cerradas como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3

Método de análisis y diseño de redes cerradas

MÉTODO	DESVENTAJA
Método de Hardy-Cross con corrección de caudales en los circuitos (1936)	Balancear los caudales antes de iniciar las iteraciones comprobó ser engorroso para las redes grandes.
Método de Hardy-Cross con corrección de alturas piezométricas en los nodos (1938)	Cada iteración es más larga, ya que pasa por cada uno de los nodos de la red, mientras que el de caudales pasa por circuitos.
Método de Newton-Raphson (1962 - 1963)	Requiere un número de iteraciones extremadamente alto. El método no corrige caudales.
Método de la teoría lineal (1970 y 1972)	La matriz que necesariamente debe invertirse, tiene una dimensión de $NT \times NT$. Por no ser simétrica y dispersa limita las posibilidades de manejo matricial.

Fuente: Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías*. Bogotá: Alfaomega.

Por consiguiente, el método se basa en las siguientes tres condiciones:

2.2.4.1 Primera condición:

Ecuación de continuidad en los nodos:

$$\sum_{j=1}^{NTi} (Q_{ij} - Q_{Di} + Q_{ei}) = 0 \quad (1)$$

Donde:

NT: Número de tuberías

Q_{ij} : Caudal de salida del nodo

Q_{Di} : Caudal de demanda del nodo

Q_{ei} : Caudal de ingreso al nodo

2.2.4.2 Segunda condición:

Debe existir una relación no lineal entre las pérdidas por fricción y caudal para cada uno de los tubos que conforman la red. Para ello, se ha empleado la ecuación de Darcy; y para la determinación de su factor de fricción se hace uso de la ecuación de Colebrook-White y Newton-Raphson.

a. Ecuación de Darcy (1845):

$$Hf = \frac{fLV^2}{2gD} \quad (2)$$

En el régimen laminar, los esfuerzos cortantes se pueden calcular de forma analítica. Mientras que en el régimen turbulento, no es posible obtener analíticamente los esfuerzos cortantes. Esto conlleva a la ecuación de Darcy-Weisbach, donde f es un parámetro adimensional, denominado de fricción; que en términos generales, es función del número de Reynolds y de la rugosidad de la tubería: $f = f(Re, \varepsilon_r)$. (Poma Solano, 2015).

La pérdida de carga por fricción h_f se calcula según la expresión de Darcy-Weisbach; en cambio, el factor de fricción se calcula según Colebrook-White, la cual es válida para el flujo turbulento, tanto para tubos lisos como rugosos. Debido a que esta ecuación no es explícita para el factor de fricción, su difícil solución ocasionó la aparición de ecuaciones empíricas más sencillas, pero menos exactas como la de Hazen-Williams.

“Además, menciona que las computadoras permiten desechar el uso de expresiones empíricas, diagramas y ábacos en beneficio de la exactitud; y por consiguiente, la economía en el diseño de conducciones entubadas”. (Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, 2012).

El diseño en hidráulica requiere de una ecuación para predecir las pérdidas por fricción, tales como: función del fluido, velocidad, diámetro de la tubería y tipo de material. Por esta razón, se trata de una ecuación basada en la física clásica.

Es una ecuación con dimensionalidad homogénea, una de las fórmulas más exactas para los cálculos hidráulicos que será utilizada en el Método del Gradiente.

Finalmente, se puede confirmar mediante el análisis dimensional y su fundamento en las ecuaciones de la física clásica ($\vec{F} = m \cdot \vec{a}$) que es la ecuación de resistencia fluida más general que

existe. Además, es utilizada para calcular las pérdidas de energía en un flujo mediante casos particulares que se generan a partir de la ecuación Darcy-Weisbach, tales como: Gauckler-Maning, Chezy y Hazen-Williams.

b. Ecuación de Colebrook-White (1939):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\text{Log} \left(\frac{K_s}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

$\varepsilon =$ Rugosidad absoluta (m)

$D =$ Diámetro del tubo (m)

$Re =$ Número de Reynolds

Donde: $\varepsilon_r = \frac{ks}{D}$

ks : Es la rugosidad de la tubería que representa la altura promedio de las irregularidades de la superficie interior de la tubería.

Según Saldarriaga (2007) el factor de fricción es una función compleja de la velocidad del flujo, de la densidad y viscosidad del fluido y del diámetro y rugosidad de la tubería. Esta complejidad se prueba con la ecuación de Colebrook-White, ya que es válida para todo tipo de flujo turbulento en las tuberías.

Asimismo, es una ecuación implícita que describe el factor de fricción de Darcy en función a la rugosidad absoluta de la tubería (Tabla 4) y al número de Reynolds del flujo. Es una ecuación basada en la física y es la más exacta y universal, en comparación a las siguientes ecuaciones. (Ver Tabla 5).

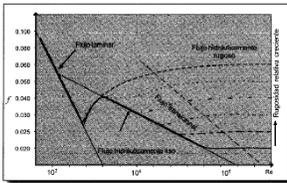
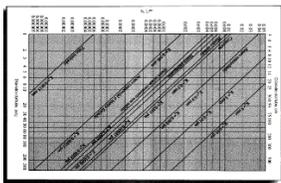
Tabla 4*Rugosidad absoluta para materiales en tuberías*

MATERIAL	k_s(mm)
Vidrio	0.0003
PVC / CPVC	0.0015
Asbesto cemento	0.03
GRP	0.03
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
CCP	0.12
Hierro fundido asfaltado	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Arcilla vitrificada	0.15
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Madera cepillada	0.18-0.9
Concreto	0.3-3.0
Acero bridado	0.9-9

Fuente: Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías*. Bogotá: Alfaomega.

Tabla 5

Ecuaciones de fricción para tuberías

ECUACIÓN	FÓRMULA	DESVENTAJAS
ECUACIÓN DE BLASIUS (1911)	$f = \frac{0.316}{Re^{-0.25}}$	<ul style="list-style-type: none"> - Para flujos hidráulicamente lisos. - Solo en función al número de Reynolds, situados entre 5000 y 100000. (Tiene rango limitado).
PRANDTL Y VON KARMAN (1930)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> - No pudieron deducir una ecuación que describiera el factor de fricción en función al número de Re y a la rugosidad relativa. Se sabe que f es una función complicada de $\frac{k_s}{d}$ y Re.
DIAGRAMA DE NIKURADSE (1933)		<ul style="list-style-type: none"> - En cuanto a los materiales que existen hoy en día, las tuberías con rugosidad artificial resultan extremadamente rugosas.
DIAGRAMA DE MOODY (1944)		<ul style="list-style-type: none"> - Se basó en Nikuradse y Colebrook. - Solo se aplica en el caso de flujo hidráulicamente rugoso.
ECUACIÓN DE MOODY (1944)	$f = 0.0055 \left[1 + \left(2000 \cdot \frac{k_s}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$	<ul style="list-style-type: none"> - Ecuación empírica. - La precisión de la ecuación es baja para $Re > 3 \times 10^5$ y rugosidades relativas muy altas.
ECUACIÓN DE WOOD (1960)	$f = a + b \cdot Re^{-c}$	<ul style="list-style-type: none"> - Ecuación empírica. - Menos precisa que Moody. - Solo tiene validez para rugosidades relativas superiores a 10^{-5} y para el número de Re entre 3×10^4 y 10^7.

ECUACIÓN	FÓRMULA	DESVENTAJAS
ECUACIÓN DE BARR (1976)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2. \log_{10} \left(\left(\frac{A}{\pi_1 B} \right) + \left(\frac{C}{\pi_2 D} \cdot E \right) \right)$	<ul style="list-style-type: none"> - Ecuación empírica. - Varía su rugosidad relativa respecto a Colebrook-White entre 10^{-1} y 10^{-7} y número de Re entre 3×10^3 y 3×10^7. - No incluye explícitamente los caudales y el material de tubería, el cual es necesario para la exactitud de su ecuación.
ECUACIÓN DE SWAMEE-JAIN (1976)	$f = \frac{0.25}{[\log. (\frac{k_s}{3.7.d} + \frac{5.74}{Re^{0.5}})]^2}$	<ul style="list-style-type: none"> - Ecuación empírica. - Ecuación explícita con errores menores al 1%.
ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS	$h = \frac{6.824 \times l \times v^{1.851}}{C_{HW}^{1.851} \cdot d^{1.167}}$	<ul style="list-style-type: none"> - Ecuación empírica y explícita. - El fluido (agua) debe estar a temperaturas normales (5°C / 25°C). - El diámetro debe ser superior o igual a 75 mm (3 pulg). - La velocidad en las tuberías debe ser inferior a 3m/s (10 pies/seg). - Sobreestima el f para Re entre 5000 y 300 000 con una diferencia máxima del orden de 30% para un Re de 40000.

Fuente: Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías*. Bogotá: Alfaomega.

“Combinaron diversas expresiones y propusieron una única expresión para el coeficiente de fricción que puede aplicarse en cualquier régimen turbulento. Es la más exacta y universal, pero el problema radica en su complejidad y en que requiere de iteraciones”. (Chávez Mendoza, 2014).

Se han utilizado las ecuaciones Darcy-Weisbach y Colebrook-White, ya que durante el proceso de diseño de redes no se tiene el control sobre el número de Reynolds en todas las tuberías de la red, lo cual invalida el uso de la ecuación de Hazen-Williams.

Poma Solano (2015) afirma que el tipo de flujo, laminar o turbulento, depende del valor de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, es decir, del llamado número de Reynolds cuya expresión se muestra de forma general y particularizada para tuberías de sección transversal circular:

$$Re = \frac{\rho.V.D}{\mu} = \frac{VD}{\mu.\rho} = \frac{\left(\frac{4Q}{\pi.D^2}\right).D}{v} = \frac{4.Q}{\pi.D.v} \quad (4)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido

V: Velocidad media

D: Diámetro de la tubería

μ : Viscosidad dinámica o absoluta del fluido

v: Viscosidad cinemática del fluido

Q: Caudal circulante por la tubería

Saldarriaga (2007) afirma que el número de Reynolds determina si el flujo se encuentra bajo régimen laminar ($Re < 2000$) o régimen turbulento ($Re > 4000$); y entre $2000 < Re < 4000$ existe una zona de transición.

c. Ecuación de Newton-Raphson (1669):

Al no ser la ecuación de Colebrook-White una ecuación explícita para el factor de fricción f , la cual implica utilizar un método numérico iterativo una vez conocidas todas las variables.

Según Saldarriaga (2007) el método Newton-Raphson tiene como valor semilla para f 0.002. Este valor es el más cercano al valor real de 0.0261. En cambio, otros métodos de iteración alcanzan 0.001. Además, el método Newton-Raphson converge muy rápidamente; considerando que el método parte de la ecuación:

$$x = g(x)$$

$$g(x) - x = 0 \quad (5)$$

$$x_{i+1} = x_i - \frac{g(x_i) - x_i}{g'(x_i) - 1} \quad (6)$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (7)$$

$$g(x) = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51 \cdot x_i}{Re} \right) \quad (8)$$

$$g'(x) = -\frac{2}{\ln 10} \left(\frac{\frac{2.51}{Re}}{\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51 \cdot x_i}{Re}} \right) \quad (9)$$

Reemplazando en las ecuaciones, tenemos:

$$Hf = \frac{fLV^2}{2gD} \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{LV^2}{2gDHf} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{\sqrt{LV^2}}{\sqrt{2gDHf}} \quad (10)$$

De las ecuaciones tenemos:

$$Q = \frac{-2\sqrt{2gDHf}}{\sqrt{L}} A \log \left(\frac{K_s}{3.7D} + \frac{2.51v\sqrt{L}}{\sqrt{2gD^3}\sqrt{Hf}} \right) \quad (11)$$

2.2.4.3 Tercera condición:

En cada tubo la energía total disponible se gasta en pérdidas por fricción y en pérdidas menores.

$$Hf = hf + \sum h_m \quad (12)$$

Si se tienen en cuenta las pérdidas menores causadas por cualquier tipo de accesorio y la posible existencia de bombas en algunos de los tubos de la red, la ecuación (12) toma la siguiente forma:

$$Hf = \alpha Q_i^n + \beta Q + \gamma \quad (13)$$

Donde:

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

α , β , γ : Parámetros característicos del tubo, válvulas y bombas.

En el caso de que en una tubería particular solo ocurren pérdidas por fricción y pérdidas menores normales (funciones de la altura de velocidad únicamente), se tendrá:

$$H_1 = \alpha Q_n \quad (14)$$

$$hf + \sum h_m = \alpha Q_n \quad (15)$$

Usando la ecuación de Darcy-Weisbach se obtiene:

$$\alpha = \frac{f \frac{l}{d} + \sum Km}{2gA^2} \quad (16)$$

De esta manera Según Saldarriaga (2007) se presenta definiciones para la descripción de la topología de la red que plantea el Metodo del Gradiente:

NT: Número de Tuberías de la Red.

NN: Número de nodos con altura piezométrica desconocida.

NS: Número de nodos de altura piezométrica fija o conocida.

[A12]: Matriz de conectividad asociada a cada uno de los nodos de la red. De dimensión: NT x NN.

-1: en la columna que corresponde al nodo inicial del tramo i.

1: en la columna que corresponde al nodo final del tramo i.

[A10]: Matriz topológica tramo a nodo para los números de nodos de altura piezométrica fija o conocida.

Su dimensión es NT x NS.

-1: en la fila que corresponde a los tramos conectados a nodos de altura piezométrica fija.

[A21]: Matriz Transpuesta de [A12].

Asimismo, se deben considerar las definiciones anteriores, la pérdida de carga en cada tramo de tubería que conecte dos nodos de la red:

- Ecuación de Conservación de la Energía:

$$[A11][Q] + [A12][H] = -[A10][H_0] \quad (17)$$

$$[A11] = \begin{bmatrix} \alpha_1 Q_1^{(n1-1)} + \beta_1 + \frac{\gamma_1}{Q_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 Q_2^{(n2-1)} + \beta_2 + \frac{\gamma_2}{Q_2} & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_{NT} Q_{NT}^{(n_{NT}-1)} + \beta_{NT} + \frac{\gamma_{NT}}{Q_{NT}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Donde:

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

[H]: Vector de alturas piezométricas desconocidas con dimensión NN x 1.

[H₀]: Vector de alturas piezométricas fijas con dimensión NS x 1.

- Ecuación de continuidad para todos los nodos de la red:

$$[A21][Q] = [q] \quad (19)$$

$[q]$: Vector de consumo (demanda) o de entrada (oferta) en cada nodo de la red. Dimensión $NT \times 1$.

Por tanto, de las ecuaciones (17) y (18) en términos matriciales se obtiene:

$$\begin{bmatrix} [A11] & [A12] \\ [A21] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Q] \\ [H] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[A10][H_0] \\ [q] \end{bmatrix} \quad (20)$$

Para la ecuación (20) la parte superior corresponde a la relación Q versus H; y la inferior, a la conservación de la masa en cada uno de los nodos; siendo la parte superior no lineal, es decir, no se puede resolver en forma directa.

Es por ello que se utilizará el algoritmo iterativo del Método del Gradiente, a causa de operar simultáneamente:

$$\begin{bmatrix} [N][A11] & [A12] \\ [A21] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [dQ] \\ [dH] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [dE] \\ [q] \end{bmatrix} \quad (21)$$

Donde:

$[A11]$: Matriz con dimensión $NT \times NT$:

$$[A11] = \begin{bmatrix} \alpha_1 Q_1^{(n1-1)} & 0 \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 Q_2^{(n2-1)} \dots & 0 \\ 0 & 0 \dots & \alpha_{NT} Q_{NT}^{(NT-1)} \end{bmatrix} \quad (22)$$

En base a las condiciones y ecuaciones dadas, finalmente se obtiene:

$$[H_{i+1}] = \{[A21]([N][A11]')[A12])\}^{-1} \times \{[A21]([N][A11]')^{-1} ([A11][Q_i] + [A10][H_0]) - ([A21][Q_i] - [q])\} \quad (23)$$

$$[Q_{i+1}] = \{[I] - ([N][A11]')^{-1} - [A11]\}[Q_i] - \{([N][A11]')^{-1}([A12][H_{i+1}] + [A10][H_0])\} \quad (24)$$

2.2.5 Funciones Objetivos:

2.2.5.1 Función Objetivo de Costo:

Según Mendoza & Saldarriaga (2010) el costo de una red de distribución está determinado por el valor comercial de las tuberías y accesorios, el cual varía exponencialmente con el diámetro de la tubería más su costo de instalación. Pudiendo expresarse una relación potencial respecto al diámetro, de la siguiente manera:

$$C_T = \sum_{i=1}^{NT} K_1 L_i D_i^{K_2} \quad (25)$$

Donde NT es el número de tuberías que conforman la red de distribución de agua, L_i y D_i son la longitud y el diámetro del i ésimo tubo de la red, k y x son parámetros que se determina por regresión teniendo en cuenta los costos de determinado material en función del costo.

Se plantea como función objetivo el costo por metro lineal de tubería, de la curva de orden potencial se determinó la ecuación que define la función costo empleada para este estudio:

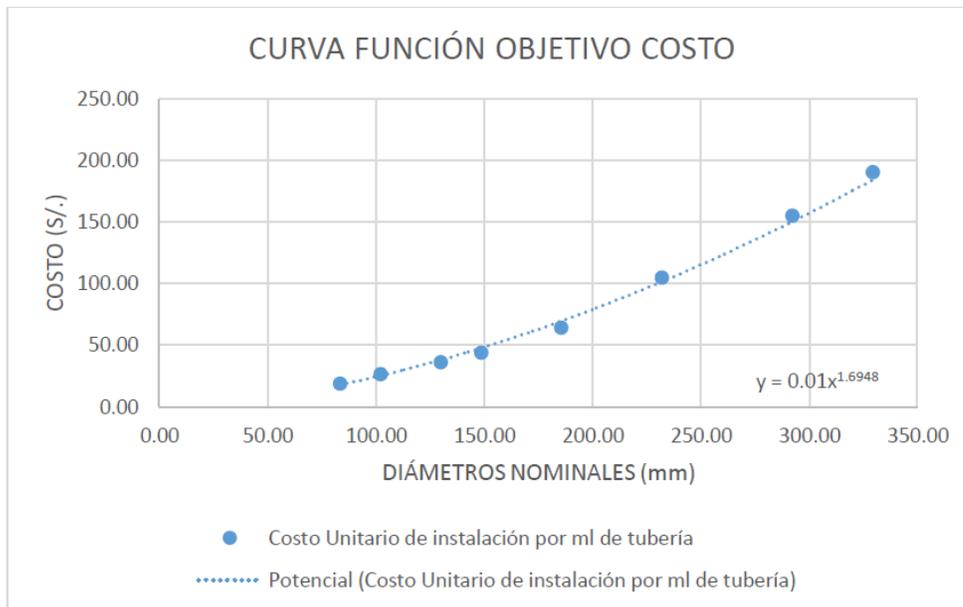


Figura 56. Curva función objetivo de costo para tubería en función del diámetro comercial

Fuente: 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 Pregrado de la UNJBG). Tacna, Perú.

$$C_T = 0,01x^{1,6948} \quad (26)$$

2.2.5.2 Función objetivo de confiabilidad resiliente de la red:

Todini (2000) define la confiabilidad como “la capacidad intrínseca que tiene una red de distribución de agua para superar fallas repentinas y se mide como la proporción entre el excedente de potencia que es entregado a los usuarios y la máxima potencia que puede ser disipada en la red cuando se cumplen exactamente los criterios y condiciones de diseño. El índice de resiliencia es la capacidad de un sistema de reaccionar y superar un estado de esfuerzos o el incremento de la redundancia energética y decrecimiento de la energía disipada internamente en una red”.

El índice de resiliencia de una red de agua (I_r) está basado en la noción de que incrementará las pérdidas de energía cuando la demanda incremente, aumento de rugosidad u ocurran fallos en las tuberías, que se representa como la potencia adicional en cada nodo de modo que exista un superávit suficiente de potencia que permita una red de distribución de agua más confiable que no afecte el servicio de los usuarios durante su operación. El índice de resiliencia hace referencia a qué tanto excedente de energía hay en la red que está dado por la relación entre el superávit de potencia por unidad de peso que es proporcionado a la red y la máxima potencia por unidad de peso que podría ser disipada internamente por la red sin dejar de satisfacer la presión mínima.

La potencia total disponible (P_{tot}) en una red de distribución de agua puede expresarse de la siguiente manera:

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^{n_e} Q_i H_i \quad (27)$$

Ne: Número de embalses.

