

**“OPTIMIZACIÓN DE REDES HIDRÁULICAS MEDIANTE APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS Y DE RECOCIDO SIMULADO UTILIZADOS EN PROGRAMAS COMERCIALES”**

**MARLON ALEXIS GONZALEZ PIÑEROS**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**German Ricardo Santos  
Ingeniero Civil  
P H D in Engineering Science and Mechanics**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA “JULIO GARAVITO”  
INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C  
2013**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del director de trabajo

Bogotá D.C 28 Junio 2013

***Dedicatoria:***

A mi esposa Nathalia y mi hija Luciana, quienes son la motivación más grande para continuar creciendo en todos los aspectos de mi vida, y quienes entre mi trabajo profesional y la realización de la especialización han sabido comprender las ausencias y el tiempo no compartido, apoyándome y motivándome a seguir adelante!

***Agradecimientos:***

A todos mis profesores de Hidráulica de la Escuela Colombiana de Ingeniería, quienes con sus conocimientos y experiencias desde pre-grado han creado en mí el interés y el gusto por esta rama de la Ingeniería Civil, en especial al Dr. German Santos quien en esta última etapa me ha aportado conocimiento y brindado dedicación para llevar a término el presente trabajo.

## CONTENIDO

	pág.
<b>1. CAPITULO I – INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN	8
1.2 OBJETIVOS GENERALES	9
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
<b>2 CAPITULO II – CONCEPTOS BÁSICOS Y MARCO TEÓRICO</b>	<b>10</b>
2.1 ALGORITMO GENÉTICO DEFINICIÓN Y TEORÍA	10
2.2 ALGORITMO RECOCIDO SIMULADO DEFINICIÓN Y TEORÍA	18
2.3 DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE REDES HIDRÁULICAS USANDO SOFTWARE WATERNETGEN	25
2.4 PARÁMETROS Y HERRAMIENTAS INTRODUCIDAS EN EPANET PARA LA OPTIMIZACIÓN DE REDES “WATERNETGEN”	29
<b>3 CAPITULO III – PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>36</b>
3.1 REDES DE ALPEROVITS – SHAMIR Y DE HANOI	36
3.2 MODELACIÓN EN PROGRAMA EPANET + WATERNETGEN	40
3.3 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN	50
3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>63</b>
BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXOS	
Anexo A. Ejemplo de una serie de datos arrojada en una simulación para la red de Hanói “verbose mode”	
Anexo B. Optimización de una red mediante el criterio de mínima presión	

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Terminología algoritmos genéticos	11
Tabla 2. Ejemplo óptimo de un polinomio por S.A	23
Tabla 3. Iteraciones partiendo de To. 100	24
Tabla 4. Iteraciones partiendo de To. 500	24
Tabla 5. Catalogo tuberías para red Alperovits – Shamir	38
Tabla 6. Catalogo tuberías para red Hanói	38
Tabla 7. Datos de entrada red de Hanói	40
Tabla 8. Configuración obtenida para la red Alerovits – Shamir	51
Tabla 9. Cuadro comparativo soluciones red Alperovits – Shamir	52
Tabla 10. Configuración obtenida para la red de Hanói	53
Tabla 11. Cuadro comparativo soluciones red Hanói	56
Tabla 12. Variación del parámetro de Elasticidad – partiendo solución más costosa	58
Tabla 13. Variación del parámetro de Elasticidad – partiendo solución más económica	60
Tabla 14. % aceptación individuos que pasan a medida que cambia la temperatura	62

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Operador de reproducción A.G	12
Figura 2. Operador de cruzamiento A.G	13
Figura 3. Operador de mutación A.G	14
Figura 4. Diagrama de flujo algoritmo WaterNetGen	27
Figura 5. Cambios configuración sistema tubería hacia el vecindario	28
Figura 6. Paralelo en la Barra de herramientas entre EPANET y WaterNetGen	29
Figura 7. Herramientas introducidas en WaterNetGen	30
Figura 8. Vista menú New WDN Model	31
Figura 9. Vista menú Pipe Catalogue	31
Figura 10. Vista menú Demand Assignement	32
Figura 11. Vista menú Diameters Zones	32
Figura 12. Vista menú Pipe Sizing	33
Figura 13. Vista menús Valores por defecto	34
Figura 14. Vista Menú - Valores por defecto → WaterNetGen	35
Figura 15. Red Alperovits – Shamir	36
Figura 16. Red de Hanói	37
Figura 17. Menú valores por defecto “Defaults”	40
Figura 18. Presión mínima como valor por defecto	41
Figura 19. Configuración de presión mínima	41
Figura 20. Vista herramienta para crear catálogos de tubería	42
Figura 21. Visualización del catálogo creado	43
Figura 22. Menú asignación de tipo y clase de tuberías a cada tramo	44
Figura 23. Menú optimización WaterNetGen	45
Figura 24. Vista Pantalla pre dimensionamiento red – seleccionando diámetro mínimo	46
Figura 25. Vista Sizing Rule – Simulated Annealing	47
Figura 26. Valores por defecto “parametros” Simulated Annealing	48
Figura 27. Menú verificación de presiones	49
Figura 28. Menú “view solution”	49
Figura 29. Menú “view solution” red de Hanoi	53
Figura 30. Pantallazos verificación de presiones – solución red de Hanói	53

