



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA**

**DIMENSIONAMIENTO DE SECTORES HIDROMÉTRICOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE  
AGUA POTABLE**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**ING. MANUEL J. PALOMO CANDILA**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DR. CARLOS E. MARIANO ROMERO**  
**INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍAS DEL AGUA**

**JIUTEPEC, MORELOS, MAYO 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. FRANCISCO JAVIER APARICIO MIJARES

Secretario: DR. VÍCTOR MANUEL ARROYO CORREA

Vocal: DR. CARLOS E. MARIANO ROMERO

1<sup>er</sup>. Suplente: M.I. JOSÉ MANUEL RODRÍGUEZ VARELA

2<sup>d o</sup>. Suplente: DR. EDMUNDO PEDROZA GONZÁLEZ

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA  
JIUTEPEC, MORELOS.

**TUTOR DE TESIS:**

DR. CARLOS E. MARIANO ROMERO

---

**FIRMA**

*He creído, creo y creeré...*  
*Que los tiempos de Dios son Perfectos.*  
*Eclesiastés, 3:11.*

*Nunca te canses de hacer el bien,*  
*Porque aquél que da sin esperar nada a cambio,*  
*Todo lo que siembra un día lo cosechara en abundancia.*  
*Anónimo*

*Hay una fuerza motriz más poderosa*  
*Que el vapor, la electricidad y la energía atómica:*  
*La voluntad humana.*  
*Albert Einstein.*

*Son nuestras decisiones las que muestran lo que podemos llegar a ser;*  
*Mucho más que nuestras propias habilidades.*  
*J.K.R.*

## *Dedicatoria*

*A Dios que obra y cumple en mí sus propósitos. A Él que le debo todo, la vida, sus bendiciones, la fortaleza y fe que en todo momento me hacen ser mejor cada día.*

*A ese ser maravilloso que me dio la vida, guerrera incansable y mi ejemplo a seguir, mi madre. A quién nunca me bastará la vida para agradecerle su apoyo, alegrías y amor.*

*A mi señor padre y mis hermanas, quienes también han estado en todo momento de mi vida para brindar su cariño y consejo.*

*A esas dos personas que se adelantaron y que sin duda dejaron huella en la persona que soy.*

*Por último y no menos importante, a la mujer de vida. A esa mujer que cambio mi vida y que a su lado he tenido los mejores aprendizajes y momentos de la vida. Te amo, Nadia.*

## **Agradecimientos.**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado durante esta etapa de estudios. Que me brindó la oportunidad de poder lograr esta meta.

A la unidad de Posgrado del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), cuyos académicos e investigadores de la mano con Universidad Autónoma Nacional de México, colaboraron en mi formación; Personas de gran compromiso con la investigación y apasionadas por contribuir con México a la solución de los problemas que enfrenta nuestro ramo, la hidráulica.

A mi director de tesis, el Dr. Carlos E. Mariano Romero. A quién sus consejos académicos y profesionales, así como su paciencia y guía contribuyeron enormemente a este trabajo de investigación. Por su visión y perspectiva en el ramo, de gran ayuda personal a quién se apoya en él.

A mi Comité de Titulación, por su tiempo y conocimiento que ayudaron a enriquecer este trabajo:

Dr. F. Javier Aparicio Mijares

Dr. Víctor M. Arroyo Correa

M.I. José M. Rodríguez Varela

Dr. Edmundo Pedroza González.

A la Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (CEA Querétaro), por brindar las facilidades técnicas en el caso de estudio utilizado para esta investigación y contribuir con mis conocimientos del ramo.

A mis compañeros y amigos del Posgrado UNAM-IMTA, que de algún modo u otro han contribuido en este logro, en especial al Ing. Marco A. Jiménez López, al Ing. Juan C. Alvarado, al Ing. José M. López y al Ing. Álvaro Romero, grandes seres humanos y amigos.



## INDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	9
Justificación y alcances. ....	13
Hipótesis.....	14
Objetivo General .....	14
Estructuración de la Tesis .....	15
<b>CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES</b> .....	16
<b>CAPÍTULO 3. MARCO TEORICO</b> .....	25
3.1. Algoritmos Genéticos (AG). ....	25
3. 2. Recocido Simulado (RS). ....	31
3. 3. Fundamentación Hidráulica .....	34
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA</b> .....	37
4.1. Adaptación del Algoritmo Genético (AG).....	38
4.1.1. Variables de ingreso. ....	38
4.1.2. Solución Inicial. ....	39
4.1.3. Evaluación de la solución inicial.....	39
4.1.4. Formación de la Generación 1 (Padres) .....	44
4.1.5. Fase Reproductiva .....	48
4.1.6. Continuación del proceso iterativo.....	49
4.1.7. Solución final .....	50
4.2. Adaptación del Recocido Simulado (RS).....	51
4.2.1. Variables de ingreso .....	51
4.2.2. Solución Inicial. ....	51
4.2.3. Evaluación de la solución.....	52
4.2.4. Aplicación del recocido.....	53
4.2.5. Solución final .....	54
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS</b> .....	56
5. 1. RDAP del Frac. Villas del Sol, Pátzcuaro, Michoacán. ....	58
5.1.1. Algoritmo Genético Red 32n. ....	61
5.1.2. Recocido Simulado (RS).....	65
5. 1. 3. Análisis y comentarios de la Red 32n .....	67
5. 2. Red de Distribución CEA Querétaro.....	72
5.2.2. Recocido Simulado Red CEA .....	76
5.2.3. Análisis y comentarios Red CEA.....	78
5. 3. Red CEA simplificada.....	81
5. 4. Dimensionamiento de Sectores. ....	85
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS</b> .....	88
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	93
<b>ANEXO A</b> .....	97



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Operador de cruza en un punto.....	28	
<b>Figura 2.</b> Operador de mutación .....	28	
<b>Figura 3.</b> Representación de una red con nodo inicial 1 y nodo final 5 .....	29	
<b>Figura 4.</b> Ejemplo de la aplicación de la mutación propuesta.....	31	
<b>Figura 5.</b> Reestructuración molecular de un material férreo al aplicársele un proceso de recocido .....	32	
<b>Figura 6.</b> Curva de enfriamiento del acero.....	32	
<b>Figura 7.</b> Diferencia entre óptimo global y local de una función.....	33	
<b>Figura 8.</b> Formación de la primera generación .....	39	
<b>Figura 9.A.</b> Desensamble de un individuo	<b>Figura 9.B.</b> Matriz de un individuo .....	40
<b>Figura 10.</b> Análisis y desensamble del caso 1 del AG .....	41	
<b>Figura 11.</b> Análisis y desensamble del caso 2 del AG .....	42	
<b>Figura 12.</b> Análisis y recorrido del Caso 3 del AG.....	42	
<b>Figura 13.</b> Determinación de la aptitud de un individuo.....	43	
<b>Figura 14.</b> Ordenamiento de individuos.....	46	
<b>Figura 15.</b> Proceso de selección de padres preliminares.....	48	
<b>Figura 16.</b> Formación de padres definitivos .....	48	
<b>Figura 17.</b> Proceso de mutación de un individuo.....	49	
<b>Figura 18.</b> Diagrama de flujo del AG .....	50	
<b>Figura 19.</b> Formación de la cadena molecular .....	52	
<b>Figura 20.</b> Generación de la nueva solución .....	53	
<b>Figura 21.</b> Análisis y desensamble del caso 1 para el RS .....	54	
<b>Figura 22.</b> Análisis y desensamble del caso 2 para el RS .....	54	
<b>Figura 23.</b> Análisis y recorrido del Caso 3 para el RS .....	54	
<b>Figura 24.</b> Imagen satelital de la ubicación de la Red 32n (Frac. Villas del Sol, Pátzcuaro, Mich.) .....	59	
<b>Figura 25.</b> Grafica de los resultados obtenidos por el AG para el caso 1. ....	62	
<b>Figura 26.</b> Grafica de los resultados obtenidos por el AG para el caso 2. ....	63	
<b>Figura 27.</b> Grafica de los resultados obtenidos por el AG para el caso 3. ....	64	
<b>Figura 28.</b> Grafica de los resultados obtenidos por el AG para el caso 4. ....	64	
<b>Figura 29.</b> Grafica de los resultados obtenidos por el RS para el caso 1 .....	65	
<b>Figura 30.</b> Grafica de los resultados obtenidos por el RS para el caso 2 .....	66	
<b>Figura 31.</b> Grafica de los resultados obtenidos por el RS para el caso 3 .....	66	
<b>Figura 32.</b> Grafica de los resultados obtenidos por el RS para el caso 4 .....	66	
<b>Figura 33.</b> Desglose de la selección de las 24 soluciones obtenidas.....	69	
<b>Figura 34.</b> Imagen satelital de la zona de análisis comprendida para la Red CEA .....	74	
<b>Figura 35.</b> Visualización en ArcGis de la información proporcionada de la Red CEA.....	74	
<b>Figura 36.</b> Grafica de resultados obtenidos por el AG para la Red CEA.....	75	
<b>Figura 37.</b> Imagen ilustrativa de la conectividad propuesta por el AG para el caso 4 con la Red CEA ..	76	
<b>Figura 38.</b> Grafica de resultados obtenidos por el RS para la Red CEA .....	77	
<b>Figura 39.</b> Imagen ilustrativa de la conectividad propuesta por el RS para el caso 4 con la Red CEA...	77	
<b>Figura 40.</b> Simplificación de la Red CEA por conjuntos habitacionales .....	81	
<b>Figura 41.</b> Conectividad de nodos propuesta en una solución del caso 3 con el AG.....	83	
<b>Figura 42.</b> Conectividad de nodos propuesta en una solución del caso 1 con el RS.....	84	
<b>Figura 43.</b> Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el AG para el caso 1 ....	97	
<b>Figura 44.</b> Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el AG para el caso 2 ...	97	





- Figura 45.** Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el AG para el caso 3 ...97  
**Figura 46.** Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el AG para el caso 4 ...98  
**Figura 47.** Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el RS para el caso 1 ....98  
**Figura 48.** Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el RS para el caso 2 ....98  
**Figura 49.** Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el RS para el caso 3 ....99  
**Figura 50.** Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el RS para el caso 4 ....99

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Desglose de la nomenclatura utilizada para la presentación de los resultados.....	51
<b>Tabla 2.</b> Definición de la amplitud de búsqueda a utilizar por los algoritmos.....	56
<b>Tabla 3.</b> Definición de las condiciones límite para la formación de sectores .....	57
<b>Tabla 4.</b> Valores nodales de la Red 32n.....	59
<b>Tabla 5.</b> Valores y conectividad de las tuberías de la Red 32n.....	60
<b>Tabla 6.</b> Resumen de resultados caso 1 (AG).....	62
<b>Tabla 7.</b> Tiempo de computo caso 1 (AG).....	63
<b>Tabla 8.</b> Resumen de resultados casos 2 al 4 (AG).....	64
<b>Tabla 9.</b> Tiempo de computo casos del 2 al 4 (AG).....	64
<b>Tabla 10.</b> Resumen de resultados obtenidos con el RS (Red 32n).....	67
<b>Tabla 11.</b> Concentrado de los grados de confiabilidad para la Red 32n .....	68
<b>Tabla 12.</b> Porcentajes de dispersión de los resultados obtenidos por el AG .....	70
<b>Tabla 13.</b> Porcentajes de dispersión de los resultados obtenidos por el RS .....	71
<b>Tabla 14.</b> Amplitudes de búsqueda para Red CEA.....	73
<b>Tabla 15.</b> Resumen de resultados obtenidos con el AG (Red CEA).....	75
<b>Tabla 16.</b> Resumen de resultados obtenidos con el RS (Red CEA).....	77
<b>Tabla 17.</b> Valor promedio de los parámetros hidráulicos en las soluciones obtenidas para la Red CEA 80	
<b>Tabla 18.</b> Valores nodales de la Red CEA simplificada .....	82
<b>Tabla 19.</b> Valores y conectividad de las tuberías (Red CEA simplificada) .....	82
<b>Tabla 20.</b> Resumen de los resultados obtenidos con la Red CEA simplificada por ambos algoritmos ...	83
<b>Tabla 21.</b> Formación de los rangos (tamaños) de sectores.....	86



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La utilización irracional, el desperdicio, la contaminación y deficiente administración de las fuentes de abastecimiento de agua para uso público urbano han ocasionado que muchas de las fuentes de abastecimiento estén sobreexplotadas. La consecuencia de la sobreexplotación es la baja disponibilidad de agua, situación que empeora en función del crecimiento demográfico y la deficiente administración y operación de los sistemas de distribución operados en la actualidad (Toxky, G., 2012).

Es por lo anterior que, constantemente los prestadores de servicio de agua potable afrontan la necesidad de incorporar nuevas fuentes de abastecimiento que permitan incrementar la disponibilidad de agua o invertir en infraestructura para satisfacer las necesidades de consumo de agua actuales (Toxky, G., 2012). Sumándole a lo anterior, la reducción de ingresos al prestador debido a las pérdidas no cuantificadas o fugas en la infraestructura de distribución, mismas que originan que cada vez sea más complicado brindar un servicio de calidad y aun costo accesible para los usuarios.

Hoy en día la sectorización surge como una alternativa viable para facilitar la operación de una red de distribución, ésta se concibe como la conformación de zonas de servicio a través de la conjunción de conexiones de servicio, todas ellas abastecidas desde puntos de control cuantificables de manera independiente, donde cada conjunto de conexiones se le denomina sector hidrométrico, que en otros textos se le puede definir también como distrito hidrométrico (CONAGUA, 2006).

La sectorización permite un mayor control y cuantificación de los volúmenes de agua suministrados, consumidos y perdidos en el sistema, facilitando de esta manera la identificación, reducción e inclusive la eliminación de las pérdidas de agua, teniendo por consecuencia una reducción en los costos de mantenimiento y operación del sistema. La sectorización es útil para homogeneizar las condiciones topológicas (elevación, tuberías, etc.) y/o de operación (demandas, presiones, etc.) de un sector (Vegas, O., 2012), (Fragoso et. al. 2014).

Otro de los beneficios que se le atribuyen a la sectorización, es el aislamiento de los distintos distritos hidrométricos cuando se requiere realizar reparaciones y/o mantenimiento a la red de



distribución, esto debido a que por definición cada uno de ellos cuenta con una única entrada y salida de caudal, por tal motivo, se puede suspender el suministro de agua a los usuarios de dicho distrito sin perjudicar al resto de los usuarios de la red.

Sin embargo, uno de los retos con los que actualmente se enfrentan los especialistas en el área de la hidráulica urbana es la definición del tamaño de los sectores hidrométricos, pues su definición implica la búsqueda de un valor óptimo entre los costos de inversión requeridos para realizar los seccionamientos, sistemas de medición necesarios para el control de los sectores hidrométricos y, el tamaño que permita un adecuado control y operación de los volúmenes de agua suministrados.

Tradicionalmente este dimensionamiento se ha realizado mediante procedimientos empíricos de prueba y error, donde más que seguir un rigor científico-técnico este procedimiento está basado en la experiencia profesional-técnica del diseñador/operador de la red y, en la mayoría de las veces acobijados por los modelos de simulación hidráulica. Para redes pequeñas este procedimiento podría resultar adecuado, sin embargo, la complejidad aumentará conforme la red sea de mayor tamaño y por tanto la cantidad de información a manipular, haciendo inviable realizar una ejecución de este modo sin utilizar herramientas informáticas (Fragoso et. al. 2014), (Campbell E., 2013), (Izquierdo et. al. 2008).

Otro problema que se tiene en el dimensionamiento de sectores es la selección del criterio con el que se llevará a cabo la división de la red ya que, oficialmente no existen instrucciones claras que establezcan un procedimiento adecuado para llevar a cabo un proceso de sectorización. Por tal motivo, varios de los criterios que se han manejado actualmente están relacionados con la topología de la red, como el número de conexiones de servicio o longitud de tuberías, o parámetros hidráulicos de diseño como son la demanda y la presión de operación (Vegas, O., 2012), (Fragoso et. al. 2014), (Campbell E., 2013).

Por esos motivos se puede decir que, el factor económico, la eficiencia hidráulica y la viabilidad técnica son las condiciones que en su combinación determinan el tamaño de los sectores hidrométricos. Entonces, una propuesta de sectorización debe buscar generar la menor cantidad de



sectores, todos ellos con sus respectivas válvulas de corte y medidores, lo que se concreta en los costos de inversión, maximizando la calidad en el servicio (volúmenes suministrados con la presión adecuada para los usuarios de la red).

Este planteamiento nos lleva a pensar que el dimensionamiento de sectores hidrométricos debe verse como un problema de optimización no lineal, ya que:

- Por un lado, el análisis del comportamiento hidráulico y/o diseño de una red es un problema no lineal, esto debido a que existe una dependencia entre las variables hidráulicas, cuya complejidad aumenta conforme el tamaño de la red sea mayor.
- A su vez, el dimensionamiento de sectores se debe ver como un problema de optimización cuyas restricciones estarán en función de criterios de dimensionamiento y las características propias de la red.

En las últimas décadas, se han realizado algunos esfuerzos por dar una solución al problema de optimización de sectores hidrométricos, que buscan automatizar la división de una Red de Agua Potable (RDAP) con un enfoque basado en criterios científicos y técnicos y la ayuda de herramientas informáticas y/o computacionales. En la mayoría de estos trabajos se proponen procedimientos, técnicas o algoritmos que manipulan diversos criterios de dimensionamiento optimizando las condiciones de operación del sistema y/o los costos del seccionamiento, dejando así a un lado las prácticas empíricas para llevar a cabo la sectorización.

De las 16 fuentes consultadas en el capítulo siguiente, se puede generalizar que la mayoría de los esfuerzos por resolver el problema de optimización de los distritos hidrométricos se han enfocado en 2 métodos de búsqueda:

- Teoría de grafos. Esta técnica de búsqueda dirigida consiste en conceptualizar los nodos y tuberías de una red como un diagrama o conjunto de puntos unidos por líneas, y partiendo de un punto inicial (la fuente de abastecimiento) se hace un recorrido lineal denominado *visitas* donde se aplican criterios de evaluación y con ello, lograr la agrupación. Esta metodología fue utilizada en seis trabajos



de los consultados (Tzatchkov, et. al. 2008), (Di Nardo, A. & Di Natale, M. 2010), (Gomes et. al. 2012), (Di Nardo, et. al. 2013), (De Paola, et. al. 2013), (Vegas, O. 2013).

- Métodos de aprendizaje o agrupamiento (clústeres). Esta técnica está basada en la analogía con el proceso de aprendizaje del ser humano, ya que consiste en crear un sistema de recompensas y castigos para premiar cada decisión tomada o acción realizada. En el caso del dimensionamiento de sectores, estas recompensas o castigos estarán en función de optimizar uno o varios objetivos basados en los criterios de selección (costos, pérdidas, etc.). Este enfoque fue implementado en 6 de las fuentes revisadas (Sempewo et. al. 2009), (Izquierdo et. al. 2009), (Herrera et. al. 2010), (Herrera et. al. 2012), (Diao et. al. 2013), (Campbell E. 2013).

Existen otras metodologías poco exploradas que igual han brindado resultados aceptables en el dimensionamiento de sectores, por mencionar algunas, la Teoría de Redes Sociales (Campbell et. al. 2014), y los métodos heurísticos. Estos últimos, solo han sido utilizados como una herramienta de apoyo a la teoría de grafos para mejorar las soluciones obtenidas. Di Nardo, et. al. (2013) utilizaron el Algoritmo genético y en Gomes et. al. (2012) el Recocido Simulado.

Los métodos heurísticos son útiles para representar fenómenos altamente no lineales, como es el caso del dimensionamiento de sectores, utilizando diferentes técnicas para resolver un problema combinatorio de este tipo, sin embargo, en esencia la mayoría se apoyan de procesos aleatorios o estocásticos para evaluar diversas soluciones del problema y converger a una o varias que optimicen el objetivo deseado (Martí, R. 2003). Cabe mencionar que este tipo de problemas no siempre generará una solución exacta, sino tal vez presente una o varias opciones muy cercanas a la ideal.



## **Justificación y alcances.**

En este trabajo de investigación se busca abordar el tema del dimensionamiento de sectores hidrométricos desde la perspectiva de un problema combinatorio no lineal y para resolverlo se utilizarán dos de los métodos heurísticos que sí se han utilizados en el tema de sectorización aunque como herramientas de apoyo, los Algoritmos Genéticos (Di Nardo, et. al. 2013) y el Recocido Simulado (Gomes et. al. 2012), y adaptar sus metodologías para brindar propuestas de sectorización satisfaciendo parámetros hidráulicos preestablecidos (criterio de dimensionamiento).

La finalidad de esta tesis, es presentar las metodologías desarrolladas como una opción viable para el dimensionamiento de sectores y demostrar que la sectorización es posible realizarla sustentada con criterios hidráulicos y búsqueda y evaluación de soluciones viables.

En este trabajo se evaluaron 3 criterios de dimensionamiento:

- Demanda homogénea.

Este término está relacionado con el volumen de agua requerido por los usuarios de la red, por lo que, este criterio tiene el objetivo de brindarle al diseñador sectores homogéneos en términos de demanda obedeciendo a las condiciones de abastecimiento o políticas de suministro.

- Presión mínima.

El control de presiones depende de un complejo número de variables como son las elevaciones de nodos, pendientes, velocidades, pérdidas de carga y las características físicas de la tubería, es decir, longitudes, diámetros y rugosidades. Estas en su conjunto, rigen el funcionamiento y de una red de distribución. Este criterio se diseñó para que la totalidad de los sectores hidrométricos propuestos se conserve una presión de servicio mínima.

- Longitud de tubería.

Este criterio se diseñó en función de las trayectorias de distribución de los sectores con la finalidad de formar recorridos máximos del flujo de agua por sector, respetando la infraestructura existente (situación que no es prioritaria en los dos criterios previamente descritos).



El desarrollo de la tesis considera la evaluación de los tres criterios separadamente. Se considera un cuarto caso de análisis resultado de la combinando de los tres criterios antes mencionados y con la intención de integrar en las soluciones la totalidad de los criterios diseñados y evaluar su efecto, esto es, soluciones donde se cuiden los volúmenes suministrados y se garantice presión de servicio mínima y ~~con~~ al menor costo de inversión, producto de modificaciones a la infraestructura actual.

Por último, los dos algoritmos elegidos se aplicaron a los 4 casos de análisis descritos anteriormente en dos redes de distribución reales no sectorizadas. Como producto se presenta un análisis comparativo con los rangos o tamaños que aparecen en la bibliografía referente al dimensionamiento de sectores hidrométricos.

### **Hipótesis**

El dimensionamiento de sectores hidrométricos puede plantearse como un problema de optimización no lineal a ser resuelto a través de la aplicación de métodos heurísticos. El uso de criterios de decisión basados en los valores de variables hidráulicas de operación permite identificar soluciones al problema de dimensionamiento viables.

### **Objetivo General**

Evaluar cuatro criterios de dimensionamiento de sectores hidrométricos a través de su implementación con el uso de dos técnicas heurísticas.



## **Estructuración de la Tesis**

En el capítulo 2, se presenta la revisión del estado del arte sobre el tema de dimensionamiento de sectores hidrométricos. En este capítulo se presentan algunos casos de sectorización empleando criterios empíricos y los trabajos de investigación en los que se proponen técnicas, herramientas o metodologías novedosas para el dimensionamiento de sectores.

En el tercer capítulo, se expone la fundamentación teórica sobre la cual se basan los métodos heurísticos seleccionados, el Algoritmo Genéticos (AG) y el Recocido Simulado (RS), adicionalmente se presentará las ecuaciones hidráulicas utilizadas para los cálculos realizados por ambos algoritmos.

En el capítulo 4, se detalla la conceptualización y adaptación al tema de dimensionamiento de sectores de cada uno de los algoritmos así como la manera en que serán evaluados los criterios de selección propuestos.

Los resultados de aplicar dichos algoritmos a dos redes de distribución reales no sectorizadas, para los 4 casos de análisis considerados son presentados en el capítulo 5.

Finalmente, en el sexto capítulo se presentan las conclusiones y discusión del trabajo realizado así como propuestas de mejora en el tema para investigaciones futuras.





## CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

Hoy en día no es un secreto que el abastecimiento de agua para consumo humano a nivel mundial está en crisis. Este problema no es ajeno a nadie, al contrario, su solución está en el trabajo en conjunto de todos los habitantes de este planeta, independientemente de que rol nos toque, ya sea como funcionario público, organismo operador, especialista, consultor, investigador, usuario, etc. Por ello, es indispensable tomar acciones que nos permitan una mejor gestión de este recurso y así, evitar que este se desperdicie.

Respecto a lo anterior y desde el punto de vista técnico, Campbell (2013) opina que los problemas que enfrentan los gestores y operadores de una Red de Distribución de Agua Potable (RDAP) puede resumirse en cuatro aspectos: las fugas y agua no contabilizada, la integridad física de la red, la calidad de agua a distribuir y, la fiabilidad y calidad de la base datos de los sistemas de distribución. El primero de estos aspectos es uno de los más antiguos, recurrentes y alarmantes, pues representa una enorme cantidad volúmenes perdidos del vital líquido. De hecho, en países de desarrollo (como México) el porcentaje de pérdidas por fugas en tuberías asciende a más del 50% del agua inyectada a la red. (Kingdom et. al., 2006), (SAWUABD, 2007).

En respuesta a eso, la sectorización ha surgido como una alternativa estratégica para facilitar la operación de una red de distribución con el fin de mejorar la eficiencia hídrica y tener un mejor conocimiento de los volúmenes circulantes dentro del sistema. La sectorización consiste en subdividir la red en zonas de servicio con una sola entrada y salida de agua y operacionalmente independientes entre sí.