Qi: Caudal de entrada.

Hi: Altura piezométrica de entrada.

También existe la siguiente relación para definir la potencia total (P_{tot}):

$$P_{tot} = P_{dis} + P_{sal} \quad (28)$$

Donde:

P_{dis} : Potencia disipada en las tuberías.

P_{sal} : Potencia entregada a los usuarios en cada uno de los nodos.

La potencia entregada a los usuarios en cada uno de los nodos (P_{sal}), puede ser la ideal (P^*_{sal}) o la real (P_{sal}). Por lo tanto, para la ideal tenemos:

$$P^*_{sal} = \sum_{j=1}^{nu} Q_j H_j^* \quad (29)$$

Donde:

un: Número de uniones (nodos).

Q_j : Caudal que demanda cada nodo.

H_j^* : Presión mínima requerida en cada nodo.

Teniéndose las definiciones anteriores se puede tener:

$$P_{dis} = P_{tot} - P_{sal} = P_{tot} - \sum_{j=1}^{nu} Q_j H_j \quad (30)$$

$$P^*_{dis} = P_{tot} - P^*_{sal} = P_{tot} - \sum_{j=1}^{nu} Q_j H_j^* \quad (31)$$

Se puede notar que la diferencia entre P_{dis} y P^*_{dis} es que en la primera se usan presiones realidad y en la segunda las presiones ideales o mínimas.

Uno de los principales parámetros de confiabilidad en una red es el índice de resiliencia que se define como:

$$I_R = 1 - \frac{P_{dis}}{P^*_{dis}} \quad (32)$$

Finalmente se tiene la siguiente expresión:

$$I_R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{nu} Q_j H_j}{\sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{nu} Q_j H_j^*} = \frac{\sum_{j=1}^{nu} Q_j (H_i - H_j)}{\sum_{i=1}^{ne} Q_e H_e - \sum_{j=1}^{nu} Q_j H_j^*} \quad (33)$$

Para poder evaluar la efectividad del algoritmo propuesto, se ha invertido la representación del coeficiente de confiabilidad resiliente de la red, mediante la siguiente relación de acuerdo a Valle (2014):

$$I_r = 1 - I_r \quad (34)$$

Con el fin de mejorar la representación de las soluciones, la función de confiabilidad se ha transformado para ser una función de minimización, siendo el 0 el valor más óptimo; así mismo el costo de la red es representado por un coeficiente que va desde 0 a 1, que representa el menor y mayor costo posibles respectivamente (Valle, 2014).

Además, se considerará el coeficiente de conectividad (C_j) que representa el nivel de variación de los diámetros de las tuberías en las conexiones (nudos), siendo las redes más confiables las que representen una menor variación de diámetros. Para ello Teniendo en cuenta la variabilidad de diámetros, los cuales están en el rango de 90 mm y 400 mm, se considerará un coeficiente de conectividad de 0.6.

$$I_R = \frac{\sum_{j=1}^{nu} C_j Q_j (H_i - H_j)}{\sum_{i=1}^{ne} Q_e H_e - \sum_{j=1}^{nu} Q_j H_j^*} \quad (35)$$

2.2.6 Algoritmo Genético:

Es una técnica de diseño económico que se basa en parámetros hidráulicos y criterios económicos que permite optimizar el diseño de redes de agua. Técnicas que tuvo relevancia a partir de 1940, debido al desarrollo urbanístico en las grandes ciudades. (Mora Melia, 2012).

Según Reed (1967) (citado por Melia, 2012) una heurística es una técnica que busca soluciones buenas a un costo computacional razonable, así también, según Melia (2012) mejora el desempeño de la solución de un problema.

Según Mateos (2014) los algoritmos evolutivos trabajan con una población de individuos, que representan soluciones candidatas a un problema. Esta población se somete a ciertas transformaciones y después a un proceso de selección, que favorece a los mejores. Cada ciclo de transformación y selección constituye una generación, de forma que después de cierto número de generaciones se espera que el mejor individuo de la población esté cerca de la solución buscada. Los algoritmos evolutivos combinan la búsqueda aleatoria, dada por las transformaciones de la población, con una búsqueda dirigida dada por la selección.

Tabla 6*Algoritmo Genético*

Generar una población inicial
Repetir
Seleccionar padres
Generar población de hijos usando el operador de cruce
Aplicar el operador de mutación
Evaluar hijos hasta que condición de paro se cumpla

Fuente: Gutiérrez Méndez, F. (2011). *Optimización multiobjetivo usando algoritmos genéticos culturales*. (Tesis de maestría). México: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

Principales Componentes:

- Población de individuos, que son una representación (no necesariamente directa) de posibles soluciones.
- Procedimiento de selección basado en la aptitud de los individuos para resolver el problema.
- Procedimiento de transformación para construir nuevos individuos a partir de los anteriores.

Los algoritmos genéticos difieren de las estrategias de búsqueda convencionales en que estos algoritmos genéticos trabajan sobre un conjunto de potenciales soluciones, llamado población. Las estrategias de evolución trabajan sobre los individuos, que representan las soluciones del problema, por lo que estos evolucionan a través de generaciones.

Dentro de la población cada individuo es diferenciado de acuerdo con su valor de aptitud, que es obtenido usando algunas medidas de acuerdo con el problema a resolver. Para la obtención de las próximas generaciones se crean nuevos individuos, llamados hijos, utilizando dos estrategias de evolución básicas como son el

operador de cruce y el de mutación (empleadas generalmente de forma aleatoria). Tras varias iteraciones el algoritmo converge al individuo con mejor valor de aptitud, el cual representara el óptimo del problema. (Mateos Andaluz, 2014).

Así Gessler (1985) (citado en Melia, 2012) propone una serie de condiciones que deben cumplir los programas de optimización de redes, y que se deben tener en cuenta en el desarrollo cualquier herramienta de diseño de redes de agua. Tales condiciones son:

- Los diámetros de las tuberías se deben tratar como variables discretas, puesto que los diámetros estándar disponibles para su implantación en la solución final constituyen un diámetro discreto y finito.
- El modelo de optimización debe garantizar al menos una buena aproximación al óptimo global para unas restricciones dadas.
- El procedimiento de optimización debe poder garantizar que la solución cumple los requisitos para más de un estado de carga.
- Es necesario tener la posibilidad de cambiar el diámetro de las tuberías en determinados puntos de la instalación diseñada.
- Es deseable que el algoritmo proporcione una lista de alternativas en lugar de una única solución.

Según Melia (2012) los Algoritmos Genéticos presentan una serie de ventajas sobre otros métodos en lo que a optimización se refiere, que los hacen más robustos y preferibles para determinadas aplicaciones que son:

- Un Algoritmo Genético es de carácter estocástico, lo que quiere decir que dos ejecuciones distintas pueden dar dos mejores soluciones distintas. Esta característica es útil por el hecho de que en un problema como el de diseño óptimo de una red de agua hay varias soluciones posibles, por lo que es interesante

disponer de un método capaz de dar distintas soluciones en distintas ejecuciones.

- Son algoritmos de búsqueda múltiple, luego en una misma ejecución el algoritmo da varias soluciones. Así, pese a que la aptitud de los individuos de la población final es similar, los individuos suelen ser distintos entre sí. Esto amplía la posibilidad de elección de una solución final, según sea la naturaleza del problema.
- Es uno de los algoritmos que realiza una mayor búsqueda en el subespacio de posibles soluciones. De hecho, se considera que de todos los algoritmos de optimización estocásticos, los Algoritmos Genéticos son uno de los que tiene mayor capacidad de exploración.
- Los Algoritmos Genéticos presentan una convergencia excepcionalmente rápida al principio, bloqueada de forma inmediata. Esto se debe a que el Algoritmos Genéticos es muy bueno descartando espacios de soluciones realmente malos.

Según Soltero (2014) los Algoritmos Evolutivos en Optimización Multiobjetivos (MOEA) tienen la posibilidad de encontrar varias soluciones óptimas de Pareto en una única ejecución. Sin embargo la complejidad de la mayoría de los problemas hace que se deba orientarlos hacia tres objetivos:

- Minimizar la distancia del frente de Pareto obtenido respecto al frente óptimo de Pareto
- Es deseable una distribución adecuada de soluciones (uniforme en la mayoría de los casos)
- Maximizar la extensión del frente no dominado, de modo que para cada objetivo un amplio rango de valores esté cubierto por soluciones no dominadas

Para cumplir estos objetivos hay que resolver dos problemas:

- Guiar la búsqueda hacia el frente óptimo de Pareto mediante los procesos de evaluación y de selección.
- Mantener la diversidad en la población para evitar una convergencia prematura y lograr así un conjunto no dominado bien distribuido y amplio.

2.2.7 Strength Pareto Evolutionary Algorithm:

SPEA, es un algoritmo que utiliza un archivo que contiene las soluciones no dominadas encontradas. En cada generación, se copian los individuos no dominados a ese archivo y se borran de éste las soluciones dominadas. Para cada individuo en el sistema externo, se computa un valor de fuerza o *strength* proporcional al número de las soluciones a las cuales cada individuo domina. En SPEA, el *fitness* de cada miembro de la población actual se computa según las fuerzas de todas las soluciones no dominadas externas que la dominen. (Frutos & Tohmé, 2012).

Utiliza una población externa de soluciones no dominadas obtenidas previamente. Se basa en el concepto de fuerza (*strength*) que tiene un rol similar al rango de dominancia en otros MOEAs. La fuerza de un individuo es proporcional al número de individuos que son dominados por él. Por tanto, la asignación de *fitness* se basa en la medida de “fuerza”. (Soltero, 2014).

MOEA que ordena a la población basándose en la dominancia de Pareto. Usa un archivo con soluciones no dominadas previamente encontradas, se calcula un valor de ranking de individuos similar a MOGA. Almacena en una población externa P' los mejores individuos (no dominados) encontrados en una población general evolutiva P en cada iteración. La asignación del *fitness* (asociado a la probabilidad de ser seleccionado para una

próxima generación) para los individuos de P' y de P se realiza según reglas diferentes, de forma que el mínimo *fitness* asignado en la población externa P' sea mayor que cualquier *fitness* asignado en la población evolutiva P . (Talavera Solalinde, 2005).

SPEA fue introducido por Zitzler & Thiele (1999). Usa un fichero externo conteniendo soluciones no dominadas previamente encontradas. SPEA calcula un valor de intensidad similar al valor de ordenación usado por MOGA.

- ```

- Leer grupo multicast a enrutar
- Inicializar población P
Hacer {
- Evaluar individuos de P
- Marcar soluciones no dominadas de P
- Actualizar el conjunto de soluciones no dominadas P_N
- Calcular la adaptabilidad de los individuos de P y P_N
- Seleccionar individuos del conjunto P_N
- Aplicar los operadores de cruzamiento
} Mientras el criterio de parada no sea alcanzado.

```

**Figura 64. Pseudocódigo del SPEA**

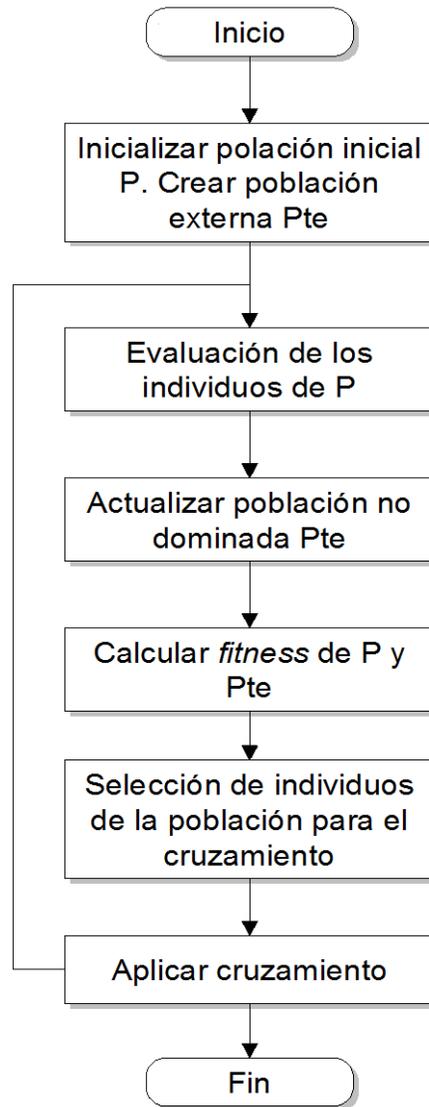
Fuente: Adaptado de Talavera, F. (2005). *Comparación de algoritmos evolutivos multiobjetivos en un ambiente multicast*. (Tesis de pregrado). Paraguay: Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción.

**Tabla 7***Características compartidas y exclusivas*

| <b>CARACTERÍSTICAS</b>                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>COMPARTIDAS</b>                                                                                                                                                                                                                                             | <b>EXCLUSIVAS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Guarda las soluciones no dominadas que ha encontrado hasta el momento en una población externa.</li> <li>- Usa el concepto de dominancia Pareto, para asignar un valor de <i>fitness</i> a los individuos.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Combina las características compartidas en un único algoritmo.</li> <li>- El <i>fitness</i> de un individuo está determinado a partir de las soluciones que se encuentran en la población de individuos no dominados solamente; de este modo, no es relevante que los miembros de la población general se dominen unos a otros.</li> <li>- Todas las soluciones que forman parte del conjunto externo de soluciones no dominadas participan en la selección.</li> </ul> |

Fuente: Adaptado de *Búsqueda óptima de rutas en transmisión multidifusión utilizando SPEA*. Recuperado de: [http://sistemanodalsinaloa.gob.mx/archivoscomprobatorios/\\_18\\_arbitro\\_publicaciones/113.pdf](http://sistemanodalsinaloa.gob.mx/archivoscomprobatorios/_18_arbitro_publicaciones/113.pdf)

La diferencia entre el SPEA y el Algoritmo Genético tradicional radica en la asignación de *fitness* y el mantenimiento de la población externa de dominantes.



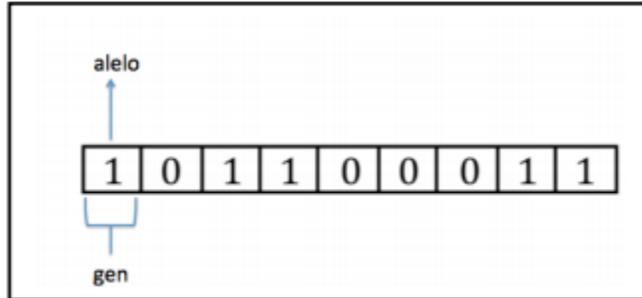
**Figura 81**  
*Diagrama de flujo del SPEA propuesto*

### 2.2.7.1 Fases del Algoritmo Evolutivo (SPEA):

De acuerdo a García, García y Villada (2015) se tiene las fases que son necesarias para implementar el algoritmo evolutivo SPEA.

#### a. Representación de individuos:

Martínez (2013) menciona que se debe encontrar una manera adecuada de representar las variables de tal forma que se tengan cromosomas que representen a cada individuo de la población. Los cromosomas son arreglos de enteros o reales, en donde cada posición es conocida como gen y corresponde a una de las variables de decisión (variables del problema planteado). El valor que puede tomar cada gen se conoce como alelo.

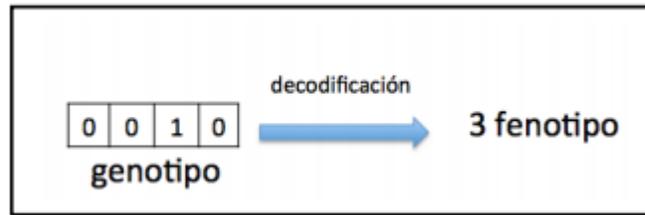


**Figura 89**

*Cromosoma con representación binaria*

Fuente: Martínez, M. (2013). *Un estudio empírico de dos algoritmos evolutivos para clustering multiobjetivo*. (Tesis de maestría). Universidad Veracruzana, Veracruz.

La codificación que representan los cromosomas es el genotipo, mientras que la decodificación de los valores del cromosoma de manera que puedan sustituirse en la función de aptitud es el fenotipo.



**Figura 106**

*Representación del genotipo y fenotipo*

Fuente: Martínez, M. (2013). *Un estudio empírico de dos algoritmos evolutivos para clustering multiobjetivo*. (Tesis de maestría). Universidad Veracruzana, Veracruz.

Por lo tanto, se tienen los dos niveles de representación a nivel fenotípico y genotípico. En caso de usar representación binaria, el cromosoma tendrá en cada alelo los valores de 0 o 1.

**b. Generar población inicial P y crear población externa ( $Pt_e$ ):**

El proceso empieza con la generación de una serie de individuos, donde se procede a realizar 2 etapas:

**Etapas 1:** La población inicial (P) es totalmente aleatoria. Aquí un conjunto aleatorio de soluciones es generado, se escoge generando cadenas al azar, pudiendo contener cada gen uno de los posibles valores del alfabeto con probabilidad uniforme.

**Etapas 2:** Simultáneamente con la carga de la población inicial (P) se crea la población externa ( $Pt_e$ ) que albergará el frente de Pareto hallado dentro del proceso de optimización como un contador para retener las soluciones no dominadas globales previamente encontradas.

**c. Evaluar individuos de P:**

Los individuos son ordenados en base a su aptitud. Esta evaluación de una solución significa calcular el valor de las funciones objetivo y cumplimiento de restricciones. Estos se reproducen atendiendo a una serie de criterios que otorgan mayor probabilidad de reproducirse a los mejores individuos y menos probabilidad de reproducirse a los peores.

**d. Actualizar población no dominada ( $Pt_e$ ):**

Se actualiza de la siguiente manera: Todos los individuos no-dominados de la población se copian al archivo y los individuos dominados o duplicados se eliminan del archivo durante esta actualización del archivo. Entonces una vez definidos los parámetros del algoritmo, población inicial y población externa, se evalúa el dominio de los individuos que componen la población general, agregando los individuos no dominados a la población externa, la cual contendrá el frente de Pareto resultante del proceso de optimización.

**e. Calcular adaptabilidad de los Individuos P y ( $Pt_e$ ):**

La asignación de la aptitud es un proceso de 2 etapas:

**Etapas 1:** La población externa es evaluada de acuerdo a las funciones objetivo donde cada solución  $i \in Pt_e$  es asignado un valor real  $S_i \in [0,1)$ , llamado *strength*,  $S_i$  es proporcional al número  $n_i$

$$S_i = \frac{n_i}{(N+1)} \quad (36)$$

$n_i$ = Número de soluciones dominadas por i en la población P

N: Número de individuos

**Etapla 2:** Cada individuo  $j$  perteneciente a la población externa se le calcula su aptitud dependiendo los valores de fuerza asignados a los individuos del archivo externo que lo dominan. Se suma 1 a ese total para asegurar que los miembros de  $Pt_e$  tengan mejor *strength* que los miembros de Población inicial. (Duarte Flores, 2001)

$$f_j = 1 + \sum_{i,i>j} S_i \quad (37)$$

(García & Mendoza, 2011) Parte esencial del algoritmo es la asignación de aptitud, que se divide en dos partes, dependiendo de la población que se está asignando. Cuanto mayor sea el fitness de una solución, mayor será la probabilidad de que la misma sea seleccionada.

Después, a los individuos de la población y del archivo se les asigna un valor de fitness a cada solución del archivo externo y su fuerza  $S_i$ . El proceso se realiza de modo a lograr que los individuos dominantes y más representativos tengan mejores valores de fitness.

Así de esta manera ambas poblaciones ( $P$  y  $Pt_e$ ) se ejecutan para aplicar los operadores genéticos de selección, cruzamiento manteniéndose constante el tamaño de la Población  $P$ .

#### f. Selección por torneos del conjunto $P$ :

La población y el conjunto externo se combinan y basados en su valor de aptitud *strength* el mejor será seleccionado, es decir, los cromosomas con mejor aptitud (mayor aptitud de adaptación a la función objetivo y restricciones impuestas), tienen mayor probabilidad de ser seleccionados.

Martínez (2013) el objetivo de la selección es la obtención del conjunto de padres que participarán en el proceso de reproducción para generar descendencia. Con esto, se trata de lograr que las generaciones de hijos, superen a las de los padres a lo largo del proceso evolutivo.

Se eligen subgrupos de individuos de la población, y los miembros de cada subgrupo compiten entre ellos. Sólo se elige a un individuo de cada subgrupo para la reproducción. (Mateos Andaluz, 2014).