# 1. CAPITULO I – INTRODUCCIÓN

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

Los Algoritmos se pueden definir como listas de instrucciones para resolver un problema abstracto, es decir, que un número finito de pasos convierten los datos de un problema (entrada) en una solución (salida). Sin embargo cabe notar que algunos algoritmos no necesariamente resuelven un problema en particular. Hoy en día se utilizan algoritmos generales en diversos aspectos científicos como técnicos dando excelentes resultados en ramas como la Inteligencia Artificial, la Medicina, la Economía, la Industria y la Ingeniería en general, por tanto para los Ingenieros Civiles es necesario conocer y estudiar Algoritmos que son utilizados ampliamente para resolver problemas de ingeniería tales como los Algoritmos Genéticos y de Recocido Simulado.

Dentro del tema que nos concierne, la hidráulica de redes a presión se encuentran diversos problemas altamente NO lineales con múltiples restricciones y con múltiples soluciones locales que diversifican y hacen compleja una solución óptima mediante métodos convencionales. Hoy en día se han incorporado Algoritmos generales a programas de distribución libre. Tal es el caso del WATERNETGEN que incorpora el de Recocido Simulado (Simulated Annealing) para la optimización de redes en el EPANET. , Esta herramienta desarrollada se convierte en una ayuda importante para el pre-dimensionamiento y optimización de redes “encontrar la configuración de tuberías que dé el menor costo de la red satisfaciendo las restricciones o necesidades para la cual se plantea la red”.No obstante, es necesario conocer el funcionamiento, las limitaciones y ventajas que se derivan de la utilización del programa. En el presente trabajo, luego de una introducción y estudio previo de la teoría disponible de los algoritmos genéticos y de recocido simulado, así como de las recomendaciones y estudios realizados por los autores del software relacionados en el presente trabajo se presentan las conclusiones y análisis del autor

Para tener puntos de comparación y concluir, se seleccionaron redes estándar como las de Alperovits - Shamir y la red de Hanói las cuales han sido analizadas por varios autores en diversos trabajos de Algoritmos Genéticos y de Recocido Simulado para verificar la eficiencia del programa WATERNETGEN.

## **1.2 OBJETIVOS GENERALES:**

- Hacer una introducción y estudio previo de Los Algoritmos Genéticos y de Recocido Simulado.
- Dar a conocer el programa WATERNETGEN.
- Realizar la optimización de redes hidráulicas utilizando WATERNETGEN de EPANET.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Estudio de la aplicación de algoritmos Genéticos y de Recocido Simulado en la Hidráulica de sistemas a presión.
- Hacer una introducción al manejo de la herramienta de optimización WATERNETGEN explicando cada uno de los parámetros introducidos por los autores, y explicar el procedimiento para la construcción de una red y simulación de la misma.
- Comparar los resultados obtenidos con la bibliografía encontrada sobre otros trabajos en los cuales se ha hecho optimización de las redes de Alperovits - Shamir y la red de Hanói mediante la utilización de Algoritmos Genéticos y Recocido Simulado.
- A partir de los resultados obtenidos determinar la versatilidad, precisión y ventajas o desventajas del programa y concluir sobre el tema.

## 2. CAPITULO II – CONCEPTOS BÁSICOS Y MARCO TEÓRICO

### 2.1 ALGORITMO GENÉTICO DEFINICIÓN Y TEORÍA:

Los organismos vivos poseen destreza consumada en la resolución de problemas y se manifiesta una versatilidad capaz de avergonzar a los problemas más refinados. Una definición bastante completa de un Algoritmo Genético es la propuesta por **Jhon Kosa [Coello 95]**: “Es un Algoritmo matemático altamente paralelo que transforma un conjunto de objetos matemáticos con respecto al tiempo usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto, y tras haberse presentado de forma natural una serie de operaciones genéticas de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas, y se asocian con una cierta función matemática que refleja su aptitud. Los Algoritmos Genéticos utilizan una analogía directa del fenómeno de evolución en la naturaleza. Trabajan con una población de individuos, cada uno representado una posible solución a un problema dado. A cada individuo se le asigna una puntuación de adaptación, dependiendo de qué tan buena fue la respuesta al problema. A los más adaptados se les da la oportunidad de reproducirse mediante cruzamientos con otros individuos de la población, produciendo descendientes con características de ambos padres. Los miembros menos adaptados poseen pocas probabilidades de que sean seleccionados para la reproducción, y desaparecen. El evaluar esta adaptación no es sencillo de hacer, pues el entorno está modificándose constantemente por lo que nunca se llegara al súper individuo perfecto, sino que la naturaleza tenderá a optimizar los individuos de cada especie en las circunstancias actuales”.