En México, la Comisión Nacional de Agua concibe a la sectorización como la conformación de conjuntos de conexiones de servicio, todas ellas abastecidas desde puntos de control cuantificables de manera independiente, donde cada conjunto de conexiones se le denomina sector hidrométrico o distrito hidrométrico (CONAGUA, 2006).



La sectorización permite un mayor control y cuantificación de los volúmenes de agua suministrados, consumidos y perdidos en el sistema, facilitando de esta manera la identificación, reducción e inclusive la eliminación de este tipo pérdidas físicas de agua, esperando con ello se reduzcan los costos por mantenimiento y operación del sistema. La sectorización es útil para homogeneizar las condiciones topológicas (elevación, tuberías, etc.) y/o de operación (demandas, presiones, etc.) de un sector (Vegas, O., 2012), (Fragoso et. al. 2014).

Otro de los beneficios que se le atribuyen a la sectorización, es el aislamiento de los distintos distritos hidrométricos cuando se requiere realizar reparaciones y/o mantenimiento a la red de distribución, esto debido a que por definición cada uno de ellos cuenta con una única entrada y salida de caudal, y por ende, se puede suspender el suministro de agua a los usuarios de dicho distrito y sin perjudicar al resto de los usuarios de la red.

Aunque no queda claro los primeros indicios del uso de la sectorización, sin embargo, en el libro “Los acueductos de Roma” de Frontinus, se menciona que para el año 100 esta ciudad se encontraba dividida en catorce sectores y detalla las características de la alimentación de agua a los sectores (Blázquez, J.M., 1977). Ya en tiempos recientes, el concepto de sectorización fue introducido a principios de la década de 1980 en el reporte 26 de Control de Pérdidas y Prácticas de la Asociación de Autoridades del Agua de Inglaterra (Morrison et. al., 2007) (Herrera, 2011).

Actualmente, esta técnica ha sido muy utilizada en diferentes partes del mundo. Sin embargo, en la mayor parte de los casos en los que se ejecuta un proyecto de sectorización, no se suele seguir el proceso con un rigor científico-técnico y por el contrario, suelen basarse en aproximaciones a prueba y error (Di Nardo et. al., 2013). Para redes pequeñas este procedimiento podría resultar adecuado, sin embargo, la complejidad aumentará conforme la red sea de mayor tamaño y por tanto, la cantidad de información a manipular por lo que sería inviable realizar una ejecución de este modo sin utilizar herramientas informáticas. (Fragoso et. al. 2014), (Campbell E., 2013), (Izquierdo et. al. 2013), (Di Nardo et. al., 2013).



Otro problema que se tiene en el dimensionamiento de sectores es la selección del criterio con el que se llevará a cabo la división de la red ya que, oficialmente no existen instrucciones claras que establezcan un procedimiento adecuado para llevar a cabo un proceso de sectorización. Por tal motivo, los criterios que se han manejado actualmente están relacionados con la topología de la red, como el número de conexiones de servicio, área superficial o longitud de tuberías, o parámetros hidráulicos de diseño como son la demanda y la presión de operación. (Vegas, O., 2012), (Fragoso et. al. 2014), (Campbell E., 2013). Por mencionar algunos trabajos en los cuales se utilizaron o propusieron este tipo de criterios de dimensionamiento tenemos:

- En el trabajo de tesis de maestría de Oscar Vegas (2012) se mencionan 3 redes sectorizadas de la siguiente manera:
  - Bajo el criterio de tomas domiciliarias (o conexiones de servicio) se sectorizó la red de agua de Atizapán, Edo. de México (México) considerando un valor promedio por sector de 2,000 tomas y, en la ciudad de Huacho, Lima (Perú) se utilizó un rango de entre 400 a 4,000 conexiones de servicio. En ambos casos, los trabajos se realizaron bajo un procedimiento a prueba y error con un modelo de simulación hidráulico.
  - En la ciudad de Lima y Callo, Perú, se dividió la red de agua potable en áreas menores de 3 km<sup>2</sup> considerando mantener una presión en cada sector de entre 15 a 50 mca y teniendo a las avenidas como límites de sector. Para este caso, no se detalla el procedimiento del dimensionamiento, si consideró algún software de soporte o no.
- Enrique Campbell (2013) en su tesis de maestría menciona otros dos trabajos de sectorización:
  - La sectorización de la RDAP de Managua, Nicaragua se realizó utilizando un procedimiento empírico apoyado de un modelo matemático de la red de primaria y secundaria conformando 65 sectores con un tamaño aproximado de 20 km de longitud de tubería en cada uno.
  - La red de la ciudad de Tegucigalpa, Honduras se encontraba parcialmente sectorizada por lo que para el período del 2010-2012 el esfuerzo del organismo operador consistió en completar la



sectorización tomando de base la división previa y cuidando mantener la presión mínima de servicio establecida por la autoridad local, para ello, se utilizó un modelo matemático de la red primaria cuya calibración no se llevó a cabo debido a la intermitencia del servicio (tandeos).

- Fragoso et. al. (2014) en su trabajo de sectorización del macrosector MHO-31 de la Deleg. Miguel Hidalgo en la Ciudad de México, recomiendan un criterio de dimensionamiento basado en áreas de  $1\text{km}^2$  y en zonas urbanas con alta densidad hasta un valor de  $1.5\text{ km}^2$ . Su trabajo fue utilizando el software de simulación hidráulica Epanet 2.0 mediante un procedimiento a prueba y error.
- La Asociación Internacional del Agua (IWA por sus siglas en ingles) en su conferencia internacional en 2007, establece que para grandes redes es adecuado considerar un tamaño de sector de entre 500 a 3,000 usuarios (Hunaidi, O. & Brothers, K, 2007) (Morrison et.al. 2007).
- En GIZ et. al (2011) se establece como criterio de longitud de tubería dentro del sector, definiendo como un rango que va de 4km a 30km como un rango aceptable.

Una propuesta de sectorización ideal será aquella en la que se logre obtener la menor cantidad de sectores, con sus respectivas válvulas de corte y medidores de caudal, minimizando de este modo los costos de inversión y a la vez maximizar la calidad en el servicio (volúmenes suministrados con la presión adecuada para los usuarios de la red) o en su defecto, homogenizar las condiciones de operación y los parámetros hidráulicos en un sector (Oscar V., 2012). En este trabajo se comparte esta hipótesis, uno de los objetivos específicos es la identificación de soluciones en las que el número de sectores propuestos sea el menor posible, maximizando el uso de la infraestructura existente (mínima inversión) y garantizando el volumen demandado y la presión mínima establecida por conexión de servicio o toma domiciliaría.

Lo anterior lleva a que el problema de dimensionamiento de distritos hidrométricos sea, por su naturaleza, no lineal, debido a que existe una dependencia entre las variables hidráulicas. La complejidad del problema de dimensionamiento de distritos hidrométricos aumenta conforme el tamaño de la red es mayor. Por tal motivo, el implementar procedimientos empíricos basados en



prueba y error como en los ejemplos presentados anteriormente, resulta impráctico en función de la complejidad de la red aumente.

Al respecto, se han realizado esfuerzos en darle un enfoque más teórico-científico al problema de dimensionamiento de sectores, buscando manipular y combinar los parámetros hidráulicos y topológicos de la red con criterios de dimensionamiento para así dar una propuesta de sectorización óptima. Los enfoques utilizados son variados, existen muchas técnicas y metodologías utilizadas para resolver problemas de optimización de este tipo. A continuación se presentan los trabajos e investigaciones realizados por diversos autores respecto al tema:

- Enrique Campbell (2013) en su trabajo de investigación de maestría, primeramente, en función de los diámetros de la red diferencia la red primaria (o de conducción) de las líneas secundarias (red de distribución). Luego, define el número de sectores de la RDAP mediante la aplicación de una técnica informática de análisis de clústeres, la cual consiste en la formación de conjuntos de objetos con características similares entre sí, en este caso, utilizando las características hidráulicas tradicionales o geográficas de la red. Con esos resultados, establece la distribución del número de distritos mediante clústering espectral (igual una técnica de agrupación) con base en criterios energéticos.
- Tzatchkov, et al. (2008) proponen zonas hidráulicas independientes (sectores) implementando la teoría de grafos al software de gestión de redes de abastecimiento (SCARED) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) basadas en la zona de cobertura de las fuentes de abastecimiento o tanques de regulación para establecer sectores aislados, aplicando este análisis a dos redes de agua potable en México.
- La teoría de grafos fue aplicada por Di Nardo, A. & Di Natale, M. (2010), para la sectorización de la ciudad de Castelfranco, Italia donde enfocaron su análisis en la búsqueda en amplitud y el recorrido más corto para obtener los sectores y finalmente, corroborar sus resultados con softwares de simulación.



- Años más tarde, en 2013 estos autores junto con otros 2 investigadores (Di Nardo, et. al. 2013) hacen mejoras a la teoría de grafos al orientar su búsqueda mediante el uso de índices energéticos asignados a los nodos con la finalidad de determinar el cierre de tuberías y así formar los distritos hidrométricos. Además, utilizan un Algoritmo Genético para identificar de manera simultánea los valores de demanda y el patrón de fugas.
- Saldarriaga et. al. (2008) analizaron el efecto de la sectorización hidráulica en una RDAP ante la eventual falla de uno de sus elementos, aplicando el concepto de resiliencia para evaluar los criterios de sectorización.
- De Paola, et. al. (2013) combinaron el concepto de teoría de grafos y métodos de análisis de clústeres para la formación de un algoritmo que realiza la división de los distritos bajo un enfoque multi-objetivo basado en la disminución de fugas, producción energética mediante turbinas y el suministro de agua (demanda).
- Herrera, et. al. (2010) utilizaron un método de aprendizaje por refuerzo semi-supervisado en donde las restricciones del suministro de agua fueron asignadas a una matriz de adyacencia basado en el grafo de la red para luego dividirla utilizando algoritmos de agrupación espectral y métodos de aprendizaje supervisado. Más adelante, estos mismos autores (Herrera, et. al. 2012) aplican nuevamente un método de aprendizaje semi-supervisado ahora considerando las características de la red (elevación y demanda) y los costos por implementación de los cortes y sistemas de medición pero, únicamente aplicaron su análisis en casos donde el número de macro-sectores es inferior al número de fuentes de abastecimiento.
- Sempewo et. al. (2009) desarrollaron un enfoque de búsqueda denominado análisis espectral basado en la herramienta de partición de gráficos METIS (Karypis & Kumar, 1995) que es una metodología computación para la asignación equitativa de tareas. Este método mostró buenos resultados en la demarcación de distritos contiguos, sin embargo, la calidad de la solución se degrada cuando se considera más de un objetivo de búsqueda y se observaron incertidumbres al aumentar el número de distritos.



- Un modelo teórico enfocado en estrategias para una mejor gestión de costos por fugas fue establecido por Hunaidi, O. & Brothers, K. (2007), en el cual consideraron 3 tres criterios de intervención diferentes ligados a las políticas de fuga del sistema local de agua donde aplicaron este modelo, obteniendo de esta manera tamaños de distritos hidrométricos económicamente óptimos.
- Vegas, O. (2013) crea un algoritmo basado en Teoría de Grafos para obtener un árbol dirigido de mínimo coste en función del alcance de las fuentes de abastecimiento sobre el consumo nodal y con ello, obtener los macro-sectores. Posteriormente, realiza otra búsqueda dirigida para identificar los conjuntos de corte asociados en aquellas tuberías donde se instalarán los medidores de caudal. Finalmente, su algoritmo es ligado al software de simulación GISRED para formar parte de las herramientas de sectorización de este software en el cual, se pueden manipular varios criterios de dimensionamiento.
- Izquierdo *et. al.* (2009) propusieron un enfoque de partición de la RDAP basado en la aplicación de sistemas multi-agente. En este caso los clúster aprovechan la naturaleza distributiva de la red para la formación de pequeñas redes de suministro de agua.
- Diao *et. al.* (2013) consideraron la creación automática de sectores basado en una Estructura Jerárquica de la Comunidad, la cual considera una recolección de vértices (nodos) en las comunidades (conjuntos/sectores) de tal forma que haya una mayor densidad de bordes dentro de las comunidades. En su trabajo, las líneas de alimentación fueron escogidas con un análisis de sensibilidad.
- Gomes *et. al.* (2012) aplican un enfoque de 2 pasos para la obtención de distritos hidrométricos óptimos. El primero consiste en aplicar la Teoría de Grafos con criterios definidos por el usuario para delimitar la red en distritos. El segundo usa el Recocido Simulado para identificar la ubicación y número óptimo de los puntos de entrada y salida, la instalación de válvulas de seccionamiento y las tuberías a remplazar o reforzar. La función objetivo de este último modelo se basó en la diferencia entre los beneficios económicos gracias a la reducción de pérdidas y el costo de implementación de los sectores.



- Campbell *et. al.* (2014) plantean una metodología basada en dos conceptos de la Teoría de Redes Sociales, la centralización y la detección de la comunidad, para obtener la subdivisión de la red. Para este enfoque los criterios de evaluación está en función de criterios energéticos. El uso de esta metodología a RDAP depende de su red troncal (o principal).

De los trabajos descritos anteriormente, podemos generalizar que en la mayoría de ellos resuelve el problema del dimensionamiento óptimo de sectores mediante dos métodos de búsqueda: La teoría de grafos o búsqueda dirigida y los métodos de aprendizaje o agrupamiento (clústeres); o en su caso, adaptaciones o combinaciones de estos. También es importante mencionar que cada uno de este tipo de metodologías tiene sus respectivas variaciones según como el autor las considere.

Sin embargo, otra manera de resolver problemas de optimización no lineal, como lo es el caso del dimensionamiento de sectores, es mediante el uso de *métodos heurísticos o aproximados*. Según Martín, R. (2003) es útil implementar estas metodologías en problemas donde la rapidez del proceso es tan importante como la calidad de la solución obtenida. Este mismo autor, también menciona que las ideas o técnicas aplicadas por estos métodos a la resolución de un problema son específicas de éste, y aunque en general, estas pueden ser trasladadas a otros problemas, han de particularizarse en cada caso.

En Díaz *et al.* (1996) se presentan ocho definiciones de algoritmos de este tipo, en la que destaca: “Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución”.

A pesar de que estos métodos han demostrado buenos resultados al ser aplicados en diversos problemas combinatorios, han sido muy poco utilizados al tema de dimensionamiento de sectores. De los enfoques y trabajos presentados en este capítulo, únicamente dos han aplicado dos métodos heurísticos, El Algoritmo Genético (Di Nardo *et. al.* 2013) y el Recocido Simulado (Gomes *et. al.* 2012), y en ambos casos no fueron implementados directamente sino como complemento con la Teoría de Grafos (técnica de búsqueda dirigida) y así, mejorar los resultados de este última. En el





caso de estudio de esta tesis, la búsqueda está dirigida por la evaluación de las variables de decisión seleccionadas.

De la revisión bibliográfica llevada a cabo para la presente investigación, solo se encontró un enfoque en el cuál únicamente se aplica el Recocido Simulado (Bahena, B. 2011), sin embargo, este trabajo fue enfocado al diseño de redes de distribución de agua potable y no para dimensionamiento de sectores, donde se buscó optimizar el diseño mediante funciones de costo.

Por tal motivo, en este tema de investigación se propone utilizar la metodología del Algoritmo Genético y el Recocido Simulado y adaptarla al tema de dimensionamiento de sectores hidrométricos, buscando que en su conceptualización sea la evaluación de los parámetros hidráulicos la que permita generar soluciones óptimas en términos hidráulicos. Es importante resaltar que se usaron ambas metodologías de manera pura, es decir, sin combinarlas con otras técnicas de búsqueda, agrupación o modelos matemáticos para buscar mejorar los resultados.

En el capítulo siguiente, se presentará a detalle la fundamentación y bases teóricas que sustentan a ambos algoritmos, sin embargo, a continuación se presenta brevemente descripción de cada uno:

- Algoritmo Genético o Evolutivo (AG).

Estos algoritmos son sistemas computacionales diseñados para solucionar problemas altamente no lineales, tomando ideas del proceso evolutivo y de adaptación de la naturaleza, las cuales se agrupan bajo la denominada teoría Neo-Darwiniana de la evolución (Fogel, D., 1995).

- Templado o Recocido Simulado (RS).

Este se define como un método de búsqueda por entornos, caracterizado por un criterio de aceptación de soluciones vecinas que se adapta a lo largo de su ejecución. El RS está inspirado en el proceso de recocido de sólidos, el cual utiliza un procedimiento que va disminuyendo de manera lenta la temperatura, con lo cual, se modifica la estructura del material buscando que sea más resistente (Peralta et. al. 2015).



## CAPÍTULO 3. MARCO TEORICO

En el presente capítulo se exponen los fundamentos teóricos que sustentan las heurísticas seleccionadas para este trabajo de investigación, el Algoritmo Genético y El Recocido Simulado. Primeramente se expone la metodología junto con las definiciones propias de cada algoritmo y adicionalmente se hace una breve descripción de la conceptualización de cada uno al tema de dimensionamiento de sectores hidrométricos. Por último, este capítulo presenta los conceptos y ecuaciones hidráulicas que dan soporte a dicha conceptualización.

### 3.1. Algoritmos Genéticos (AG).

Este tipo de algoritmos ha sido utilizado para resolver problemas de búsqueda no lineales debido a que su fundamentación se basa en la generación aleatoria de una población inicial de soluciones, la evaluación de estas y la evolución de las mismas. Los algoritmos genéticos, proponen una población de soluciones iniciales, y a lo largo de su ejecución combinan soluciones buscando aquellas con mejor evaluación respecto a una(s) función(es) objetivo del problema de búsqueda.

El fundamento de los Algoritmos Genéticos (AG) se sustenta en la simulación de las teorías evolutivas y adaptativas de la naturaleza, conocidas como teorías neo-Darwiniana de la evolución (Fogel, D., 1995). Por tal motivo, la mayoría de la terminología utilizada en estos algoritmos es semejante a los conceptos biológicos en los que se inspira (por ejemplo, cromosomas, mutación, generación, etc.) (Cruz, N., 2004).

Una característica importante de los algoritmos evolutivos es que son poblacionales, lo que significa que manipulan simultáneamente un conjunto de soluciones potenciales al problema y no una solución única, esta capacidad de analizar conjuntos o poblaciones de soluciones potenciales permite que los AG no queden atrapados en óptimos locales, además de que su capacidad de exploración del espacio de búsqueda se ve incrementada (Martí, R., 2003), (Cruz, N., 2004). Esta capacidad no siempre garantiza lo anterior, sin embargo y a diferencia de otras técnicas heurísticas y de métodos



de programación matemática si permite multiplicar las capacidades de búsqueda sobre el espacio de soluciones potenciales.

La representación que se hace de las soluciones en los AG es tradicionalmente una codificación binaria, donde cada una de las soluciones está formada por un conjunto de ceros y unos formando una cadena. Cada una de las posiciones en la cadena (sitios donde se aloja un cero o un uno) se le llama *cromosoma*, que simbolizan un valor o característica de la solución (Bäck et. al. 1997). Sin embargo, esta representación no es la única opción, pues es posible utilizar diferentes tipos de codificaciones, siempre y cuando sea posible aplicar *operadores genéticos* (mutaciones, cruza, etc.), que se detallarán más adelante.

Continuado con la terminología Darwiniana, en su conjunto a cada cadena de cromosomas (o solución) se le denomina *individuo*. Cada individuo cuenta con características propias otorgadas por el material genético que le conforma (sus cromosomas), la valoración de los cromosomas en conjunto se caracteriza como *aptitud o valor de aptitud*, valor importante para determinar qué tan bueno o malo es un individuo o solución a fin de poder ser parte de la generación que le sigue (Goldberg, D., 1989), en otras palabras, que tan bueno es que un individuo aporte su información genética en la generación que le sucede a través de su reproducción. En otras palabras, que tan apto es para poder ser elegido como *padre* de la siguiente generación y que sus características trasciendan.

En la naturaleza, una vez que dos individuos (*padres*) se eligen mutuamente estos entran a una *fase reproductiva* en la cual, el objetivo principal es intercambiar su material genético para así, formar un nuevo individuo denominado *hijo*, proceso natural que se realiza de manera repetitiva de generación en generación (Michalewicz, Z. & Schoenauer M., 1996)

En el AG este *proceso de selección* depende de dos cosas, de su evaluación en una *función aptitud o adaptación (u objetivo)* y de un proceso aleatorio de *Selección Natural*:

- La función aptitud (u objetivo) consiste en asignarle un valor a cada individuo, evaluando cada cromosoma o característica en una función selectiva (Martí, R., 2003), (Cruz, N., 2004) la cual, se basa en la aptitud o características que se pretenda conservar o mejorar de una generación a otra,



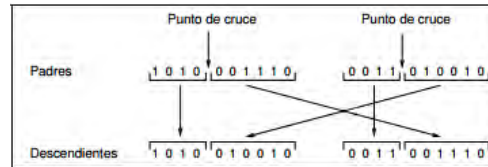
es decir, dotar de valor numérico a la aptitud o a las características de cada individuo. Por ejemplo, si deseamos minimizar la función  $f(x)=x^2$  se desea conservar el o los individuos que en su valor de aptitud se encuentren más cercanos a cero, aquellos individuos con aptitud cercana o igual a cero, tendrán mayor probabilidad de ser elegidos para formar parte del proceso que se aplique para formar la generación subsecuente.

- La segunda parte del proceso de selección consiste en que, una vez evaluado el individuo, este recibe una calificación individual con respecto a la de la generación. Existen varios criterios para asignarles esta calificación, el más utilizado es el *porcentaje de selección* que consiste en tomar un valor porcentual resultado de dividir la aptitud individual entre la suma de las aptitudes de los individuos de toda la generación (Cruz, N., 2004), (Martí, R., 2003). De esta forma aquellas soluciones más aptas o con mayor valor de aptitud tendrán más probabilidad de ser seleccionadas para formar la generación subsecuente.

Los porcentajes calculados en el proceso de selección sirven para brindar a los individuos con mejores aptitudes una mayor probabilidad de ser elegidos como padres.

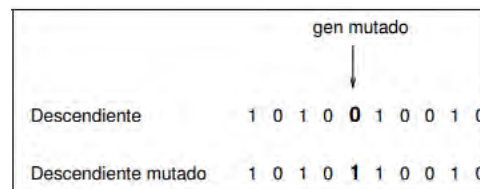
En los algoritmos genéticos, la fase reproductiva consiste en aplicar a la totalidad de individuos seleccionados (padres) operadores genéticos (Goldberg, D., 1989). La aplicación de operadores genéticos genera nuevos individuos, conocidos en el argot de los Algoritmos Genéticos como hijos. Los Operadores Genéticos más utilizados son la *cruza* y la *mutación*, aunque también puede existir la combinación o alguna variación de ambas generaciones (Cruz, N., 2004), (Martí, R., 2003). Para explicar el funcionamiento y la operación de los operadores se utiliza una codificación binaria en los individuos:

- *Cruce basado en un punto*. Este operador considera a los padres seleccionados previamente y corta en un punto sus cromosomas en una posición elegida o al azar, para producir dos sub-códigos genéticos (Holland, J., 1975). Finalmente, los individuos descendientes se formarán del ensamble de los sub-códigos, como se muestra en la Figura 1:



**Figura 1.** Operador de cruce en un punto

- *Mutación.* En este se toma el cromosoma de un padre y se alteran uno o varios genes del mismo, nuevamente tomados aleatoria o determinísticamente (Martí, R., 2003). En caso de que sea un código binario, solo se hace un cambio del valor 0 al 1, o viceversa (como se ilustra en la Figura 2), o en su defecto, se intercambia el valor numérico entre los genes involucrados.



**Figura 2.** Operador de mutación

- *Mixto.* Este proceso consiste en aplicar los dos operadores antes descritos, ya sea de manera simultánea o uno después de otro, es decir, a la descendencia propuesta por el proceso de cruce aplicarles un proceso de mutación antes de pasar a formar parte de la siguiente generación.

Concluido el proceso de aplicación de operadores genéticos, se obtienen  $n$  nuevos individuos que en su conjunto forman la siguiente generación. La nueva generación se evaluar aplicando los procedimientos descritos previamente, concluyendo un ciclo iterativo del algoritmo. Este proceso se repite hasta un número determinado de iteraciones (generaciones) que permitan obtener una(s) solución(es) muy aproximada(s) al valor deseado. (Cruz, N., 2004), (Martí, R., 2003)

Es importante destacar que la cantidad de individuos y de generaciones, es decir, la amplitud de búsqueda de soluciones se define a juicio de quién implementa el algoritmo. En ocasiones, se puede acelerar la convergencia del resultado reemplazando una cierta cantidad de los peores individuos (aquellos con la peor aptitud) de cada generación por los mejores de la predecesora, aún que este procedimiento no es una garantía, dadas las características aleatorias del algoritmo.



Basado en lo descrito en los párrafos anteriores, a continuación se detallará brevemente la conceptualización del dimensionamiento de sectores hidrométricos a la metodología seguida por el Algoritmo Genético, en el capítulo siguiente se describirá ampliamente el algoritmo:

- Definido un valor de  $n$ , se explorarán “ $n$ ” generaciones para la búsqueda de soluciones, en la implementación del algoritmo desarrollado para esta tesis en cada una de las  $n$  generaciones, se elige y almacena en memoria al mejor individuo de cada. De tal forma que luego de evolucionar el algoritmo a lo largo de  $n$  generaciones se tendrán como resultado  $n$  “mejores individuos” o soluciones.