La idea principal de este método consiste en realizar la selección en base a comparaciones directas entre individuos. Existen dos versiones de selección mediante torneo, la cual representa a los participantes del torneo, donde el ganador (el individuo seleccionado) será el de mejor aptitud:

- Determinística: siempre se elige al más apto.
- Probabilística: se elige con una cierta probabilidad al individuo más apto, y en caso contrario, se elige al menos apto.

De esta manera se elige el más apto dentro de la población de manera determinística.

Valle (2014) Una vez determinado los individuos, se procede a la selección de los padres mediante la metodología de torneo, en la cual los pobladores se dividen en dos pares y cada par es sometido a contienda.

Los vencedores de cada torneo son los únicos facultados para obtener descendencia, el cruzamiento.

**g. Cruza:**

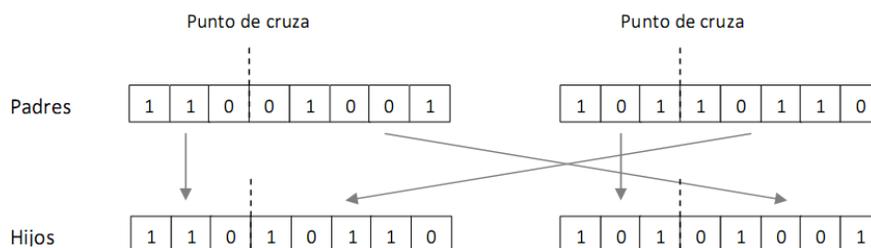
Consiste en tomar dos cadenas de cromosomas o individuos e intercambiar segmentos de ellas, cruza los individuos con el fin de concentrar su búsqueda en la misma zona. Es crear un intercambio de información y esperar poder encontrar mejores caminos en el proceso.

Los individuos de la nueva generación son emparejados produciéndose un intercambio de material genético. Para este caso se implementó un cruce homogéneo, el cual inicialmente traslada al hijo las características comunes entre los padres y luego procede a elegir de uno de ellos los genes faltantes, validando que el gen elegido pertenece al padre de mejores características o valor fitness. Con este procedimiento se logra que los hijos hereden efectivamente las buenas características de los padres y con ello se logre obtener descendientes factibles, cosa que no se logra con otro tipo de cruce.

Las formas comunes de cruzamiento incluyen al cruzamiento de un punto, en el que se establece un punto de intercambio en un lugar aleatorio del genoma de los dos individuos, y uno de los individuos contribuye todo su código anterior a ese punto y el otro individuo contribuye todo su código a partir de ese punto para producir una descendencia. (Mateos Andaluz, 2014)

Los ocho padres resultantes anteriormente, son sometidos al operador genético de cruza para la obtención de cuatro hijos. El proceso para la obtención de un hijo consiste en la combinación de sus genes (diámetros de cada tramo de tubería), el método que se ha empleado es la combinación de un punto aleatorio, donde para cada tramo se obtiene un número al azar que determina si se heredará el diámetro del

Padre Nº 01 o el Padre Nº 02. El proceso del operador genético se repite para la obtención de los cuatro hijos.



**Figura 123**

*Representación de cruzamiento en un punto*

Fuente: Moujahid, A., Inza, I., & Larrañaga, P. (s.f.). Algoritmos Genéticos. Universidad del País Vasco. Obtenido de <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/t2s.pdf>

### Solución Final:

Finalmente se valida como criterio de convergencia cuando se alcance la generación máxima. Si se ha llegado al límite generacional se guarda el frente de Pareto obtenido en la última generación. Si esta condición no se ha cumplido se repite el proceso desde el paso donde se agregaron los individuos no dominados a la población externa, eliminando los que son cubiertos por otros individuos de la misma población, entendiendo por cubiertos aquellos que no mejoran ninguna de las funciones evaluadas respecto al individuo con el que se le compare. Luego se continúa con el proceso generacional ya descrito, repitiéndose hasta cumplir con la condición de convergencia.

## **2.2.8 Diseño Óptimo de Redes de Agua:**

### **2.2.8.1 Restricciones hidráulicas:**

Según Villalba & Saldarriaga (2005) se tiene como leyes y restricciones hidráulicas a cumplir:

- Ley de Conservación de Masa en cada nodo
- Ley de Conservación de Energía en cada circuito
- La presión en cada nodo debe ser mayor al valor mínimo

### **2.2.8.2 Restricciones comerciales:**

Según Villalba & Saldarriaga (2005) los diámetros solo pueden tomar valores discretos dados por la disponibilidad de diámetros de cada fabricante de tuberías.

### **2.2.8.3 Restricciones adicionales:**

Según Villalba & Saldarriaga (2005) el método de solución debe ser capaz de encontrar una buena solución para una amplia variedad de topologías, demandas en los nodos, topografías. Debe ser capaz de encontrar una “buena” solución en un tiempo “razonable” según el tamaño de la red.

### **2.2.8.4 Condiciones para el diseño:**

La red debe prestar un servicio eficiente y continuo, por lo cual su diseño debe atender a la condición más desfavorable. Al estudiar las variaciones del consumo, determinamos las horas del día cuando el consumo de agua de la población llega a su máximo, lo cual permite definir el Consumo Máximo Horario. Esta condición debe ser satisfecha por la red de distribución a fin de no provocar deficiencias en el sistema.

Agüero (1997) Para el diseño de la red de distribución es necesario definir la ubicación tentativa del reservorio de almacenamiento con la finalidad de suministrar el agua en cantidades y presiones adecuadas a todos los puntos de la red. Las cantidades de agua se han definido en base a las dotaciones y en el diseño se contempla las condiciones más desfavorables, para lo cual se analizaron las variaciones de consumo considerando en el diseño de la red el consumo máximo horario ( $Q_{rh}$ ).

Las presiones deben satisfacer las condiciones máximas y mínimas para las diferentes situaciones de análisis que puedan ocurrir. En tal sentido, la red debe mantener presiones de servicio mínimas, que sean capaces de llevar agua al interior de las viviendas (parte alta del pueblo). También en la red deben existir limitaciones de presiones máximas tales que no provoquen danos en las conexiones y que permitan el servicio sin mayores inconvenientes de uso (parte baja).

#### **2.2.8.5 Población:**

De acuerdo a la norma OS.050 Redes de distribución de agua para consumo humano se deberá determinar la población y la densidad poblacional para el periodo de diseño adoptado. La determinación de la población final para el periodo de diseño adoptado se realizará a partir de proyecciones, utilizando la tasa de crecimiento distrital y/o provincial establecida por el organismo oficial que regula estos indicadores.

De acuerdo a la norma OS.100 Consideraciones Básica de diseño de Infraestructura Sanitaria la población futura para el período de diseño considerado deberá calcularse Tratándose de asentamientos humanos existentes, el crecimiento deberá estar

acorde con el plan regulador y los programas de desarrollo regional si los hubiere; en caso de no existir éstos, se deberá tener en cuenta las características de la ciudad, los factores históricos, socioeconómico, su tendencia de desarrollo y otros que se pudieren obtener.

#### **2.2.8.6 Variaciones de consumo:**

De acuerdo a la norma OS.100 Consideraciones Básica de diseño de Infraestructura Sanitaria En los abastecimientos por conexiones domiciliarias, los coeficientes de las variaciones de consumo, referidos al promedio diario anual de la demanda, deberán ser fijados en base al análisis de información estadística comprobada.

De lo contrario se podrán considerar los siguientes coeficientes:

- Máximo anual de la demanda diaria; 1,3
- Máximo anual de la demanda horaria: 1,8 a 2,5

#### **2.2.8.7 Dotación de agua:**

De acuerdo a la norma técnica OS.100: Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria si se comprobara la no existencia de estudios de consumo y no se justifica su ejecución, se considerará por lo menos para sistemas con conexiones domiciliarias una dotación de 180 l/hab/d, en clima frío y de 220 l/hab/d en clima templado y cálido.

#### **2.2.8.8 Caudal de diseño:**

De acuerdo a la norma OS.050 Redes de distribución de agua para consumo humano la red de distribución se calculará con la cifra que resulte mayor al comparar el gasto máximo horario con la suma del gasto máximo diario más el gasto contra incendios para el caso de habilitaciones en que se considere demanda contra incendio.

#### **2.2.8.9 Análisis hidráulico:**

De acuerdo a la norma OS.050 Redes de distribución de agua para consumo humano las redes de distribución se proyectarán, en principio y siempre que sea posible en circuito cerrado formando malla. Su dimensionamiento se realizará en base a cálculos hidráulicos que aseguren caudal y presión adecuada en cualquier punto de la red debiendo garantizar en lo posible una mesa de presiones paralela al terreno.

Para el análisis hidráulico del sistema de distribución, podrá utilizarse el método de Hardy Cross o cualquier otro equivalente.

Para el cálculo hidráulico de las tuberías, se utilizarán fórmulas racionales. En caso de aplicarse la fórmula de Hazen y Williams, se utilizarán los coeficientes de fricción que se establecen en la tabla. Para el caso de tuberías no contempladas, se deberá justificar técnicamente el valor utilizado del coeficiente de fricción.

#### **2.2.8.10 Diámetro mínimo:**

De acuerdo a la norma OS.050 Redes de distribución de agua para consumo humano el diámetro mínimo de las tuberías

principales será de 75 mm para uso de vivienda y de 150 mm de diámetro para uso industrial.

En casos excepcionales, debidamente fundamentados, podrá aceptarse tramos de tuberías de 50 mm de diámetro, con una longitud máxima de 100 m si son alimentados por un solo extremo o de 200 m si son alimentados por los dos extremos, siempre que la tubería de alimentación sea de diámetro mayor y dichos tramos se localicen en los límites inferiores de las zonas de presión.

El valor mínimo del diámetro efectivo en un ramal distribuidor de agua será el determinado por el cálculo hidráulico. Cuando la fuente de abastecimiento es agua subterránea, se adoptará como diámetro nominal mínimo de 38 mm o su equivalente. En los casos de abastecimiento por piletas el diámetro mínimo será de 25 mm. El diámetro mínimo de la conexión predial será de 12,50 mm.

#### **2.2.8.11 Velocidades:**

De acuerdo a la norma OS.050 Redes de distribución de agua para consumo humano:

- a. La velocidad máxima en la red de distribución será de 3 m/s.
- b. En casos justificados se aceptará una velocidad máxima de 5m/s.

Agüero Pittman (1997) Si se tiene velocidades menores que la mínima, se presentaran fenómenos de sedimentación; y con velocidades muy altas, se producirá el deterioro de los accesorios y tuberías.

### **2.2.8.12 Presiones:**

De acuerdo a la norma OS.050 Redes de distribución de agua para consumo humano la Presión estática no será mayor de 50m en cualquier punto de la red. En condiciones de demanda máxima horaria, la presión dinámica no será menor de 10m.

## **2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS:**

### **2.3.1 Algoritmos genéticos:**

Programas que evolucionan, simulando en cierto grado la selección natural y alcanzan a resolver problemas complejos, que ni siquiera quienes los crearon comprenden plenamente. (John Holland, 1960). (Citado en Peña, 2002).

Son una serie de pasos que describe el proceso que se debe seguir para dar solución a un problema específico, son procesos que pueden utilizar para problemas de búsqueda donde el número de pasos para determinar la solución es desconocido. Un algoritmo genético es un método de búsqueda que imita la teoría de la evolución biológica de Darwin para la resolución de problemas. Para ello, se parte de una población inicial de la cual se seleccionan los individuos más capacitados para luego reproducirlos y mutarlos para finalmente obtener la siguiente generación de individuos que estarán más adaptados que la anterior generación según Parra (2014) (citado en Arranz de la Peña, 2016).

Según Koza (1992) (citado en Castañeda, Garmendia, & Santos) es un algoritmo matemático altamente paralelo que transforma un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo, usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más

apto, y tras haberse presentado de forma natural una serie de operaciones genéticas de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas, y se les asocia con una cierta función matemática que refleja su aptitud.

(Montesinos, García, & Muñoz, 1997) define a el Algoritmo Genético como un procedimiento de búsqueda del óptimo de una función (máximo o mínimo) basado en la mecánica natural de selección y en la genética, que permite la supervivencia del individuo mejor adaptado, mediante el empleo de operadores genéticos simulados (selección, cruce y mutación).

### **2.3.2 Optimización multiobjetivo:**

Encontrar un vector de variables de decisión que satisfagan restricciones y optimicen una función vectorial cuyos elementos representan funciones objetivo en donde no se busca una solución óptima, sino un conjunto de soluciones posibles de calidad equivalente.

El espacio de búsqueda se convierte en parcialmente ordenado, donde existe un conjunto de soluciones *trade-offs* óptimas entre los objetivos conflictivos, que puedan ser aceptadas por el tomador de decisiones. (Túpac Valdivia, 2011).

El problema de encontrar un vector de variables de decisión que satisfaga las restricciones y que optimice una función vectorial cuyos elementos representen las funciones objetivo. Estas funciones forman una descripción matemática de criterios de desempeño que están usualmente en conflicto entre sí. Por lo tanto, el término optimizar significa encontrar aquella solución que

daría un valor aceptable al diseñador en todas las funciones objetivo. (Martínez, 2013).

El término “optimización” se refiere a la búsqueda de una solución para todas las funciones objetivo. La optimización multiobjetivo no se restringe a la búsqueda de una única solución, sino de un conjunto de soluciones llamadas soluciones no-dominadas. Cada solución de este conjunto es un óptimo de Pareto y al representarlas en el espacio de los valores de las funciones objetivo, conforman lo que se conoce como frente de Pareto. (Nebro, Alba, & Luna).

Según Osyczka (1985) (citado en Peña, 2002) la optimización con objetivos múltiples problema de encontrar un vector de variables de decisión, sujeto a ciertas restricciones, que optimiza una función vectorial cuyos elementos representan las funciones objetivo (...), así, el término “optimizar” significa encontrar una solución que de valores aceptables para el diseñador en todas las funciones objetivo.

### **2.3.3 Redes de distribución:**

Conjunto de instalaciones que la empresa de abastecimiento tiene para transportar desde el punto o puntos de captación y tratamiento hasta hacer llegar el suministro al cliente en unas condiciones que satisfagan sus necesidades. Este grado de satisfacción tiene un elevadísimo número de componentes, unos medibles y otros no, y entre los que podemos destacar la calidad, el caudal, la presión, la continuidad del suministro y el precio. Por tanto, debemos crear es una red de distribución que altere lo menos posible las características de los componentes, minimizando la variación de satisfacción de las necesidades de los clientes. (Molia, 1987).

#### **2.3.4 Confiabilidad hidráulica:**

“La fortaleza de una red para mantener un nivel de servicio adecuado (en términos de disponibilidad de caudal y presión) frente a eventos adversos”.

Tung, (1985) (citado en Torres Martínez, 2011) define la confiabilidad de los sistemas de distribución de agua como la probabilidad de que el flujo alcance a los puntos de demanda en la red.

Para Xu et al. (1999) (citado en Torres Martínez, 2011) la confiabilidad de la red, es medida por su capacidad de asegurar la demanda de los nudos a una presión mínima requerida.

Bertin (1994) (citado en Torres Martínez, 2011) describe la confiabilidad de la red con la ayuda de un índice, que expresa el impacto de un fallo sobre la satisfacción de la demanda a nivel de los nudos de la red.

#### **2.3.5 Costo:**

Es el costo de la red de distribución de agua, para su determinación se considera el valor comercial de las tuberías más su costo de instalación.

## **2.4 HIPÓTESIS:**

### **2.4.1 Hipótesis general:**

La aplicación del Algoritmo Genético Multiobjetivo Genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) es efectivo en el diseño óptimo de redes de distribución de agua.

### **2.4.2 Hipótesis específicas:**

- a. La aplicación del Algoritmo Genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) asegura una mejor distribución entre las soluciones y es fácil de calcular.
- b. El Algoritmo Genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) resulta ser una solución de menor costo que cumple con las restricciones hidráulicas y con alta confiabilidad.

## **2.5 VARIABLES:**

### **2.5.1 Definición conceptual de la variable:**

- a. Variable Independiente: Algoritmo Genético multiobjetivo Strength Pareto Evolutionary Algorithm:

Son una serie de pasos que describe el proceso que se debe seguir para dar solución a un problema específico (...), es un método de búsqueda que imita la teoría de la evolución biológica de Darwin para la resolución de problemas según Parra (2014) (citado en Arranz de la Peña, 2016).

- b. Variable Dependiente: Efectividad en el Diseño de Redes de Agua Potable:

Molia (1987) Conjunto de instalaciones que la empresa de abastecimiento tiene para transportar desde el punto o puntos de captación y tratamiento hasta hacer llegar el suministro al cliente en unas condiciones que satisfagan sus necesidades. Saldarriaga (2007) Con el fin de llegar a un diseño óptimo de una red (...), se debe utilizar una función objetivo.

### **2.5.2 Definición operacional de la variable:**

- a. Variable Independiente: Algoritmo Genético multiobjetivo Strength Pareto Evolutionary Algorithm:

Procedimiento de búsqueda de soluciones no dominadas que representan el óptimo diseño de redes de agua potable que satisface las restricciones y funciones objetivo: Mínimo costo y máxima confiabilidad mediante el empleo de operadores genéticos simulados por el principio de Darwin.

- b. Variable Dependiente: Efectividad en el Diseño de Redes de Agua Potable:

Diseño que cumple con los requerimientos de desempeño en la red como conservación de masa en los nudos, conservación de la energía en los circuitos, presión mínima en los nudos de consumo, diámetros comerciales adecuados en las tuberías y cumple con los requerimientos económicos.

### 2.5.3 Matriz de Consistencia:

**Tabla 8**

*Matriz de consistencia*

| PROBLEMA PRINCIPAL                                                                                                                                                    | OBJETIVO GENERAL                                                                                                                                                       | HIPÓTESIS GENERAL                                                                                                                                                           | VARIABLE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | METODOLOGÍA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ¿Cuál es la efectividad de la aplicación del algoritmo genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) en el diseño de redes de agua potable en Viñani- Tacna? | Demostrar la efectividad de la aplicación del algoritmo genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) en el diseño de redes de agua potable en Viñani- Tacna. | La aplicación del Algoritmo Genético Multiobjetivo Genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) es efectivo en el diseño óptimo de redes de distribución de agua. | <p><b>Variable independiente:</b></p> <p>Algoritmo Genético multiobjetivo</p> <p>X1: Inicializar Población inicial y crear población externa</p> <p>X2: Evaluación de los individuos P</p> <p>X3: Actualizar Población no dominada</p> <p>X4: Calcular <i>fitness</i></p> <p>X5: Selección de individuos</p> <p>X6: Aplicar cruzamiento</p> | <p>1. Tipo de investigación: Clásica cuantitativa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Investigación aplicada.</li> </ul> <p>2. Diseño de investigación: Experimental (Hernández R.).</p> <p>3. Nivel de investigación Descriptiva y Exploratoria (Hernández R.).</p> <p>4. Población y Muestra La Red de distribución de agua potable del Distrito de Gregorio Albarracín Lanchipa</p> |

| <p style="text-align: center;"><b>PROBLEMAS SECUNDARIOS</b></p>                                                                                                                                                                                        | <p style="text-align: center;"><b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b></p>                                                                                                                                       | <p style="text-align: center;"><b>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                        | <p>5. Técnica: Aplicación del Algoritmo SPEA</p> <p>6. Instrumentos :<br/>Matlab R2012</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>¿Cómo es la aplicación del Algoritmo Genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)?</p> <p>¿Cuán efectiva es la aplicación del algoritmo genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) en la solución del problema propuesto?</p> | <p>Determinar la aplicación del Algoritmo Genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA).</p> <p>Evaluar la efectividad Algoritmo Genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA).</p> | <p>La aplicación del Algoritmo Genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) asegura una mejor distribución entre las soluciones y es fácil de calcular.</p> <p>El Algoritmo Genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) resulta ser una solución de menor costo que cumple con las restricciones hidráulicas y con alta confiabilidad.</p> | <p><b>Variable Dependiente:</b></p> <p>Efectividad en el Diseño de Redes de Agua Potable</p> <p>Y1: Confiabilidad</p> <p>Y2: Costo</p> |                                                                                            |

### **3 METODOLOGÍA**

---

#### **3.1 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN:**

El tipo de investigación es aplicada, ya que es la que soluciona problemas prácticos busca nuevos conocimientos para poder ser aplicados en el campo de la ingeniería civil. Esta investigación tiene como fin demostrar la efectividad de la aplicación del algoritmo genético Strength Pareto Evolutionary Algorithm en el diseño de redes de agua potable Caso: Sector Viñani- Tacna.