Existen varios tipos de Algoritmos Genéticos, cada uno basado en una metáfora distinta de la naturaleza. Los algoritmos genéticos parten de una población inicial donde cada individuo se representa con un código genético (típicamente una secuencia de bits) en la que se encuentra codificada su información. Sobre esta población se realiza una serie de operaciones, en primer lugar se seleccionan parejas de soluciones para que se reproduzcan (a este proceso se le llama cruce), siendo los hijos una mezcla del código genético de los padres. A continuación se producen una serie de mutaciones que alteran los genes de los recién nacidos y por último de entre toda la población se eligen aquellos que van a sobrevivir desechándose el resto (la población en un algoritmo genético típico permanece constante en todas las iteraciones). Tanto a la hora de la reproducción, como en el momento de elegir las soluciones supervivientes en cada iteración, se favorece a aquellos individuos que según la función de evaluación sean más fuertes. El algoritmo terminará cuando se llegue a un número de iteraciones seleccionado previamente, o cuando se observe tras una serie de iteraciones no se ha detectado ninguna mejora en la población. El pseudo código sería el siguiente:

## Pasos Algoritmo

- Crear población inicial
- Evaluar la población
- Mientras No(condición salida)
- Seleccionar a los padres
- Combinar los genes de los padres para crear a los descendientes
- Mutar a los descendientes
- Evaluar la nueva población
- Elegir los individuos que sobrevivirá

## Terminología y operadores de los algoritmos genéticos

Los AG utilizan un vocabulario prestado de la genética natural. A continuación se presentan algunos términos que se utilizan en los AG.

Tabla 1. Terminología Algoritmos Genéticos

<b>NATURALEZA</b>	<b>SISTEMA ARTIFICIAL</b>
Cromosoma	Cadena de Caracteres
Gen	Característica, Carácter
Alelo	Valor de la característica
Locus	Posición en la cadena
Genotipo	Estructura
Fenotipo	Conjunto de parámetros
Población	Conjunto de Individuos, Fenotipos

Fuente: Gomes Pimentel Heber; Pérez García Rafael (2007); Abastecimiento de agua o estado da arte e técnicas avanzadas, editorial Universit UFPB.Pág.243

### **Individuos:**

Son los que forman una población, también denominados genotipos, estructuras, cadenas o cromosomas. Están compuestos de unidades llamadas también genes, ordenados sucesivamente; cada gen controla la herencia de uno o varios caracteres. Cada estado del gen se denomina alelo (valor característico), y se representan en código binario. Cada individuo representará una posible solución del problema.