- Los cromosomas que conforma un individuo representa una propuesta de sectorización, esto es, el valor de cada cromosoma representa un nodo de la red. El proceso de asignación de nodos es de tipo aleatorio, el primer y último cromosoma de cada individuo se reservan para el nodo inicial y final respectivamente. En la Figura 3, el individuo ilustrado representa una red de 5 nodos:

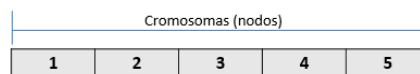


Figura 3. Representación de una red con nodo inicial 1 y nodo final 5

- En este trabajo se consideran cuatro criterios de dimensionamiento, definidos como Casos. La aptitud de los individuos se define en función del criterios seleccionado (casos 1 al 4), de la siguiente forma:

- Caso 1. Demanda homogénea. Mayor conectividad de nodos con respecto a la red actual.
- Caso 2. Presión mínima. Menor cantidad de sistemas de rebombeo.
- Caso 3. Longitud de recorrido. Menor consto de inversión en infraestructura.
- Caso 4. Combinación. Evaluación multi-objetivo utilizando los 3 casos anteriores.



- La probabilidad de cada individuo a ser elegido para reproducción se calcula atendiendo que: en el Caso 1 se busca maximizar la función objetivo o de aptitud, para los casos 2 y 3 se buscan aquellas soluciones que minimicen la función objetivo y el cuarto caso combina la maximización de la demanda (caso 1) y la minimización de los rebombes y costos de inversión (caso 2 y 3).

- La probabilidad de reproducción de cada individuo permite identificar aquellos individuos con mayor aptitud de cada generación. En la implantación desarrollada para el problema de dimensionamiento de sectores hidrométricos que constituye una de las partes fundamentales de esta tesis se considera la selección del 30% de los mejores individuos en la población. Este conjunto de individuos se reserva y forma parte de la población de reproducción que dará origen a la población de la generación subsecuente.

- El 70% restante de la población a reproducirse se selecciona aleatoriamente considerando la probabilidad de cada individuo en la población que no conforma el 30% previamente seleccionado.

- De esta forma los padres estarán conformados por el 70% de los mejores padres pre-seleccionados aleatoriamente y el 30% de los separados antes de la selección (selección elitista).

- Finalmente, para la fase reproductiva se utilizará un operador de mutación, que designará de manera aleatoria el 30% de los cromosomas (nodos) que se intercambiarán por cada individuo. Y con ello, quedará conformada la nueva generación. Siguiendo el mismo ejemplo de la Figura 3, el 30% de 5 cromosomas sería 1.5 pero se necesita un mínimo de 2 para poder hacer el intercambio cromosómico, por lo que, supondremos que el operador de



mutación propone intercambiar el cromosoma 1 y 4. La Figura 4 muestra el nuevo individuo formado:

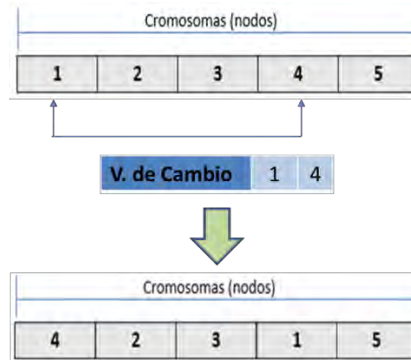


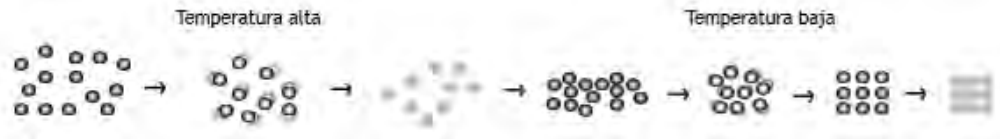
Figura 4. Ejemplo de la aplicación de la mutación propuesta

### 3. 2. Recocido Simulado (RS).

El recocido simulado se define como un método de búsqueda por entornos, caracterizado por un criterio de aceptación de soluciones vecinas que se adapta a lo largo de su ejecución. Fue propuesto por Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi en 1983 (Peralta et. al. 2015), (Martí, R., 2003) e inicialmente se creó para minimizar funciones de costo. Por lo que la mayoría de la terminología implementada en la explicación del método aparecerá este término de costo (o coste), sin embargo, en la práctica este valor puede ser reemplazado por la función objetivo que se desea solucionar.

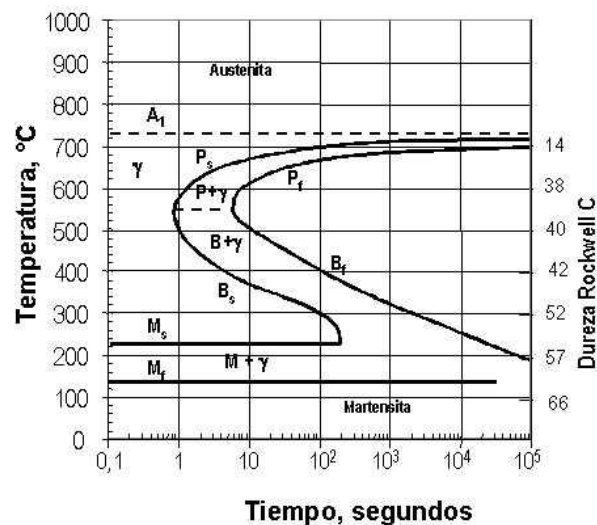
Este procedimiento se basa en una analogía con el comportamiento de un sistema físico de templado de un material férreo que se somete a un incremento de temperatura y su estructura molecular se altera. En el proceso de recocido se considera el enfriamiento lento de las piezas, en algunas ocasiones manteniendo las piezas de materia férreo en distintos niveles de temperatura por tiempos definidos, lo que permite que la estructura molecular se ordene y sus características y propiedades físicas mejoren, pudiendo incrementarse su dureza y resistencia (Figura 5) (Peralta et. al. 2015).





**Figura 5.** Restructuración molecular de un material férreo al aplicársele un proceso de recocido

El algoritmo del recocido simulado, al simular este proceso físico de mejora de las propiedades de los materiales férreos, debe elegir adecuadamente el mecanismo de enfriamiento del sistema pues las características de mejora buscadas dependen totalmente de ello (Peralta et. al. 2015). Utilizando el acero como metal de ejemplo, en la **Figura 6** se puede observar que la dureza de sus componentes moleculares (austenita y martensita) depende de la curva Temperatura vs Tiempo.



**Figura 6.** Curva de enfriamiento del acero

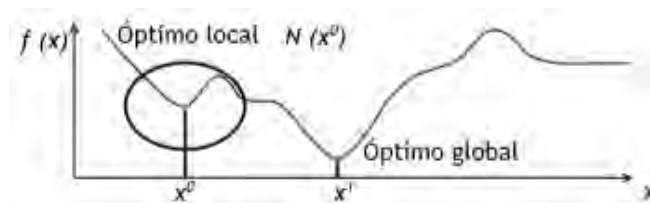
Por lo anterior, es importante que la estructura del mecanismo de enfriamiento considere adecuadamente los siguientes parámetros (Dowland, K. & Adenso, B. 2003):

1. *Parámetro de control inicial.* Comúnmente conocido como temperatura inicial ( $T_0$ ), este valor debe ser lo suficientemente alto para permitir que todos los cambios sean aceptados.
2. *Parámetro de control final.* También llamada temperatura final ( $T_f$ ), es la condición que dicta la terminación del proceso.

3. *Coefficiente de decremento de la temperatura.* Valor constante que indica la tasa de decremento para pasar de  $T_o$  a  $T_f$ .

La estrategia que sigue el algoritmo del RS es comenzar con una temperatura inicial alta y una solución inicial seleccionada aleatoriamente. La solución inicial se perturba en cada uno de los decrementos de temperatura. Las altas temperaturas están asociadas a probabilidades altas de aceptar soluciones perturbadas con desempeño inferior a la solución precedente. En cada iteración se va reduciendo la temperatura y por lo tanto las probabilidades son cada vez más pequeñas conforme avanza el procedimiento y nos acercamos a la solución óptima (Kirkpatrick et. al. 1983).

En base a lo anterior, es ideal que inicialmente se realice una diversificación de la búsqueda sin controlar demasiado el coste de las soluciones visitadas pero, en iteraciones posteriores resulta cada vez más difícil el aceptar malos movimientos y por lo tanto, se produce un descenso en el coste. De esta forma, el RS tiene la habilidad de salir de óptimos locales al aceptar movimientos de no mejora en los estados intermedios (como se observa en la **Figura 7**). Al final del proceso éstos son tan poco probables que no se producen, con lo que, si no hay movimientos de mejora, el algoritmo finaliza (Kirkpatrick et. al. 1983).



**Figura 7.** Diferencia entre óptimo global y local de una función

Finalmente, el algoritmo puede describirse de manera general en los pasos que a continuación se presentan, y en cada uno, se explicará brevemente las consideraciones tomadas para adaptar el RS al tema del dimensionamiento de sectores hidrométricos.

- 1.- Definición de la temperatura inicial ( $t_0$ ) y final ( $t_f$ ). Para el presente trabajo, la temperatura inicial es el valor de 0 que indica el arranque del ciclo iterativo y, como temperatura final la cantidad



de iteraciones que el usuario considere. Para los casos de estudio se proponen tres, 10 000, 40 000 y 90 000, con la finalidad de determinar si la amplitud de búsqueda a esos valores afecta los resultados.

2.- Solución inicial ( $i_0$ ). Esta se genera de manera aleatoria y estará conformada por una cadena de longitud igual a la cantidad de nodos de la red, al igual que en el AG (**Figura 3**), únicamente se respetarán el nodo inicial y final.

3.- Solución vecina o perturbada ( $j$ ). En este punto se genera una nueva propuesta de solución basada en el cambio de la configuración de la solución inicial ( $i_0$ ) para obtener una solución vecina. Esta perturbación se realizará mediante un vector aleatorio que designará que nodos intercambiarán su posición. La cantidad de nodos a intercambiar se propone de un 20% del total de nodos.

4.- Evaluación. En cada iteración el algoritmo realiza la evaluación en la función objetivo de ambas soluciones, para así comparar los valores obtenidos de la solución inicial  $f(i_0)$  contra los de la solución perturbada  $f(j)$ , de la siguiente manera:

Si  $f(j) < f(i_0)$  entonces  $i_0 = j$

Sino desechar  $j$  y  $t = t + 1$

Finalmente el algoritmo nos brindará la solución final  $i_f = i_0$  al llegar a la temperatura final ( $t_f$ )

Las funciones objetivo estarán en función a los 4 casos de análisis propuestos, conectividad, cantidad de rebombes y costos de inversión, respectivamente. El uso de rebombes se define explícitamente en el capítulo de Metodología y consiste en una particularidad diseñada en este trabajo de tesis.

### 3. 3. Fundamentación Hidráulica

Una red de distribución de agua potable (RDAP) puede conceptualizarse como un conjunto de tubos, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de servicio o de distribución hasta la toma domiciliaría o hidrantes públicos (CONAGUA, 2015). Para el desarrollo de esta tesis se considera que la red debe proporcionar este servicio continuo, es decir 24 horas, los 365 días del año, en cantidad suficiente, con la calidad requerida y a una presión adecuada.



Por ende, es importante mencionar que las variables, demanda y presión mínima, son consideradas los criterios base del dimensionamiento de los sectores hidrométricos, que es el objeto principal de esta tesis y en consecuencia son las variables que conforman las funciones objetivo de los algoritmos desarrollados, todo esto enfocado a proponer una sectorización adecuada en términos hidráulicos.

- *Demanda*. Este valor surge de la suma de los consumos de cada tipo de usuario (doméstico o no doméstico) con las pérdidas físicas originadas por fugas (CONAGUA, 2015).

Para fines de este trabajo, el cálculo de la demanda de las RDAP utilizadas en este trabajo (Capítulo 5) se realizó bajo los lineamientos establecidos en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA, 2015) donde se consideran índices de hacinamiento, tipo de consumo, etc.

- *Presión mínima (o de servicio)*. Referente a este punto, no existe un valor establecido en el manual mencionado anteriormente, por lo que para esta tesis se propondrá una presión de trabajo de 0.5m de columna de agua.

- *Rebombeos*. Instalaciones de bombeo que tienen el objetivo de elevar la carga hidráulica en el punto de su ubicación para mantener la circulación del agua en la tubería (CONAGUA, 2015).

Para evaluar las funciones objetivo de los casos de análisis 2 y 4 de ambos algoritmos, se utilizarán las siguientes ecuaciones (CONAGUA, 2015):

1.- De la ecuación de conservación de la energía (o de Bernoulli) se tiene que de un nodo a otro se cumple:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + hf \text{ (m)}$$

2.- Las pérdidas de carga ( $hf$ ) se calculan mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{LV^2}{D2g}$$



3.- El coeficiente de fricción  $f$  se obtendrá de la ecuación propuesta por Swanec-Jorn.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

4.- El valor de la rugosidad de tubería ( $\varepsilon$ ) se puede obtener por especificaciones del proveedor o mediante la ecuación:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha t \dots \dots \dots (7)$$

Los valores promedio de  $\varepsilon_0$ ,  $\alpha$  y  $t$  se pueden encontrar en las tablas 3.1 y 3.2 en CONAGUA, 2015. Este valor de rugosidad será solicitado como una variable de ingreso para ambos algoritmos.

Nomenclatura y unidades de las variables utilizadas en este apartado:

$Z_1$  y  $Z_2$  son las elevaciones topográficas de los nodos 1 y 2 respectivamente, en metros.

$P_1$  y  $P_2$  son las presiones hidrostáticas de cada nodo, en  $\text{kg/m}^2$

$\gamma$  es la densidad del agua, igual a  $1,000 \text{ kg/m}^3$

$\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son los coeficientes de coriolis, comúnmente tomados igual a 1.

$V_1$  y  $V_2$  es la velocidad en cada nodo, en  $\text{m/s}$ .

$L$  es la longitud de la tubería, en  $\text{m}$ .

$D$  es el diámetro de la tubería, en  $\text{m}$ .

$g$  es el valor de la gravedad terrestre,  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

$hf$  se define como la pérdida de carga o de fricción de un punto 1 a un punto 2, en  $\text{m}$ .

$f$  es el coeficiente de fricción, adimensional.

$Re$  es el número de Reynolds, adimensional.

$\varepsilon$  es la rugosidad de pared de la tubería, en  $\text{mm}$ .



## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Una vez identificado que el dimensionamiento de sectores hidrométricos tradicionalmente ha sido abordado mediante procedimientos empíricos a base de prueba y error, la mayoría apoyados en modelos de simulación hidráulica, donde el éxito de las soluciones depende del grado de experiencia del diseñador. Y que en varios trabajos de sectorización realizados de esta manera, se han propuesto diversos criterios de dimensionamiento de sectores, basados en características tangibles de la red de distribución de agua potable (RDAP) como son la cantidad de tomas domiciliarias, la cantidad o longitud de tuberías, área o tamaño de la población, topografía e infraestructura vial existente, capacidad del suministro de agua, etc. (Vegas, O., 2012), (Campbell, E., 2013), (Fragoso et. al. 2014), (Morrison et. al. 2007), (GIZ et. al. 2011).

Por tal motivo, en la presente investigación se optó por explorar metodologías heurísticas, específicamente Algoritmos Genéticos (AG) y Recocido Simulado (RS), para aplicarlas al tema de dimensionamiento de sectores hidrométricos de manera independiente, es decir, sin combinarlos con otras metodologías o enfoques como se han utilizado (Di Nardo et. al. 2013), (Gomes et. al. 2012).

La justificación del uso de estas heurísticas se basó en su capacidad para explorar varias soluciones en una sola ejecución y en la forma como se configuran las soluciones, pues permiten a través de una codificación, representar soluciones en función de las variables hidráulicas, tales como demanda, presión y longitud de los tramos de tubería, que son las variables de decisión consideradas para el desarrollo de la tesis.

La relevancia de este trabajo radica en que, independiente al caso analizado, los algoritmos utilizados cuentan con la fundamentación hidráulica (las ecuaciones presentadas en el capítulo anterior) para calcular el comportamiento hidráulico (volúmenes y presión) y el costo de inversión esperado de cada propuesta de sectorización que se genere.

Por lo tanto, toca a este capítulo presentar a detalle la adaptación del AG y el RS para dar solución al dimensionamiento de sectores hidrométricos.



#### 4.1. Adaptación del Algoritmo Genético (AG)

Como ya se mencionó en el capítulo 3, los AG emplean para su funcionamiento un conjunto de soluciones o individuos a la que también se hace referencia como población. Las poblaciones a lo largo de las generaciones se hacen evolucionar a través de la aplicación de operadores genéticos. La identificación de los individuos a los que se les aplicarán operadores genéticos se realiza tomando como base su aptitud. En el caso de esta implementación la aptitud de un individuo o solución es función de criterios diseñados ex profeso para lograr la conformación de sectores que optimicen funciones objetivo, también llamadas en este trabajo funciones de aptitud. De tal forma que la evolución de las generaciones permite al AG explorar el espacio de búsqueda de soluciones, seleccionar aquellas con mejor aptitud y a partir de ellas y a través de operadores genéticos explotar su bondad. En el contexto de este trabajo de tesis las soluciones representan sectores hidrométricos.

A continuación se presentan los pasos utilizados para acoplar la metodología de los algoritmos genéticos al tema de dimensionamiento de sectores hidrométricos.

##### 4.1.1.- Variables de ingreso.

Primeramente, es necesario ingresar los valores para las variables de decisión, así como para los parámetros que el algoritmo manipulará.

- Para las tuberías: Diámetro principal, rugosidad, conectividad actual y longitudes.
- Para los Nodos de la red: Cantidad, coordenadas X-Y, demandas, presiones actuales y elevaciones.
- Abastecimiento: Cantidad de tanques elevados y/o estaciones de rebombeo y volumen de agua disponible.
- Selección de la condición límite según el caso de análisis y la amplitud de búsqueda (cantidad de soluciones a explorar por el algoritmo).

Nota: La implementación del algoritmo considera cuatro casos de análisis a) Demanda Máxima, b) Presión de servicio mínima, c) Longitud de tubería máximo y d) Combinación de los 3 anteriores.



#### 4.1.2.- Solución Inicial.

Las generaciones siempre tienen la misma cantidad de individuos, no existe variación en el número de individuos entre generaciones. Un individuo representa una solución, es decir, una propuesta de sectorización.

Cada individuo está formado por una cadena de cromosomas. Para este trabajo cada cromosoma representa un nodo de la red, por lo tanto, la longitud de la cadena cromosómica depende de la cantidad de nodos de la red ( $n$ ).

Para la configuración inicial de cada individuo, se utilizó una función aleatoria para asignar los valores de los nodos cuidando que dos o más cromosomas en un mismo individuo no tuvieran el mismo valor, únicamente se respetó la posición del nodo inicial y final. Esto para que la ubicación del abastecimiento y disposición final del agua se mantengan fijas. Lo descrito en este punto, se ilustra en la imagen siguiente:

		Cromosomas = número de nodos						
Individuos	Nodo Inicial	$n$	... ..				Nodo final	
	Nodo Inicial	.	$n$	... ..			Nodo final	
	.	.	.	.	$n$	.	.	
	.	.	.	$n$	,	.	.	
Nodo Inicial	... ..				$n$	.	Nodo final	

Figura 8. Formación de la primera generación

#### 4.1.3.- Evaluación de la solución inicial.

##### A. Formación de Sectores

De manera general, el proceso es similar para los 3 criterios de diseño (Casos del 1 al 3), ya que el 4º consiste en la aplicación de los 3. El proceso consiste en hacer un recorrido nodo a nodo (cromosoma a cromosoma) evaluando el comportamiento de la red bajo el criterio seleccionado, de



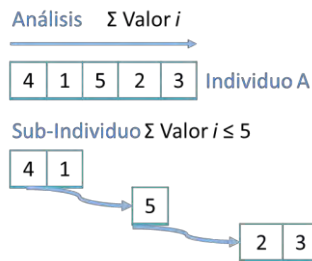


tal manera que el valor inicial del criterio a evaluar, vaya aumentando o disminuyendo hasta llegar al valor máximo o mínimo establecido para dicho criterio.

Lo anterior produce que la cadena cromosómica del individuo se vaya desensamblando, es decir, cada que el recorrido llegue al valor límite establecido la cadena se corta, formando un sub-individuo (para este trabajo *Sector*), y el análisis brinca al siguiente cromosoma restableciendo el valor inicial para este y, así sucesivamente hasta llegar al cromosoma final (**Figura 9.A**).

Entonces, el individuo que anteriormente se conceptualizaba de manera lineal ahora se puede ver como una matriz, donde la cantidad de filas indicará la cantidad de sectores y sus columnas almacenarán los nodos de cada uno, es importante mencionar que no necesariamente todas las celdas deben estar ocupadas pues un sector (número de filas) puede ser menor en dimensión de celdas que otro (**Figura 9.B**).

Para ejemplificar lo anterior, supongamos que se tiene un individuo de 5 cromosomas cuyo orden de numeración generado aleatoriamente quedo de la forma que ilustra la **Figura 9** (A y B), se desea que cada sub-individuo no exceda del valor 5, por lo que el análisis consistirá en hacer una suma acumulada sin exceder el valor máximo de 5.



**Figura 9.A.** Desensamble de un individuo

Individuo A	
4	1
5	-
2	3

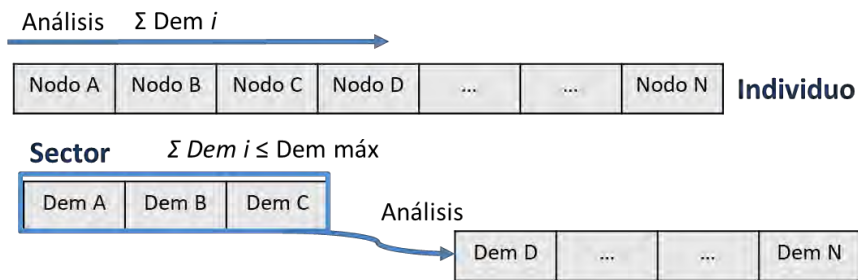
**Figura 9.B.** Matriz de un individuo

Detallado el proceso general de desensamble de cada individuo, ahora queda detallar este proceso para cada caso de análisis:

- Caso 1. Demanda homogénea.



Tomando las demandas nodales del individuo, el recorrido realizado por el algoritmo consiste en tener el valor acumulado de ese consumo de agua nodo a nodo hasta llegar al valor máximo establecido (punto 4.1.1), como se muestra en la **Figura 10**.

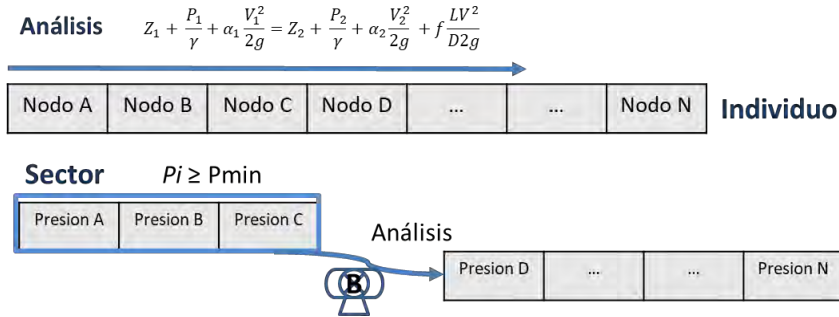


**Figura 10.** Análisis y desensamble del caso 1 del AG

- Caso 2. Presión mínima.

Previo al desensamble, se hace un recorrido total a los nodos del individuo para calcular las distancias entre nodo a nodo y utilizando los parámetros hidráulicos ingresados en el punto 4.1.1 (diámetro, rugosidad, elevaciones, etc.) se aplican las ecuaciones hidráulicas (descritas en el capítulo anterior) para poder obtener la presión de servicio (o disponible) de cada nodo considerando sus respectivas pérdidas.

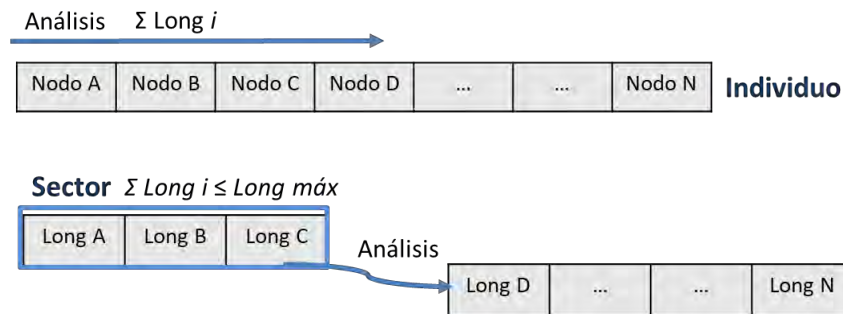
Por lo tanto el recorrido de análisis estará en base en la presión servicio, cada vez que el algoritmo encuentre un valor menor a la presión mínima establecida se hará el corte en la cadena. En caso de que se requiera aumentar la presión para reestablecer el valor inicial en el siguiente nodo, es decir, por encima de la presión mínima entonces el algoritmo considera un sistema de rebombeo ficticio que incrementa la presión a 5mca (valor arbitrario y modificable) y lo almacena en su memoria, como se observa en la **Figura 11**. En caso que se requiera más de 5mca, el algoritmo considerará y almacenará la cantidad de rebombes necesarios en múltiplos de 5, por ejemplo, para 8mca se tendrían 2 rebombes. Este artificio y su utilización se detallan más adelante en este mismo documento.