De acuerdo a su nivel de investigación es descriptiva y exploratoria (Hernández R.).

#### **3.2 DESCRIPCIÓN DEL AMBITO DE ESTUDIO:**

El ámbito de la investigación abarca a la Redes de agua potable teniendo como unidad de estudio a la red potable del Sector Viñani – Tacna.

#### **3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA:**

##### **3.3.1 Población:**

Se tienen a toda la Red de distribución de agua potable del Distrito de Gregorio Albarracín Lanchipa.

#### **3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS**

##### **3.4.1 Técnicas:**

Aplicación del Algoritmo genético multiobjetivo SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) y MAGMO (Micro Algoritmo Genético Multiobjetivo) para su comparación respectiva.

### **3.4.2 Instrumentos:**

Uso de Matlab para evaluar el diseño óptimo de las redes de distribución de agua.

## **3.5 PLAN DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS**

Los datos se procesarán con el Matlab R2012 para evaluar el diseño óptimo de las redes de distribución de agua. Se tiene la red del Sector Viñani de una sola fuente, con 20 circuitos, 91 nodos, un reservorio y 139 tuberías y no se consideran pérdidas menores en las tuberías.

La presentación de la información a través de tablas luego del procesamiento de la misma, por lo tanto, se hará una presentación escrita tabular para la discusión los procedimientos lógicos de la deducción e inducción al comparar con los resultados de la red sin optimización y la red optimizada con el Micro Algoritmo Genético Multiobjetivo.

La evaluación del desempeño se realizará con la metodología de optimización denominada Strength Pareto Evolutionary Algorithm.

## 4 RESULTADOS

---

### 4.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA RED

La distribución plantea una red de agua potable constituida de 139 tuberías unidas por 91 nodos, formando 20 circuitos de tuberías mediante las cuales se abastece de agua potable a las viviendas y servicios del Sector Viñani.

Las características físicas del líquido a ser transportado por las tuberías necesarios para el diseño de la red de agua potable son:

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| Material               | : PVC       |
| Rugosidad (mm)         | : 0.0015    |
| Viscosidad ( $m^2/s$ ) | : 1.14 E-06 |

### 4.2 RESULTADOS OBTENIDO SIN OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE AGUA POTABLE:

La red plantada se diseñó según Valle (2014) en el programa Watergems para los siguientes diámetros comerciales y así calcular las presiones en los nudos, velocidades y caudales en los tramos para una determinada configuración de los diámetros de la red de agua potable.

**Tabla 9**

*Diámetros, caudal y velocidad en las tuberías de la red*

| Tubería | Diámetro interior (mm) | Diámetro (mm) | Caudal (L/s) | Velocidad (m/s) | Longitud (m) |
|---------|------------------------|---------------|--------------|-----------------|--------------|
| T-1     | 329.20                 | PVC           | 350          | 1.92            | 353.98       |
| T-2     | 329.20                 | PVC           | 350          | 1.42            | 426.62       |
| T-3     | 292.20                 | PVC           | 315          | 1.22            | 308.48       |
| T-4     | 292.20                 | PVC           | 315          | 0.66            | 487.19       |
| T-5     | 292.20                 | PVC           | 315          | 0.21            | 563.69       |
| T-6     | 148.40                 | PVC           | 160          | 1.23            | 19.64        |

| <b>Tubería</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (L/s)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> | <b>Longitud (m)</b> |
|----------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| T-7            | 102                           | 110                  | 13.13               | 1.61                   | 208.61              |
| T-8            | 102                           | 110                  | 12.67               | 1.55                   | 211.23              |
| T-9            | 102                           | 110                  | -1.6                | 0.2                    | 524.28              |
| T-10           | 102                           | 110                  | 10.95               | 1.34                   | 370.91              |
| T-11           | 185.40                        | 200                  | 42.05               | 1.56                   | 21.81               |
| T-12           | 102.00                        | 110                  | -4.57               | 0.56                   | 24.81               |
| T-13           | 148.40                        | 160                  | 30.37               | 1.76                   | 374.33              |
| T-14           | 102                           | 110                  | 7.59                | 0.93                   | 25.10               |
| T-15           | 102                           | 110                  | 3.73                | 0.46                   | 397.19              |
| T-16           | 102                           | 110                  | 9.42                | 1.15                   | 429.96              |
| T-17           | 148.40                        | 160                  | -5.5                | 0.32                   | 25.50               |
| T-18           | 185.40                        | 200                  | 39.1                | 1.45                   | 25.85               |
| T-19           | 148.40                        | 160                  | 25.65               | 1.48                   | 433.75              |
| T-20           | 102                           | 110                  | 3.2                 | 0.39                   | 24.33               |
| T-21           | 102                           | 110                  | 6.04                | 0.74                   | 282.69              |
| T-22           | 102                           | 110                  | 6.32                | 0.77                   | 282.17              |
| T-23           | 102                           | 110                  | 9.95                | 1.22                   | 414.12              |
| T-24           | 102                           | 110                  | -5.34               | 0.65                   | 89.94               |
| T-25           | 102                           | 110                  | 4.15                | 0.51                   | 162.74              |
| T-26           | 148.40                        | 160                  | 10.44               | 0.6                    | 27.21               |
| T-27           | 148.40                        | 160                  | 37.48               | 2.17                   | 25.51               |
| T-28           | 148.40                        | 160                  | 27.58               | 1.59                   | 412.55              |
| T-29           | 102                           | 110                  | -5.44               | 0.67                   | 418.11              |
| T-30           | 102                           | 110                  | 2.2                 | 0.27                   | 487.13              |
| T-31           | 148.40                        | 160                  | 30.16               | 1.74                   | 27.61               |
| T-32           | 102                           | 110                  | 7.52                | 0.92                   | 416.73              |
| T-33           | 148.40                        | 160                  | 22.51               | 1.3                    | 25.07               |
| T-34           | 102                           | 110                  | 8.33                | 1.02                   | 417.16              |
| T-35           | 102                           | 110                  | 5.96                | 0.73                   | 357.02              |
| T-36           | 102                           | 110                  | 12.21               | 1.49                   | 374.81              |
| T-37           | 102                           | 110                  | -4.38               | 0.54                   | 417.20              |

| <b>Tubería</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (L/s)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> | <b>Longitud (m)</b> |
|----------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| T-38           | 102                           | 110                  | 12.07               | 1.48                   | 24.71               |
| T-39           | 102                           | 110                  | 9.49                | 1.16                   | 452.56              |
| T-40           | 102                           | 110                  | -1.86               | 0.23                   | 541.75              |
| T-41           | 148.40                        | 160                  | -0.6                | 0.03                   | 534.02              |
| T-42           | 102                           | 110                  | 9.31                | 1.14                   | 437.71              |
| T-43           | 148.40                        | 160                  | -12.23              | 0.71                   | 24.38               |
| T-44           | 148.40                        | 160                  | 32.62               | 1.89                   | 23.82               |
| T-45           | 102                           | 110                  | 9.4                 | 1.15                   | 437.64              |
| T-46           | 102                           | 110                  | 1.19                | 0.15                   | 24.00               |
| T-47           | 102                           | 110                  | 7.2                 | 0.88                   | 398.23              |
| T-48           | 148.40                        | 160                  | 8.68                | 0.5                    | 398.03              |
| T-49           | 148.40                        | 160                  | 3.46                | 0.2                    | 25.76               |
| T-50           | 102                           | 110                  | 8.24                | 1.01                   | 22.63               |
| T-51           | 102                           | 110                  | 11.46               | 1.4                    | 438.99              |
| T-52           | 102                           | 110                  | 16.37               | 2                      | 23.57               |
| T-53           | 148.40                        | 160                  | 20.96               | 1.21                   | 21.50               |
| T-54           | 102                           | 110                  | 12.09               | 1.48                   | 439.01              |
| T-55           | 102                           | 110                  | 5.42                | 0.66                   | 364.18              |
| T-56           | 148.40                        | 160                  | 10.42               | 0.6                    | 285.88              |
| T-57           | 102                           | 110                  | 9.8                 | 1.2                    | 117.34              |
| T-58           | 102                           | 110                  | 12.89               | 1.58                   | 364.40              |
| T-59           | 148.40                        | 160                  | 40.09               | 2.32                   | 161.98              |
| T-60           | 148.40                        | 160                  | 24.93               | 1.44                   | 393.05              |
| T-61           | 102                           | 110                  | 16.41               | 2.01                   | 24.00               |
| T-62           | 102                           | 110                  | 8.12                | 0.99                   | 23.93               |
| T-63           | 102                           | 110                  | 1.82                | 0.22                   | 813.04              |
| T-64           | 102                           | 110                  | 2.56                | 0.31                   | 532.68              |
| T-65           | 102                           | 110                  | 3.34                | 0.41                   | 24.10               |
| T-66           | 102                           | 110                  | 2.06                | 0.25                   | 598.69              |
| T-67           | 102                           | 110                  | 21.14               | 2.59                   | 24.10               |
| T-68           | 102                           | 110                  | 14.67               | 1.79                   | 438.00              |

| <b>Tubería</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (L/s)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> | <b>Longitud (m)</b> |
|----------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| T-69           | 102                           | 110                  | -3.6                | 0.44                   | 363.83              |
| T-70           | 102                           | 110                  | 4.49                | 0.55                   | 364.07              |
| T-71           | 102                           | 110                  | 12.55               | 1.54                   | 483.00              |
| T-72           | 148.40                        | 160                  | 6.44                | 0.37                   | 20.00               |
| T-73           | 102                           | 110                  | 12.53               | 1.53                   | 483.00              |
| T-74           | 102                           | 110                  | -1.37               | 0.17                   | 24.00               |
| T-75           | 102                           | 110                  | 8.34                | 1.02                   | 389.97              |
| T-76           | 102                           | 110                  | 12.08               | 1.48                   | 389.97              |
| T-77           | 102                           | 110                  | 9.71                | 1.19                   | 483.00              |
| T-78           | 102                           | 110                  | 3.63                | 0.44                   | 363.61              |
| T-79           | 102                           | 110                  | 14.98               | 1.83                   | 24.11               |
| T-80           | 102                           | 110                  | 7.05                | 0.86                   | 407.26              |
| T-81           | 102                           | 110                  | 8.27                | 1.01                   | 365.94              |
| T-82           | 102                           | 110                  | 5.14                | 0.63                   | 24.00               |
| T-83           | 102                           | 110                  | 3.8                 | 0.46                   | 415.00              |
| T-84           | 102                           | 110                  | 8.83                | 1.08                   | 24.00               |
| T-85           | 102                           | 110                  | 3.61                | 0.44                   | 415.00              |
| T-86           | 102                           | 110                  | 7.07                | 0.87                   | 24.00               |
| T-87           | 102                           | 110                  | 2.34                | 0.29                   | 389.97              |
| T-88           | 102                           | 110                  | 2.56                | 0.31                   | 389.97              |
| T-89           | 102                           | 110                  | 11.97               | 1.46                   | 24.00               |
| T-90           | 102                           | 110                  | 9.26                | 1.13                   | 24.48               |
| T-91           | 102                           | 110                  | 0.1                 | 0.01                   | 338.14              |
| T-92           | 102                           | 110                  | 4.66                | 0.57                   | 20.48               |
| T-93           | 102                           | 110                  | 2.72                | 0.33                   | 411.98              |
| T-94           | 102                           | 110                  | 1.63                | 0.2                    | 25.89               |
| T-95           | 102                           | 110                  | 0.8                 | 0.1                    | 324.69              |
| T-96           | 102                           | 110                  | 5.88                | 0.72                   | 24.00               |
| T-97           | 102                           | 110                  | 2.71                | 0.33                   | 154.45              |
| T-98           | 102                           | 110                  | 1.51                | 0.19                   | 455.37              |
| T-99           | 102                           | 110                  | 2.07                | 0.25                   | 24.00               |

| <b>Tubería</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (L/s)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> | <b>Longitud (m)</b> |
|----------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| T-100          | 102                           | 110                  | 1.28                | 0.16                   | 362.78              |
| T-101          | 102                           | 110                  | 1.05                | 0.13                   | 26.09               |
| T-102          | 102                           | 110                  | 1.53                | 0.19                   | 24.53               |
| T-103          | 102                           | 110                  | 1.95                | 0.24                   | 23.83               |
| T-104          | 102                           | 110                  | 1.22                | 0.15                   | 375.23              |
| T-105          | 102                           | 110                  | 1.01                | 0.12                   | 379.94              |
| T-106          | 102                           | 110                  | 0.8                 | 0.1                    | 323.91              |
| T-107          | 102                           | 110                  | 1.95                | 0.24                   | 23.90               |
| T-108          | 102                           | 110                  | 1.22                | 0.15                   | 498.71              |
| T-109          | 102                           | 110                  | 14.62               | 1.79                   | 20.76               |
| T-110          | 102                           | 110                  | 12.79               | 1.57                   | 545.77              |
| T-111          | 102                           | 110                  | -0.26               | 0.03                   | 273.70              |
| T-112          | 102                           | 110                  | 0.78                | 0.09                   | 98.34               |
| T-113          | 102                           | 110                  | 14.01               | 1.72                   | 462.12              |
| T-114          | 102                           | 110                  | 11.73               | 1.44                   | 24.00               |
| T-115          | 102                           | 110                  | 11.59               | 1.42                   | 24.00               |
| T-116          | 102                           | 110                  | -0.26               | 0.03                   | 273.70              |
| T-117          | 102                           | 110                  | 8.71                | 1.07                   | 398.34              |
| T-118          | 102                           | 110                  | 10.37               | 1.27                   | 397.71              |
| T-119          | 102                           | 110                  | -6.14               | 0.75                   | 273.70              |
| T-120          | 102                           | 110                  | 14.85               | 1.82                   | 27.04               |
| T-121          | 102                           | 110                  | 6.66                | 0.82                   | 398.14              |
| T-122          | 102                           | 110                  | 3.47                | 0.42                   | 398.14              |
| T-123          | 102                           | 110                  | -0.24               | 0.03                   | 273.70              |
| T-124          | 102                           | 110                  | 1.03                | 0.13                   | 224.45              |
| T-125          | 102                           | 110                  | -3.53               | 0.43                   | 209.02              |
| T-126          | 102                           | 110                  | 5.56                | 0.68                   | 24.00               |
| T-127          | 102                           | 110                  | 2.54                | 0.31                   | 376.94              |
| T-128          | 102                           | 110                  | 0.32                | 0.04                   | 498.25              |
| T-129          | 102                           | 110                  | 4.38                | 0.54                   | 24.92               |
| T-130          | 102                           | 110                  | 2.48                | 0.3                    | 377.57              |

| <b>Tubería</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (L/s)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> | <b>Longitud (m)</b> |
|----------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| T-131          | 102                           | 110                  | -0.16               | 0.02                   | 498.25              |
| T-132          | 102                           | 110                  | 14.29               | 1.75                   | 327.74              |
| T-133          | 102                           | 110                  | 7.73                | 0.95                   | 328.64              |
| T-134          | 102                           | 110                  | 5.56                | 0.68                   | 400.84              |
| T-135          | 102                           | 110                  | 6.12                | 0.75                   | 363.83              |
| T-136          | 102                           | 110                  | 3.45                | 0.42                   | 415.00              |
| T-137          | 102                           | 110                  | 2.77                | 0.34                   | 411.77              |
| T-138          | 102                           | 110                  | -1.97               | 0.24                   | 389.97              |
| T-139          | 102                           | 110                  | 6.65                | 0.81                   | 273.70              |

Fuente: 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 Pregrado de la UNJBG). Tacna, Perú.

**Tabla 10***Cotas hidráulicas y presiones en los nodos de la red*

| <b>Nodos</b> | <b>Cotas (m)</b> | <b>Caudal (L/s)</b> | <b>Altura Piezométrica (mca)</b> | <b>Presión (mca)</b> |
|--------------|------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|
| N-2          | 468.35           | 0.00                | 481.298                          | 12.948               |
| N-3          | 468.73           | 0.00                | 479.471                          | 10.741               |
| N-4          | 466.74           | 0.00                | 478.317                          | 11.577               |
| N-5          | 462.00           | 0.00                | 477.718                          | 15.718               |
| N-6          | 460.24           | 0.00                | 477.627                          | 17.387               |
| N-7          | 467.27           | 0.46                | 483.742                          | 16.472               |
| N-8          | 463.12           | 0.46                | 479.228                          | 16.108               |
| N-9          | 457.76           | 2.20                | 474.941                          | 17.181               |
| N-10         | 459.04           | 1.76                | 475.205                          | 16.165               |
| N-11         | 469.00           | 1.36                | 480.998                          | 11.998               |
| N-12         | 469.00           | 1.55                | 481.08                           | 12.08                |
| N-13         | 459.05           | 1.61                | 475.001                          | 15.951               |
| N-14         | 458.43           | 1.71                | 474.086                          | 15.656               |
| N-15         | 469.08           | 1.64                | 479.224                          | 10.144               |
| N-16         | 469.00           | 1.62                | 479.243                          | 10.243               |
| N-17         | 458.11           | 1.86                | 474.043                          | 15.933               |
| N-18         | 456.23           | 0.70                | 472.513                          | 16.283               |
| N-19         | 457.53           | 0.70                | 472.122                          | 14.592               |
| N-20         | 466.77           | 1.57                | 477.599                          | 10.829               |
| N-21         | 466.50           | 2.50                | 477.708                          | 11.208               |
| N-22         | 457.32           | 3.36                | 472.057                          | 14.737               |
| N-23         | 453.80           | 2.08                | 473.94                           | 20.14                |
| N-24         | 462.20           | 2.34                | 477.278                          | 15.078               |
| N-25         | 461.91           | 1.97                | 477.044                          | 15.134               |
| N-26         | 453.55           | 2.37                | 473.102                          | 19.552               |
| N-27         | 448.57           | 1.58                | 471.257                          | 22.687               |
| N-28         | 456.01           | 1.97                | 470.018                          | 14.008               |
| N-29         | 456.94           | 3.18                | 474.483                          | 17.543               |
| N-30         | 413.80           | 2.70                | 448.766                          | 34.966               |
| N-31         | 445.81           | 3.23                | 469.317                          | 23.507               |

| <b>Nodos</b> | <b>Cotas (m)</b> | <b>Caudal (L/s)</b> | <b>Altura Piezométrica (mca)</b> | <b>Presión (mca)</b> |
|--------------|------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|
| N-32         | 446.97           | 3.70                | 469.268                          | 22.298               |
| N-33         | 458.56           | 2.32                | 474.486                          | 15.926               |
| N-34         | 458.45           | 2.32                | 474.561                          | 16.111               |
| N-35         | 446.78           | 3.38                | 469.262                          | 22.482               |
| N-36         | 446.52           | 2.30                | 466.377                          | 19.857               |
| N-37         | 457.60           | 1.99                | 473.873                          | 16.273               |
| N-38         | 457.64           | 1.90                | 473.864                          | 16.224               |
| N-39         | 446.62           | 1.90                | 465.619                          | 18.999               |
| N-40         | 444.00           | 1.90                | 463.972                          | 19.972               |
| N-41         | 452.81           | 1.07                | 471.669                          | 18.859               |
| N-42         | 455.47           | 0.62                | 473.183                          | 17.713               |
| N-43         | 415.21           | 2.32                | 448.77                           | 33.56                |
| N-44         | 452.81           | 15.16               | 467.678                          | 14.868               |
| N-45         | 443.30           | 6.76                | 463.165                          | 19.865               |
| N-46         | 438.86           | 2.37                | 456.372                          | 17.512               |
| N-47         | 429.28           | 2.45                | 450.785                          | 21.505               |
| N-48         | 431.95           | 2.83                | 452.98                           | 21.03                |
| N-49         | 432.26           | 2.05                | 452.92                           | 20.66                |
| N-50         | 443.45           | 1.90                | 463.184                          | 19.734               |
| N-51         | 445.83           | 1.99                | 464.389                          | 18.559               |
| N-52         | 434.64           | 3.29                | 453.039                          | 18.399               |
| N-53         | 434.12           | 1.81                | 452.721                          | 18.601               |
| N-54         | 422.90           | 1.91                | 451.042                          | 28.142               |
| N-55         | 421.69           | 1.86                | 450.372                          | 28.682               |
| N-56         | 431.86           | 1.76                | 452.17                           | 20.31                |
| N-57         | 431.45           | 2.66                | 451.732                          | 20.282               |
| N-58         | 421.38           | 2.46                | 450.213                          | 28.833               |
| N-59         | 418.83           | 2.09                | 449.704                          | 30.874               |
| N-60         | 428.82           | 1.82                | 450.532                          | 21.712               |
| N-61         | 428.36           | 1.83                | 450.317                          | 21.957               |
| N-62         | 418.76           | 1.66                | 449.684                          | 30.924               |
| N-63         | 416.20           | 1.56                | 449.563                          | 33.363               |

| <b>Nodos</b> | <b>Cotas (m)</b> | <b>Caudal (L/s)</b> | <b>Altura Piezométrica (mca)</b> | <b>Presión (mca)</b> |
|--------------|------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|
| N-64         | 425.80           | 2.04                | 449.755                          | 23.955               |
| N-65         | 426.18           | 0.00                | 449.756                          | 23.576               |
| N-66         | 415.66           | 1.54                | 449.554                          | 33.894               |
| N-67         | 403.94           | 2.23                | 449.435                          | 45.495               |
| N-68         | 431.32           | 3.88                | 468.688                          | 37.368               |
| N-69         | 409.00           | 1.26                | 449.552                          | 40.552               |
| N-70         | 446.30           | 3.84                | 469.165                          | 22.865               |
| N-71         | 418.30           | 1.45                | 449.666                          | 31.366               |
| N-72         | 418.30           | 1.23                | 449.684                          | 31.384               |
| N-73         | 425.77           | 0.19                | 449.27                           | 23.5                 |
| N-74         | 409.63           | 1.74                | 449.561                          | 39.931               |
| N-75         | 417.46           | 1.20                | 449.835                          | 32.375               |
| N-76         | 425.16           | 2.22                | 449.191                          | 24.031               |
| N-77         | 420.84           | 1.20                | 450.067                          | 29.227               |
| N-78         | 455.00           | 1.05                | 469.482                          | 14.482               |
| N-79         | 445.00           | 2.96                | 469.213                          | 24.213               |
| N-80         | 454.00           | 1.05                | 469.468                          | 15.468               |
| N-81         | 443.97           | 2.02                | 458.395                          | 14.425               |
| N-82         | 445.74           | 1.46                | 458.391                          | 12.651               |
| N-83         | 443.26           | 1.62                | 457.979                          | 14.719               |
| N-84         | 445.17           | 2.62                | 457.983                          | 12.813               |
| N-85         | 435.42           | 2.57                | 453.946                          | 18.526               |
| N-86         | 433.67           | 1.67                | 452.476                          | 18.806               |
| N-87         | 433.03           | 1.53                | 451.767                          | 18.737               |
| N-88         | 434.73           | 3.18                | 450.069                          | 15.339               |
| N-89         | 424.96           | 2.20                | 449.312                          | 24.352               |
| N-90         | 423.01           | 1.34                | 449.306                          | 26.296               |
| N-91         | 422.36           | 2.70                | 449.199                          | 26.839               |

Fuente: 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 Pregrado de la UNJBG). Tacna, Perú.