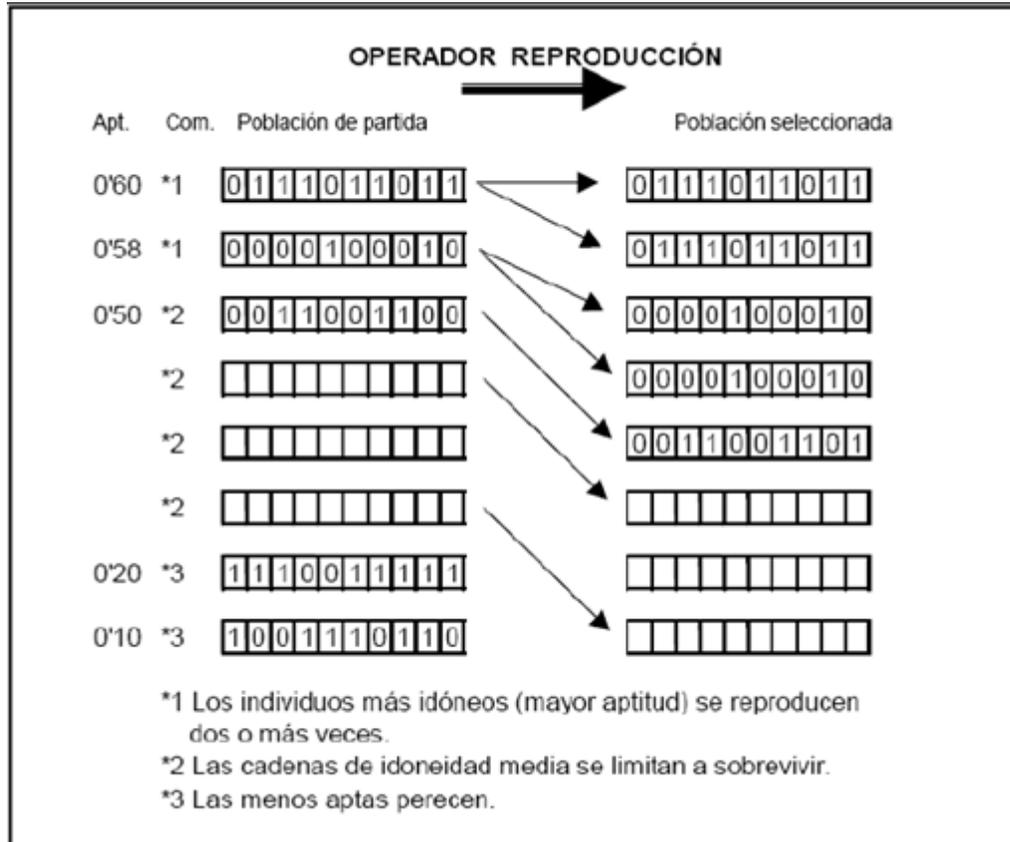
### **Población:**

La población es un conjunto finito de individuos. Para conseguir una evolución de la población inicial hacia nuevas poblaciones cuya aptitud sea cada vez mayor, el AG utiliza tres operadores básicos: reproducción, cruzamiento y mutación.

### Selección:

Tiene la función de escoger los individuos de una población que poseen una mayor aptitud.

Figura 1. Operador de Reproducción A.G



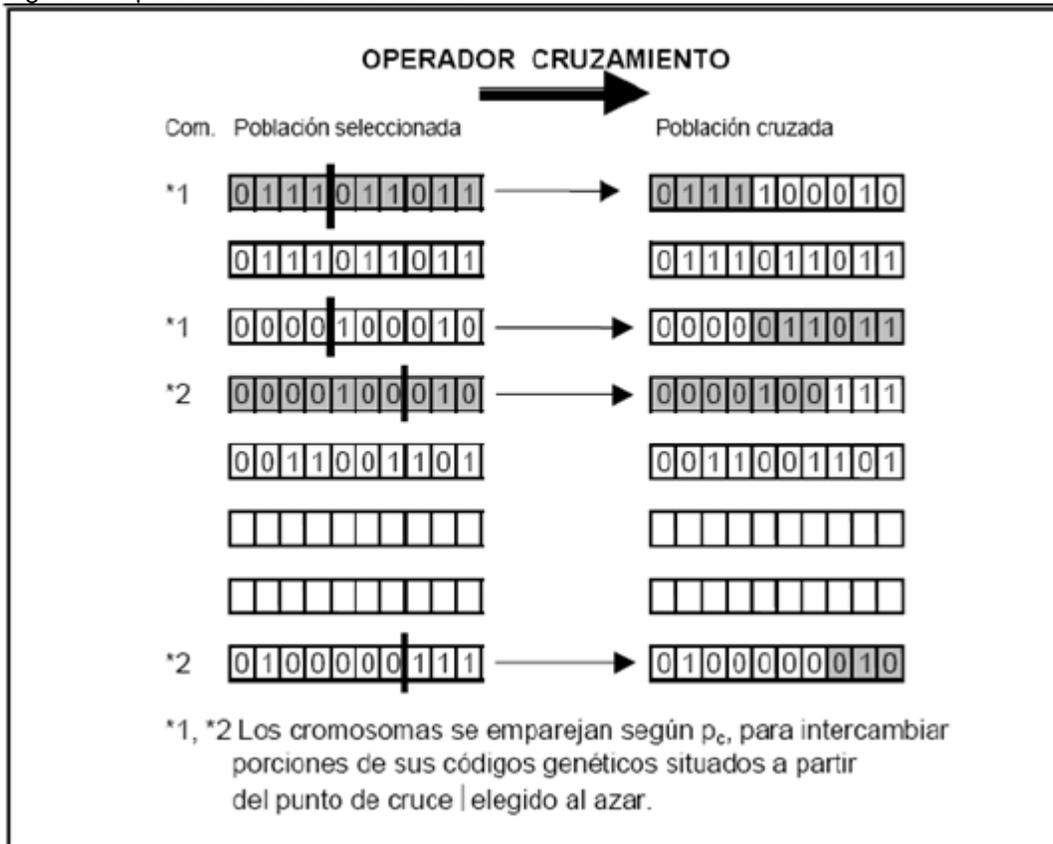
Fuente: Agustín Matías Sánchez (2003); Diseño de redes de distribución de agua contemplando la fiabilidad, mediante Algoritmos Genéticos, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. Pág.132

### Cruzamiento

Después de haber seleccionado los individuos de una población de acuerdo a su aptitud, se Emparejan aleatoriamente estos individuos, combinando los genes de cada pareja para obtener dos nuevos individuos hijos.