**Figura 11.** Análisis y desensamble del caso 2 del AG

- Caso 3. Longitud de recorrido.

Similar al caso 2, primeramente se calculan las distancias nodo a nodo y por lo tanto, el análisis se basa en la suma acumulada de esas distancias hasta llegar al valor máximo establecido (**Figura 12**):



**Figura 12.** Análisis y recorrido del Caso 3 del AG.

- Caso 4. Combinación de casos.

Para este último caso, el algoritmo ejecuta y almacena el resultado de los 3 casos individuales.

### B. Evaluación de la aptitud

Como se mencionó previamente, la selección de individuos que se les aplicarán operadores genéticos y transmitirán su información genética a la siguiente generación, se hace con base en su valor de aptitud.

Se le llamará aptitud a la suma de las evaluaciones de cada sector (sub-individuo) con respecto a una cualidad, la cual, depende del caso de análisis. A su vez, la cualidad de cada sector estará en función de la suma de la aportación de sus nodos con respecto a dicha cualidad (Figura 13).



<b>I N D I V I D U O</b>	<b>Nodos</b>			<b>Cualidad</b>
	A1	...	Ai	$C1 = \sum A_i$
	B1	...	Bj	$C2 = \sum B_j$
	... ..			...
	N1	...	Nk	$CN = \sum N_i$
	<b>Aptitud</b>			$\sum C_i$

**Figura 13.** Determinación de la aptitud de un individuo

De acuerdo al caso de análisis (criterios de dimensionamiento) las cualidades a evaluar son las siguientes:

- Caso 1 (Demanda homogénea). Conectividad.

Una condición que el algoritmo atiende es el aprovechamiento de la infraestructura existente y la conformación de sectores con base en la capacidad de la misma. En este sentido, las soluciones que propongan arreglos iguales a los existentes en la red serán mejor evaluados, es decir, su valor de aptitud será mayor. La evaluación de aptitud contemplada en este caso se basa simplemente en contabilizar las conexiones entre nodos de cada individuo o solución que coinciden con la red actual. La coincidencia toma en cuenta el comportamiento hidráulico.

- Caso 2 (Presión mínima). Cantidad de rebombes.

Uno de los problemas más recurrentes con los métodos de sectorización convencionales (que no emplean criterios hidráulicos) es la generación de zonas o sectores sin servicio, esto se debe a las modificaciones que se hacen a la infraestructura sin analizar su comportamiento ni su capacidad. La forma como se logró evaluar este fenómeno es a través de la cuantificación de los “rebombes”, así llamados pues artificial y de manera arbitraria se incrementa la presión en las zonas donde se identifican faltas de suministro de agua. El efecto de los rebombes se debe interpretar como la identificación de faltas de suministro a causa de la agrupación de nodos. Estas faltas de suministro requerirán la incorporación de infraestructura adicional, misma que lleva un costo. Una de las hipótesis principales en este trabajo de tesis es el máximo aprovechamiento de la infraestructura



existente y la conformación de sectores de menor costo. Caso 3 (Longitud de recorrido). Costos de inversión.

Similar al caso 1, para este caso se consideró que cuando no hay conexión entre los nodos se requerirá hacer la habilitación de tubería nueva y por ende, se producen costos de inversión. Se consideró un valor arbitrario de \$ 10,000 pesos por cada metro lineal de tubería que se requiera agregar a la red, sin embargo, este valor puede ser modificado a consideración del proyectista.

- Caso 4 (Combinación de criterios). Evalúa y almacena las aptitudes de los 3 casos anteriores.

Lo descrito en este punto es la parte central a la conceptualización del dimensionamiento de sectores al algoritmo, ya que en los puntos siguientes únicamente se continúa la metodología del algoritmo. Por ello es importante resumir que, según el caso, la aptitud de un individuo es un valor numérico asociado a la suma de su evaluación nodo a nodo con respecto a una cualidad a maximizar (o minimizar) y con este valor, más adelante poder ser comparado con el resto de los demás individuos de su generación. Para cada caso, la aptitud busca lo siguiente:

- Caso 1. Maximizar la conectividad actual respetando un valor establecido de demanda.
- Caso 2. Minimizar los rebombes (costos adicionales) manteniendo una presión mínima de servicio.
- Caso 3. Minimizar los costos por infraestructura nueva.
- Caso 4. Maximizar la conectividad, es decir, minimizar costos debido a rebombes o tuberías, respetando volúmenes máximos de suministro y presiones mínimas de servicio.

#### **4. 1. 4. Formación de la Generación 1 (Padres)**

Una generación está formada por “n” individuos, inicialmente generados de manera aleatoria, a partir ahí, la formación de las siguientes generaciones está en función de su predecesora, en otras palabras, los padres engendran hijos. La teoría neo-darwiniana dice que los mejores individuos prevalecen, por lo tanto, el algoritmo en cada iteración selecciona a los mejores padres para que sus características sean heredadas. Esta selección está basada en su aptitud, la cual, es comparada con los



demás individuos de su generación mediante rangos de selección basados en probabilidades. Este procedimiento se detalla a continuación.

### A. Asignación de probabilidades de selección.

Como su nombre lo indica, la probabilidad de selección consiste en calcular un valor (entre 0 y 1) en función del valor de aptitud de un individuo con respecto a la de los demás individuos de su generación. El primer paso es calcular el valor de la aptitud de la generación, esto se logra al sumar la aptitud de todos los individuos que la conforman, a esta suma de aptitudes individuales de una generación la denominamos “aptitud de la generación”. La probabilidad de cada individuo en la generación es entonces el cociente de su aptitud entre el valor de aptitud de la generación. La suma de probabilidades será la unidad. El cálculo se realizó de la siguiente manera:

- Caso 1. En este caso se realiza un proceso de maximización de la aptitud (conectividad) y la probabilidad se asignó de la siguiente manera:

$$P_{max(x)i} = \frac{\text{Aptitud Individual}}{\text{Aptitud de la Generación}}$$

- Caso 2 y 3. En estos casos se realiza un proceso de minimización, la probabilidad con la fórmula siguiente:

$$P_{min(x)i} = \frac{1 - P_{máx(x)i}}{\sum(1 - P_{max(x)i})}$$

- Caso 4. Obtenidas las probabilidades individuales de los 3 casos, para este caso se calculó un valor ponderado de la aportación de cada caso para obtener la probabilidad global:

$$P(caso1)i \times \frac{1}{3} + P(caso2)i \times \frac{1}{3} + P(caso3)i \times \frac{1}{3} = P(caso4)i$$

En los tres casos, los mejores individuos con base en la función objetivo tendrán mayor probabilidad.

### B. Ordenamiento por aptitud.

Con las probabilidades calculadas en el punto anterior, se realiza un reordenamiento de los individuos de mayor a menor, en otras palabras, del mejor individuo al peor según su aptitud.



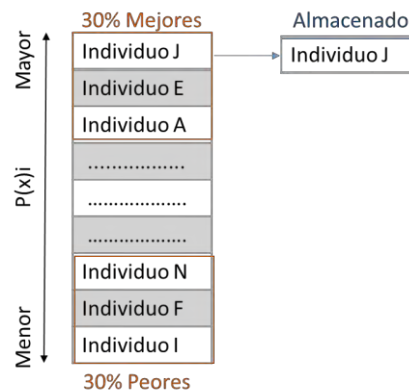
Con la intención de mejorar la tasa de convergencia se diseñó e implanto un proceso denominado “purga”. Este consiste en aniquilar de en cada generación aquellos individuos con los peores valores de aptitud, en otras palabras, los individuos con menor probabilidad. Este proceso se detallará a continuación.

Primero, tras realizar el ordenamiento se aplican las siguientes reglas:

- Separar al mejor individuo de la generación
- Separar al 30% de los mejores individuos
- Separar al 30% de los peores individuos.

El valor de 30% fue elegido de manera arbitraria pero puede ser modificado a conveniencia.

En la **Figura 14** se muestra lo descrito en este punto.



**Figura 14.** Ordenamiento de individuos

### C. Selección preliminar de padres.

La finalidad de las probabilidades obtenidas en el punto A, es brindarles a los individuos mejores evaluados en su aptitud una mayor oportunidad de ser seleccionados como padres. Para esto es necesario ponderar a los individuos dentro de la generación formando rangos de selección. Se utiliza el término rango pues no es un reordenamiento de los individuos, sino más bien se respeta el orden natural en que se formaron (Individuo A, B, C,..., N)



El rango de selección, busca reajustar la probabilidad de selección natural de un individuo ( $1/\text{número de individuos}$ ) al cambiarla por la probabilidad resultante de la evaluación de su aptitud con respecto de los demás individuos. Para un individuo con buena actitud, seguramente el rango de selección será más ancho con respecto al rango natural de selección de  $1/n$  y viceversa para un individuo con baja aptitud. Este rango se forma con el valor acumulado de la probabilidad, de tal manera que, el primer individuo tendrá un rango de ser elegido de entre 0 y el valor de su probabilidad, de ahí comenzará el rango del segundo y así sucesivamente hasta que la probabilidad del último individuo llegue a la unidad.

Apoyándose de una función ruleta (predeterminada en Matlab) se obtiene una serie de números aleatorios entre 0 y 1 con una longitud igual a la cantidad de individuos que se deseen seleccionar, ubicando estos valores en los rangos de selección y así para seleccionar de manera preliminar a los padres de la siguiente generación. Se consideran preliminares debido a que aún deben pasar por un procedimiento de purga, que se explicará en el siguiente apartado.

Como ejemplo de lo anterior, en la **Figura 15** se presenta una generación de 5 individuos ordenados tal cual se originaron ( $1^{\text{a}}$  columna), después de evaluar sus aptitudes individuales con respecto a la generación (la suma de los 5) se obtiene los valores de la columna 2, momentáneamente aún con un recuadro (rango) igual para los 5, sin embargo, nótese que la suma de los valores es igual a 1. A continuación, se aplica lo descrito en este apartado y el individuo 1 que tiene una mejor aptitud ensancha su rango de selección y el individuo 2 sufre lo contrario al contar con una baja aptitud. Sin embargo el valor generado por la función ruleta de 0.5 selecciona al individuo 3, que es el segundo mejor evaluado, esto se debió a que su rango de selección estaba entre 0.41 y 0.7



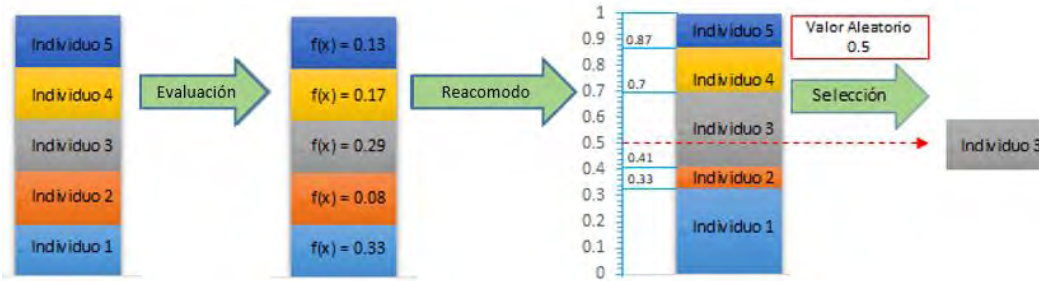


Figura 15. Proceso de selección de padres preliminares

#### D. Formación de padres definitivos.

Los padres seleccionados en el punto anterior son nuevamente evaluados y ordenados, según lo descrito en los puntos 4.1.3.B. y 4.1.4.B. respectivamente, esto con la finalidad de desechar al 30% de los peores padres preseleccionados y ser reemplazados por el 30% de los mejores individuos separados de la generación previa (punto 4.1.4. B.) para así obtener finalmente a los padres definitivos (Figura 16).

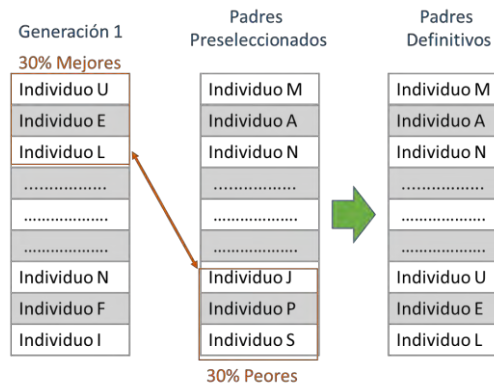


Figura 16. Formación de padres definitivos

#### 4.1.5. Fase Reproductiva.

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de un individuo es reproducirse, es decir, que sus características genéticas trasciendan en las futuras generaciones. Por lo tanto en la fase reproductiva del AG, dos padres (o incluso nada más uno) son sometidos a operadores genéticos que definen la manera intercambiarán o modificaran (según el caso) sus características para formar un nuevo individuo, denominado *hijo*.



Para este trabajo se consideró utilizar solo un padre, y a cada uno se le aplicó un operador genético llamado *mutación*, para que su material genético sea modificado y con ello, formar la nueva generación de individuos. Para llevar a cabo la mutación, se utilizaron dos vectores auxiliares que trabajan de la siguiente forma:

- Vector cambio. Este vector designa de manera aleatoria cada par de sub-individuos (sectores) que intercambiarán cromosomas (nodos).

- Vector cruza. Con este vector se elige que nodos de cada sector serán intercambiados. Para este trabajo de investigación la cantidad de nodos a intercambiar está basada en un 20% de la cantidad total de los mismos, sin embargo, este valor puede ser modificado a conveniencia.

Para ejemplificar este proceso, en la Figura 17 se muestra un individuo “A” de 10 nodos que después de pasar por el proceso 4.1.3.A. quedó conformado por 3 sub-individuos (sectores) y se le aplica los vectores cambio y cruza para formar el nuevo individuo A\*

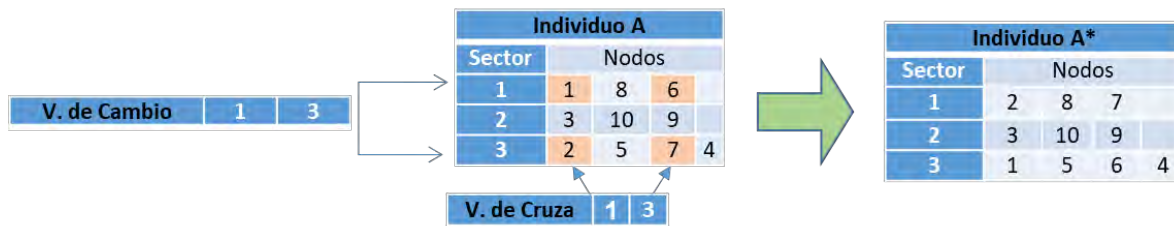
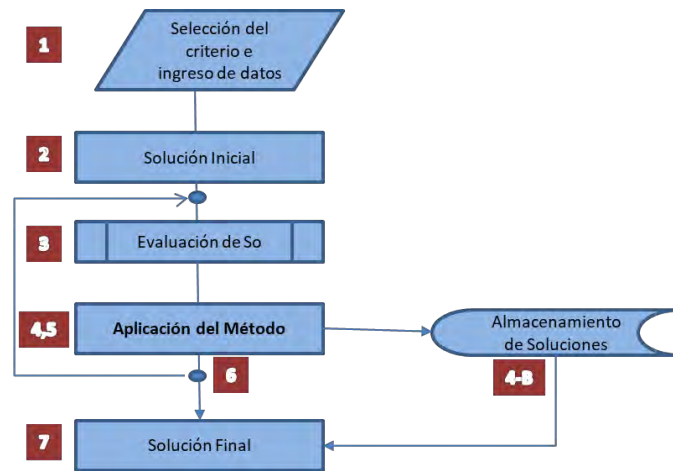


Figura 17. Proceso de mutación de un individuo.

#### 4.1.6. Continuación del proceso iterativo.

Con el punto anterior se concluye la parte medular de la metodología del AG, los nuevos individuos obtenidos en el punto anterior (Generación 2) regresan al punto 4.1.3 y repiten los pasos 4.1.4, 4.1.5 y 4.1.6 de manera iterativa hasta que se realicen las “n” iteraciones establecidas en el punto 4.1.1 cómo se ilustra en el siguiente diagrama de flujo (Figura 18).



**Figura 18.** Diagrama de flujo del AG

#### 4.1.7. Solución final.

Por cada generación, se almacenó en la memoria del programa al individuo mejor evaluado según el criterio analizado (Punto 4.1.4.B.) junto con el valor de su aptitud, por lo tanto, de entre los “n” individuos se selecciona al mejor de los mejores. Es decir, este individuo cuenta con la mejor aptitud evaluada (según el caso) de entre todos los individuos y por tanto, es considerado la solución final. De esta solución, se desplegará la cantidad de sectores y los nodos que los conforman. Independientemente del caso de análisis elegido (criterio de dimensionamiento), el mejor individuo presentará los valores calculados para todas los casos, es decir, a este individuo se le calculará la demanda, la presión, cantidad de rebombes y los posibles costos de inversión.

En la Tabla 1 se presentan la nomenclatura utilizada para presentar los resultados, en el primer renglón están los resultados propios del caso elegido para el análisis y, en el segundo renglón se encuentran los valores calculados para el resto de los parámetros hidráulicos, físicos (longitudes o rebombes) o económicos que se deseen consultar.



Tabla 1. Desglose de la nomenclatura utilizada para la presentación de los resultados

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
<b>Propios del criterio</b>	DotaciónNodal1 DotaciónSector1	PresionesSectorizacion2 PresionMaxima2 PresionMinima2 RebombeoSectorizacion2	CostoTotalSectorizaion3	Todos los anteriores con la terminación 4
<b>Otros criterios</b>	CostoTotalSectorizacion1 DistSectorizacion1 PresionesSectorizacion1 PresionMaxima1 PresionMinima1 RebombeoSectorizacion1	DotacionNodal2 DotacionSector2 CostoTotalSectorizacion2 DistSectorizacion2	DotacionNodal3 DotacionSector3 PresionesSectorizacion3 PresionMaxima3 PresionMinima3 RebombeoSectorizacion3 DistSectorizacion3	Ninguno

## 4.2. Adaptación del Recocido Simulado (RS)

En esta sección se explicará a detalle los pasos seguidos para llevar a cabo el acoplamiento del RS al tema de dimensionamiento de sectores.

### 4.2.1. Variables de ingreso.

Primeramente es necesario definir el valor de los parámetros o variables que el algoritmo del RS requiere para su manipulación y calculo, estos son los siguientes:

- Tuberías: Diámetro principal, rugosidad, conectividad actual y longitudes.
- Nodos: Cantidad, coordenadas X-Y, demandas, presiones actuales y elevaciones.
  - Abastecimiento: Cantidad de tanques elevados y/o estaciones de rebombeo y volumen de agua disponible.
- Valores del Criterio: Dotación Máxima (Caso 1 y 4), Presión de servicio mínima (Caso 2 y 4), Longitud de tubería máximo (Caso 3 y 4) y tiempo de enfriamiento (cantidad de soluciones).

### 4.2.2. Solución Inicial.

Para la obtención de la solución inicial, se propuso utilizar una función aleatoria para crear una serie o cadena formada por los valores de los nodos sin repetirse (denominada *cadena molecular*) respetando la posición del nodo inicial y final como se muestra en la **Figura 19**

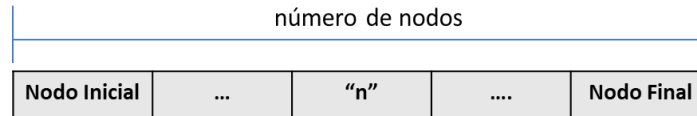


Figura 19. Formación de la cadena molecular

#### 4.2.3. Evaluación de la solución.

A diferencia del procedimiento anterior (AG) para este método, en este punto aún no se realiza el desensamble de la solución inicial sino que únicamente se hace la evaluación del criterio y se almacena temporalmente dicho valor. Debido a que para la metodología anterior se detalló el motivo de la elección de las cualidades a evaluar, para este apartado solo se enlistarán dichas actualidades: La evaluación de la solución inicial está en función de la característica o cualidad mejorar según el caso de análisis. Esta evaluación consiste en asignarle un valor numérico a la solución, este se obtiene al realizar un recorrido nodo a nodo evaluándolos con respecto a dicha característica y obtener el valor total del recorrido. Las cualidades o características a evaluar son las siguientes:

- Caso 1. Demanda Homogénea: Conectividad

En este caso se obtener la solución con mayor cantidad de conexiones que coincida con la conectividad actual de la red.

- Caso 2. Presión mínima: Estaciones de rebombero.

Al realizar el recorrido nodo a nodo, basado en los parámetros de ingreso y en las ecuaciones hidráulicas correspondientes, el algoritmo calcula la presión disponible en el nodo y, en caso de que está sea menor a la presión mínima establecida, considera de manera ficticia la incorporación de un sistema de rebombero que aumente la carga estática en 5mca (valor arbitrario y modificable). Por lo tanto, una buena solución es la que requiere implementar la menor cantidad de estos sistemas de rebombero.

- Caso 3. Longitud de tubería Costos de inversión.

Este caso es similar al primero, ya que busca obtener la mayor similitud a la red actual, sin embargo cuando no se presente de esta manera, calcula la longitud de tubería necesaria para establecer



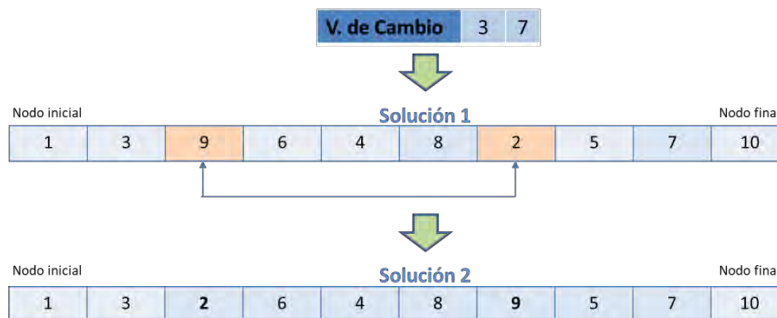
la conexión entre nodos correspondiente y le asigna un costo. Este costo se propone de manera arbitraria de \$ 10,000 pesos por metro lineal de tubería pero puede ser modificado.

Este caso, realiza las 3 evaluaciones descritas previamente de manera simultánea.

#### 4.2.4. Aplicación del recocido.

La fundamentación de este método consiste en que, durante el proceso de enfriamiento la configuración molecular de un material se ve modificada. Por tal motivo, en este punto se genera una nueva solución resultado de aplicar una perturbación a la solución original.

Para lograr lo anterior, se propuso crear un vector de cambio con la finalidad de designar de manera aleatoria que *moléculas* (nodos) de la solución inicial se intercambian de posición. La cantidad de nodos a intercambiar fue elegida como un 20% de la cantidad total de nodos de la red. En la **Figura 20** se presenta un ejemplo de este proceso de perturbación considerando una cadena de 10 nodos:



**Figura 20.** Generación de la nueva solución

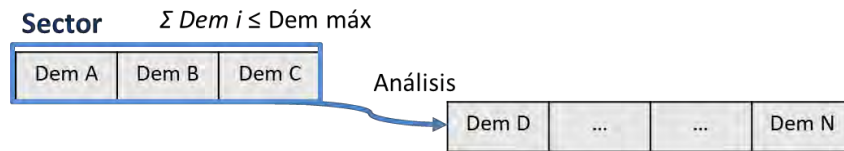
La nueva solución se le evalúa bajo las cualidades establecidas en el punto anterior para posteriormente realizar una comparación (según el caso de análisis) entre la evaluación de la solución 1 y la solución 2, la propuesta que resulte mejor se conserva y la otra se desecha. Es importante mencionar que para el caso 4, la mejor solución es la que satisface simultáneamente los 3 casos.



#### 4.2.5. Solución final.

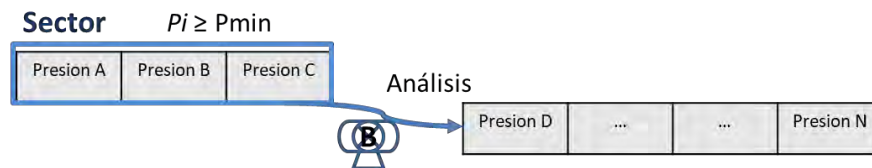
Concluido el proceso de enfriamiento (cantidad de iteraciones) la solución que se mantuvo es considerada como la solución final. La cual ahora sí, pasa a un proceso de desensamble para visualizar la cantidad de sectores y los nodos que los conforman. Esto se realiza haciendo un recorrido nodo a nodo calculando el valor acumulado de la cualidad según el caso analizado (**Figura 21**, **Figura 22** y **Figura 23**) y al llegar a la condición límite establecida, desensambla la cadena. Formándose de esta manera los sectores.

- Caso 1. Demanda homogénea.



**Figura 21.** Análisis y desensamble del caso 1 para el RS

- Caso 2. Presión de servicio.



**Figura 22.** Análisis y desensamble del caso 2 para el RS

- Caso 3. Longitud de recorrido.



**Figura 23.** Análisis y recorrido del Caso 3 para el RS

Para el caso 4 resulta difícil poder ilustrar este proceso pues la formación de un sector u otro puede estar regida por distintos criterios. Por ejemplo, si una solución propone la formación de 5 sectores, una probabilidad puede ser que 3 de ellos se formaran al llegar a la condición límite de demanda homogénea y 2 por la presión mínima y, ninguno llegue a la longitud máxima de tubería.