#### 4.2.1 Costo de la red sin optimización:

El costo de la red con los materiales y topografía actual es de S/. 1 311 550 083 (Un millón trescientos once mil quinientos cincuenta con 83/100 nuevo soles).

#### 4.2.2 Confiabilidad de la red sin optimización:

La confiabilidad del sistema es un  $I_r = 0.70$ , Una red con índice de resiliencia de más del 0.50 es muy vulnerable a todo tipo de fallas (ruptura de tubos, fugas, etc.).

### 4.3 DISEÑO OPTIMIZADO CON MAGMO:

**Tabla 11**

*MAGMO para 02 objetivos: Tabla de nodos de las respuestas*

| Nodo | Altura Piezométrica (m) | Presión (mca) | Nodo | Altura Piezométrica (m) | Presión (mca) |
|------|-------------------------|---------------|------|-------------------------|---------------|
| N-2  | 482.896                 | 14.546        | N-47 | 472.874                 | 43.594        |
| N-3  | 482.46                  | 13.73         | N-48 | 474.022                 | 42.072        |
| N-4  | 481.935                 | 15.195        | N-49 | 474.013                 | 41.753        |
| N-5  | 479.012                 | 17.012        | N-50 | 474.865                 | 31.415        |
| N-6  | 478.188                 | 17.948        | N-51 | 475.619                 | 29.789        |
| N-7  | 483.827                 | 16.557        | N-52 | 474.146                 | 39.506        |
| N-8  | 481.25                  | 18.13         | N-53 | 473.835                 | 39.715        |
| N-9  | 481.199                 | 23.439        | N-54 | 473.569                 | 50.669        |
| N-10 | 482.216                 | 23.176        | N-55 | 473.072                 | 51.382        |
| N-11 | 482.932                 | 13.932        | N-56 | 473.788                 | 41.928        |
| N-12 | 482.883                 | 13.883        | N-57 | 473.751                 | 42.301        |
| N-13 | 482.216                 | 23.166        | N-58 | 473.052                 | 51.672        |
| N-14 | 481.641                 | 23.211        | N-59 | 472.715                 | 53.885        |
| N-15 | 482.388                 | 13.308        | N-60 | 472.866                 | 44.046        |
| N-16 | 482.136                 | 13.136        | N-61 | 472.846                 | 44.486        |

| <b>Nodo</b> | <b>Altura<br/>Piezométrica (m)</b> | <b>Presión<br/>(mca)</b> | <b>Nodo</b> | <b>Altura<br/>Piezométrica (m)</b> | <b>Presión<br/>(mca)</b> |
|-------------|------------------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------------|--------------------------|
| N-17        | 481.595                            | 23.485                   | N-62        | 472.708                            | 53.948                   |
| N-18        | 481.472                            | 25.242                   | N-63        | 472.4                              | 56.2                     |
| N-19        | 479.648                            | 22.118                   | N-64        | 472.417                            | 46.617                   |
| N-20        | 482.003                            | 15.233                   | N-65        | 472.424                            | 46.244                   |
| N-21        | 481.855                            | 15.355                   | N-66        | 472.4                              | 56.74                    |
| N-22        | 478.982                            | 21.662                   | N-67        | 472.4                              | 68.46                    |
| N-23        | 478.98                             | 25.18                    | N-68        | 478.772                            | 47.452                   |
| N-24        | 479.012                            | 16.812                   | N-69        | 472.54                             | 63.54                    |
| N-25        | 478.908                            | 16.998                   | N-70        | 478.518                            | 32.218                   |
| N-26        | 477.896                            | 24.346                   | N-71        | 472.679                            | 54.379                   |
| N-27        | 477.9                              | 29.33                    | N-72        | 472.688                            | 54.388                   |
| N-28        | 478.523                            | 22.513                   | N-73        | 472.349                            | 46.579                   |
| N-29        | 481.172                            | 24.232                   | N-74        | 472.615                            | 62.985                   |
| N-30        | 472.105                            | 58.305                   | N-75        | 472.629                            | 55.169                   |
| N-31        | 479.633                            | 33.823                   | N-76        | 472.324                            | 47.164                   |
| N-32        | 478.51                             | 31.54                    | N-77        | 472.845                            | 52.005                   |
| N-33        | 481.642                            | 23.082                   | N-78        | 478.275                            | 23.275                   |
| N-34        | 481.674                            | 23.224                   | N-79        | 479.631                            | 34.631                   |
| N-35        | 478.5                              | 31.72                    | N-80        | 477.709                            | 23.709                   |
| N-36        | 475.692                            | 29.172                   | N-81        | 476.044                            | 32.074                   |
| N-37        | 481.568                            | 23.968                   | N-82        | 475.743                            | 30.003                   |
| N-38        | 481.589                            | 23.949                   | N-83        | 475.393                            | 32.133                   |
| N-39        | 475.669                            | 29.049                   | N-84        | 475.735                            | 30.565                   |
| N-40        | 475.142                            | 31.142                   | N-85        | 473.142                            | 37.722                   |
| N-41        | 476.36                             | 23.55                    | N-86        | 473.039                            | 39.369                   |
| N-42        | 476.399                            | 20.929                   | N-87        | 473.036                            | 40.006                   |
| N-43        | 472.277                            | 57.067                   | N-88        | 472.484                            | 37.754                   |
| N-44        | 475.881                            | 23.071                   | N-89        | 472.35                             | 47.39                    |
| N-45        | 474.744                            | 31.444                   | N-90        | 472.163                            | 49.153                   |
| N-46        | 474.322                            | 35.462                   | N-91        | 472.156                            | 49.796                   |

Fuente: 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 Pregrado de la UNJBG). Tacna, Perú.

**Tabla 12***MAGMO para 02 objetivos: Tabla de tuberías de las respuestas*

| <b>ID Tubería</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (l/s)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
|-------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| T-1               | 329.2                         | 350                  | 96.956              | 1.14                   |
| T-2               | 329.2                         | 350                  | 54.91               | 0.65                   |
| T-3               | 231.8                         | 250                  | 28.58               | 0.677                  |
| T-4               | 102                           | 110                  | 6.423               | 0.786                  |
| T-5               | 148.4                         | 160                  | 7.958               | 0.46                   |
| T-6               | 292.2                         | 315                  | 87.45               | 1.3                    |
| T-7               | 129.8                         | 140                  | 18.29               | 1.38                   |
| T-8               | 292.2                         | 315                  | 17.83               | 0.27                   |
| T-9               | 129.8                         | 140                  | -6.51               | 0.49                   |
| T-10              | 148.4                         | 160                  | 9.31                | 0.54                   |
| T-11              | 329.2                         | 350                  | 42.05               | 0.49                   |
| T-12              | 292.2                         | 315                  | 58.03               | 0.87                   |
| T-13              | 329.2                         | 350                  | 74.62               | 0.88                   |
| T-14              | 329.2                         | 350                  | 1.04                | 0.012                  |
| T-15              | 292.2                         | 315                  | 48.42               | 0.72                   |
| T-16              | 129.8                         | 140                  | 6.12                | 0.46                   |
| T-17              | 129.8                         | 140                  | 16.15               | 1.22                   |
| T-18              | 148.4                         | 160                  | 26.33               | 1.52                   |
| T-19              | 129.8                         | 140                  | 5.08                | 0.38                   |
| T-20              | 231.8                         | 250                  | 30.31               | 0.72                   |
| T-21              | 231.8                         | 250                  | 13.36               | 0.32                   |
| T-22              | 329.2                         | 350                  | 35.78               | 0.42                   |
| T-23              | 83.4                          | 90                   | 3.63                | 0.67                   |
| T-24              | 102                           | 110                  | -12.66              | 1.55                   |
| T-25              | 83.4                          | 90                   | 7.38                | 1.35                   |
| T-26              | 83.4                          | 90                   | 8.21                | 1.5                    |
| T-27              | 185.4                         | 200                  | 22.16               | 0.82                   |
| T-28              | 148.4                         | 160                  | 19.02               | 1.1                    |

| <b>ID Tubería</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (l/s)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
|-------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| T-29              | 185.4                         | 200                  | 0.57                | 0.02                   |
| T-30              | 185.4                         | 200                  | 31.21               | 1.16                   |
| T-31              | 185.4                         | 200                  | -1.53               | 0.057                  |
| T-32              | 148.4                         | 160                  | 1.515               | 0.088                  |
| T-33              | 185.4                         | 200                  | 25.823              | 0.957                  |
| T-34              | 83.4                          | 90                   | 2.246               | 0.411                  |
| T-35              | 83.4                          | 90                   | -0.124              | 0.023                  |
| T-36              | 231.8                         | 250                  | 21.607              | 0.512                  |
| T-37              | 83.4                          | 90                   | 1.704               | 0.312                  |
| T-38              | 231.8                         | 250                  | 22.145              | 0.525                  |
| T-39              | 185.4                         | 200                  | 23.138              | 0.857                  |
| T-40              | 129.8                         | 140                  | 6.76                | 0.511                  |
| T-41              | 129.8                         | 140                  | -4.173              | 0.315                  |
| T-42              | 102                           | 110                  | 7.089               | 0.867                  |
| T-43              | 185.4                         | 200                  | -13.581             | 0.503                  |
| T-44              | 129.8                         | 140                  | 25.63               | 1.937                  |
| T-45              | 83.4                          | 90                   | 4.162               | 0.762                  |
| T-46              | 231.8                         | 250                  | 12.616              | 0.299                  |
| T-47              | 129.8                         | 140                  | 13.398              | 1.013                  |
| T-48              | 185.4                         | 200                  | 5.567               | 0.207                  |
| T-49              | 83.4                          | 90                   | -1.221              | 0.239                  |
| T-50              | 185.4                         | 200                  | 22.52               | 0.831                  |
| T-51              | 148.4                         | 160                  | 27.317              | 1.579                  |
| T-52              | 292.2                         | 315                  | 38.415              | 0.573                  |
| T-53              | 292.2                         | 315                  | 20.166              | 0.302                  |
| T-54              | 102                           | 110                  | 10.092              | 1.235                  |
| T-55              | 185.4                         | 200                  | 14.387              | 0.533                  |
| T-56              | 83.4                          | 90                   | 6.953               | 1.273                  |
| T-57              | 185.4                         | 200                  | 6.333               | 0.235                  |
| T-58              | 148.4                         | 160                  | 12.643              | 0.731                  |
| T-59              | 129.8                         | 140                  | 23.309              | 1.761                  |

| <b>ID Tubería</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (l/s)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
|-------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| T-60              | 129.8                         | 140                  | 8.149               | 0.616                  |
| T-61              | 148.4                         | 160                  | 25.13               | 1.453                  |
| T-62              | 329.2                         | 350                  | 13.147              | 0.154                  |
| T-63              | 148.4                         | 160                  | 6.636               | 0.384                  |
| T-64              | 102                           | 110                  | 3.551               | 0.435                  |
| T-65              | 129.8                         | 140                  | -2.467              | 0.187                  |
| T-66              | 129.8                         | 140                  | -2.756              | 0.208                  |
| T-67              | 231.8                         | 250                  | 32.22               | 0.764                  |
| T-68              | 148.4                         | 160                  | 12.684              | 0.733                  |
| T-69              | 148.4                         | 160                  | 3.644               | 0.211                  |
| T-70              | 185.4                         | 200                  | 17.547              | 0.65                   |
| T-71              | 148.4                         | 160                  | 8.847               | 0.511                  |
| T-72              | 185.4                         | 160                  | 31.93               | 1.183                  |
| T-73              | 231.8                         | 250                  | 26.597              | 0.63                   |
| T-74              | 231.8                         | 250                  | -11.993             | 0.284                  |
| T-75              | 148.4                         | 160                  | 11.774              | 0.681                  |
| T-76              | 148.4                         | 160                  | 6.722               | 0.389                  |
| T-77              | 102                           | 110                  | 4.352               | 0.533                  |
| T-78              | 148.4                         | 160                  | 7.254               | 0.419                  |
| T-79              | 83.4                          | 90                   | 5.75                | 1.053                  |
| T-80              | 129.8                         | 140                  | 3.524               | 0.266                  |
| T-81              | 83.4                          | 90                   | 1.614               | 0.296                  |
| T-82              | 148.4                         | 160                  | 22.433              | 1.297                  |
| T-83              | 129.8                         | 140                  | 6.095               | 0.461                  |
| T-84              | 185.4                         | 200                  | 14.994              | 0.555                  |
| T-85              | 148.4                         | 160                  | 8.614               | 0.498                  |
| T-86              | 148.4                         | 160                  | 5.85                | 0.338                  |
| T-87              | 129.8                         | 140                  | 4.132               | 0.312                  |
| T-88              | 102                           | 110                  | 3.719               | 0.455                  |
| T-89              | 185.4                         | 200                  | 6.422               | 0.238                  |
| T-90              | 148.4                         | 160                  | 5.791               | 0.335                  |

| <b>ID Tubería</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (l/s)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
|-------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| T-91              | 83.4                          | 90                   | 1.553               | 0.284                  |
| T-92              | 83.4                          | 90                   | 0.705               | 0.129                  |
| T-93              | 83.4                          | 90                   | 0.217               | 0.04                   |
| T-94              | 129.8                         | 140                  | 2.083               | 0.157                  |
| T-95              | 83.4                          | 90                   | 1.318               | 0.241                  |
| T-96              | 102                           | 110                  | 7.872               | 0.963                  |
| T-97              | 102                           | 110                  | 2.827               | 0.346                  |
| T-98              | 185.4                         | 200                  | 1.627               | 0.06                   |
| T-99              | 102                           | 110                  | 2.489               | 0.305                  |
| T-100             | 148.4                         | 160                  | 2.59                | 0.15                   |
| T-101             | 83.4                          | 90                   | 2.477               | 0.453                  |
| T-102             | 129.8                         | 140                  | 2.514               | 0.19                   |
| T-103             | 83.4                          | 90                   | 1.514               | 0.277                  |
| T-104             | 102                           | 110                  | 1.33                | 0.163                  |
| T-105             | 129.8                         | 140                  | 2.547               | 0.193                  |
| T-106             | 83.4                          | 90                   | 1.247               | 0.228                  |
| T-107             | 83.4                          | 90                   | -0.025              | 0.005                  |
| T-108             | 231.8                         | 250                  | -0.317              | 0.008                  |
| T-109             | 129.8                         | 140                  | 17.933              | 1.355                  |
| T-110             | 129.8                         | 140                  | 10.609              | 0.802                  |
| T-111             | 102                           | 110                  | -2.47               | 0.302                  |
| T-112             | 102                           | 110                  | 6.275               | 0.768                  |
| T-113             | 148.4                         | 160                  | 13.183              | 0.762                  |
| T-114             | 83.4                          | 90                   | 8.692               | 1.591                  |
| T-115             | 231.8                         | 250                  | 11.619              | 0.275                  |
| T-116             | 129.8                         | 140                  | -5.082              | 0.384                  |
| T-117             | 83.4                          | 90                   | 3.917               | 0.717                  |
| T-118             | 129.8                         | 140                  | 12.154              | 0.919                  |
| T-119             | 102                           | 110                  | -1.347              | 0.165                  |
| T-120             | 292.2                         | 315                  | 11.831              | 0.176                  |
| T-121             | 102                           | 110                  | 3.647               | 0.446                  |

| ID Tubería | Diámetro interior (mm) | Diámetro (mm) | Caudal (l/s) | Velocidad (m/s) |
|------------|------------------------|---------------|--------------|-----------------|
| T-122      | 148.4                  | 160           | 3.474        | 0.201           |
| T-123      | 83.4                   | 90            | -1.09        | 0.2             |
| T-124      | 129.8                  | 140           | 0.183        | 0.014           |
| T-125      | 185.4                  | 200           | -6.549       | 0.243           |
| T-126      | 148.4                  | 160           | 3.398        | 0.196           |
| T-127      | 129.8                  | 140           | 1.425        | 0.108           |
| T-128      | 83.4                   | 90            | -0.728       | 0.133           |
| T-129      | 148.4                  | 160           | 6.542        | 0.378           |
| T-130      | 185.4                  | 200           | 3.595        | 0.133           |
| T-131      | 102                    | 110           | -1.275       | 0.156           |
| T-132      | 148.4                  | 160           | 7.958        | 0.46            |
| T-133      | 292.2                  | 315           | 68.7         | 1.024           |
| T-134      | 231.8                  | 250           | 23.906       | 0.566           |
| T-135      | 83.4                   | 90            | 0.416        | 0.076           |
| T-136      | 129.8                  | 140           | 2.53         | 0.191           |
| T-137      | 129.8                  | 140           | 2.409        | 0.182           |
| T-138      | 148.4                  | 160           | -3.845       | 0.222           |
| T-139      | 129.8                  | 140           | 6.654        | 0.503           |

Fuente: 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 Pregrado de la UNJBG). Tacna, Perú

#### 4.3.1 Costo de la red con optimización aplicando MAGMO:

El costo de la red de agua potable es de S/. 1 933 745.61 (Un millón novecientos treinta y tres setecientos cuarenta y cinco con 61/100 nuevo Soles).

#### 4.3.2 Confiabilidad de la red con optimización aplicando MAGMO:

La confiabilidad del sistema es de  $I_r = 0.391$ . Una red con índice de confiabilidad menos del 0.50 que simboliza una red poco vulnerable a todo tipo de fallas.

#### 4.4 DISEÑO OPTIMIZADO UTILIZANDO SPEA:

Se planteó dos funciones objetivo, la primera la función costo de la red y en segundo lugar la función de confiabilidad de la red de agua potable, con el objetivo de lograr la optimización multiobjetivo para encontrar una solución que nos proporcione valores aceptables en todos los objetivos.