Generalmente se eligen los individuos a cruzar mediante una probabilidad de cruzamiento **pc**. También la posición del intercambio de genes se puede elegir de forma aleatoria.

Figura 2. Operador de cruzamiento A.G



Fuente: Agustín Matías Sánchez (2003); Diseño de redes de distribución de agua contemplando la fiabilidad, mediante Algoritmos Genéticos, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. Pág.133

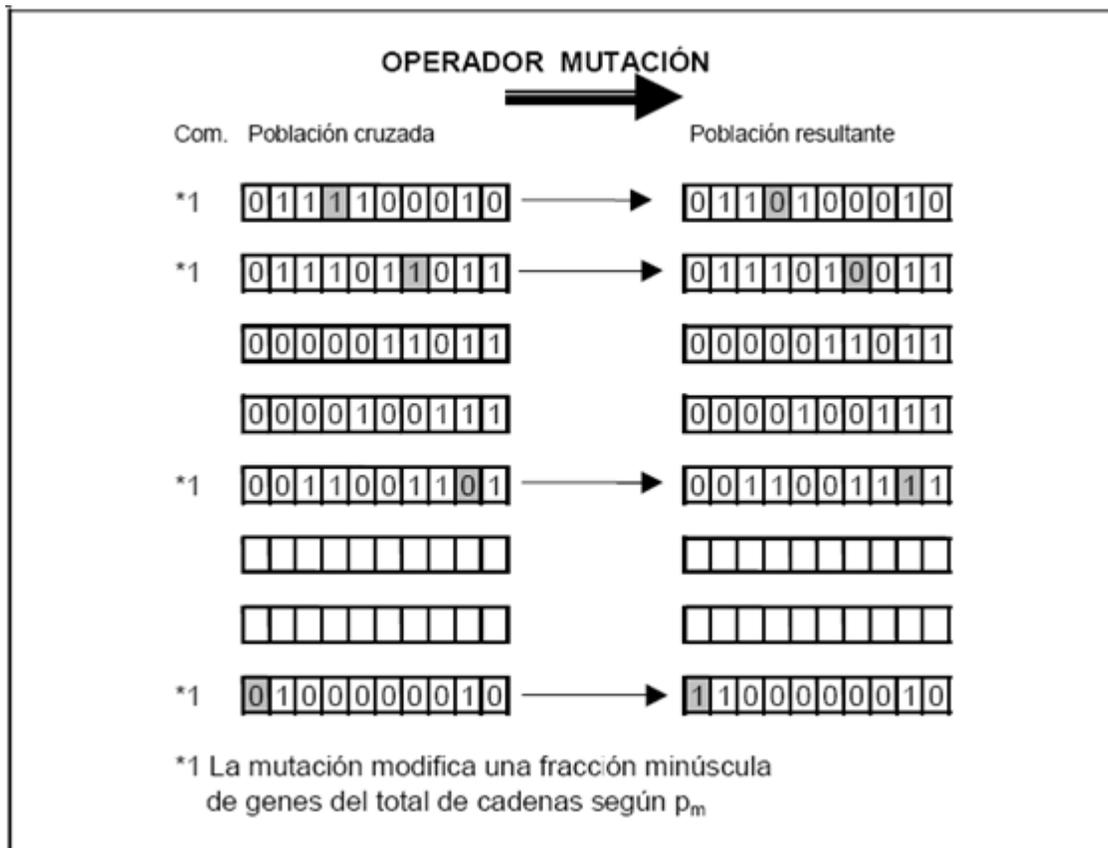
### Mutación

Consiste en elegir aleatoriamente un gen mediante la probabilidad de mutación  $p_m$  de un individuo y cambiar su valor. La elección del gen se realiza aleatoriamente.

El objetivo de la mutación es producir diversidad en la población, de tal manera que éste alcance una solución óptima.