Finalmente, cada propuesta de sectorización es evaluada primeramente por el criterio de dimensionamiento seleccionado y posteriormente con respecto a los otros dos criterios, a excepción del caso 4 que evalúa los 3 de manera simultánea. Con la finalidad de que independientemente del criterio de dimensionamiento elegido se tenga una solución integral, donde se pueden observar los resultados de todas las variables. Los resultados son presentados con la misma nomenclatura presentada en la Tabla 1.





## CAPÍTULO 5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar los algoritmos descritos en el capítulo anterior a dos casos de estudio, una red de distribución de agua potable (RDAP) pequeña (Pátzcuaro) y una mediana (Querétaro).

Los resultados aquí presentados permiten evaluar las soluciones generadas por cada algoritmo para los 4 casos de análisis propuestos: Demanda Homogénea (Caso 1), Presión Mínima (Caso 2), Longitud de tuberías máxima (caso 3) y la combinación de los 3 (Caso 4); y con ello, determinar el dimensionamiento de los distritos hidrométricos más adecuado para cada combinación Algoritmo-Caso. Adicionalmente, se evaluó el desempeño y limitaciones para cada uno de los algoritmos empleados.

Para lograr lo anterior, las consideraciones generales que se implementaron tanto para el Algoritmo Genético como para el Recocido Simulado son las siguientes:

- La codificación de los algoritmos se realizó en el programa MatLab R2015.a. y la compilación de resultados se realizó en un computador personal (laptop) con procesador Intel® Core™ i7-4510 CPU @ 2.00-2.60 GHz y RAM de 8.00 GB.

- Amplitud de búsqueda equivalente, es decir, que la cantidad de soluciones a explorar por cada algoritmo sea numéricamente equivalente, con la finalidad de determinar si a mayor amplitud de búsqueda las soluciones propuestas mejoran.

Entonces, atendiendo a que el Algoritmo Genético (AG) cuenta con una búsqueda poblacional de soluciones de 'n' generaciones de 'm' individuos, (formando una matriz de tamaño  $N \times M$  y el Recocido Simulado es secuencial (es decir, se evalúa una solución a la vez), se utilizaron 3 valores de amplitud de búsqueda equivalentes presentados en la siguiente Tabla 2:

<b>Tabla 2. Definición de la amplitud de búsqueda a utilizar por los algoritmos</b>			
Algoritmo (soluciones)	Amplitud de búsqueda equivalente		
AG ( $N \times M$ )	100x100	200x200	300x300
RS ( $\Delta t$ )	10,000	40,000	90,000



- De manera inicial, se propuso llevar a cabo 40 repeticiones de los algoritmos utilizando las amplitudes de búsqueda establecidas en el punto anterior para cada combinación Algoritmo-Caso.

- El valor máximo o mínimo, denominado condición límite establecido en los algoritmos para la formación de los sectores (ver apartados 4.1.1 y 4.1.2) según el caso de análisis y la red de estudio, fueron los siguientes:

<b>Tabla 3. Definición de las condiciones límite para la formación de sectores</b>			
Red \ Caso	Demanda (max)	Presión (min)	Longitud (max)
Pátzcuaro	0.7 l/s	0.5mca	1,000 m
Querétaro	20.0 l/s	0.5mca	6,000 m

- Para determinar el grado de confiabilidad de los resultados y/o afirmaciones presentadas, a continuación se enlistan 3 criterios establecidos por diferentes autores sobre el tema:

- Rosenthal (en García, 2005) propone una confiabilidad mínima de 0.9 para tomar decisiones sobre la vida de las personas y 0.5 para propósitos de investigación
- Kaplan y Sacuzzo (en Hogan, 2004) señalan que la confiabilidad en el rango de 0.70 y 0.80 es lo suficientemente buena para cualquier propósito de investigación.
- De Vellis (en García, 2005) plantea la siguiente escala de valoración de la confiabilidad:
  - Por debajo de 0.60 es inaceptable
  - Entre 0.6 y 0.65 es indeseable
  - Entre 0.65 y 0.7 es mínimamente aceptable
  - De 0.7 a 0.8 es respetable
  - De 0.8 a 0.9 muy buena
  - Y finalmente, mayor a 0.9 ideal.

En base a lo anterior, para esta investigación los resultados analizados que se encuentren en un rango de 0.6 a 0.7 se considerarán como aceptables y mayor a este rango como buenos.



A continuación se describirá brevemente las características generales, físicas e hidráulicas de los casos de estudio y los resultados generados por los algoritmos al aplicar las consideraciones descritas anteriormente.

### 5. 1. RDAP del Frac. Villas del Sol, Pátzcuaro, Michoacán.

Esta red pequeña fue tomada de un proyecto de ampliación solicitado por parte de la administración de una urbanizadora privada a la subcoordinación de hidráulica urbana del Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua (IMTA), con el objetivo de conocer las características de operación del sistema y evaluar futuras ampliaciones. Por lo que, la información presentada a continuación fue proporcionada por personal del IMTA para fines de la presente investigación:

#### *Características de la Red de Distribución*

<i>Nombre de la Red</i>	Frac. Villas del Sol
<i>Ubicación</i>	Pátzcuaro, Michoacán
<i>Habitantes</i>	350 aprox.
<i>Tomas Domiciliarias</i>	183
<i>Superficie</i>	40, 120km <sup>2</sup>
<i>Abastecimiento</i>	Tanque Elevado de 38.5m <sup>3</sup>
<i>Longitud de tuberías</i>	1.294 km
<i>Cantidad de Nodos</i>	32
<i>Demanda de Diseño</i>	3.503lps

En la Figura 24 se presenta una imagen satelital de la RDAP descrita anteriormente y que en lo subsiguiente se le referirá como *Red 32n*, haciendo referencia a su cantidad de nodos.



**Figura 24.** Imagen satelital de la ubicación de la red de distribución (Frac. Villas del Sol, Pátzcuaro, Michoacán)

Debido a que la Red 32n es pequeña en cantidad de nodos y tuberías, es viable presentar el listado de sus características fisiográficas e hidráulicas iniciales (Tabla 4 y Tabla 5):

Tabla 4. Valores nodales de la Red 32n					
Nodo	Demanda (l/s)	Elevación (m)	Carga Est. (mca)	Coord-X	Coord-Y
1	0.134	2206.82	8.48	227551.94	2159506.26
2	0.268	2206.76	18.33	227471.68	2159514.61
3	0.096	2206.76	21.56	227480.93	2159553.1
4	0.249	2196.00	10.00	227429.01	2159519.68
5	0.096	2196.00	14.16	227434.39	2159563.25
6	0.134	2196.00	11.73	227421.85	2159466.87
7	0.191	2195.98	12.57	227389.03	2159524.76
8	0.153	2195.98	13.55	227381.87	2159473.44
9	0.268	2195.98	17.32	227349.95	2159530.72
10	0.134	2195.98	17.96	227336.82	2159466.28
11	0.172	2190.94	14.79	227308.77	2159538.18
12	0.095	2190.94	17.13	227269.99	2159546.24
13	0.172	2190.94	17.82	227275.66	2159582.64
14	0.172	2190.96	15.60	227312.95	2159574.58
15	0.114	2190.94	17.09	227320.41	2159608.89
16	0.038	2190.94	17.86	227322.8	2159619.64
17	0.095	2190.94	19.75	227283.41	2159619.04
18	0.038	2190.93	21.26	227287.59	2159642.61
19	0.057	2190.93	20.97	227266.7	2159624.41
20	0.114	2190.93	21.78	227251.49	2159627.1
21	0.057	2190.93	24.03	227213	2159630.97
22	0.114	2195.51	18.77	227355.02	2159566.53



23	0.057	2195.51	19.62	227360.09	2159592.48
24	0.134	2195.74	15.89	227393.81	2159559.37
25	0.038	2195.74	18.11	227396.79	2159582.04
26	0.095	2190.94	19.79	227241.05	2159589.2
27	0.057	2190.94	18.21	227249.7	2159549.82
28	0.019	2190.94	19.24	227227.92	2159561.75
29	0.019	2190.94	20.38	227217.18	2159578.46
30	0.057	2190.93	24.44	227207.03	2159631.57
31	0.019	2190.93	27.45	227186.74	2159660.81
32	0.038	2190.94	21.83	227184.95	2159573.99

**Tabla 5. Valores y conectividad de las tuberías de la Red 32n**

Tubería	Nodo Inicial	Nodo Final	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Rugosidad (mm)
1	1	2	80.69	101.6	0.009
2	2	3	39.58	50.8	0.009
3	2	34	41.32	101.6	0.009
4	4	5	43.9	50.8	0.009
5	4	6	53.29	50.8	0.009
6	4	7	40.3	101.6	0.009
7	7	8	51.82	50.8	0.009
8	7	9	39.54	101.6	0.009
9	9	10	65.77	50.8	0.009
10	9	35	41.01	101.6	0.009
11	11	12	39.61	101.6	0.009
12	12	13	36.84	50.8	0.009
13	13	14	38.15	50.8	0.009
14	14	15	35.11	50.8	0.009
15	15	16	11.01	50.8	0.009
16	15	17	38.36	50.8	0.009
17	17	18	23.94	50.8	0.009
18	17	19	17.55	50.8	0.009
19	19	20	15.45	50.8	0.009
20	20	21	38.68	50.8	0.009
21	9	22	40.10	50.8	0.009
22	22	23	26.45	50.8	0.009
23	22	24	39.44	50.8	0.009
24	24	25	22.87	50.8	0.009
25	7	24	34.94	50.8	0.009
26	22	36	41.74	50.8	0.009
27	11	14	36.64	50.8	0.009
28	13	17	37.22	50.8	0.009
29	13	26	35.23	50.8	0.009
30	29	32	32.53	50.8	0.009
31	29	30	54.07	50.8	0.009
32	30	31	35.59	50.8	0.009
33	12	27	20.6	101.6	0.009
34	27	28	24.84	101.6	0.009
35	28	29	19.86	101.6	0.009



Los valores de la Tabla 4 y Tabla 5 serán manipulados por los algoritmos para los 4 casos de análisis propuestos (demanda homogénea, presión mínima, longitud de tubería y su combinación) y los resultados se presentaran en los apartados siguientes.

### 5.1.1. Algoritmo Genético Red 32n.

En la Figura 25 se presentan los resultados obtenidos por el AG al realizar las 40 corridas bajo las 3 amplitudes de búsqueda propuestas para el primer caso de análisis, demanda homogénea con un valor aproximado de 0.7 l/s por sector. En el eje horizontal se aprecia la cantidad de soluciones generadas (120 en total) y en el sentido vertical, cada valor graficado (forma circular) de distinto color representa un sector y su valor en el eje dicta la cantidad de nodos que lo conforman. Adicionalmente, se puede observar 5 ejes secundarios (3 horizontales y 2 verticales) que se describen a continuación:

- El eje horizontal intermedio, representado con una línea continua, corresponde al valor medio del conjunto de datos graficados ( $\mu$ )
- Los otros dos ejes horizontales (superior e inferior) representados con una línea discontinua corresponden al acotamiento de valores considerando la desviación estándar del conjunto ( $\sigma$ ), es decir, la línea superior en lo subsiguiente denominada *Rango Mayor* corresponde al valor de la media más la desviación estándar ( $\mu + \sigma$ ) y la línea inferior a la media menos la desviación estándar ( $\mu - \sigma$ ), considerado como el *Rango Menor*.
- Los ejes verticales representados con una línea punteada marcan la división entre las distintas amplitudes de búsqueda propuestas, 100, 200 y 300 generaciones respectivamente.

El acotamiento de los valores entre el rango mayor y menor, representa el rango o tamaño de los sectores que el algoritmo propone para las condiciones hidráulicas y el parámetro máximo establecido para el dimensionamiento.

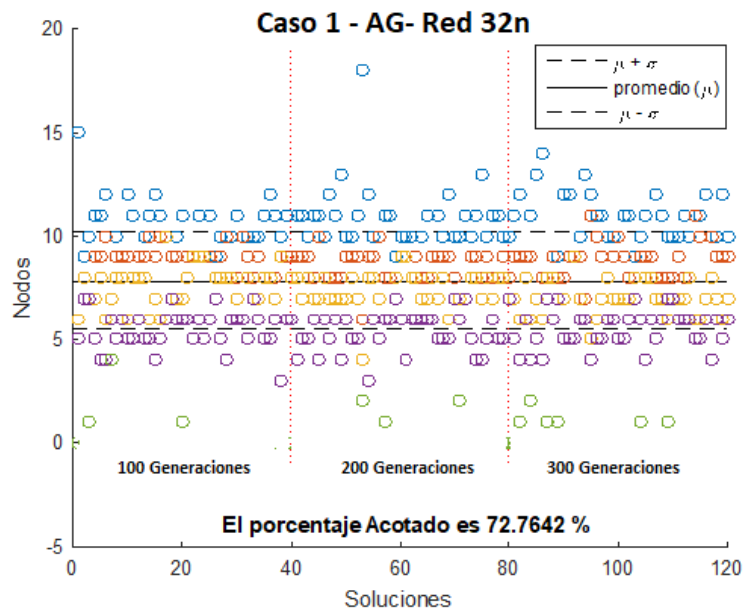
Para verificar la validez del establecimiento del tamaño del sector, el grado de confiabilidad de este análisis está asociado al porcentaje de valores que se encuentran representados dentro del acotamiento o límites descritos en el párrafo anterior. Para ello, se contabilizan la cantidad de valores





que están dentro del rango establecido luego, este valor se divide entre el total de datos o valores del análisis y multiplica por 100 para obtener el valor porcentual o grado de confiabilidad de los valores acotados.

El porcentaje de la cantidad de sectores que se encuentran, el valor medio de los nodos por sector, el rango mayor, el rango menor y el porcentaje de confiabilidad de los nodos acotados obtenidos para este caso 1 están resumidos en la Tabla 6.



**Figura 25.** Grafica de los resultados obtenidos por el AG para el caso 1.

**Tabla 6. Resumen de resultados caso 1 (AG)**

<i>Cantidad de Sectores</i>	4 (85%)
<i>Valor medio de nodos</i>	7.82
<i>Rango Mayor</i>	10.19
<i>Rango Menor</i>	5.45
<i>Grado de confiabilidad</i>	72.76 %

Otro resultado que debemos tomar en cuenta es el esfuerzo computacional promedio calculado a partir del tiempo requerido por el algoritmo para completar el número de generaciones. A partir de este criterio se identifica que bajo el esquema propuesto de analizar “n” generaciones con “n” individuos, el aumento en el tiempo no es lineal (Tabla 7). El análisis de estos resultados se verá más

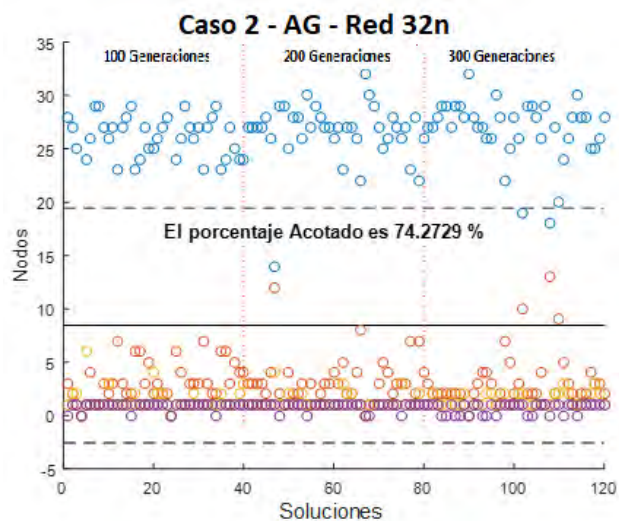


adelante. Es importante recordar que estos resultados se obtienen empleando una computadora de las características descritas al principio del presente capítulo.

**Tabla 7. Tiempo de computo caso 1 (AG)**

Amplitud de 100x100	9.02 s
Amplitud de 200x200	21.58 s
Amplitud de 300x300	47.85 s

Siguiendo el esquema utilizado para la presentación de resultados en este primer caso, ahora se presentan las gráficas correspondiente al caso 2, 3 y 4 (Figura 26, Figura 27 y Figura 28 respectivamente) junto con sus respectivas tablas resumen de resultados y tiempo de computo medio (Tabla 8 y Tabla 9).



**Figura 26.** Gráfica de los resultados obtenidos por el AG para el caso 2.



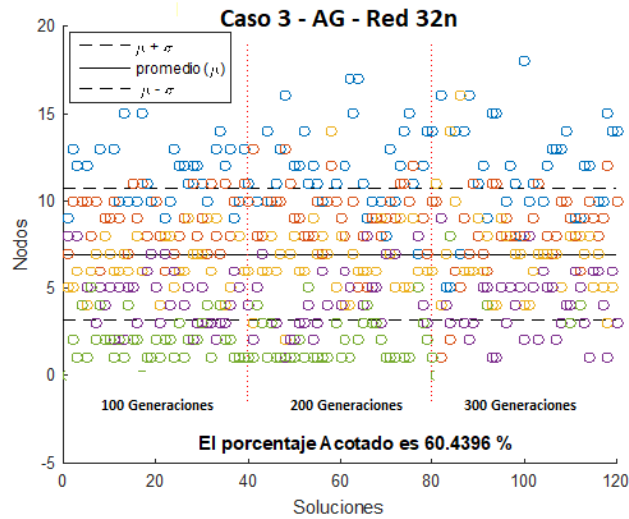


Figura 27. Grafica de los resultados obtenidos por el AG para el caso 3.

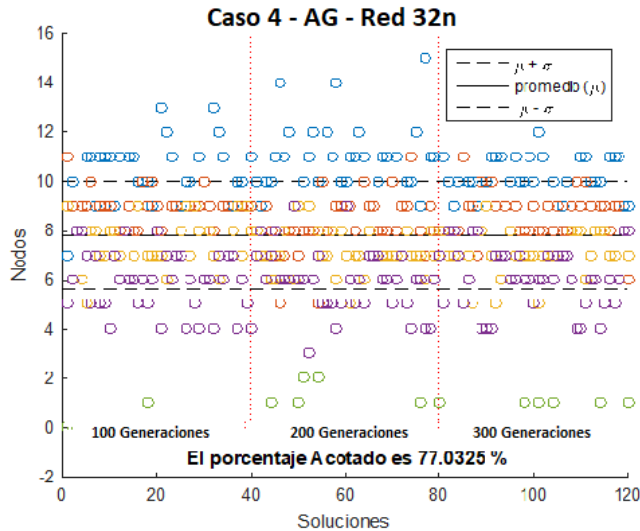


Figura 28. Grafica de los resultados obtenidos por el AG para el caso 4.

Tabla 8. Resumen de resultados casos 2 al 4 (AG)

Valor analizado	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Cantidad de Sectores	4 (70%)	5 (95%)	4 (88%)
Valor medio de nodos	8.44	6.93	7.79
Rango Mayor	19.44	10.73	10.00
Rango Menor	0	3.14	5.59
Grado de confiabilidad	74.27 %	60.44 %	77.03 %

Tabla 9. Tiempo de computo casos del 2 al 4 (AG)

Amplitud de búsqueda	Caso 2	Caso 3	Caso 4
100 gen. x 100 indiv.	28.11 s	36.30 s	43.80 s
200 gen. x 200 indiv.	196.96 s	147.79 s	129.5 s
300 gen. x 300 indiv.	338.85 s	158.60 s	364.58 s

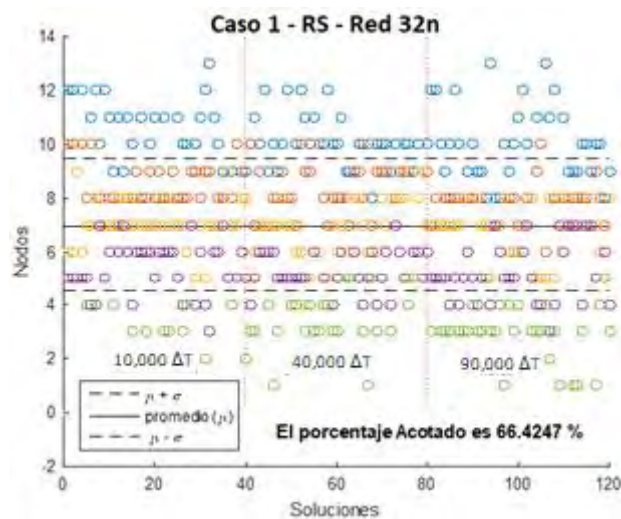
De los resultados de la aplicación del AG a la Red 32n se observa lo siguiente:

- En 3 de los 4 casos, el grado de confiabilidad del acotamiento entre el Rango Mayor y Menor es bueno, y para el caso 2 aceptable.
- De igual manera a excepción del caso 2, la convergencia a una cantidad de sectores óptima (valor porcentual entre paréntesis) es muy buena.
- El espectro formado por los tiempos de computo es muy amplio, de 9.02 a 364.58 segundos

Más adelante, en la sección 5.1.3 se hará un análisis más extenso de estos resultados junto con los obtenidos por el RS que se presentan en el siguiente apartado.

### 5.1.2. Recocido Simulado (RS)

En las Figura 29, 30, 31 y 32 se ilustran los resultados obtenidos utilizando el RS en los 4 casos de estudios, en dichas figuras el cambio de amplitud a lo largo de las soluciones (eje horizontal) está representado por una línea punteada roja. En la Tabla 10 se presentan los valores numéricos correspondientes a las medias, rangos, porcentaje de confiabilidad y tiempo promedio de cómputo invertido por solución.



**Figura 29.** Grafica de los resultados obtenidos por el RS para el caso 1

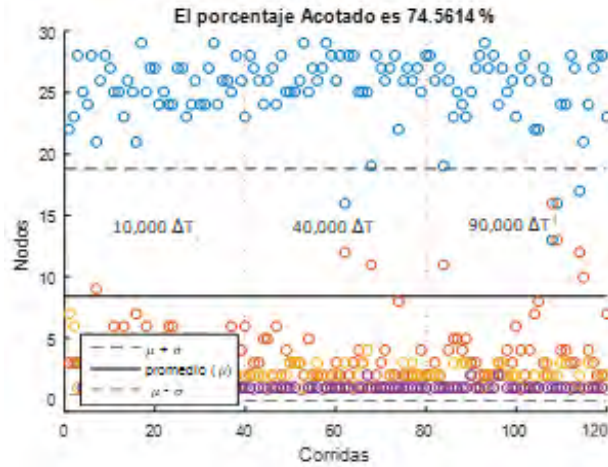


Figura 30. Grafica de los resultados obtenidos por el RS para el caso 2

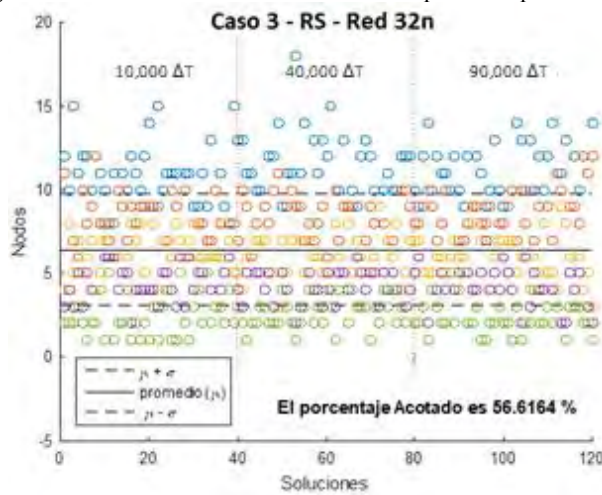


Figura 31. Grafica de los resultados obtenidos por el RS para el caso 3

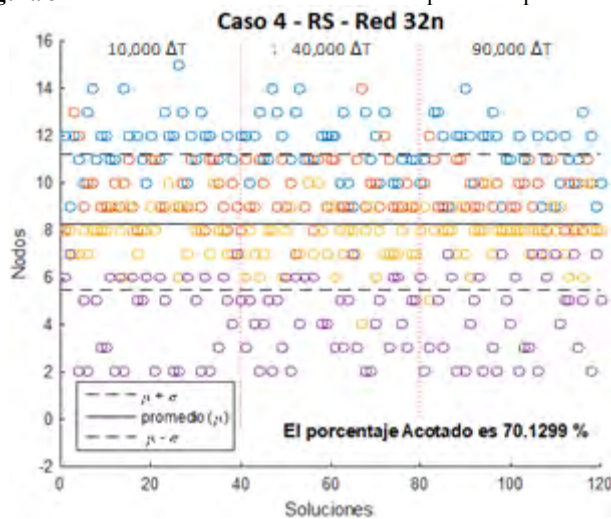


Figura 32. Grafica de los resultados obtenidos por el RS para el caso 4



**Tabla 10. Resumen de resultados obtenidos con el RS (Red 32n)**

Valor analizado	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Cantidad de Sectores	5 (80%)	4 (92.5%)	5 (98%)	4 (80%)
Valor medio de nodos	6.97	14.64	6.42	8.31
Rango Mayor	9.45	18.84	9.78	11.18
Rango Menor	4.50	0	3.05	5.44
Grado de confiabilidad	66.42%	74.56%	56.62%	70.13%
Tiempo de Computo ( $\Delta t = 10,000$ )	26.56 s	48.14 s	35.47 s	41.30 s
Tiempo de Computo ( $\Delta t = 40,000$ )	81.92 s	92.29 s	66.58 s	152.00 s
Tiempo de Computo ( $\Delta t = 90,000$ )	106.55 s	155.99 s	137.40 s	350.44 s

De esta sección, preliminarmente se puede apreciar lo siguiente:

- El grado de confiabilidad a nivel global disminuye con respecto al AG, pues se obtiene un valor no deseable (caso 3), uno aceptable (caso 1) y dos buenos (casos 2 y 4).
- La convergencia a una cantidad de sectores (según el caso) es de muy buena (más de 80%) a ideal (más de 90%).
- El espectro del tiempo de cómputo es más compacto que el AG, de 26.56 a 350.44 segundos.