Se describen a continuación las funciones objetivo propuestas teniendo como variable de decisión los diámetros comerciales disponibles, y se pretende minimizar la función de costos y maximizar la función de resiliencia o confiabilidad del sistema.

Se analizaron una población de 16 individuos en un total de 25 generaciones lo cual significa que se han analizado 400 redes de agua potable teniendo como variables de decisión 8 diámetros comerciales.

Los parámetros para la optimización del SPEA introducidos fueron los siguientes:

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| Número de generaciones            | : 25      |
| Número de genes de los pobladores | : 139     |
| Tamaño de individuos              | : 16      |
| Número de torneos binarios        | : 4       |
| Cruzamiento                       | : 1 Punto |
| Números de hijos                  | : 4       |

El proceso de optimización de la red, una vez ingresados los datos, fue de un promedio de dos minutos.

**Tabla 13***SPEA para 02 objetivos: Tabla de nodos de las respuestas*

| <b>Etiqueta</b> | <b>Cotas</b> | <b>H Piezométrica (m)</b> | <b>Presión (mca)</b> |
|-----------------|--------------|---------------------------|----------------------|
| N-2             | 468.35       | 483.12                    | 14.77                |
| N-3             | 468.73       | 482.34                    | 13.61                |
| N-4             | 466.74       | 479.12                    | 12.38                |
| N-5             | 462.00       | 474.88                    | 12.88                |
| N-6             | 460.24       | 473.53                    | 13.29                |
| N-7             | 467.27       | 483.81                    | 16.54                |
| N-8             | 463.12       | 481.66                    | 18.54                |
| N-9             | 457.76       | 481.26                    | 23.50                |
| N-10            | 459.04       | 477.53                    | 18.49                |
| N-11            | 469.00       | 482.92                    | 13.92                |
| N-12            | 469.00       | 482.88                    | 13.88                |
| N-13            | 459.05       | 477.52                    | 18.47                |
| N-14            | 458.43       | 476.38                    | 17.95                |
| N-15            | 469.08       | 482.28                    | 13.20                |
| N-16            | 469.00       | 482.28                    | 13.28                |
| N-17            | 458.11       | 476.35                    | 18.24                |
| N-18            | 456.23       | 475.2                     | 18.97                |
| N-19            | 457.53       | 475.19                    | 17.66                |
| N-20            | 466.77       | 478.85                    | 12.08                |
| N-21            | 466.50       | 478.76                    | 12.26                |
| N-22            | 457.32       | 474.66                    | 17.34                |
| N-23            | 453.80       | 474.84                    | 21.04                |
| N-24            | 462.20       | 474.87                    | 12.67                |
| N-25            | 461.91       | 474.68                    | 12.77                |
| N-26            | 453.55       | 474.67                    | 21.12                |
| N-27            | 448.57       | 473.65                    | 25.08                |
| N-28            | 456.01       | 473.64                    | 17.63                |
| N-29            | 456.94       | 481.19                    | 24.25                |

| <b>Etiqueta</b> | <b>Cotas</b> | <b>H Piezométrica (m)</b> | <b>Presión (mca)</b> |
|-----------------|--------------|---------------------------|----------------------|
| N-30            | 413.80       | 471.5                     | 57.70                |
| N-31            | 445.81       | 478.96                    | 33.15                |
| N-32            | 446.97       | 477.7                     | 30.73                |
| N-33            | 458.56       | 477.7                     | 19.14                |
| N-34            | 458.45       | 477.5                     | 19.05                |
| N-35            | 446.78       | 477.68                    | 30.90                |
| N-36            | 446.52       | 474.4                     | 27.88                |
| N-37            | 457.60       | 476.34                    | 18.74                |
| N-38            | 457.64       | 476.33                    | 18.69                |
| N-39            | 446.62       | 474.38                    | 27.76                |
| N-40            | 444.00       | 473.26                    | 29.26                |
| N-41            | 452.81       | 475.16                    | 22.35                |
| N-42            | 455.47       | 475.21                    | 19.74                |
| N-43            | 415.21       | 471.59                    | 56.38                |
| N-44            | 452.81       | 473.26                    | 20.45                |
| N-45            | 443.30       | 473.21                    | 29.91                |
| N-46            | 438.86       | 472.62                    | 33.76                |
| N-47            | 429.28       | 472.47                    | 43.19                |
| N-48            | 431.95       | 472.76                    | 40.81                |
| N-49            | 432.26       | 472.76                    | 40.50                |
| N-50            | 443.45       | 473.25                    | 29.80                |
| N-51            | 445.83       | 473.57                    | 27.74                |
| N-52            | 434.64       | 472.96                    | 38.32                |
| N-53            | 434.12       | 472.94                    | 38.82                |
| N-54            | 422.90       | 472.91                    | 50.01                |
| N-55            | 421.69       | 472.19                    | 50.50                |
| N-56            | 431.86       | 472.71                    | 40.85                |
| N-57            | 431.45       | 472.7                     | 41.25                |
| N-58            | 421.38       | 472.18                    | 50.80                |
| N-59            | 418.83       | 472.15                    | 53.32                |
| N-60            | 428.82       | 472.47                    | 43.65                |
| N-61            | 428.36       | 472.3                     | 43.94                |

| <b>Etiqueta</b> | <b>Cotas</b> | <b>H Piezométrica (m)</b> | <b>Presión (mca)</b> |
|-----------------|--------------|---------------------------|----------------------|
| N-62            | 418.76       | 472.15                    | 53.39                |
| N-63            | 416.20       | 472.15                    | 55.95                |
| N-64            | 425.80       | 472.23                    | 46.43                |
| N-65            | 426.18       | 472.12                    | 45.94                |
| N-66            | 415.66       | 472.15                    | 56.49                |
| N-67            | 403.94       | 472.08                    | 68.14                |
| N-68            | 431.32       | 478.23                    | 46.91                |
| N-69            | 409.00       | 472.14                    | 63.14                |
| N-70            | 446.30       | 477.7                     | 31.40                |
| N-71            | 418.30       | 472.15                    | 53.85                |
| N-72            | 418.30       | 472.15                    | 53.85                |
| N-73            | 425.77       | 471.74                    | 45.97                |
| N-74            | 409.63       | 472.14                    | 62.51                |
| N-75            | 417.46       | 472.14                    | 54.68                |
| N-76            | 425.16       | 471.6                     | 46.44                |
| N-77            | 420.84       | 472.18                    | 51.34                |
| N-78            | 455.00       | 473.58                    | 18.58                |
| N-79            | 445.00       | 478.25                    | 33.25                |
| N-80            | 454.00       | 473.4                     | 19.40                |
| N-81            | 443.97       | 471.77                    | 27.80                |
| N-82            | 445.74       | 471.64                    | 25.90                |
| N-83            | 443.26       | 471.71                    | 28.45                |
| N-84            | 445.17       | 471.6                     | 26.43                |
| N-85            | 435.42       | 471.59                    | 36.17                |
| N-86            | 433.67       | 471.59                    | 37.92                |
| N-87            | 433.03       | 471.59                    | 38.56                |
| N-88            | 434.73       | 471.58                    | 36.85                |
| N-89            | 424.96       | 471.69                    | 46.73                |
| N-90            | 423.01       | 471.54                    | 48.53                |
| N-91            | 422.36       | 471.54                    | 49.18                |

Elaboración: Propia

**Tabla 14***SPEA para 02 objetivos: Tabla de Tuberías de las respuestas*

| <b>Tubería</b> | <b>Nodos</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (l/s)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
|----------------|--------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| T-1            | R-N2         | 329.20                        | 350.00               | 85.36               | 1.00                   |
| T-2            | N2-N3        | 329.20                        | 350.00               | 76.22               | 0.90                   |
| T-3            | N3-N4        | 185.40                        | 200.00               | 43.44               | 1.61                   |
| T-4            | N4-N5        | 129.80                        | 140.00               | 15.21               | 1.15                   |
| T-5            | N5-N6        | 102.00                        | 110.00               | 3.88                | 0.47                   |
| T-6            | R-N7         | 292.20                        | 315.00               | 99.05               | 1.48                   |
| T-7            | N7-N8        | 231.80                        | 250.00               | 78.00               | 1.85                   |
| T-8            | N8-N9        | 329.20                        | 350.00               | 77.54               | 0.91                   |
| T-9            | N9-N10       | 102.00                        | 110.00               | 7.14                | 0.87                   |
| T-10           | N11-N10      | 102.00                        | 110.00               | 10.63               | 1.30                   |
| T-11           | N2-N12       | 102.00                        | 110.00               | 9.13                | 1.12                   |
| T-12           | N11-N12      | 148.40                        | 160.00               | 8.61                | 0.50                   |
| T-13           | N12-N13      | 102.00                        | 110.00               | 10.53               | 1.29                   |
| T-14           | N10-N13      | 292.20                        | 315.00               | 16.01               | 0.24                   |
| T-15           | N13-N14      | 102.00                        | 110.00               | 4.32                | 0.53                   |
| T-16           | N15-N14      | 83.40                         | 90.00                | 6.02                | 1.10                   |
| T-17           | N15-N16      | 185.40                        | 200.00               | -2.00               | 0.07                   |
| T-18           | N3-N16       | 231.80                        | 250.00               | 32.79               | 0.78                   |
| T-19           | N16-N17      | 129.80                        | 140.00               | 19.54               | 1.48                   |
| T-20           | N14-N17      | 102.00                        | 110.00               | 2.51                | 0.31                   |
| T-21           | N17-N18      | 129.80                        | 140.00               | 9.98                | 0.75                   |
| T-22           | N16-N20      | 102.00                        | 110.00               | 9.63                | 1.18                   |
| T-23           | N20-N19      | 102.00                        | 110.00               | 8.06                | 0.99                   |
| T-24           | N19-N18      | 292.20                        | 315.00               | -9.28               | 0.14                   |
| T-25           | N19-N41      | 185.40                        | 200.00               | 4.12                | 0.15                   |
| T-26           | N19-N22      | 102.00                        | 110.00               | 12.52               | 1.53                   |
| T-27           | N4-N21       | 148.40                        | 160.00               | 28.23               | 1.63                   |
| T-28           | N21-N22      | 83.40                         | 90.00                | 5.02                | 0.92                   |

| <b>Tubería</b> | <b>Nodos</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (l/s)</b> | <b>Velocidad</b> |
|----------------|--------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| T-29           | N22-N23      | 185.40                        | 200.00               | -7.47               | 0.28             |
| T-30           | N21-N24      | 148.40                        | 160.00               | 20.70               | 1.20             |
| T-31           | N5-N24       | 329.20                        | 350.00               | 11.33               | 0.13             |
| T-32           | N24-N23      | 292.20                        | 315.00               | 9.55                | 0.14             |
| T-33           | N24-N25      | 148.40                        | 160.00               | 20.15               | 1.16             |
| T-34           | N25-N26      | 292.20                        | 315.00               | 6.66                | 0.10             |
| T-35           | N26-N27      | 102.00                        | 110.00               | 4.29                | 0.53             |
| T-36           | N25-N28      | 148.40                        | 160.00               | 11.52               | 0.67             |
| T-37           | N28-N27      | 292.20                        | 315.00               | -2.71               | 0.04             |
| T-38           | N9-N29       | 292.20                        | 315.00               | 68.19               | 1.02             |
| T-39           | N29-N31      | 231.80                        | 250.00               | 52.03               | 1.23             |
| T-40           | N31-N32      | 185.40                        | 200.00               | 18.91               | 0.70             |
| T-41           | N29-N33      | 129.80                        | 140.00               | 12.98               | 0.98             |
| T-42           | N33-N32      | 329.20                        | 350.00               | 2.93                | 0.03             |
| T-43           | N33-N34      | 102.00                        | 110.00               | 7.73                | 0.95             |
| T-44           | N13-N34      | 231.80                        | 250.00               | 20.62               | 0.49             |
| T-45           | N34-N35      | 231.80                        | 250.00               | -12.92              | 0.31             |
| T-46           | N32-N35      | 292.20                        | 315.00               | 37.36               | 0.56             |
| T-47           | N35-N36      | 148.40                        | 160.00               | 21.06               | 1.22             |
| T-48           | N34-N37      | 231.80                        | 250.00               | 38.94               | 0.92             |
| T-49           | N37-N38      | 292.20                        | 315.00               | 16.09               | 0.24             |
| T-50           | N14-N37      | 129.80                        | 140.00               | 6.11                | 0.46             |
| T-51           | N37-N36      | 185.40                        | 200.00               | 26.97               | 1.00             |
| T-52           | N36-N39      | 329.20                        | 350.00               | 45.73               | 0.54             |
| T-53           | N17-N38      | 185.40                        | 200.00               | 10.21               | 0.38             |
| T-54           | N38-N39      | 129.80                        | 140.00               | 10.46               | 0.79             |
| T-55           | N39-N40      | 185.40                        | 200.00               | 22.15               | 0.82             |
| T-56           | N38-N42      | 148.40                        | 160.00               | 13.94               | 0.81             |
| T-57           | N42-N41      | 231.80                        | 250.00               | 13.32               | 0.32             |
| T-58           | N41-N40      | 148.40                        | 160.00               | 16.37               | 0.95             |
| T-59           | N22-N44      | 148.40                        | 160.00               | 21.66               | 1.25             |

| <b>Tubería</b> | <b>Nodos</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (l/s)</b> | <b>Velocidad</b> |
|----------------|--------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| T-60           | N44-N45      | 231.80                        | 250.00               | 6.50                | 0.15             |
| T-61           | N40-N50      | 329.20                        | 350.00               | 36.62               | 0.43             |
| T-62           | N31-N79      | 129.80                        | 140.00               | 29.90               | 2.26             |
| T-63           | N79-N68      | 292.20                        | 315.00               | 5.16                | 0.08             |
| T-64           | N79-N70      | 231.80                        | 250.00               | 21.78               | 0.52             |
| T-65           | N32-N70      | 329.20                        | 350.00               | -19.22              | 0.23             |
| T-66           | N70-N68      | 83.40                         | 90.00                | -1.28               | 0.23             |
| T-67           | N39-N51      | 129.80                        | 140.00               | 32.14               | 2.43             |
| T-68           | N51-N52      | 231.80                        | 250.00               | 25.90               | 0.61             |
| T-69           | N52-N49      | 129.80                        | 140.00               | 3.23                | 0.24             |
| T-70           | N51-N50      | 129.80                        | 140.00               | 4.24                | 0.32             |
| T-71           | N50-N49      | 231.80                        | 250.00               | 21.65               | 0.51             |
| T-72           | N50-N45      | 185.40                        | 200.00               | 17.31               | 0.64             |
| T-73           | N45-N48      | 185.40                        | 200.00               | 11.32               | 0.42             |
| T-74           | N49-N48      | 231.80                        | 250.00               | -7.32               | 0.17             |
| T-75           | N48-N47      | 83.40                         | 90.00                | 1.17                | 0.21             |
| T-76           | N45-N46      | 129.80                        | 140.00               | 5.73                | 0.43             |
| T-77           | N46-N47      | 148.40                        | 160.00               | 3.36                | 0.19             |
| T-78           | N47-N65      | 129.80                        | 140.00               | 4.48                | 0.34             |
| T-79           | N52-N53      | 231.80                        | 250.00               | 19.38               | 0.46             |
| T-80           | N53-N54      | 292.20                        | 315.00               | 8.58                | 0.13             |
| T-81           | N54-N55      | 129.80                        | 140.00               | 6.67                | 0.50             |
| T-82           | N49-N56      | 231.80                        | 250.00               | 30.15               | 0.71             |
| T-83           | N56-N55      | 102.00                        | 110.00               | 2.72                | 0.33             |
| T-84           | N56-N57      | 292.20                        | 315.00               | 34.67               | 0.52             |
| T-85           | N57-N58      | 102.00                        | 110.00               | 2.70                | 0.33             |
| T-86           | N55-N58      | 185.40                        | 200.00               | 7.53                | 0.28             |
| T-87           | N58-N59      | 148.40                        | 160.00               | 1.27                | 0.07             |
| T-88           | N57-N60      | 292.20                        | 315.00               | 29.31               | 0.44             |
| T-89           | N47-N60      | 185.40                        | 200.00               | -2.40               | 0.09             |
| T-90           | N60-N61      | 148.40                        | 160.00               | 19.49               | 1.13             |

| <b>Tubería</b> | <b>Nodos</b> | <b>Diámetro interior (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Caudal (l/s)</b> | <b>Velocidad</b> |
|----------------|--------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| T-91           | N61-N64      | 292.20                        | 315.00               | 16.36               | 0.24             |
| T-92           | N65-N64      | 129.80                        | 140.00               | -11.82              | 0.89             |
| T-93           | N64-N63      | 148.40                        | 160.00               | 2.49                | 0.14             |
| T-94           | N59-N62      | 329.20                        | 350.00               | 3.64                | 0.04             |
| T-95           | N62-N63      | 83.40                         | 90.00                | 0.05                | 0.01             |
| T-96           | N58-N77      | 329.20                        | 350.00               | 6.50                | 0.08             |
| T-97           | N77-N75      | 102.00                        | 110.00               | 1.06                | 0.13             |
| T-98           | N75-N74      | 231.80                        | 250.00               | -0.14               | 0.00             |
| T-99           | N59-N72      | 185.40                        | 200.00               | 1.14                | 0.04             |
| T-100          | N72-N74      | 231.80                        | 250.00               | 3.66                | 0.09             |
| T-101          | N74-N69      | 148.40                        | 160.00               | 1.78                | 0.10             |
| T-102          | N72-N71      | 185.40                        | 200.00               | 0.49                | 0.02             |
| T-103          | N62-N71      | 292.20                        | 315.00               | 3.23                | 0.05             |
| T-104          | N71-N69      | 83.40                         | 90.00                | 0.24                | 0.04             |
| T-105          | N69-N67      | 102.00                        | 110.00               | 0.76                | 0.09             |
| T-106          | N71-N66      | 329.20                        | 350.00               | 2.03                | 0.02             |
| T-107          | N63-N66      | 231.80                        | 250.00               | 0.98                | 0.02             |
| T-108          | N66-N67      | 129.80                        | 140.00               | 1.47                | 0.11             |
| T-109          | N28-N78      | 148.40                        | 160.00               | 12.26               | 0.71             |
| T-110          | N78-N82      | 102.00                        | 110.00               | 4.84                | 0.59             |
| T-111          | N82-N81      | 129.80                        | 140.00               | -2.97               | 0.22             |
| T-112          | N78-N80      | 129.80                        | 140.00               | 6.37                | 0.48             |
| T-113          | N80-N81      | 129.80                        | 140.00               | 9.19                | 0.69             |
| T-114          | N81-N83      | 102.00                        | 110.00               | 4.20                | 0.51             |
| T-115          | N82-N84      | 129.80                        | 140.00               | 6.35                | 0.48             |
| T-116          | N83-N84      | 102.00                        | 110.00               | 1.39                | 0.17             |
| T-117          | N84-N85      | 292.20                        | 315.00               | 5.12                | 0.08             |
| T-118          | N83-N86      | 102.00                        | 110.00               | 1.19                | 0.15             |
| T-119          | N86-N85      | 329.20                        | 350.00               | -2.55               | 0.03             |
| T-120          | N86-N87      | 148.40                        | 160.00               | 2.07                | 0.12             |
| T-121          | N87-N90      | 83.40                         | 90.00                | 0.41                | 0.08             |

|       |         |        |        |        |      |
|-------|---------|--------|--------|--------|------|
| T-122 | N88-N89 | 148.40 | 160.00 | -3.05  | 0.18 |
| T-123 | N90-N89 | 148.40 | 160.00 | -4.65  | 0.27 |
| T-124 | N89-N73 | 231.80 | 250.00 | -9.90  | 0.23 |
| T-125 | N73-N65 | 185.40 | 200.00 | -16.31 | 0.60 |
| T-126 | N90-N91 | 292.20 | 315.00 | 3.72   | 0.06 |
| T-127 | N91-N30 | 148.40 | 160.00 | 1.78   | 0.10 |
| T-128 | N91-N76 | 102.00 | 110.00 | -0.76  | 0.09 |
| T-129 | N73-N76 | 102.00 | 110.00 | 6.22   | 0.76 |
| T-130 | N76-N43 | 231.80 | 250.00 | 3.24   | 0.08 |
| T-131 | N30-N43 | 102.00 | 110.00 | -0.92  | 0.11 |
| T-132 | N6-N80  | 148.40 | 160.00 | 3.88   | 0.22 |
| T-133 | N7-N11  | 185.40 | 200.00 | 20.60  | 0.76 |
| T-134 | N12-N15 | 129.80 | 140.00 | 5.66   | 0.43 |
| T-135 | N53-N56 | 185.40 | 200.00 | 8.99   | 0.33 |
| T-136 | N60-N59 | 148.40 | 160.00 | 5.60   | 0.32 |
| T-137 | N61-N62 | 102.00 | 110.00 | 1.30   | 0.16 |
| T-138 | N72-N77 | 231.80 | 250.00 | -4.24  | 0.10 |
| T-139 | N87-N88 | 102.00 | 110.00 | 0.13   | 0.02 |

Elaboración: Propia

#### 4.4.1 Costo de la red con optimización aplicando SPEA:

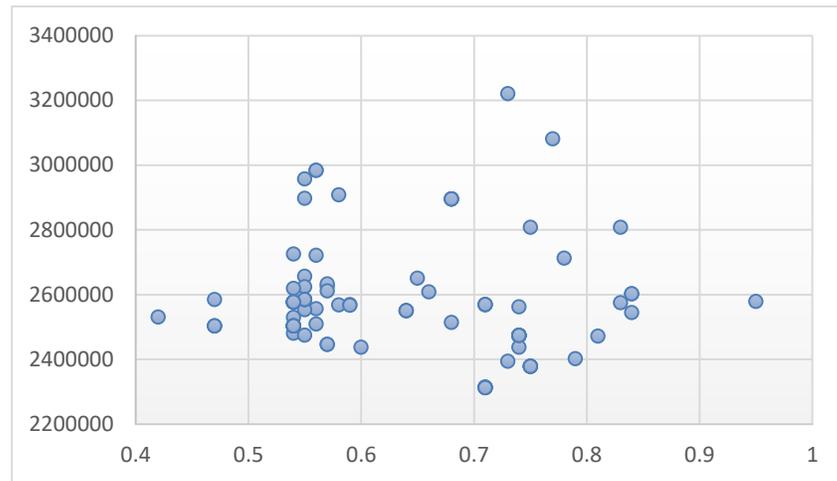
El costo de la red de agua potable con diámetros la configuración tipológica actual es de S/. 2 530 803.86 (Dos millones quinientos treinta mil ochocientos tres con 86/100 nuevos Soles).