La probabilidad de mutación no debe ser grande para evitar oscilaciones en el promedio de los valores objetivo de la población

Figura 3. Operador de mutación A.G



Fuente: Agustín Matías Sánchez (2003); Diseño de redes de distribución de agua contemplando la fiabilidad, mediante Algoritmos Genéticos, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. Pág.134

### Ventajas y desventajas de los algoritmos genéticos

#### Ventajas

- ✓ Los algoritmos genéticos exploran múltiples soluciones al mismo tiempo. Contra otros algoritmos cuya exploración es en serie y sólo pueden buscar en el espacio de soluciones hacia una solución en una dirección al mismo tiempo, y si la solución que se encuentra en dicho camino resulta un óptimo global, no se puede hacer otra cosa que abandonar todo el trabajo hecho y empezar de nuevo.
- ✓ Debido al paralelismo que les permite evaluar implícitamente muchos esquemas a la vez, los AG funcionan particularmente bien resolviendo problemas cuyo espacio de solución es realmente grande o demasiado vasto para hacer una búsqueda exhaustiva en un tiempo razonable. La mayoría de los

problemas que caen en esta categoría se conocen como “no lineales”. En un problema lineal, la aptitud de cada componente es independiente, por lo que cualquier mejora en alguna parte dará como resultado una mejora en el sistema completo. No es necesario decir que hay pocos problemas como éste en la vida real. La no linealidad es la norma, donde cambiar un componente puede tener efectos en cadena en todo el sistema, y donde cambios múltiples que, individualmente, son perjudiciales, en combinación pueden conducir hacia mejoras en la aptitud mucho mayores. La no linealidad produce una explosión combinatoria: el espacio de cadenas binarias de 1.000 dígitos puede examinarse exhaustivamente evaluando sólo 2.000 posibilidades si el problema es lineal, mientras que si no es lineal, una búsqueda exhaustiva requiere evaluar 21.000 posibilidades un número que, escrito, ocuparía más de 300 dígitos. Afortunadamente, el paralelismo implícito de los AG les permite superar incluso este enorme número de posibilidades, y encontrar con éxito resultados óptimos o muy buenos en un corto periodo de tiempo, tras muestrear directamente sólo regiones pequeñas del vasto paisaje adaptativo.

- ✓ Otra ventaja notable de los AG es que se desenvuelven bien en problemas con un paisaje adaptativo complejo aquéllos en los que la función objetivo es discontinua, cambia con el tiempo, o tiene muchos óptimos locales. La mayoría de los problemas prácticos tienen un espacio de soluciones enorme, imposible de explorar exhaustivamente; el reto se convierte entonces en cómo evitar los óptimos locales soluciones que son mejores que todas las que son similares a ella, pero que no son mejores que otras soluciones distintas situadas en algún otro lugar del espacio de soluciones. Muchos algoritmos de búsqueda pueden quedar atrapados en los óptimos locales: si llegan a lo alto de una colina del paisaje adaptativo, descubrirán que no existen soluciones mejores en las cercanías y concluirán que han alcanzado la mejor de todas, aunque existan picos más altos en algún otro lugar del mapa. Los algoritmos evolutivos, por otro lado, han demostrado su efectividad al escapar de los óptimos locales y descubrir el óptimo global incluso en paisajes adaptativos muy escabrosos y complejos. (Debe decirse que, en la realidad, a menudo no hay manera de decir si una cierta solución a un problema es el óptimo global o sólo un óptimo local muy alto. Sin embargo, aunque un AG no devuelva siempre una solución perfecta y demostrable aun problema, casi siempre puede devolver al menos una muy buena solución). Todos los cuatro componentes principales de los AG paralelismo, selección, mutación y cruzamiento-trabajan juntos para conseguir esto. Al principio, el AG genera una población inicial diversa, lanzando una “red” sobre el paisaje adaptativo. (Koza 2003[42], p. 506) compara esto con un ejército de paracaidistas cayendo sobre el paisaje del espacio de búsqueda de un problema, cada uno de ellos con órdenes de buscar el pico más alto). Pequeñas mutaciones permiten a cada individuo explorar sus proximidades, mientras que la

selección enfoca el progreso, guiando a la descendencia del algoritmo cuesta arriba hacia zonas más prometedoras del espacio de soluciones.

Sin embargo, el cruzamiento es el elemento clave que distingue a los AG de los otros métodos como los trepa colinas y el recocido simulado. Sin el cruzamiento, cada solución individual va por su cuenta, explorando el espacio de búsqueda en sus inmediaciones sin referencia de lo que el resto de individuos puedan haber descubierto. Sin embargo, con el cruzamiento, hay una transferencia de información entre los candidatos prósperos, los individuos pueden beneficiarse de lo que otros han aprendido, y los esquemas pueden mezclarse y combinarse, con el potencial de producir una descendencia que tenga las virtudes de sus dos padres y ninguna de sus debilidades.

## **DESVENTAJAS**

Aunque los AG han demostrado su eficiencia y potencia como estrategia de resolución de problemas, no son la panacea. Los AG tienen ciertas limitaciones; sin embargo, se demostrará que todas ellas pueden superarse y que ninguna de ellas afecta a la validez de la evolución biológica.