En el siguiente apartado, se hará un análisis más profundo de estos resultados y los del AG.

### 5. 1. 3. Análisis y comentarios de la Red 32n

De los resultados presentados en ambos algoritmos y para los 4 casos, se tienen los siguientes comentarios:

- Para todos los casos se observa que los algoritmos obtiene un sector grande (ilustrado con círculos azules) donde se agrupa una gran cantidad de nodos, se debe a que es uno de los primeros sectores que se forma antes de la condición límite y por lo tanto, tiene la mayor libertad de agrupar la mayor cantidad de nodos en un sector.

- En contra posición a lo anterior, también se llegan a formar sectores pequeños o nodos “suelos” graficados como círculos verdes en la mayoría de los casos (morado para el caso 2). Esto se debe a que la gran mayoría de los nodos fueron acomodados en los otros sectores y por lo tanto, estos nodos quedan sueltos y de manera forzada forman un sector adicional, aunque en la mayoría de



los casos no lleguen a cumplir con la condición límite, por ejemplo, la suma de demanda nodal de ese nodo (o nodos) no llegue(n) a la demanda máxima establecida de 0.7 l/s para el caso 1 de análisis.

- Considerando el punto anterior, lo ideal es que este tipo de soluciones no se presenten ya que los algoritmos fueron diseñados para favorecer soluciones donde haya el menor número de sectores. Sin embargo, fueron tomados en cuenta en el análisis estadístico (media y desviación estándar) ya que este tipo de resultados se logran debido a la alta capacidad de exploración de los algoritmos empleados.

- El caso 2 es especialmente representativo con respecto al tema de la dispersión de los resultados (descrito en los primeros dos puntos de estos comentarios) pues se observa una amplia separación entre la serie de color azul y las otras dos. Esto debido a que al ser una red muy pequeña, en realidad no cuenta con problemas de presión (véanse los valores de elevación y carga estática de la Tabla 4) y eso se ve reflejado en que en un solo sector, prácticamente se encuentran agrupados la mayoría de los nodos de la red. Por ejemplo, en la solución 66 del AG (mostrada en la Figura 26) incluso están los 32 nodos, y las otras series únicamente representan el complemento para llegar al total de nodos, lo observado en el punto anterior. Sin embargo, aunque el valor medio es bajo comparado con el espectro de valores de color azul, el caso cuenta con un porcentaje de confiabilidad bueno (74.27%).

- Para evaluar la estabilidad de los algoritmos se realizaron dos análisis:

- La confiabilidad de los tamaños de sectores.

Este análisis consiste en analizar la dispersión vertical de los valores graficados para todas las combinaciones Algoritmo-Caso (Figura 25 a 32) y para ello, se utilizaron los grados de confiabilidad calculados. Estos valores se resumen en la Tabla 11, y con ellos se calcula el porcentaje de veces en los cuales se tiene un porcentaje mayor al 60% (es decir, aceptable), tanto por algoritmo como global.

<b>Tabla 11. Concentrado de los grados de confiabilidad para la Red 32n</b>						
Algoritmo	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Porc. Algor.	Porc. Global
AG	72.76 %	74.27 %	60.44 %	77.03 %	100 %	87.5 %
RS	66.42 %	74.56 %	56.62 %	70.13 %	75 %	

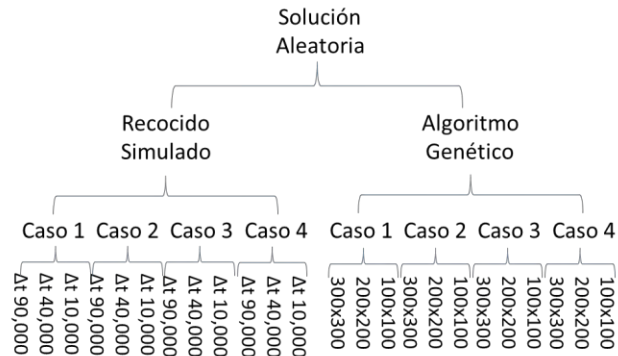


El porcentaje global se encuentra en el rango muy bueno, por lo que se puede concluir que existe una confiabilidad de la cantidad de sectores, es decir, ambos algoritmos convergen a un cantidad de sectores bajo las condiciones establecidas.

- La confiabilidad en la amplitud de búsqueda (o soluciones exploradas).

Ahora, esta evaluación es en sentido horizontal de las gráficas presentadas (Figura 25 a 32), el objetivo de esto es determinar si al aumentar las amplitudes de búsqueda (Tabla 2) o el realizar un mayor número de corridas de los algoritmos, las soluciones mejoran o en su defecto empeoran.

Con una simple inspección visual no se aprecia tendencia (inclinación) en favor o en contra de que las soluciones mejoren. Sin embargo para corroborar lo anterior, se propuso seleccionar 3 soluciones de manera aleatoria de cada caso de análisis (casos del 1 al 4) por cada algoritmo y para cada bloque de amplitud de búsqueda propuesta (Tabla 2), obteniendo un total de 24 soluciones elegidas aleatoriamente. La Figura 33 ilustra lo descrito:



**Figura 33.** Desglose de la selección de las 24 soluciones obtenidas

Por cada solución elegida, se tomó el valor máximo y mínimo de los parámetros hidráulicos que se utilizaron como criterio de dimensionamiento (demanda, presión, longitud de tubería, etc.). Para aclarar este punto, supongamos que en una solución donde se proponen 4 sectores, en cada uno los valores de la demanda son 10 l/s, 14.3 l/s, 8.8 l/s y 12.9 l/, entonces para el análisis se tomaría como valor máximo 14.3 l/s y como mínimo 8.8 l/s.





Con cada uno de estos valores, se realizó una división entre el valor medio de todo el caso (los establecidos en las Tabla 6, 8 y 10) resultado se le resto a la unidad (1), para luego multiplicarse por 100 y así obtener el porcentaje de dispersión de dicha solución respecto a la media, un valor positivo indica que está por encima de la media y un valor negativo significa que es inferior. Se utilizó término porcentaje de dispersión para evitar confusión con el porcentaje asociado a la confiabilidad.

Lo descrito en los párrafos anteriores sobre el análisis de confiabilidad de la amplitud de búsqueda y los cálculos correspondientes están resumidos en la Tabla 12 para el AG.

Cabe mencionar que este análisis no se aplicó cuando el parámetro a analizar coincide el de su caso de análisis, por ejemplo, la presión mínima no se analizó para el caso 2, ya que todas las soluciones oscilan cercanas a la condición límite (0.5 mca para este caso) y por ende, el análisis no resulta representativo; lo mismo para el caso 1 y 3. Esto se aprecia en la diagonal (de color rosado) sin análisis de la Tabla 12.

**Tabla 12. Porcentajes de dispersión de los resultados obtenidos por el AG**

Amp. Búsqueda Parámetro		Caso 1			Caso 2			Caso 3			Caso 4					
		100 Gen	200 Gen	300 Gen	100 Gen	200 Gen	300 Gen	100 Gen	200 Gen	300 Gen	100 Gen	200 Gen	300 Gen			
<b>Demanda Máxima</b>	Valor (lps)	N/A			1.79	1.98	1.84	0.98	0.82	1.06	0.57	0.54	0.57			
	Media (lps)				1.66			0.83			0.59					
	% dispersión				7.83	19.28	10.84	18.07	-1.20	27.71	-3.39	-8.47	-3.39			
<b>Demanda Mínima</b>	Valor (lps)				0.03	0.01	0.02	0.04	0.1	0.03	0.48	0.49	0.47			
	Media (lps)				0.04			0.11			0.4					
	% dispersión				-25.00	-75.00	-50.00	-63.64	-9.09	-72.73	20.00	22.50	17.50			
<b>Presión Máxima</b>	Valor (m)				17.19	12.34	11.92	N/A			9.9	9.9	11.25	13.72	19.02	17.88
	Media (m)				14.85						13.34			16.34		
	% dispersión				15.76	-16.90	-19.73				-25.79	-25.79	-15.67	-16.03	16.40	9.42
<b>Presión Mínima</b>	Valor (m)	0.49	0.2	-0.78	0.59	-0.58	0				3.27	-1.25	-1.25			
	Media (m)	-0.47			-0.47						-1.25					
	% dispersión	-204.26	-142.55	65.96	-225.53	23.40	-100.00				-361.60	0.00	0.00			
<b>Longitud de tubería</b>	Valor (m)	402.08	404.87	417.65	384.8	434.12	282.75				N/A			449.7	457.78	427.84
	Media (m)	397.34			352.4									434.01		
	% dispersión	1.19	1.90	5.11	9.19	23.19	-19.76							3.62	5.48	-1.42
<b>Costos de inversión</b>	Valor (\$)	1.39E+07	1.40E+07	1.37E+07	1.03E+07	7.96E+06	6.35E+06	1.54E+07	1.53E+07	1.48E+07						
	Media (\$)	1.34E+07			9.10E+06			1.47E+07								
	% dispersión	3.78	4.53	2.64	12.97	-12.55	-30.20	5.25	4.18	1.05						



Para este análisis se optó considerar un valor de 0.7 (70%) como criterio de confiabilidad, con la finalidad de ser más estrictos pues se están evaluando los parámetros hidráulicos y así, tener un grado de análisis bueno. Por lo tanto, de los 54 porcentajes de dispersión obtenidos, se observan 11 valores elevados, es decir, mayores a 30 por ciento (complemento del 70% deseado), resaltados en rojo y azul.

La mayoría (los 10 en color rojo) de estos 11 valores se presentan en los parámetros hidráulicos de demanda y presión mínima, donde se debe recordar que estos valores muy bajos con respecto a la media se deben a la formación de sectores pequeños o nodos “sueños”. Es por esa razón que no deben ser tomados en cuenta en este análisis.

Entonces tenemos que 1 de los 54 valores tienen un porcentaje mayor al 30% (resaltado en color azul), es decir, un 91.8%. Lo cual nos permite concluir que en Algoritmo Genético presenta una muy buena estabilidad, tanto en la amplitud de búsqueda (soluciones exploradas) y en la convergencia en los resultados (cantidad de sectores), es decir, ni la cantidad de generaciones ni la cantidad de corridas realizadas garantizan que los resultados mejores o empeoren. Este mismo análisis se aplicó para el Recocido Simulado y los resultados se presentan en la Tabla 13.

**Tabla 13. Porcentajes de dispersión de los resultados obtenidos por el RS**

Parámetro	Amp. Búsqueda	Caso 1			Caso 2			Caso 3			Caso 4					
		10,000 Δt	40,000 Δt	90,000 Δt	10,000 Δt	40,000 Δt	90,000 Δt	10,000 Δt	40,000 Δt	90,000 Δt	10,000 Δt	40,000 Δt	90,000 Δt			
Demanda Máxima	Valor (lps)	N/A			1.38	1.79	1.39	0.82	0.67	0.64	0.64	0.89	0.69			
	Media (lps)				1.59			0.78			0.79					
	% dispersión				-13.21	12.58	-12.58	5.13	-14.10	-17.95	-18.99	12.66	-12.66			
Demanda Mínima	Valor (lps)				0.2	0.01	0.08	0.1	0.22	0.2	0.24	0.57	0.31			
	Media (lps)				0.06			0.13			0.27					
	% dispersión				233.33	-83.33	33.33	-23.08	69.23	53.85	-11.11	111.11	14.81			
Presión Máxima	Valor (m)				9.9	9.9	9.25	N/A			19.51	29.32	28.29	13.46	18.91	21.39
	Media (m)				13.28						21.73			16.49		
	% dispersión				-25.45	-25.45	-30.35				-10.22	34.93	30.19	-18.37	14.68	29.71
Presión Mínima	Valor (m)	1.45	1.73	0.84	-7.57	-11.53	-5.53				1.74	0.69	1.58			
	Media (m)	0.49			-6.25						-1.03					
	% dispersión	195.92	253.06	71.43	21.12	84.48	-11.52				-268.93	-166.99	-253.40			
Longitud de tubería	Valor (m)	294.33	210.47	258.78	344.22	294.65	342.63				N/A			400.24	564.86	443.9
	Media (m)	303.91			339.03									441.99		
	% dispersión	-3.15	-30.75	-14.85	1.53	-13.09	1.06							-9.45	27.80	0.43
Costos de inversión	Valor (\$)	7.08E+06	5.36E+06	4.30E+06	1.05E+07	7.27E+06	1.05E+07	1.30E+07	1.32E+07	1.30E+07						
	Media (\$)	9.73E+06			9.73E+06			1.29E+07								
	% dispersión	-27.21	-44.91	-55.81	7.96	-25.24	8.17	0.66	2.09	0.63						





Bajo las mismas consideraciones tomadas en el AG, para este caso de igual manera se eliminan los resultados resaltados en color rojo, que corresponden a los sectores pequeños o nodos sueltos en los criterios de demanda y presión mínima. Por lo tanto, únicamente se consideran los 6 valores con un porcentaje de más del 30% resaltados en color azul de entre los 54 datos analizados, lo que corresponde a un valor de 11.11 %.

En base al resultado obtenido, se considera que el RS cuenta con una estabilidad en los resultados presentados buena, pero menor que la del AG.

El análisis de la estabilidad de los resultados de ambos algoritmos se realizó con la finalidad de brindar la oportunidad de utilizar una amplitud de búsqueda no tan alta ni realizar tantas demasiadas corridas de los algoritmos, y tener la certeza de obtener un resultado adecuado. Lo anterior es importante ya que el objetivo de la investigación es fomentar estas metodologías como una alternativa viable para el dimensionamiento de sectores.

Para cerrar el análisis de la Red 32n, se observa que el caso 4 presenta buenos resultados, tanto en sus porcentajes de confiabilidad global como en el de la amplitud de búsqueda, ya que juntando las Tabla 12 y Tabla 13 se puede ver que este caso fue el que no conto con ningún valor resaltado en azul, es decir, con porcentajes mayores de 30%, (considerando que los valores en rojo no son tomados en cuenta). Sin embargo, este caso es el que para ambos algoritmo implica un costo (tiempo) computacional mayor (Tabla 7, 9 y 10).

## **5. 2. Red de Distribución CEA Querétaro**

Ahora toca evaluar los resultados de los algoritmos (AG y RS) al manipular una red de distribución más compleja. Para ello, en atención a una solicitud por parte del programa de Posgrado UNAM-IMTA, el organismo operador del estado de Querétaro, la Comisión Estatal de Aguas (CEA Querétaro) proporcionó la información pertinente para realizar este trabajo de investigación, la cual consiste en un sector de la red de distribución de la ciudad y sus características se presentan a continuación:



#### Características de la Red de Distribución

<i>Nombre de la Red</i>	Sector 118 – San Carlos.
<i>Ubicación</i>	Querétaro, Qro.
<i>Habitantes</i>	14,109 aprox.
<i>Tomas domiciliarias</i>	5,783
<i>Superficie</i>	964, 415 km <sup>2</sup>
<i>Abastecimiento</i>	Tanque Elevado de 150m <sup>3</sup>
<i>Longitud de tuberías</i>	45, 298.67 km
<i>Cantidad de Nodos</i>	913
<i>Demanda de Diseño</i>	101. 68 l/s

En la Figura 34, se presenta una imagen satelital donde se aprecia la delimitación del Sector 118 de la red de distribución proporcionada, y que en lo sucesivo se denominará *Red CEA*. Los datos correspondientes a la demanda nodal, elevaciones, coordenadas, presiones de servicio actuales, conectividad y longitud de tuberías, necesarios para que los algoritmos manipulen, no serán presentados en este documento debido a la extensión de dicha información, sin embargo, en la Figura 35 se puede ver una captura de pantalla de la manera en que la información fue presentada por la CEA Querétaro.

Para esta red de distribución, basado en el análisis y conclusiones preliminares del apartado anterior (Red 32n) se propuso realizar 20 corridas para ambos algoritmos únicamente considerando el 4º Caso, ya que evalúa los otros 3 de manera simultánea y presento una buena estabilidad en los parámetros hidráulicos. De las 20 corridas propuestas, se consideraron 10 de las primeras dos primeras amplitudes de búsqueda propuestas al inicio de este capítulo, es decir, de la siguiente manera:

Tabla 14. Amplitudes de búsqueda para Red CEA		
Algoritmo	Amplitud de búsqueda	
AG (NxM)	100x100	200x200
RS ( $\Delta t$ )	10,000	40,000

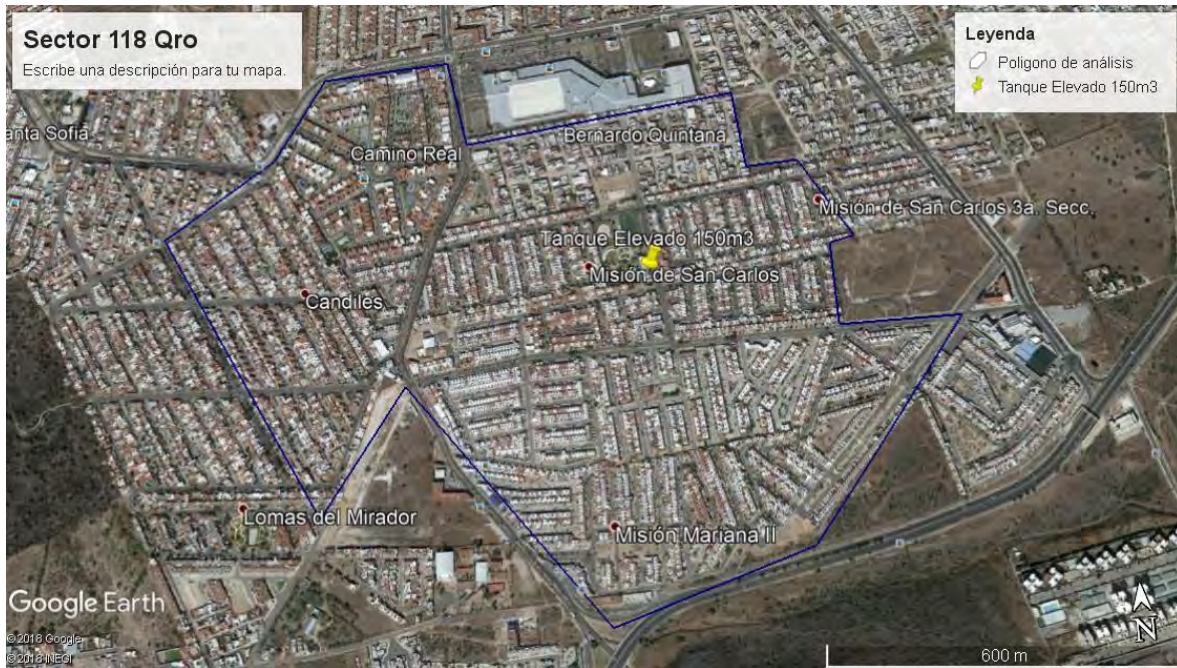


Figura 34. Imagen satelital de la zona de análisis comprendida para la Red CEA

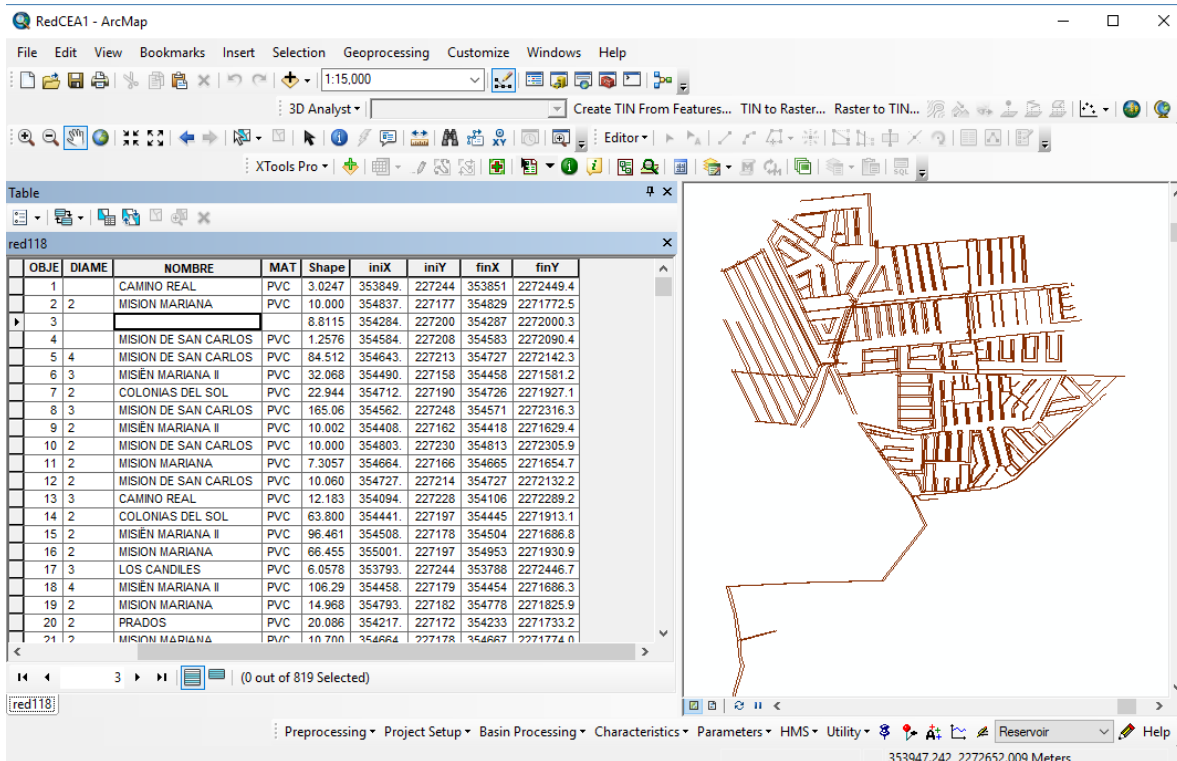


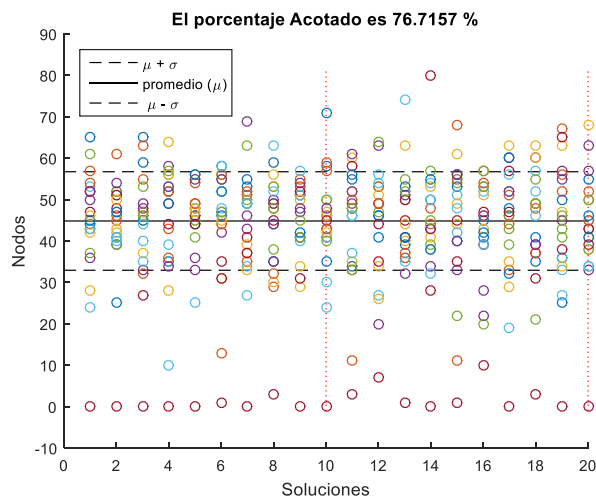
Figura 35. Visualización en ArcGis de la información proporcionada de la Red CEA.



### 5.2.1. Algoritmo Genético Red CEA

La gráfica contenida en la Figura 36 representa la cantidad de nodos por sector (círculos de distintos colores) que se obtuvieron al realizar las 20 corridas propuestas en el apartado anterior (10 con 100x100 soluciones exploradas y 10 con 200x200). En la Tabla 15 se presenta el concentrado de los valores numéricos de dichos resultados graficados.

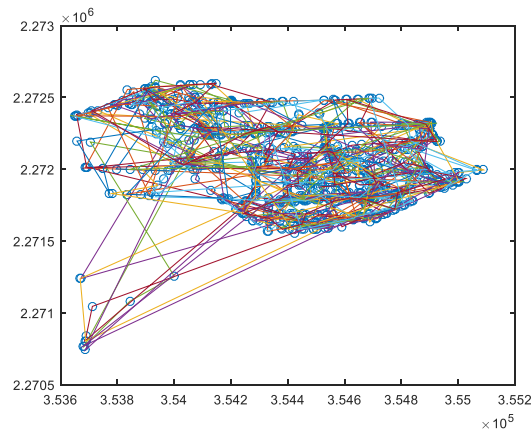
Como herramienta de apoyo e independiente a los objetivos de esta tesis, se aprovechó el entorno y las herramientas del programa MatLab para desarrollar una subrutina que grafique un bosquejo de la conectividad propuesta en cada solución. Esta gráfica no representa la sectorización final pues no considera las tuberías (ni existentes ni adicionales) únicamente es un bosquejo que agrupa los nodos propuestos por cada sector. En la Figura 37 se presenta la gráfica de una solución escogida al azar entre las 20 obtenidas al utilizar esta subrutina.



**Figura 36.** Grafica de resultados obtenidos por el AG para la Red CEA

**Tabla 15. Resumen de resultados obtenidos con el AG (Red CEA)**

Valor analizado	Caso 4
Cantidad de Sectores	20 (60%) – 21 (40%)
Valor medio de nodos	44.82
Rango Mayor	56.72
Rango Menor	32.93
Grado de confiabilidad	76.72
Tiempo medio de Computo (100 gen)	81,462.6 s
Tiempo medio de Computo (200 gen)	244,387.9 s



**Figura 37.** Imagen ilustrativa de la conectividad propuesta por el AG para el caso 4 con la Red CEA

De manera preliminar al aplicar el AG a esta red se observa lo siguiente:

- En la Figura 36. Grafica de resultados obtenidos por el AG para la Red CEA se observa que la cantidad de nodos por sector es más compacta con lo observada en la Red CEA 32n e incluso, a lo largo de las soluciones (sentido horizontal) se ve observa que algunos de estos valores se repiten constantemente.