#### 4.4.2 Confiabilidad de la con optimización aplicando SPEA:

La confiabilidad del sistema es de  $I_r = 0.42$ . Presenta un índice de confiabilidad de menos de 0.50, lo cual simboliza una red poco vulnerable a todo tipo de fallas (ruptura de tubos, fugas, etc.). Es decir es eficiente

## 5 DISCUSIÓN

El resultado del procesamiento se presenta en la Figura 12, la cual muestra la gráfica de la población de respuestas, además se puede observar el óptimo de Pareto basado en las soluciones que cumplen las restricciones impuestas.

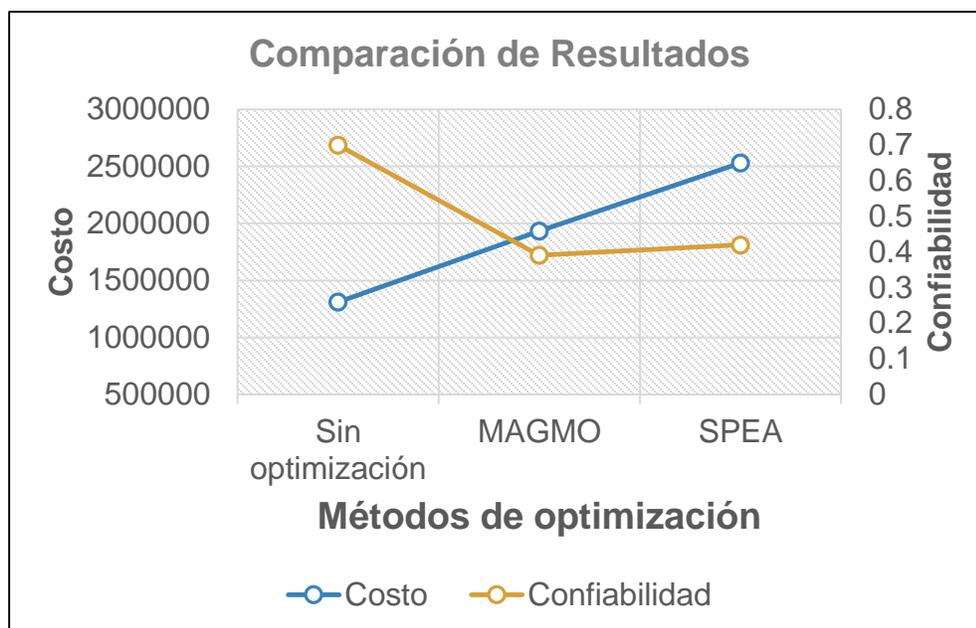


**Figura 141**  
*Iteración 1 al 25*

Elaboración: Propia

Se han obtenido resultados satisfactorios al comparar los resultados de la Tabla 8 y Tabla 9 con los resultados de la red sin optimización ya que se tiene un mejor índice de confiabilidad en 0.28, pero con un costo mayor en 1 219 253.03 (2 530 803.86 - 1311550.83).

Además al comparar los resultados obtenidos al aplicar el método SPEA y MAGMO se tiene que el MAGMO tiene un mejor desempeño para ambas funciones al ser menor  $I_r$  en 0.029 y un costo menor de S/ 597 058.25.



**Figura 152**  
*Métodos de Optimización*

Elaboración: Propia

Se tiene en la Figura 13 la comparación de los resultados obtenidos. Definitivamente es la solución de MAGMO y SPEA soluciones que representan un mejor valor para la confiabilidad de las redes de distribución de agua a comparación de la red sin optimización. Entonces podemos decir que la elección del grupo de redes resultantes finales, siempre será una red optimizada al estar ubicadas todas las respuestas en el frente de Pareto, pudiendo elegirse la que tenga el menor costo posible con la contrapropuesta de una baja confiabilidad, la de mayor confiabilidad que generaría un alto costo para su implementación, o elegir una red con características intermedias. Para la zona de estudio se pretende dar un servicio eficiente y confiable en el Sector Viñani sin despreciar un costo apropiado.

**Tabla 15**  
*Comparación de Resultados*

|                               | <b>Sin optimización</b> | <b>MAGMO</b> | <b>SPEA</b> |
|-------------------------------|-------------------------|--------------|-------------|
| <b>Velocidad máxima (m/s)</b> | 2.59m/s                 | 1.94m/s      | 2.43m/s     |
| <b>Presión mínima (mca)</b>   | 10.14m                  | 23.28m       | 12.08m      |
| <b>Presión máxima (mca)</b>   | 45.50m                  | 68.46m       | 68.14m      |

Elaboración: Propia

Se aprecia en la Tabla 15 que las menores velocidades las tiene la solución con MAGMO de 1.94 m/s; en segundo lugar, la solución con SPEA de 2.43 m/s; y por último, la solución de la red sin optimización con 2.59 m/s.

De esta manera se tiene a las presiones resultantes en los nodos de la red del Sector Viñani muestran que la presión mínima para la red aplicando el SPEA se da en el nodo N° 19 con un valor de 12.08 m.c.a y una presión máxima en el nodo N°66 con 68.14m.c.a; en la solución de la red aplicando MAGMO es en el nodo N° 32 con un valor de 23.275 m.c.a y una presión máxima en el nodo N°21 con 68.46 m.c.a; por último, en la solución de la red sin optimización en el nodo N° 14 con un valor de 10.144 m.c.a y una presión máxima en el nodo N°66 de 45.495 m.c.a. La solución con MAGMO ha tenido un valor de presión mínima y máxima muy por encima de las otras dos soluciones .

## 6 CONCLUSIONES

---

- El Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo de Frente de Pareto (SPEA) realizado en Matlab R2012 para el diseño óptimo de redes de distribución de agua es adecuado ya que la elección de los diámetros cumplen con las restricciones hidráulicas, es decir, las presiones y velocidades máximas, el comportamiento energético, conservación de masa en los nudos, las restricciones comerciales de disponibilidad de diámetros, la fiabilidad de la red poco vulnerable a todo tipo de fallas que reducen la eficiencia de las redes y generan una pérdida económica a los organismos operadores del sistema de distribución de este tipo de líquido. El SPEA se aplica a redes de gran tamaño, minimiza el problema y reduce los cálculos, así como el tiempo. Realiza un análisis integral que implica una optimización simultánea de dos funciones objetivo: Máxima confiabilidad y mínimo costo para un diseño óptimo que asegura la calidad del método. De este modo, se puede adoptar cualquier alternativa de acuerdo a las necesidades.
  
- Los resultados que muestran la efectividad en la red del Sector Viñani son:
  - o Se evidencia notables mejoras respecto a los métodos tradicionales de diseño que se limitan a verificar condiciones hidráulicas y no pretenden optimizar el diseño de la red de agua potable. El costo estimado de la red optimizada es económicamente superior a la red sin optimización (S/. 2 530 803.86 vs S/. 1 311 550.83), sin embargo al incluir como parámetro a optimizar en el diseño la confiabilidad de la red de agua potable, se hizo evidente que la red más confiable es la optimizada con un índice de resiliencia de 0.42 contra un índice de resiliencia de 0.70 vulnerable a todo tipo de fallas.
  
  - o El Micro Algoritmo Genético Multiobjetivo (MAGMO) tiene mejor desempeño que el Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo de Frente de Pareto (SPEA). Los resultados indicaron que con el algoritmo SPEA tiene una confiabilidad resiliente de 0.42 y un costo estimado de S/. 2 530 803.86 el cual es superior al costo estimado con la implementación del MAGMO en S/.597 058.25, además una confiabilidad de 0.391 con menos probabilidad de fallas.

- Ambos algoritmos tienen capacidades similares para encontrar soluciones cercanas al conjunto de soluciones Pareto óptimas pero se evidencia que el SPEA no es efectiva para el diseño óptimo de redes ello puede resultar debido a:
  - o La forma de asignación del *strength* y la asignación posterior de la aptitud debido a que cuando existe un único elemento dominante en la población externa, el algoritmo es casi una búsqueda ciega; cuando existen demasiados elementos dominantes, ya no se realiza la búsqueda eficientemente y se pierde la posibilidad de ir encontrando siempre mejores soluciones.
  - o Existe una convergencia prematura que no mantiene la diversidad en la población para lograr así un conjunto no dominado bien distribuido y amplio.
  
- El método del gradiente es el mejor método de cálculo de redes debido a que la manipulación de las matrices dispersas reduce el tiempo de cálculo en el computador el cual no es posible en el método de la teoría lineal. Además, toma en cuenta para el diseño de tuberías las pérdidas de energía, conservación de la masa lo que no garantiza otros métodos como Hardy Cross y Newton Raphson.
  
- Las distintas técnicas evolutivas son numerosas, pero pocos son aplicados al diseño de Redes de distribución de agua que permitan al profesional tomar decisiones adecuadas para llevar a cada ser humano este vital líquido de manera segura y eficaz tomando en cuenta los objetivos al mismo tiempo.

## 7 RECOMENDACIONES

---

- Para la aplicación del El Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo de Frente de Pareto (SPEA) se recomienda:
  - o Considerar como parámetros de acuerdo a los investigadores un ratio de 1:4 entre la población externa y el tamaño de la población.
  - o Es necesario que cada proyecto de diseño cuente con su propia curva de costos de tuberías en función del diámetro debido a las variaciones de mano de obra, equipos y tuberías que se emplean para la determinación de los precios unitarios en obra.
  
- Se debe incorporar las técnicas de optimización para mejorar el diseño óptimo de las redes de distribución de agua en la normativa peruana para ello es necesario utilizar criterios de optimización para encontrar la red de agua potable óptima, debido a que se obtienen “varias soluciones” posibles, y es responsabilidad del ingeniero la decisión final puesto que los recursos económicos en algunas zonas son limitadas, sin dejar de garantizar un nivel de confianza aceptable que evalúe la economía de acuerdo a las características socioeconómicas y la elección de una red menos vulnerable a fallas, rupturas o fugas.
  
- Para las presiones altas se recomienda el uso de válvulas reductoras de presión y colocación de purgas para las tuberías con velocidades menores y evitar problemas como la sedimentación.
  
- Deben seguir realizándose comparaciones o combinar con otros métodos de optimización que permitan tener criterios válidos de comparación, se necesita investigar sobre metodologías de optimización que puedan aplicarse al diseño de redes de distribución de agua resaltándose así la necesidad de centrar los esfuerzos en la búsqueda de modelos de optimización Multiobjetivo que permita atender un mayor número de aspectos ingenieriles con un menor presupuesto.

- Se debe realizar para la determinación de las características hidráulicas de una red de distribución de agua con el Método del Gradiente junto con las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White ya que durante el proceso de diseño de redes, no se tiene el control sobre el número de Reynolds en todas las tuberías de la red, lo cual invalida el uso de la ecuación de Hazen Williams. Un método de manejo matricial de las ecuaciones de energía y conservación de masa que permitirá la reducción del tiempo de cálculo en computadores.
- Se debe desarrollar más técnicas heurísticas como los Algoritmos evolutivos para la solución de problemas Multiobjetivo en la ingeniería con software elaborados para un menor tiempo de cálculo que incluyan más alternativas más allá del coste mínimo de diseño obtenido ya que el encontrar la red de agua potable de mínimo costo no garantiza encontrar un nivel de confiabilidad deseable que garantice el suministro en caso de presentarse una falla u plantear otros objetivos como la confiabilidad cinemática que permitirá definir una mejor decisión; el juicio final del Ingeniero es fundamental.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

---

1. Agüero Pittman , R. (1997). *Agua Potable para poblaciones rurales-Sistemas de abastecimiento por gravedad sin tratamiento*. Lima, Perú: Asociación Educativos Rurales.
2. Arranz de la Peña, J. (2016). *Algoritmos Genéticos*. Madrid, España.
3. Castañeda, E., Garmendia, L., & Santos, M. (s.f.). *Algoritmos Genéticos Difusos: Una Aproximación Práctica para la Creatividad Computacional* . Madrid, Universidad Complutense de Madrid, España.
4. Chávez Mendoza, C. J. (2014). *Selección de electrobomba sumergible para pozo profundo aplicado al proyecto de riego de áreas verdes, distrito de Pachacámac (Tesis de Pregrado)*. Lima, Universidad Nacional de San Marcos.
5. Coello, C. A., Veldhuizen, D. A., & Lamont, G. B. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems (Second Edition ed.)*. MA: Kluwer.
6. Coello, C., & Toscano, G. (2001). Multiobjective optimization using a micro-genetic algorithm. *Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference*, 274-282.
7. Cuartas Torres , B. (2009). *Metodología para la optimización de múltiples objetivos basada en AG y uso de preferencias (Tesis de Maestría)*. Medellín, Universidad Nacional de Colombia.
8. De Freitas, A., Do Nascimento , H., Fernandes , G., & Márcio, P. (2003). Algoritmos evolucionários aplicados ao planejamento florestal com objetivos múltiplos. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional e os Recursos Renováveis*.
9. Duarte Flores, S. (2001). *Optimización multiobjetivo de redes empleando algoritmos evolutivos paralelos.(Tesis de maestría)*. Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Paraguay.
10. Espinoza , J., & Pino , E. (2011). *Uso de algoritmos genéticos multiobjetivo aplicado al diseño de redes de agua potable, caso AA.H.Puente Camiara, Distrito Locumba-Tacna*. Tacna, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Perú.

11. Frutos, M., & Tohmé, F. (2012). Técnicas evolutivas en problemas multi-objetivos en el proceso de planificación de la producción. *Scielo*.
12. García, C. A., & Mendoza, S. (2011). Implementación de un Algoritmo Evolutivo en la Planeación de Inversiones de un Sistema de Distribución de Energía. *Scielo*.
13. García, C. A., García, E., & Villada, F. (2015). Implementación del Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo de Frente de Pareto (SPEA) para la Planeación de Sistemas Eléctricos de Distribución incluyendo Huecos de Voltaje. *Información Tecnológica*, 26(5), 155-168. Obtenido de [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642015000500019](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642015000500019)
14. Gutiérrez Méndez, F. (2011). Optimización Multiobjetivo usando Algoritmos Genéticos Culturales (Tesis de maestría). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.
15. Luque Gonzáles, G. (2013). Diseño Multiobjetivo de un sistema de abastecimiento de agua incluyendo la cosecha de agua de lluvia como recurso complementario. Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, España.
16. Martínez, M. (2013). Un estudio empírico de dos algoritmos evolutivos para clustering multi-objetivo (Tesis de maestría). Veracruz, Universidad Veracruzana.
17. Mateos Andaluz, A. (2014). Inteligencia en Redes de Comunicaciones. Madrid, Universidad Carlos III de Madrid, España.
18. Mendoza, F., & Saldarriaga, J. G. (2010). Diseño optimizado de redes de distribución de agua potable incluyendo análisis de costo mínimo versus resiliencia en la red. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.
19. Ministerio de Vivienda, c. y. (2006). OS.100 Consideraciones básicas de diseño de Infraestructura Sanitaria . Lima, Perú.
20. Ministerio de Vivienda, construcción y saneamiento. (2009). OS.050 Redes de distribución de Agua para consumo humano. Lima, Perú.

21. Molia, R. (Noviembre de 1987). Módulo: Abastecimiento y saneamiento urbanos. Recuperado el 15 de Diciembre de 2016, de <file:///C:/Users/Violeta/Downloads/componente45475.pdf>
22. Montesinos, M. P., García, A. G., & Muñoz, J. L. (Marzo de 1997). Optimización de Redes de distribución de agua utilizando un algoritmo genético. *Ingeniería del agua*, 4(1), 71-77. Obtenido de <https://ojs.cc.upv.es/index.php/IA/article/view/2717/2702>
23. Mora Melia, D. (2012). Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia (Tesis Doctoral). Valencia, Universidad Politécnica de Valencia , España.
24. Moujahid, A., Inza, I., & Larrañaga, P. (s.f.). Algoritmos Genéticos. Universidad del País Vasco. Obtenido de <http://www.sc.ehu.es/ccwbyes/docencia/mmcc/docs/t2s.pdf>
25. Nebro, A., Alba, E., & Luna, F. (s.f.). Optimización Multi-Objetivo y Computación Grid. Obtenido de <http://www.lcc.uma.es/~eat/pdf/maeb04p.pdf>
26. Ochoa, S., Saldarriaga, J. G., Ñañez, P., & Galvis, C. (Noviembre de 2010). Diseño optimizado de redes de distribución de agua potable mediante la superficie óptima de gradiente hidráulico. Punta del Este, XXIV Congreso latinoamericano de hidráulica, Uruguay.
27. Pareto, V. (1986). Cours D'Economie Politique. I,II. Rouge,Lausanne.
28. Peña, J. J. (2002). Desarrollo de un Applet del Micro Algoritmo Genético Usando Optimización Multiobjetivo (Tesis de Pregrado). Mérida, Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán.
29. Pino, E., & Alfaro, L. (2013). "Propuesta de actualización Norma RNE OS 050 para el Diseño óptimo de redes de agua para consumo humano". IV Congreso Nacional del Agua, Lima.

30. Poma Solano, R. G. (2015). Diseño y construcción de un banco de ensayo para el estudio de pérdidas de carga por fricción y singularidad (Tesis de Pregrado). Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina.
31. Potti, S., & Chitra, C. (2011). Strength Pareto Evolutionary Algorithm based Multi-Objective Optimization for Shortest Path Routing Problem in Computer Networks. *Journal of Computer Science*, 7(1), 17-26.
32. Rodríguez, K., Fuentes, O. A., Jiménez, M. R., & De Luna, F. (2006). Diseño Óptimo de Redes de distribución de Agua Potable utilizando un algoritmo genético multiobjetivo. João Pessoa, VI SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Água, Brasil.
33. Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías*. Bogotá: Alfaomega.
34. Saldarriaga, J., Takahashi, Hernández, F., & Escovar, M. A. (2010). Diseño optimizado de sistemas de distribución de agua: Una perspectiva. *Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 226, 28-39.
35. Selección de electrobomba sumergible para pozo profundo aplicando al proyecto de riego de áreas verdes distrito de Pachacámac (Tesis de Pregrado). (2014). Lima, Universidad Nacional de San Marcos, Perú.
36. Soltero, F. (2014). Aplicaciones de los algoritmos evolutivos al análisis de procesos económicos (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
37. Sotelo, A., & Barán, B. (2001). Optimización de los costos de bombeo en sistemas de suministro de agua mediante un algoritmo evolutivo multiobjetivo combinado. Universidad Nacional de Asunción.
38. Sotelo, A., Basulado, J., Doldán, P., & Barán, B. (2001). Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo Combinados para la Optimización de la Programación de Bombeo en Sistemas de Suministro de Agua. Universidad Nacional de Asunción.
39. Talavera Solalinde, F. (2005). Comparación de algoritmos evolutivo multi-objetivos en un ambiente multicast (Tesis de Pregrado). Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción , Paraguay.

40. Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*.
41. Torres Martínez, S. A. (2011). Optimización del índice de Resiliencia y uniformización de la Presión como criterios para renovar tuberías en redes de distribución de acueductos (Tesis de Pregrado). Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
42. Toscano, G. (2001). Optimización multiobjetivo usando un micro algoritmo genético. Veracruz, Universidad Veracruzana-LANIA, México.
43. Túpac Valdivia, Y. J. (2011). Algoritmos Evolutivos en Optimización Multiobjetivos (MOEA). Tacna, Universidad Católica San Pablo , Perú.
44. Urzúa, M. G., Melillanca, E. T., Gálvez, P. G., & Caamaño, G. P. (2014). Optimización de portafolios accionarios a través de un micro algoritmo genético. *Industrial Data*, 10(2), 012-020. Obtenido de <https://doi.org/10.15381/idata.v10i2.6357>
45. Valle Castro, 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 Pregrado). Tacna, Perú.
46. Valle, A. & Pino, E. (2017). Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Usando Un Software Basado en Microalgoritmos Genéticos Multiobjetivos. *RIBAGUA-Revista Iberoamericana del Agua-Elsevier*.doi:10.1080/23863781.2017.1317087
47. Villalba Fernández de Castro, G., & Saldarriaga, J. G. (2005). Algorithms of Combinatorial Optimization for the design of water distribution networks. *Revista de Ingeniería*,(22), 118-125.
48. Villalba, G., & Saldarriaga, J. (2005). Algoritmos de Optimización Combinatoria (AOC) aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable. *Revista de Ingeniería*(22), 118-125.
49. Yates, D. F., Templeman, A. B., & Boffey, T. B. (1984). The computational complexity of the problem of determining least capital cost designs for water supply networks. *Engg. Optimization*, 7(2), 142-155.

50. Zitzler, E., & Thiele, L. (1999). Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(4).
51. Zitzler, E., Deb, K., & Thiele, L. (2000). "Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results. *Evolutionary Computation*, 8, 173-195.
52. Zitzler, K., & Thiele, L. (2000). Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results. *Evolutionary Computation*, 8, 173-195.

## 9 ANEXOS

---

Anexo 01: Código Fuente del Método Gradiente– Matlab R2012

NumIndividuos =1; *%Determinación del N° de individuos o redes posibles*

NumTuberias =139; *%Ingresar N° de tuberías de red configurada*

```
LongitudT= [353.98 426.62 308.48 487.19 563.69 19.64 208.61 211.23 524.28
370.91 21.81 24.81 374.33 25.1 397.19 429.96 25.5 25.85 433.75 24.33
282.69 282.17 414.12 89.94 162.74 27.21 25.51 412.55 418.11 487.13 27.61
416.73 25.07 417.16 357.02 374.81 417.2 24.71 452.56 541.75 534.02 437.71
24.38 23.82 437.64 24 398.23 398.03 25.76 22.63 438.99 23.57 21.5 439.01
364.18 285.88 117.34 364.4 161.98 393.05 24 23.93 813.04 532.68 24.1 598.69
24.1 438 363.83 364.07 483 20 483 24 389.97 389.97 483 363.61 24.11 407.26
365.94 24 415 24 415 24 389.97 389.97 24 24.48 338.14 20.48 411.98 25.89
324.69 24 154.45 455.37 24 362.78 26.09 24.53 23.83 375.23 379.94 323.91
23.9 498.71 20.76 545.77 273.7 98.34 462.12 24 24 273.7 398.34 397.71
273.7 27.04 398.14 398.14 273.7 224.45 209.02 24 376.94 498.25 24.92 377.57
498.25 327.74 328.64 400.84 363.83 415 411.77 389.97 273.7];
```

*% Vector de longitudes de las tuberías de la red configurada*

NumNudos=91; *%Ingresar N° de nodos de red configurada*

```
Demanda = 0.001*[0 0 0 0 0 0 0.46 0.46 2.2 1.76 1.36 1.55 1.61 1.71
1.64 1.62 1.86 0.7 0.7 1.57 2.5 3.36 2.08 2.34 1.97 2.37 1.58 1.97
3.18 2.7 3.23 3.7 2.32 2.32 3.38 2.3 1.99 1.9 1.9 1.9 1.07 0.62 2.32 15.16
6.76 2.37 2.45 2.83 2.05 1.9 1.99 3.29 1.81 1.91 1.86 1.76 2.66
2.46 2.09 1.82 1.83 1.66 1.56 2.04 0 1.54 2.23 3.88 1.26 3.84
1.45 1.23 0.19 1.74 1.2 2.22 1.2 1.05 2.96 1.05 2.02 1.46 1.62 2.62
2.57 1.67 1.53 3.18 2.2 1.34 2.7];
```

*% Vector de demandas (caudales de consumo) en los nodos*

```

Cotas=[483.91 468.35 468.73 466.74 462 460.24 467.27 463.12 457.76 459.04
469 469 459.05 458.43 469.08 469 458.11 456.23 457.53 466.77 466.5 457.32
453.8 462.2 461.91 453.55 448.57 456.01 456.94 413.8 445.81 446.97 458.56
458.45 446.78 446.52 457.6 457.64 446.62 444 452.81 455.47 415.21 452.81
443.3 438.86 429.28 431.95 432.26 443.45 445.83 434.64 434.12 422.9 421.69
431.86 431.45 421.38 418.83 428.82 428.36 418.76 416.2 425.8 426.18 415.66
403.94 431.32 409 446.3 418.3 418.3 425.77 409.63 417.46 425.16 420.84 455
445 454 443.97 445.74 443.26 445.17 435.42 433.67 433.03 434.73 424.96 423.01
422.36];

```

```
format bank
```

```
%Método del gradiente
```

```
RS=1;%Número de reservorios
```

```
%Matriz de conectividad de la red de agua potable
```

```

%-----
% MC=[-1 1 0 0 0 0
% 0 -1 1 0 0 0
% 0 0 0 1 -1 0
% 0 0 0 1 -1 0
% 0 -1 0 0 1 0
% 0 0 0 0 1 -1
% -1 0 0 0 0 1];

```

```
format bank
```

```
Qi=0.1*ones(NumTuberias,1);% Se asumen caudales
```

```
Longitud=LongitudT';
```

```
Mfriccion=zeros(NumTuberias,NumIndividuos);
```

```
Malfa=zeros(NumTuberias,NumIndividuos);
```

```
H11=zeros(NumTuberias,NumIndividuos);
```

```
A11=zeros(NumTuberias,NumIndividuos);
```

```
MQ=zeros(NumTuberias,NumIndividuos);
```

```
HF=zeros(NumTuberias,NumIndividuos);
```

```

ALTURASPIEZOMETRICAS=zeros(NumNudos,NumIndividuos);
%Se generan matrices de tamaño predefinido

for z=1:NumIndividuos;
for up=1:50;
for i=1:NumTuberias
 %empieza coolebrook-White.
 D=Diametrosl(i)/1000;
 Q=abs((Qi(i,1)));

 vs=1.14*10^-6;
 E=0.0015;
 Reynold=(4*Q/(pi*D*vs));
 tol=100;

 friccion=0.001375*(1+(2000*E/(D*1000)+1000000.0/Reynold)^0.333333333);

 if (Reynold<=2000)
 friccion = 64/Reynold;
 else

 while tol>=0.000001;
 LHS=1/((friccion)^(1/2));
 RHS=-2*log10((E/(3.71*D*1000))+2.51/(Reynold*(friccion)^(1/2)));
 friccion=(1/RHS)^2;
 tol=abs(LHS-RHS);
 end
 end
end

% Cálculo de las matrices Malfa Y A11, se deberán usar los caudales en valor absoluto
Malfa(i,1)=(friccion*(Longitud(i,1)/D)*((Q/((pi*(D)^2)/4))^2*(1/(2*9.81)))/(Q)^2;
Mfriccion(i,1)=friccion;
A11(i,i)=(friccion*(Longitud(i,1)/D)*((Q/((pi*(D)^2)/4))^2*(1/(2*9.81)))/(Q);

end

```

```

A12=MC(1:NumTuberias,RS+1:NumNudos);
A21=MC(1:NumTuberias,RS+1:NumNudos)';
A10=MC(1:NumTuberias,1:RS);
Q1=Qi;

Ho=Cotas(1:RS,1:RS);
Qo=Demanda';
q=Qo(RS+1:NumNudos);
Hnuevos=-
inv(A21*inv(2*eye(NumTuberias,NumTuberias)*A11)*A12)*(A21*inv(2*eye(NumTuberias,NumTuberias)*A11)*(A11*Q1+A10*Ho)-(A21*Q1-q));
Qnuevos=(eye(NumTuberias,NumTuberias)-
inv(2*eye(NumTuberias,NumTuberias)*A11)*A11)*Q1-
(inv(2*eye(NumTuberias,NumTuberias)*A11)*(A12*Hnuevos+A10*Ho));

Qi=Qnuevos;

end %fin del cálculo de la red.

PERDIDA=A11*Qnuevos;% modificar la posición de este individuo

for ordenador=1:NumTuberias;
MQ(ordenador,z)=Qnuevos(ordenador,1);
HF(ordenador,z)=PERDIDA(ordenador,1);
end
for ordenador=2:NumNudos;
ALTURASPIEZOMETRICAS(1,z)=Cotas(1,1);
ALTURASPIEZOMETRICAS(ordenador,z)=Hnuevos(ordenador-1,1);
end
end

%Cálculo de las velocidades para cada individuo en unidades m/s.

```

```
MVEL=zeros(NumTuberias,NumIndividuos);
for q=1:NumIndividuos;
 for y=1:NumTuberias;

 MVEL(y,q)=abs(MQ(y,q))/(3.141592*((DiametrosI(q,y)/1000)^2)/4);

 end
end
```

Anexo 02 : Código Fuente de la Función Objetivo Costo – Matlab R2012

```
inputDiametros = Diametros!;

AcumuladorCosto = 0;
for i=1:NumTuberias;
 AcumuladorCosto = AcumuladorCosto + 0.01*(inputDiametros(i)^1.6948)*
Longitud(i);
end
resultCosto = AcumuladorCosto;
```

## Anexo 03: Código Fuente de la Función Objetivo de Confiabilidad – Matlab R2012

```
OM1 = 0;
OM2 = 0;
OM3 = 0;
ce = 0.60;
DemandaTotal = 0;

inputAlturaPiezo=ALTURASPIEZOMETRICAS;
for i=2:NumNudos;
 OM1 = OM1 + Demanda(i)*(inputAlturaPiezo(i) - (Cotas(i) +10));
 OM2 = OM2 + Demanda(i)*(Cotas(i) +10);
 DemandaTotal = DemandaTotal + Demanda(i);
end

OM3 = OM3 + DemandaTotal*Cotas(1);

resultConfiabilidad = ce*(OM1/(OM3-OM2));

if resultConfiabilidad<0
 resultConfiabilidad=0;
end
```

Anexo 04: Código Fuente de Algoritmo Genético – Matlab R2012

```
clear all
```

```
clc
```

```
GradienteVinani
```

```
UniversoDiam=[83.4 102 129.8 148.4 185.4 231.8 292.2 329.2];
```

```
NumUniversoDiam=8;
```

```
for i=1:16
```

```
 for j=1:NumTuberias
```

```
 DiamPt(i,j)=UniversoDiam(round(rand()*(NumUniversoDiam-1) +1));
```

```
 end
```

```
end
```

```
[NumPt,NumCol]=size(DiamPt);
```

```
for k=1:NumPt
```

```
 DiametrosI=DiamPt(k,:);
```

```
 MetodoGradiente
```

```
 calcCosto
```

```
 calcConfiabilidad
```

```
 ObjetivosPt(k,1)=resultConfiabilidad;
```

```
 ObjetivosPt(k,2)=resultCosto;
```

```
end
```

```
[OrdObjPt,ordenPt] = sort(ObjetivosPt(:,2));
```

```

OrdObjPt = [ObjetivosPt(ordenPt) OrdObjPt];

contadorPtE=0;
contadorDominado=0;
for k=1:NumPt-1
 for j=1:NumPt-k
 if OrdObjPt(j,1)>OrdObjPt(NumPt-k+1,1)
 contadorDominado=contadorDominado+1;
 end
 end
 if contadorDominado==0
 contadorPtE=contadorPtE+1;
 DiamPtE(contadorPtE,:)=DiamPt(ordenPt(NumPt-k+1),:);
 numeracionEliminar(contadorPtE)=ordenPt(NumPt-k+1);
 end
 contadorDominado=0;
end

 contadorPtE=contadorPtE+1;
 DiamPtE(contadorPtE,:)=DiamPt(ordenPt(1),:);
 numeracionEliminar(contadorPtE)=ordenPt(1);

DiamPt(numeracionEliminar,:)=[];
ObjetivosPt(numeracionEliminar,:)=[];

NumPtE=contadorPtE;
NumPt=NumPt-NumPtE;
for k=1:NumPtE
 DiametrosI=DiamPtE(k,:);

 MetodoGradiente

```

```
 calcCosto
 calcConfiabilidad

 ObjetivosPtE(k,1)=resultConfiabilidad;
 ObjetivosPtE(k,2)=resultCosto;
end

Strength=zeros(NumPtE,NumPt);

for k=1:NumPtE
 for m=1:NumPt
 if ObjetivosPtE(k,1)>ObjetivosPt(m,1) & ObjetivosPtE(k,2)<ObjetivosPt(m,2)
 Strength(k,m)=1;
 end
 end
end

for k=1:NumPtE
 contporfilas=0;
 for m=1:NumPt
 if Strength(k,m)==1
 contporfilas=contporfilas+1;
 end
 end
 StrengthPtE(k)=contporfilas/(NumPt+1);
end

for k=1:NumPt
 acumSi=0;
```

```

for m=1:NumPtE
 if Strength(m,k)==1
 acumSi=acumSi+Strength(m);
 end
end
StrengthPt(k)=1+acumSi;
end

DiamSeleccion=[DiamPt;DiamPtE];
if NumPt==0
 StrengthSeleccion=[StrengthPtE];
else
 StrengthSeleccion=[StrengthPt, StrengthPtE];
end

numeroTorneos=4;
for k=1:numeroTorneos
 posiblePadre01=round(rand()*(NumPt+NumPtE-1)+1);
 posiblePadre02=round(rand()*(NumPt+NumPtE-1)+1);
 if StrengthSeleccion(posiblePadre01)>=StrengthSeleccion(posiblePadre02)
 DiamPadres(k,:)=DiamSeleccion(posiblePadre01,:);
 else
 DiamPadres(k,:)=DiamSeleccion(posiblePadre02,:);
 end
end

numeroHijos=4;
for k=1:numeroHijos
 Padre01=round(rand()*(numeroTorneos-1)+1);
 Padre02=round(rand()*(numeroTorneos-1)+1);

```

```

PuntoDeCruce=round(rand()*(NumTuberias-1)+1);
Cromosomas01=DiamPadres(Padre01,:);
Cromosomas02=DiamPadres(Padre02,:);

PoblacionNueva(k,:)=[Cromosomas01(1:PuntoDeCruce),Cromosomas02(PuntoDeCruce+1:NumTuberias)];

end

for k=1:numeroHijos
 DiametrosI=PoblacionNueva(k,:);

 MetodoGradiente

 calcCosto
 calcConfiabilidad

 ObjetivosPobNueva(k,1)=1-resultConfiabilidad;
 ObjetivosPobNueva(k,2)=resultCosto;
end

PoblacionNueva
ObjetivosPobNueva
clear ObjetivosPt
clear ObjetivosPtE
clear OrdObjPt
clear ObjetivosPobNueva
clear posiblePadre02
clear posiblePadre01
clear ordenPt

```

```
clear numeracionEliminar
clear StrengthSeleccion
clear StrengthPt
clear StrengthPtE
Strength

DiamPt=PoblacionNueva
[NumPt,NumCol]=size(DiamPt);

for k=1:NumPt
 DiametrosI=DiamPt(k,:);

 MetodoGradiente

 calcCosto
 calcConfiabilidad

 ObjetivosPt(k,1)=resultConfiabilidad;
 ObjetivosPt(k,2)=resultCosto;
end

[OrdObjPt,ordenPt] = sort(ObjetivosPt(:,2));
OrdObjPt = [ObjetivosPt(ordenPt) OrdObjPt];

contadorPtE=0;
contadorDominado=0;
for k=1:NumPt-1
 for j=1:NumPt-k
 if OrdObjPt(j,1)>OrdObjPt(NumPt-k+1,1)
 contadorDominado=contadorDominado+1;
 end
 end
end
```

```

 end
end
if contadorDominado==0
 contadorPtE=contadorPtE+1;
 DiamPtE(NumPtE+contadorPtE,:)=DiamPt(ordenPt(NumPt-k+1),:);
 numeracionEliminar(contadorPtE)=ordenPt(NumPt-k+1);
end
contadorDominado=0;
end

```

```

 contadorPtE=contadorPtE+1;
 DiamPtE(NumPtE+contadorPtE,:)=DiamPt(ordenPt(1),:);
 numeracionEliminar(contadorPtE)=ordenPt(1);

```

```

DiamPt(numeracionEliminar,:)=[];
ObjetivosPt(numeracionEliminar,:)=[];

```

```

NumPtE=NumPtE+contadorPtE;
NumPt=NumPt-contadorPtE;
for k=1:NumPtE
 DiametrosI=DiamPtE(k,:);

```

MetodoGradiente

```

calcCosto
calcConfiabilidad

```

```
ObjetivosPtE(k,1)=resultConfiabilidad;
ObjetivosPtE(k,2)=resultCosto;
end
```

```
Strength=zeros(NumPtE,NumPt);
```

```
for k=1:NumPtE
 for m=1:NumPt
 if ObjetivosPtE(k,1)>ObjetivosPt(m,1) & ObjetivosPtE(k,2)<ObjetivosPt(m,2)
 Strength(k,m)=1;
 end
 end
end
```

```
for k=1:NumPtE
 contporfilas=0;
 for m=1:NumPt
 if Strength(k,m)==1
 contporfilas=contporfilas+1;
 end
 end
 StrengthPtE(k)=contporfilas/(NumPt+1);
```

```
end
```

```
for k=1:NumPt
 acumSi=0;
 for m=1:NumPtE
 if Strength(m,k)==1
 acumSi=acumSi+Strength(m);
 end
```

```

 end
 StrengthPt(k)=1+acumSi;
end

DiamSeleccion=[DiamPt;DiamPtE];
if NumPt==0
 StrengthSeleccion=[StrengthPtE];
else
 StrengthSeleccion=[StrengthPt, StrengthPtE];
end

numeroTorneos=4;
for k=1:numeroTorneos
 posiblePadre01=round(rand()*(NumPt+NumPtE-1)+1);
 posiblePadre02=round(rand()*(NumPt+NumPtE-1)+1);
 if StrengthSeleccion(posiblePadre01)>=StrengthSeleccion(posiblePadre02)
 DiamPadres(k,:)=DiamSeleccion(posiblePadre01,:);
 else
 DiamPadres(k,:)=DiamSeleccion(posiblePadre02,:);
 end
end

numeroHijos=4;
for k=1:numeroHijos
 Padre01=round(rand()*(numeroTorneos-1)+1);
 Padre02=round(rand()*(numeroTorneos-1)+1);

 PuntoDeCruce=round(rand()*(NumTuberias-1)+1);
 Cromosomas01=DiamPadres(Padre01,:);
 Cromosomas02=DiamPadres(Padre02,:);

```

```
PoblacionNueva(k,:)= [Cromosomas01(1:PuntoDeCruce),Cromosomas02(PuntoDeCruce+1:NumTuberias)];
```

```
end
```

```
for k=1:numeroHijos
```

```
 DiametrosI=PoblacionNueva(k,:);
```

```
 MetodoGradiente
```

```
 calcCosto
```

```
 calcConfiabilidad
```

```
 ObjetivosPobNueva(k,1)=1-resultConfiabilidad;
```

```
 ObjetivosPobNueva(k,2)=resultCosto;
```

```
end
```

```
PoblacionNueva
```

```
ObjetivosPobNueva
```