- La primera y más importante consideración al crear un AG es definir una representación del problema. El lenguaje utilizado para especificar soluciones candidatas debe ser robusto; es decir, debe ser capaz de tolerar cambios aleatorios que no produzcan constantemente errores fatales o resultados sin sentido. Hay dos maneras principales para conseguir esto. La primera, utilizada por la mayoría de los AG, es definir a los individuos como listas de números-binarios, enteros o reales- donde cada número representa algún aspecto de la solución candidata. Si los individuos son cadenas binarias, un 0 o 1 podría significar la ausencia o presencia de una cierta característica. Si son listas de números, estos números podrían representar muchas cosas distintas: los pesos de las conexiones en una red neuronal, el orden de las ciudades visitadas en un recorrido dado, la situación espacial de componentes electrónicos, los valores con los que se alimenta a un controlador, los ángulos de torsión de los enlaces péptidos de una proteína, etc. Así, la mutación implica cambiar estos números, cambiar bits o sumar o restar valores aleatorios. En este caso, el propio código del programa no cambia; el código es lo que dirige la simulación y hace un seguimiento de los individuos, evaluando sus aptitudes y quizá asegurando que sólo se producen valores realistas y posibles para el problema dado. En otro método, la programación genética, el propio código del programa sí cambia. la PG representa a los individuos como árboles de código ejecutables que pueden mutar cambiando o intercambiando sub árboles. Ambos métodos producen representaciones robustas ante la mutación, y pueden representar muchos tipos diferentes de problemas, ambas han tenido un éxito considerable. El problema de representar a las soluciones candidatas de manera robusta no surge en la naturaleza, porque el método de

representación utilizado por la evolución, a saber, el código genético, es inherentemente robusto: con muy pocas excepciones, como una cadena de cordones de parada, no existe una secuencia de bases de ADN que no pueda traducirse en una proteína. Por lo tanto, virtualmente, cualquier cambio en los genes de un individuo siempre producirá un resultado inteligible, y por tanto las mutaciones en la evolución tienen mayor probabilidad de producir una mejora. Esto entra en contraste con los lenguajes creados por el hombre como el inglés, donde el número de palabras con significado es pequeño comparado con el número total de formas en las que se pueden combinar las letras del alfabeto, y por tanto, es probable que un cambio aleatorio en una frase en inglés produzca un sin sentido.

- El problema de cómo escribir la función objetivo debe considerarse cuidadosamente para que se pueda alcanzar una mayor aptitud y verdaderamente signifique una solución mejor para el problema dado. Si se elige mal una función objetivo o se define de manera inexacta, puede que el AG sea incapaz de encontrar una solución al problema, o puede acabar resolviendo el problema equivocado. (Esta última situación se describe a veces como la tendencia del AG a “engañar”, aunque en realidad lo que está pasando es que el AG está haciendo lo que se le pidió hacer, no lo que sus creadores pretendían que hiciera). Como por ejemplo: unos investigadores utilizaron un algoritmo evolutivo en conjunción con una serie de chips reprogramables, haciendo que la función objetivo recompensara al circuito en evolución por dar como salida una señal oscilatoria. Al fide del experimento, se producía efectivamente una señal oscilatoria pero en lugar de actuar como un oscilador, como pretendían los investigadores, ¡descubrieron que el circuito se había convertido en un receptor de radio que estaba recibiendo y retransmitiendo una señal oscilatoria de un componente electrónico cercano Sin embargo, esto no es un problema en la naturaleza. En el laboratorio de la evolución biológica, sólo hay una función objetivo que es igual para todos los seres vivos -la carrera por sobrevivir y reproducirse, sin importar qué adaptaciones hagan esto posible. Los organismos que se reproducen con más abundancia que sus competidores están más adaptados; los que fracasan en reproducirse no están adaptados.

Un problema muy conocido que puede surgir con un AG se conoce como convergencia prematura. Si un individuo que es más apto que la mayoría de sus competidores emerge muy pronto en el curso de la ejecución, se puede reproducir tan abundantemente que merme la diversidad de la población demasiado pronto, provocando que el algoritmo converja hacia el óptimo local que representa ese individuo, en lugar de rastrear el paisaje adaptativo lo bastante a fondo para encontrar el óptimo global. Esto es un problema especialmente común en las poblaciones pequeñas, donde incluso una variación aleatoria en el ritmo de reproducción puede provocar que un genotipo se haga dominante sobre los otros.

## 2.2 ALGORITMO RECOCIDO SIMULADO DEFINICIÓN Y TEORÍA:

### Analogía Física:

El método del recocido se utiliza en la industria para obtener materiales más resistentes, o más cristalinos, en general, para mejorar las cualidades de un material. Este es el caso de la metalurgia, la alfarería, etc...