- A pesar de lo anterior, el porcentaje de convergencia hacia una cantidad de sectores “fija” disminuye con respecto al aplicar este mismo algoritmo a la Red 32n (véase la primera fila de la Valor analizado), lo que indica que el algoritmo pierde poder de optimización es decir, buscar obtener una menor cantidad de sectores. Lo anterior se observa en la Figura 36 con los valores representados como círculos color rojo tinto, que tienen valores cercanos al cero.

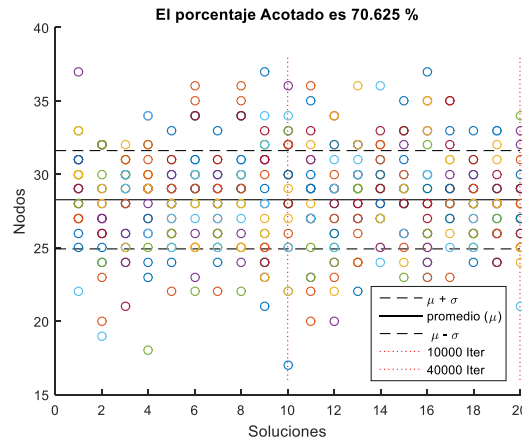
- Gracias a la subrutina de apoyo, en la Figura 37 se puede observar que las propuestas de sectorización no son viables pues están muy alejadas del comportamiento deseado para una red de distribución ya que se observa que los nodos por cada sector propuesto van de un lado a otro de la red.

### 5.2.2. Recocido Simulado Red CEA

A continuación se presentan los resultados obtenidos al aplicar este algoritmo con 10 corridas con una amplitud de búsqueda de  $10,000\Delta t$  y 10 con  $40,000\Delta t$ , es decir, las 20 corridas propuestas al inicio del apartado 5.2 (Tabla 14), para el 4° caso de análisis (combinación de los 3 casos individuales).



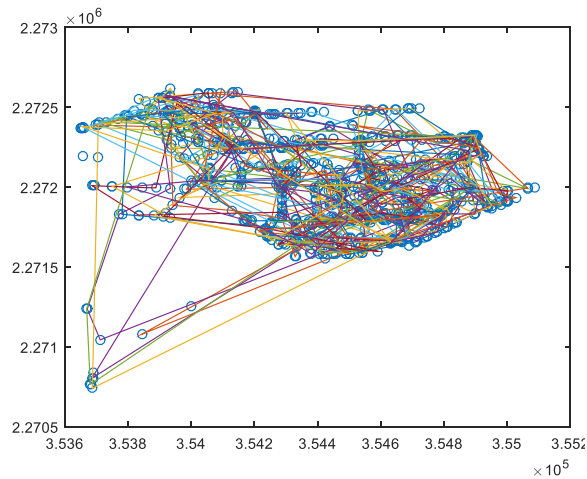
En la Figura 38, se presenta la gráfica de la conectividad de nodos por sector (círculos de colores), en la Tabla 16 el concentrado de los datos representados por la Figura 38 y finalmente en la Figura 39 la muestra un bosquejo de la conectividad de una solución tomada de manera aleatoria entre las 20 generadas por este algoritmo, esta figura es resultado de la rutina de apoyo creada para dar una idea de cómo se está proponiendo la conexión de nodos por sector.



**Figura 38.** Grafica de resultados obtenidos por el RS para la Red CEA

**Tabla 16. Resumen de resultados obtenidos con el RS (Red CEA)**

Valor Analizado	Caso 4
Cantidad de Sectores	24 (100%)
Valor medio de nodos	28.27
Rango Mayor	31.61
Rango Menor	24.92
Grado de confiabilidad	70.63
Tiempo medio de Computo (10,000Δt)	1,966.85 s
Tiempo medio de Computo (40,000Δt)	28,325.82 s



**Figura 39.** Imagen ilustrativa de la conectividad propuesta por el RS para el caso 4 con la Red CEA



De la tabla y figuras presentadas en este apartado se puede comentar lo siguiente:

- El RS presenta resultados más compactos con respecto a los del AG, pues el acotamiento entre el Rango Mayor y el Menor, es menor a 7 nodos por sector. Esto se aprecia en la misma Figura 38, donde se ven círculos sobrepuestos (visualmente se notan más oscuros con respecto a otros) en cada solución o corrida realizada, es decir, analizándolo en sentido vertical.

- Además, para este caso se tiene una total convergencia (100%) hacia una cantidad de sectores (20) con un grado de confiabilidad en el rango acotado de valores buena (más del 70%).

- El tiempo de cómputo contra el AG es más de 10 veces inferior.

- Sin embargo, a pesar de que en general el RS presenta mejores resultados que el AG, estos están muy alejados de brindar una solución viable y real al dimensionamiento de la red. Esto se puede ver en la Figura 39, pues al igual que el AG la conectividad de nodos propuesta en un sector va de un lado para otro dentro de la red.

### 5.2.3. Análisis y comentarios Red CEA

En este apartado toca realizar un análisis más profundo de los resultados y comentarios originados al aplicar ambos algoritmos a este caso de estudio (Red CEA), de lo que sobre salen dos observaciones:

- Tiempo de Computo.

Aunque no es parte de la finalidad de esta investigación ya que, este criterio es subjetivo pues depende del equipo de cómputo utilizado, sin embargo, pensando en considerar el uso de estos algoritmos como un enfoque viable para el dimensionamiento de sectores, puede valer la pena hacer un pequeño análisis de este parámetro. Para un procesador de las características descritas al principio de este capítulo, el tiempo de cómputo del AG (Tabla 15) puede resultar demasid alto y por ende, impráctico su uso. Tal vez no así para el caso del RS, ya que 7.8hrs de cómputo (para un  $\Delta t$  de 40,000) aún pueda ser práctico su uso pues muchas softwares computacionales en el ramo de la ingeniería (no



necesariamente hidráulica) utilizados para diseñar, modelar, simular, etc., requieren tiempos elevados de cómputo y posiblemente similares a este valor.

Además es importante recordar que de acuerdo a la cantidad de nodos y tuberías de esta red, es considerada de un tamaño medio, por lo que, de utilizar estos algoritmos en redes mayores es impráctico pues involucrará un tiempo de computo aún más elevado.

- Conectividad de nodos.

A pesar de contar con una convergencia adecuada hacía una cantidad de sectores (60% en el AG y 100% en el RS), la gran cantidad de nodos con los que cuenta esta red hace que en cada sector se generen brincos de un punto a otro. Originando ir de un nodo ubicado en cierta zona de la red a otro nodo en una zona mucho más distante y, tal vez, en el siguiente nodo si regrese a un punto más cercano al primero, y así sucesivamente (Ver Figura 37 y Figura 39).

Esto se debe a que la conceptualización de los algoritmos se hizo con respecto a los nodos, además de que estos tipo de metodologías no son algoritmos de búsqueda dirigida (como la teoría de grafos) sino aleatorios y por lo tanto, para este tamaño de red nos generan soluciones muy alejadas del comportamiento real de la red.

Este problema no es apreciable si solo se observan los valores calculados por los algoritmos para los parámetros hidráulicos (Tabla 17) ya que estos pueden resultar adecuados a simple vista, a excepción del tema de presiones que se observan valores negativos altos. Lo anterior se presenta justo antes de pasar al siguiente sector, no aplicable para el sector que se conformó pero sí origina la consideración de más sistemas de bombeo (valor ficticio) y que este valor sí repercute para la evaluación de que tan buena es la propuesta.

Lo anterior se produce como otra consecuencia del tema de la conectividad no viable, pues esa alta cantidad de bombeos se debe al ir de un lado para otro de la red o sopesar la topografía de un nodo a otro que no se encuentren tan cercanos, originando altos costos en infraestructura, tanto en los sistemas de bombeo como de tubería nueva (última columna de la Tabla 17).





Es debido a estos brincos que la condición que rige este 4º Caso es la presión de servicio. Esto se aprecia en los valores de demanda homogénea de la Tabla 17, ninguno llega al valor máximo de 20 l/s pues el corte del sector se produce al tener una presión mínima inferior a los 0.5mca. Caso contrario para la longitud de tubería o recorrido, que por los amplios brincos si se llega al valor límite (en promedio) de 6,000 m en el caso del AG y un valor en promedio no tan alejado para el RS.

**Tabla 17. Valor promedio de los parámetros hidráulicos en las soluciones obtenidas para la Red CEA**

	<b>Demanda máx (l/s)</b>	<b>Demanda mín (l/s)</b>	<b>Presión máx (m)</b>	<b>Presión mín (m)</b>	<b>Rebombeos</b>	<b>Longitud de tubería (m)</b>	<b>Costos de inversión (\$)</b>
<i>Algoritmo G.</i>	7.23	2.27	77.40	-12.70	67.95	6,045.80	1.23E+09
<i>Recocido S.</i>	5.84	1.65	69.50	-4.45	79.90	4,677.44	1.12E+09

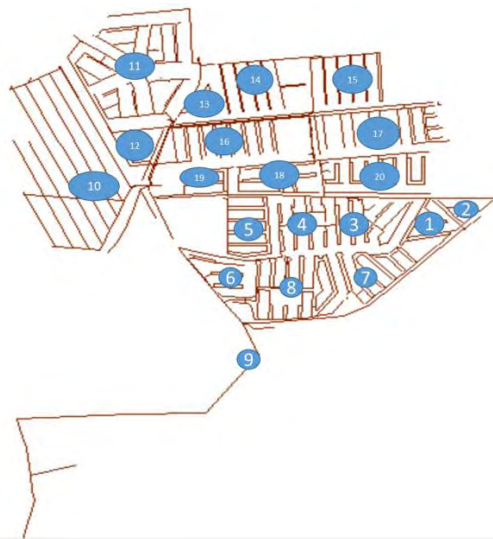
Por lo tanto, se debe concluir que para redes de distribución medianas o grandes, como la analizada en esta sección, la aplicación de los algoritmos no es viable. Esta conclusión está basada en los criterios descritos en la sección anterior, las conectividades propuestas no son viables ni van acorde al comportamiento esperado para la sectorización de una red, además de que los tiempos de cómputo invertidos son altos y poco redituables con respecto a esas propuestas de conectividad.

Una alternativa que se utilizó para poder dar una solución al problema de los resultados no viables y alejados de la operación real de la red de distribución, fue simplificar la red de tal modo que se obtenga una red operativamente equivalente pero de menor tamaño (cantidad de nodos y tuberías), en la cual, el valor de los parámetros hidráulicos nodales (demanda y presión) o propios del tramo de tubería (longitud, diámetro, etc.) sean equivalentes con el conjunto de nodos o tuberías (según sea el caso) que estos elementos representen.

Aunque este procedimiento involucre tiempo de inversión adicional por llevar a cabo estas modificaciones y adaptación a los datos de la red, este tiempo es recuperado en el tiempo de cómputo utilizado por los algoritmos. Además, esta simplificación está basada en las condiciones de infraestructura y operaciones propias de la red, pues las características topológicas están en función de la infraestructura del lugar (calles, avenidas, barrancas) y el ordenamiento habitacional de su población (colonias, privadas, fraccionamientos, condominios, etc.). De este modo, también se

asegura darles a los datos de ingreso para los algoritmos un sentido más real de las condiciones de operación de la red.

Para la Red CEA analizada, se realizó una reducción de 913 a 20 nodos atendiendo a que la zona es 100% habitacional y gran parte de su ordenamiento está basado en fraccionamientos y privadas por lo que, en la realidad existe un macro-medidor instalado por cada uno de ellos para cuantificar el volumen total de agua consumida por sus habitantes. En la Figura 40 se presenta la simplificación de la red y que en lo siguiente será denominada como *Red CEA simplificada*.



**Figura 40.** Simplificación de la Red CEA por conjuntos habitacionales

### 5. 3. Red CEA simplificada.

Los valores equivalentes de los parámetros hidráulicas obtenidos para los 20 nodos de la Red simplificada y lo respectivo para las tuberías, utilizadas para que los algoritmos manipulen, se presentan en la Tabla 18 y Tabla 19 respectivamente.

Bajo estas nuevas condiciones y aprovechando que la cantidad de nodos es inferior a la de la primera red analizada (Red del frac. Villas del Sol), para esta red se realizaron 20 corridas retomando las 3 amplitudes de búsqueda originales de cada algoritmo (Tabla 2), es decir, por cada algoritmo se generaron 60 soluciones por cada caso análisis (del 1 al 4).



**Tabla 18. Valores nodales de la Red CEA simplificada**

Nodo	Demanda (l/s)	Elevación (m)	Carga Est. (mca)	Coord-X	Coord-Y
1	6.69	1934	17.65	354556.094	2272125.75
2	1.33	1947	4.034	354894.798	2271997.05
3	4.36	1940	9.089	354573.563	2271902.59
4	4.31	1935	4.833	354443.375	2271794.68
5	7.14	1932	7.0762	354284.96	2272008.88
6	2.24	1926	5.135	354217.125	2271721.83
7	6.28	1922	30.8405	354543.504	2271590.79
8	5.64	1925	24.131	354254.668	2271666.65
9	1.39	1930	47.0195	354614.037	2272287.59
10	15.13	1919	32.206	354119.324	2272239.69
11	8.22	1917	23.779	354109.146	2272285.41
12	3.22	1921	26.677	354166.124	2272243.78
13	2.25	1931	29.007	354531.755	2272200.95
14	4.21	1929	18.417	354525.866	2272285.11
15	2.95	1918	11.142	354562.826	2272481.15
16	5.33	1921	13.683	354198.496	2272246.94
17	5.37	1929	14.265	354541.118	2272280.46
18	3.57	1934	7.601	354539.08	2272124.11
19	2.01	1932	6.128	354284.476	2272019.7
20	6.69	1934	17.652	354556.094	2272125.75

**Tabla 19. Valores y conectividad de las tuberías (Red CEA simplificada)**

Tubería	Nodo Inicial	Nodo Final	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Rugosidad (mm)
1	4	6	1242.46	101.6	0.009
2	6	8	3009.7	101.6	0.009
3	8	7	2476.74	101.6	0.009
4	4	3	1997.97	50.8	0.009
5	20	5	2214.13	101.6	0.009
6	5	19	963.41	101.6	0.009
7	18	20	2458.09	50.8	0.009
8	13	18	1491.05	50.8	0.009
9	20	1	1579.92	50.8	0.009
10	1	2	594.676	101.6	0.009
11	13	14	2728.2	101.6	0.009
12	13	17	2397.32	50.8	0.009
13	17	9	3022.28	101.6	0.009
14	14	15	2087.56	50.8	0.009
15	14	16	3178.42	50.8	0.009
16	17	16	3172.42	50.8	0.009
17	16	12	1986.13	101.6	0.009
18	12	10	4895.79	101.6	0.009
19	13	11	4392.65	50.8	0.009

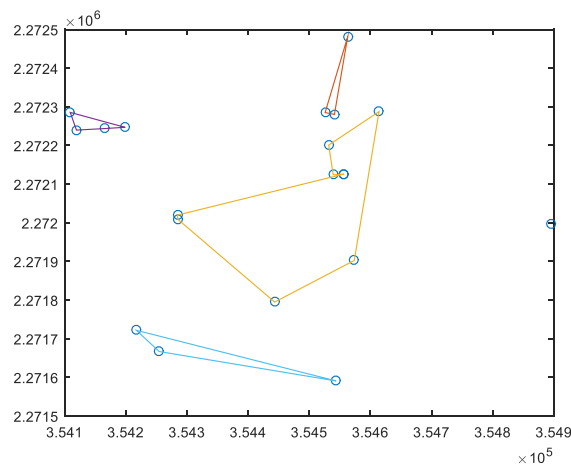


La condición límite (máximo o mínimo) según el caso de análisis se mantuvieron igual a los utilizados para la Red CEA (completa), es decir, 20 l/s para el caso 1, 0.5mca para el caso 2 y 6,000m para el caso 3, para el 4º caso se utilizan los 3 de manera simultánea.

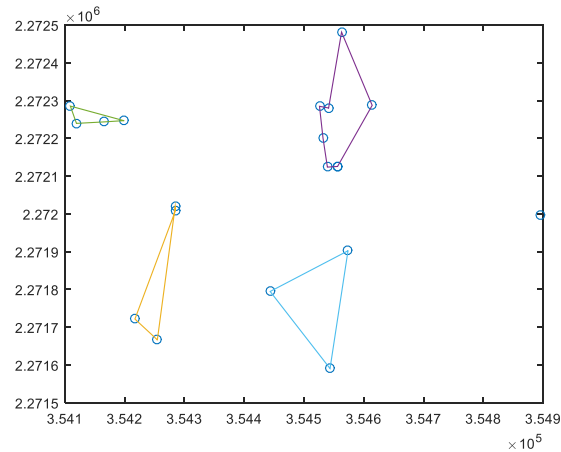
Las 8 gráficas que representan la cantidad de nodos por sector para las 60 soluciones por cada combinación algoritmo-caso se pueden consultar en el Anexo A, sin embargo, la Tabla 20 muestra el resumen de los valores que originan dichas gráficas, así como el nuevo tiempo de computo de los algoritmos. En las Figura 41 y Figura 42 se muestra un bosquejo de la conectividad de una solución elegida de manera aleatoria de cada algoritmo, AG y RS respectivamente.

**Tabla 20. Resumen de los resultados obtenidos con la Red CEA simplificada por ambos algoritmos (AG y RS)**

	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4	
	AG	RS	AG	RS	AG	RS	AG	RS
<b>Cantidad de Sectores (Porcentaje de veces obtenido)</b>	5 (96.7%)	5 (98.3%)	4 (48.3%)	4 (56.7%)	5 (96.7%)	5 (100%)	5 (91.7%)	5 (86.7%)
<b>Valor medio de nodos</b>	167.83	165.34	274.04	206.72	162.90	164.45	168.74	169.05
<b>Rango Mayor</b>	237.04	306.46	539.00	348.92	260.54	256.70	234.64	233.15
<b>Rango Menor</b>	98.62	24.21	9.75	64.58	65.26	72.20	102.85	104.95
<b>Grado de confiabilidad en %</b>	67.79	65.55	71.91	71.79	62.75	62.67	60.34	67.12
<b>Tiempo medio de Computo (100 Gen / 10,000Δt)</b>	4.86 s	8.67 s	27.87 s	18.49 s	12.59 s	13.42 s	23.80 s	27.08 s
<b>Tiempo medio de Computo (200 Gen / 40,000Δt)</b>	13.31 s	27.27 s	135.4 s	65.42 s	41.92 s	42.96 s	85.08 s	97.95 s
<b>Tiempo medio de Computo (300 Gen / 90,000Δt)</b>	28.84 s	78.15 s	351.28 s	151.94 s	85.38 s	95.51 s	180.38 s	225.55 s



**Figura 41.** Conectividad de nodos propuesta en una solución del caso 3 con el AG



**Figura 42.** Conectividad de nodos propuesta en una solución del caso 1 con el RS

Con los resultados presentados se tienen los siguientes comentarios:

- En las Figura 41 y Figura 42 se puede observar que la simplificación de la red, le da oportunidad a los algoritmos de presentar propuestas de conectividad acordes a lo buscado en una sectorización, agrupar la mayor cantidad de nodos colindantes en un sector y que homogenicen parámetros hidráulicos.
- A excepción del caso 2, en los demás casos se observa que ambos algoritmos recuperan su capacidad de convergencia u optimización hacia una cantidad de sectores.
- Al igual que el punto anterior, exceptuando el segundo caso de los demás casos, se aprecia en los dos criterios de análisis más importantes, el valor medio de nodos por sector y el grado de confiabilidad de los valores acotados (entre el Rango Mayor y Menor) sus resultados son similares entre sí, es decir, para el valor medio de nodos por sector oscilan entre 160-170 con un grado de confiabilidad entre 60-70%, calificado como aceptable.
- De lo anterior, el hecho que el caso 2 diverja significa que al analizar la red bajo ese criterio no existe un valor óptimo al cual converger, sino que, con las características topológicas e hidráulicas de la red existen varias maneras de sectorizar atendiendo la presión mínima de servicio.
- Finalmente, se observa que los tiempos de computó bajan demasiado con respecto al análisis de la red completa (con 913 nodos) e incluso con respecto a la Red 32n que se utilizó al principio.



Esto brinda a cualquier usuario de los algoritmos la oportunidad de realizar varias corridas para tener un espectro de soluciones para elegir una buena propuesta de sectorización.

#### **5. 4. Dimensionamiento de Sectores.**

Con los resultados obtenidos en el punto anterior, ahora toca definir que rango o tamaño de sector es conveniente para una red como la analizada, y en su caso, evaluar si este tamaño depende del criterio de dimensionamiento seleccionado (Caso 1 al 3). Este rango o tamaño estará en función de las tomas domiciliarias (o conexiones de servicio) que se tienen en promedio por sector.

Para poder tener un valor comparativo de los resultados, es conveniente retomar lo expuesto en la bibliografía (Capítulo 1) referente a los rangos recomendados para una red de distribución:

- En Huacho, Lima, Perú, se proponen sectores de entre 400-4000 usuarios. (Vegas O., 2012)
- En Atizapán, Edo. de México, se consideraron 2,000 tomas domiciliarias aproximadamente (Vegas O.,2012).
- La International Water Association propone para grandes ciudades sectores de entre 300 y 500 usuarios (Hunaidi, O. & Brothers, K., 2007).

Es importante mencionar que no se consideró hacer este análisis a la Red 32n ya que, su número de tomas domiciliarias es apenas de 183, valor muy inferior a los mínimos mencionados anteriormente, y por ende, únicamente solo fue utilizada para poder realizar una valoración inicial de la aplicación de los algoritmos.

Para obtener los tamaños de sector de la Red CEA (simplificada), se utilizaron los rangos formados por la media más desviación estándar (Rango Mayor) y la media menos la desviación estándar (Rango Menor) para todas las combinaciones Algoritmo-Caso (filas 3 y 4 de la Tabla 20) y se les multiplico por el valor medio de tomas domiciliarias por nodo.

El valor medio de tomas domiciliarias por nodo se obtuvo de dividir el valor total de tomas domiciliarias de la red (5,783) entre el total de nodos de la misma (913), resultando un valor de 6.33 tomas por nodo. En la Tabla 21, se muestra la conversión de nodos a tomas domiciliarias de la red



CEA por cada combinación Algoritmo-Caso, el rango promedio por Caso (considerando ambos algoritmos), el rango promedio Global y por último, el grado de confiabilidad de dicho rango (retomado de la Tabla 20):

**Tabla 21. Formación de los rangos (tamaños) de sectores**

	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4	
	AG	RS	AG	RS	AG	RS	AG	RS
<b>Rango Mayor (nodos)</b>	237.04	306.46	539.00	348.92	260.54	256.70	234.64	233.15
<b>Rango Menor (nodos)</b>	98.62	24.21	9.75	64.58	65.26	72.20	102.85	104.95
<b>Valor medio de tomas/nodo</b>	6.33							
<b>Rango Mayor (tomas dom.)</b>	1,500.4	1,939.9	3,411.9	2,208.7	1,649.2	1,624.9	1,485.2	1,475.9
<b>Rango Menor (tomas dom.)</b>	624.2	153.3	61.7	408.8	413.1	457	651	664.3
<b>Rango por Caso (Mayor-Menor)</b>	1,700.2-388.75		2,810.3-235.25		1,637.1-435.1		1,480.6-657.7	
<b>Rango Global (Mayor-Menor)</b>	1,912 – 429.2							
<b>Grado de confiabilidad en %</b>	67.79	65.55	71.91	71.79	62.75	62.67	60.34	67.12

El rango por caso, fue calculado con el objetivo de equilibrar la aleatoriedad de las metodologías y así poder obtener un rango o tamaño por caso. Lo anterior se evidencia en los casos 1 y 2, donde la dominancia entre un algoritmo y otro en ambos rangos (mayor y menor) se alternan, o visto de otro modo, la amplitud del rango (rango mayor menos rango menor) es inferior uno con respecto del otro. Esto no sucede en el caso 3 y 4, donde los valores son muy similares uno con respecto del otro.

Por tal motivo, se toma el valor de rango por caso como el tamaño de sector por criterio de dimensionamiento. A excepción del caso 2 y 1, este último muy ligeramente, los rangos inferiores en todos los casos están por encima del valor mínimo de 400 conexiones o tomas domiciliarias expuestas en la bibliografía, y de manera global (promedio de casos) también se está por encima de este valor.

Sin embargo, no hay que perder de vista que estos tamaños por criterio provienen de un valor específico para cada uno de ellos, 20l/s como demanda máxima, 0.5mca de presión mínima y 6,000m de longitud de tubería, respectivamente. Por lo tanto, estos rangos variarán al modificar estos valores. También se observa que los casos 1 y 3, donde se buscó optimizar el criterio pero respetando lo más posible la infraestructura existente (de manera directa o indirecta) se obtuvieron rangos en promedio ligeramente similares. El caso 2, dista de estos valores pues su única restricción está ligada a la presión de servicio y costos por los rebombes ficticios propuestos sin tener tanta consideración en la



infraestructura existente. En el caso 4 se aprecia que compensa lo anterior y considerar una evaluación múltiple logra generar sectores más homogéneos, o visto de otro modo, su amplitud de rango es la menor de todas.

El rango de confiabilidad de los resultados obtenidos se encuentra entre 0.60 y 0.72 (último renglón de la Tabla 21), por lo que, bajo los criterios establecidos al principio de este capítulo (mayor al 60%), se considera que los tamaños de sector propuestos son aceptables.

Bajo las premisas y condicionantes propias de este trabajo de investigación se llegó preliminarmente se llega a las siguientes conclusiones, sin embargo, en el capítulo siguiente se ampliará más al respecto:

- El tamaño promedio de un sector hidrométrico es de 430 a 1720 tomas domiciliarias (o conexiones de servicio). Valor que está (o cercanamente está) entre algunos de los rangos o tamaños establecidos en la bibliografía para redes similares (Vegas, O. 2012), (Tzatchkov, et. al. 2008), (Hunaidi, O. & Brothers, K, 2007).

- Se observa que el tamaño de un sector es dependiente a la restricción de la infraestructura existente y no al criterio de dimensionamiento seleccionado.

Referente a los algoritmos se puede concluir lo siguiente:

- En general, no se observa un dominio de alguno con respecto a otro, ya que, de acuerdo a la variable o parámetro analizado, son alternantes los valores calculados de un caso a otro o incluso similares.

- Su uso está restringido a redes pequeñas o en su caso simplificada, ya que su grado de aleatoriedad afecta la viabilidad de los resultados obtenidos.





## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

La sectorización es un procedimiento ampliamente aplicado en México a redes de distribución de agua potable. Los beneficios obtenidos tras aplicar este procedimiento son el control operativo de las redes medido a través de la presión y volumen de agua circulante; la identificación de pérdidas de volumen, tanto físicas como aparentes; así como el control que se logra debido al aislamiento de zonas de servicio. Sin embargo, el dimensionamiento de los sectores es un tema que ha sido estudiado bajo diversos enfoques y por múltiples investigadores y que no ha sido agotado aún.

Una forma de atacar el problema del dimensionamiento de sectores hidrométricos es plantearlo como un problema de optimización en el cual la función objetivo se establece como la conformación de la menor cantidad de sectores en la red a través del costo de sectorización. Las soluciones que satisfacen la función objetivo están sujetas a rangos de valores de presión y caudal definidos y que permiten que los sectores conformados maximicen la calidad del servicio.

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada en el capítulo 2 de este documento, muchos de los trabajos de sectorización han sido realizados bajo procedimientos empíricos basados en la experiencia del diseñador que en algún sustento técnico-científico. Estos procedimientos pueden resultar adecuados para redes pequeñas, sin embargo, conforme el tamaño aumente de igual manera la complejidad en la manipulación de información asociada a la misma red aumentará (Campbell, E., 2013). Además, no se cuenta con la garantía de que las condiciones de operación o los parámetros hidráulicos dentro de cada sector sean homologados ya que, muchos de estos trabajos obedecen a la partición de la red por condiciones tipológicas (vialidades, elevaciones, etc.).

Sin embargo, en las últimas décadas se han propuestos nuevos enfoques, técnicas, metodologías y algoritmos que manipulando criterios de dimensionamiento buscan brindar propuestas de



sectorización óptimas. Aunque de manera general la mayor parte de estos trabajos e investigaciones, se pueden agrupar en 2 enfoques de búsqueda de soluciones:

- Teoría de grafos o búsqueda dirigida. (Tzatchkov, et. al. 2008), (Di Nardo, A. 2010), (Gomes et. al. 2012), (Di Nardo, et. al. 2013), (De Paola, et. al. 2013), (Vegas, O. 2013).

- Métodos de aprendizaje o agrupación (Clústers). (Sempewo et. al. 2009), (Izquierdo et. al. 2009), (Herrera et. al. 2010), (Herrera et. al. 2012), (Diao et. al. 2013), (Campbell E. 2013).

Una perspectiva muy poco utilizada es resolver el problema con métodos heurísticos, cuya finalidad de estas técnicas es resolver problemas combinatorios o de optimización como el del dimensionamiento de sectores. Únicamente Di Nardo, et. al. (2013) utilizaron el Algoritmo Genético y en Gomes et. al. (2012) el Recocido Simulado pero, en ambos casos fueron utilizados de manera combinada con la Teoría de Grafos y no como una técnica de búsqueda independiente.

Por lo que, el utilizar el Algoritmo Genético y el Recocido Simulado a casos de estudios reales como se realizó en este trabajo de investigación demuestra que la utilización de estas metodologías de manera independiente, es decir, no combinada con otro enfoque de búsqueda, debe ser tomada en cuenta como una propuesta más para sectorizar RDAP de entre las ya existentes, que en su conjunto buscan erradicar los procedimientos empíricos

Esto se realizó adaptando los conceptos y metodologías del Algoritmo Genético y el Recocido simulado al dimensionamiento de sectores hidrométricos, cuyos objetivos fueron minimizar la cantidad de sectores hidrométricos y homologar las condiciones de operación en cada uno, es decir, formar distritos o sectores con la mayor cantidad de nodos maximizando, dentro del mismo, el parámetro hidráulico deseado (demanda, presión o longitud de tuberías) y minimizando los costos de inversión.

Con el apoyo del programa Matlab R2015a, los algoritmos fueron implementados en dos redes de distribución de agua potable (Pátzcuaro y Querétaro) utilizando 3 criterios de dimensionamiento (demanda, presión mínima de servicio y longitud de tuberías) y haciendo variar la amplitud de búsqueda de soluciones en cada uno; con ello, se obtuvo que para redes de distribución pequeñas (50



nodos aproximadamente) la utilización de estos dos métodos heurísticos, el Algoritmo Genético y el Recocido Simulado, son viables para tener propuestas de sectorización óptimas.

Llegando de esta manera al cumplimiento de la hipótesis planteada en la presente investigación: “El dimensionamiento de sectores hidrométricos puede plantearse como un problema de optimización no lineal a ser resuelto a través de la aplicación de métodos heurísticos. El uso de criterios de decisión basados en los valores de variables hidráulicas de operación permiten identificar soluciones al problema de dimensionamiento viables”. Lo anterior se sustenta con el compendio de resultados obtenidos y que se presentan a continuación:

- Primeramente, el grado de confiabilidad promedio de los rangos o tamaños de sectores obtenido tanto por el Algoritmo Genético (AG) como el Recocido Simulado (RS) es de 68.3%, teniendo como valor mínimo 56.62% y máximo de 77.03%.

- El porcentaje de convergencia hacia un resultado óptimo (menor cantidad de sectores) obtenido en conjunto por los algoritmos es de 84.65%, con un mínimo de 48.3% y un máximo de 100%.

- En el análisis de la estabilidad de los algoritmos se demostró que los resultados generados por ambos algoritmos no mejoran ni empeoran si se utiliza ~~se explora~~ una gran cantidad de soluciones o si se ejecutan muchas veces los algoritmos. Sin tomar en cuenta para este análisis las soluciones donde se generan nodos sueltos o sectores pequeños, para el AG se obtuvo un 8.2% de resultados con menos de 70% de dispersión con respecto al valor medio del parámetro hidráulico analizado, y para el RS se tuvo un 11.11%.

- El tamaño promedio obtenido para un sector o distrito hidrométrico basado en la cantidad de tomas domiciliarias es de 430 a 1720, valor similar o cercanamente similar a los rangos utilizados o propuestos en otros trabajos de sectorización consultados. (Vegas, O. 2012), (Tzatchkov, et. al. 2008), (Hunaidi, O. & Brothers, K, 2007).

- Aunque no está entre los objetivos principales de esta tesis el evaluar computacionalmente los algoritmos, sin embargo, con la finalidad de fomentar estas metodologías como viables para el



tema del dimensionamiento de sectores, vale la pena decir que para redes con menos de 40 nodos, ya sean de origen pequeñas o resultantes de una simplificación de una red mayor, los tiempos de cómputo pueden resultar benéficos en comparación con algunos softwares utilizados en el ramo para diseñar o simular (como Epanet 2.0, SCADRED, etc.).

Como conclusión adicional y resaltando que fueron obtenidas bajo las condicionantes particulares de los valores límite establecidos para los casos de análisis (demanda homogénea, presión mínima, longitud de tubería y la combinación de todos) y analizándolos con la Red CEA, tenemos:

- La sectorización de una RDAP es dependiente a las condiciones de la infraestructura existente más que al criterio de dimensionamiento seleccionado. Esta afirmación se basa en los resultados obtenidos al evaluar los casos 1 y 3 (demanda homogénea y longitud de recorrido, respectivamente) con respecto al caso 2 (presión mínima) pues los primeros tienen mayor convergencia hacia un resultado óptimo (menor cantidad de sectores) con respecto al caso 2. Esto se debe a que, de manera directa o indirecta el caso 1 y 3 buscan maximizar el uso de infraestructura al mismo tiempo que optimizan su criterio de dimensionamiento, en cambio, el caso 2 no tiene la restricción de la infraestructura.

Por último, referente a los algoritmos se puede mencionar lo siguiente:

- La viabilidad hablando en el sentido de representar adecuadamente los beneficios de la sectorización, es decir, la agrupación de nodos contiguos homologando en su conjunto las características topológicas o hidráulicas, se ve limitada conforme la dimensión de la red sea mayor (cantidad de nodos). Esto se observó al aplicar los algoritmos a la Red CEA con sus valores originales, lo que conllevó a realizar una simplificación de la misma.

- A pesar de que la manera de explorar soluciones es distinta para el AG y RS, los valores obtenidos en los resultados y sus respectivos tiempos de cómputo, no muestran un dominio de alguno de ellos con respecto al otro pues en términos generales o los valores fueron similares o tuvieron una dominancia alternada, es decir, en algunos casos o parámetros un algoritmo mostró un mejor resultado y viceversa.



Debido a que la esta investigación para ambos casos de estudio (Red de Pátzcuaro y CEA) contó con condiciones particulares (y arbitrariamente elegidas) en la condición límite para la formación de los sectores, es decir, el valor máximo o mínimo al cual un sector debía llegar según el criterio (demanda, presión o longitud de tuberías) y considerando las limitaciones observadas para los algoritmos, se propone que las futuras líneas de investigación estén enfocadas a:

- Determinar la variación de la convergencia (u optimización) de los resultados hacia una cantidad de sectores y nodos promedio por sector, al cambiar los valores de las condiciones límite para cada criterio de dimensionamiento. O en su caso, determinar si continúa la tendencia de regir la sectorización en los casos (o criterios) donde de cierto modo es considerada la infraestructura actual.
- Analizar y comparar los parámetros hidráulicos calculados con respecto a otras opciones de diseño de redes, tradicionales como el método de Hardy-Cross o softwares de simulación como el Epanet 2.0, para determinar la viabilidad del uso de los algoritmos respecto a ellos.
- Los criterios de dimensionamiento utilizados fueron elegidos por ser los más recurrentes en la bibliografía, sin embargo, vale la pena aplicar estos algoritmos considerando nuevos criterios o la combinación de ellos, como área de influencia de las fuentes de abastecimiento o topología de la red (avenidas principales, colonias, etc.) por mencionar algunos.
- Finalmente, debido a que se observó una clara limitante de los algoritmos al aumentar el tamaño de la red, es ideal buscar mejorar o adaptar la conceptualización del problema de dimensionamiento de sectores de estas metodologías (AG y RS) para poder brindar solución a cualquier tipo de red.

Son varias las maneras de continuar y mejorar este trabajo pues su planteamiento precisamente fue el abrir el camino hacia la utilización de estas metodologías al tema de sectorización, que de manera general aún son poco analizadas y utilizadas. En esta investigación se demostró que para redes pequeñas o en su caso simplificadas (como fue el caso de este trabajo) se pueden obtener resultados viables y válidos para la sectorización de redes de distribución de agua potable.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bäck, T., Fogel, D. & Michalewicz Z. (1997). Handbook of evolutionary computation. Institute of Physics Publishing and Oxford University Press, New York.
- [2] Bahena Martínez, Beatriz (2011). Solución del problema del árbol de expansión mínima aplicando recocido simulado con búsqueda tabú. Tesis de maestría en ingeniería y ciencias aplicadas, CIICAP, Cuernavaca.
- [3] Blázquez, J. M. (1977). La administración del agua en la Hispania romana.
- [4] Campbell González, Enrique (2013). Propuesta para una metodología de sectorización de redes de abastecimiento de agua potable. Tesina de Master, Universidad Politécnica de Valencia.
- [5] Campbell, E., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Pérez-García, R. & Tavera, M. (2014). Water supply networks sectorization based on social networks community detection algorithms. *Procedia Engineering*. Vol. 89 (2014) pp. 1208-1215.
- [6] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2006. Sectorización de redes de agua potable, SEMARNAT-CONAGUA, México.
- [7] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro 12. Diseño de redes de distribución de agua potable.
- [8] Cruz, Nareli (2004). Sistema inmune artificial para solucionar problemas de optimización. Tesis doctoral. Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.
- [9] De Paola, F., Fontana, N., Galdiero, E. Giugni, M., Degli Uberti, G.S. & Vitaletti, M. (2013). Optimal design of district metered areas in water distribution networks. 12th International conference on computing and control for the water industry. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.050.
- [10] Di Nardo A. & Di Natale M. (2010). A design support methodology for district metering of water supply networks. DOI: 10.1061/41203(425)80.



- [11] Di Nardo A., Di Natale M. & Di Mauro A. (2013). Water supply network district Metering: Theory and case study. International Centre for Mechanical Sciences. Vol. 543. DOI 10.1007/978-3-7091-1493-3.
- [12] Diao, K., Zhou, Y. & Rauch, W., (2013). Automated creation of district metered area boundaries in water distribution systems. Journal water resource. Vol. 139(2), pp. 184-190
- [13] Díaz, A., Glover, F., Ghaziri, H.M., Gonzalez, J.L., Laguna, M, Moscato, P. y Tseng, F.T. (1996). Optimización heurística y redes neuronales, Paraninfo, Madrid.
- [14] Dowsland, K. & Adenso, B. (2003). Heuristic design and fundamentals of the simulated annealing. Inteligencia Artificial, revista iberoamericana de inteligencia artificial. Vol. 19 (2003), pp. 93-102.
- [15] Fragoso Sandoval L., Ruiz y Zurvia J.R. y Toxky López G. (2014). La sectorización en la optimización hidráulica de Redes de Agua Potable. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica.
- [16] Fogel, David B., (1995). Evolutionary Computation. Toward a new philosophy of machine intelligence. The Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York.
- [17] García Cadena, Cirilo H. (2006). “La medición en ciencias sociales y en la psicología”, en Estadística con SPSS y metodología de la investigación de Rene Landeros Hernández y Mónica T. González Ramírez, Trillas, México.
- [18] GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH), VAG (VAG Armaturen GmbH). FHNW (Fachhochschule Nordwestschweiz), & KIT (Karlsruhe Institute of Technology). (2011). Guidelines for Water Loss Reduction: A Focus on Pressure Management. Bonn: Eschborn.
- [19] Goldberg, David E., (1989). Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts.
- [20] Gomes, R., Sa Marques, A. & Sousa, J. (2012). Decision support system to divide a large network into suitable district metered areas. Water Sci Technol, 65 (9), 1667-1675.



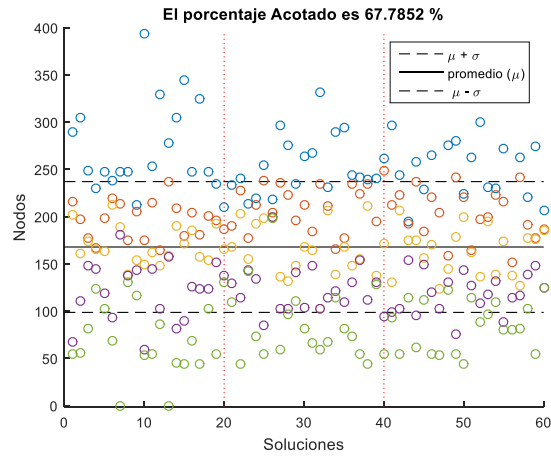
- [21] Herrera, M., Canu S., Pérez-García, R. e Izquierdo, J. (2010). An approach to water supply clusters by semi-supervised learning. International Congress on Environmental Modelling and Software. Ottawa, Canada.
- [22] Herrera, M., Canu S., Pérez-García, R. e Izquierdo, J. (2011). Water supply cluster by multi-agent based approach. In Water distribution systems analysis 2010-Proceedings of the 12th international conference, WDSA 2010. DOI: 10.1061/41203(425)79
- [23] Herrera M. and Canu S., Pérez-García, R. e Izquierdo, J. (2012). Multi-agent adaptive boosting on semi-supervised water supply clusters. *Advances in Engineering Software*, 50, 131-136.
- Holland, John H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems* Ann Arbor: University of Michigan Press.
- [24] Hogan, Thomas P. (2004). *Pruebas psicológicas. El manual moderno*. México.
- [25] Hunaidi, O., & Brothers, K. (2007) Optimal size of district metered areas. *Water Loss Specialist Conference, IWA. NRCC-50298*.
- [26] Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez-García, R. y Herrera, M., (2008). Sensitive analysis to assess the relative importance of pipes in water distribution networks. *Mathematical and computer modelling*, Vol. 48 (issues 1-2): 268-278.
- [27] Izquierdo, J., Herrera, M., Montalvo, I. y Pérez-García, R. (2009). Agend-based division of water distribution systems into district metered areas. In *Proceedings of the 4th International conference on software and data technologies. ICSOFT 2009*.
- [28] Kingdom, B., Liemberger, R. & Marin, P. M. (2006). *The Challenge of Reducing Nonrevenue Water (NRW) in Developing Countries. How the Private Sector Can Help: A look at Performance-Based Service Contracting*. Washington, DC: The World Bank Group.
- [29] Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. & Vecchi, P.M. (1983), Optimization by simulated annealing, *Science*, Vol. 220, pp. 671-680.
- [30] Martí, Raúl (2003). *Procedimientos Meta-heurísticos en Optimización Combinatoria*. Matemáticas, Universidad de Valencia Vol.1, pp. 3-62.



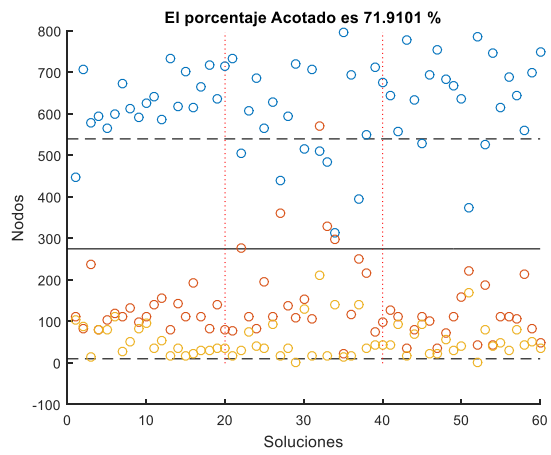


- [31] Morrison, J., Stephen, T. & Rogers, D. (2007). District metered areas: Guidance notes. London: Water Loss Task Force. International Water Association (IWA).
- [32] Peralta A., Jesús, Juárez C., Jazmín y Martínez B., Beatriz (2015). Aplicación del recocido simulado en problemas de optimización combinatoria. Narraciones de ciencia y tecnología, pp. 23-28, UAEM, Cuernavaca.
- [33] Saldarriaga, J., Naranjo, G. y Rothstein, E. (2008). Metodología para la Sectorización de Redes Existentes de Distribución de Agua Potable. Catedra PAVCO UNIANDE. <http://pavco.com.co/index.php?view=page&id=155>
- [34] SAWUADB - The Southeast Asian Water Utilities Network and Asian Development Bank (2007). Data Book of Southeast Asian Water Utilities 2005. Tokyo: Asian Development Bank. <http://www.adb.org/publications/data-book-southeast-asian-waterutilities-2005>
- [35] Sempewo, J., Pathirana, A. & Vairavamoorthy, K., (2009). Spatial analysis tool for development of leakage control zones from the analogy of distributed computing. 10th annual water distribution systems analysis conference (WDSA-2008). Kruger National Park, South Africa, 1-15.
- [36] Toxky López, Gerardo. (2012). La sectorización en la optimización hidráulica de redes de distribución de agua potable. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- [37] Tzatchkov V., Alcocer V., Bourguett V. (2006). Graph theory based algorithms for water distribution network sectorization project. 6th Annual water distribution systems analysis symposium, Cincinnati, Ohio, USA.
- [38] Vegas, Oscar T. (2012). Herramientas de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de aguas basadas en la teoría de grafos aplicando distintos criterios. Tesina de Master, Universidad Politécnica de Valencia.
- [39] Michalewicz, Z. & Schoenauer M. (1996). Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems. Evolutionary computation, vol. 4 (1) pp. 1-32.

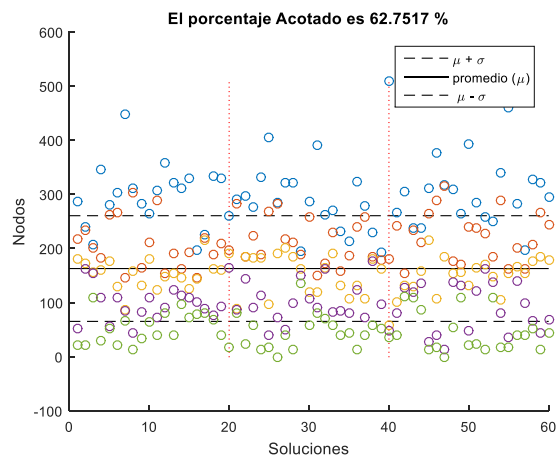
## ANEXO A



**Figura 43.** Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el AG para el caso 1



**Figura 44.** Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el AG para el caso 2



**Figura 45.** Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el AG para el caso 3

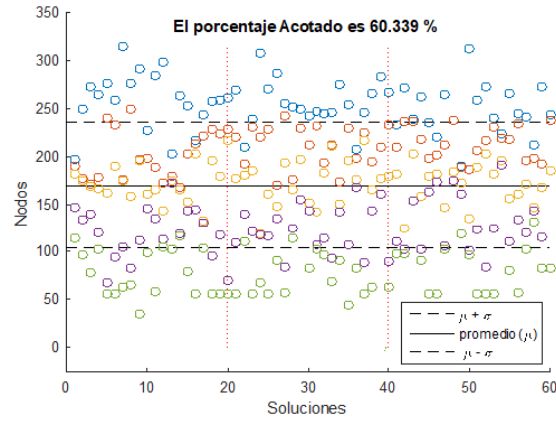


Figura 46. Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el AG para el caso 4

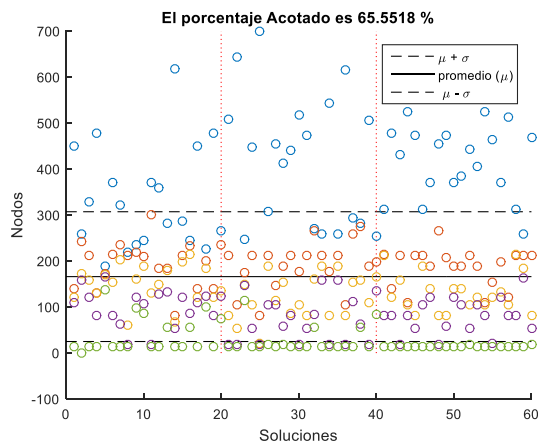


Figura 47. Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el RS para el caso 1

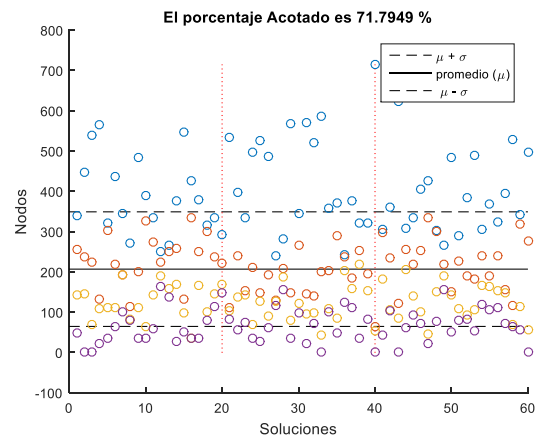


Figura 48. Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el RS para el caso 2

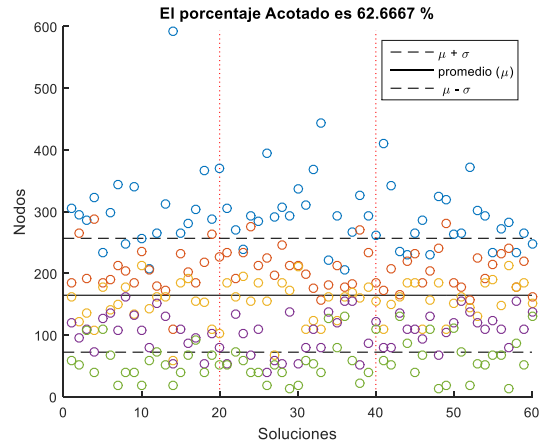


Figura 49. Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el RS para el caso 3

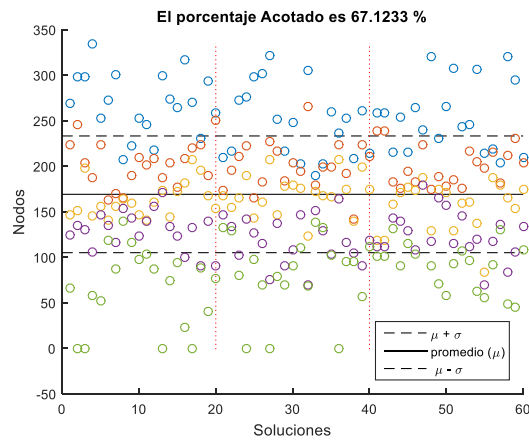


Figura 50. Gráfica de los resultados obtenidos en la RedCEA simplificada con el RS para el caso 4