El proceso consiste en “derretir” el material (calentarlo a muy alta temperatura). En esa situación, los átomos adquieren una distribución “azarosa” dentro de la estructura del material y la energía del sistema es máxima. Luego se hace descender la temperatura muy lentamente por etapas, dejando que en cada una de esas etapas los átomos queden en equilibrio (es decir, que los átomos alcancen una configuración óptima para esa temperatura). Al final del proceso, los átomos forman una estructura cristalina altamente regular, el material alcanza así una máxima resistencia y la energía del sistema es mínima.

Experimentalmente se comprueba que si la temperatura se hace descender bruscamente o no se espera suficiente tiempo en cada etapa, al final la estructura del material no es la óptima.

La rama de la Física llamada Mecánica Estadística se encargó de desarrollar una serie de métodos para estudiar el comportamiento de grandes cantidades de átomos de un sistema. Debido a que en promedio, en un sistema hay  $10^{23}$  átomos por  $\text{cm}^3$ , solamente puede estudiarse el comportamiento más probable del sistema en equilibrio a una dada temperatura. La experimentación mostró que los átomos de un sistema en un proceso de recocido se comportan según el factor de probabilidad de Boltzman. En 1953 Metrópolis modeló el proceso de recocido: en cada paso del algoritmo se le da al átomo un desplazamiento azaroso y se mide el cambio de energía  $\Delta E$ . Si  $\Delta E \leq 0$  se acepta el desplazamiento. Si  $\Delta E > 0$ , se acepta el desplazamiento con probabilidad  $\exp(-\Delta E / T.K)$ , donde T es la temperatura del sistema y K es la constante de Boltzman.

### Recocido Simulado “Simulated Annealing” - Threshold algorithms (threshold = umbral)

El algoritmo de recocido simulado (Simulated Annealing Algorithm - SAA) pertenece a una clase de Algoritmos de búsqueda local (Local Search Algorithms – LSA) comúnmente llamada Algoritmos de Umbral (Threshold Algorithm - TA). Hay dos razones por las cuales los TA resultan interesantes dentro de los LSA:

- 1) parecen funcionar bien en una amplia gama de problemas reales (prácticos)
- 2) algunos TA, como el SAA, tienen características que permiten hacer un análisis de la convergencia.

Esqueleto de un TA “Algoritmos de umbral”

Sea  $(S,c)$  una instancia de un problema de optimización combinatoria, donde:

- S es el conjunto de soluciones factibles
- c es la función costo (a valores reales positivos)

El problema es hallar un i en S que minimice c.

Para implementar un TA son necesarios además:

- Una función entorno N de S en partes de S.
- Una sucesión  $t_k$  (los llamados umbrales)

La manera de elegir los  $t_k$  y el criterio de aceptación de una nueva solución definen 3 tipos de TA:

Dado i en S en la iteración k

Genero j en N(i)

Utilizo los valores  $c(j) - c(i)$  y  $t_k$  para decidir aceptar o no la solución j

Mejora local de la búsqueda (mejora continua):  $t_k = 0$  (para todo k)

Si  $c(j) - c(i) < t_k = 0$  entonces acepto j

Umbral de aceptación se fija la sucesión  $t_k$  tal que  $t_k \geq t_{k+1}$ ,  $t_k > 0$ , y  $t_k$  tiende a 0 cuando k tiende a infinito.

Si  $c(j) - c(i) < t_k$  entonces acepto j

En este caso, todas las soluciones que disminuyen el costo son aceptadas, y las que incrementan el costo son aceptadas en forma limitada. A medida que aumenta k (progresa el algoritmo) solo se aceptan incrementos pequeños, hasta que eventualmente solo se aceptan mejoras.

Simulated Annealing (recocido simulado): los  $t_k$  se toman como en el umbral de aceptación pero el criterio de aceptación es probabilístico

Si  $c(j) - c(i) \leq 0$  entonces acepto j

Si  $c(j) - c(i) > 0$  entonces acepto j con probabilidad

$$\text{Exp} \left[ \frac{(c(i) - c(j))}{t_k} \right]$$

(en la iteración k se genera un numero al azar r y se acepta j si

$$r < \text{Exp} \left[ \frac{(c(i) - c(j))}{t_k} \right]$$

En este caso, cada vecino de una solución tiene una probabilidad positiva de reemplazar a la solución actual. Los  $t_k$  se eligen de forma tal que a medida que avanzan las iteraciones, aceptar soluciones con grandes incrementos en el costo es menos probable (pero sigue existiendo una probabilidad positiva de aceptarlos).

### **Algoritmo de Recocido Simulado**

#### *Versión monótona*

El algoritmo se divide en etapas. A cada etapa le corresponde una temperatura menor que la que tenía la etapa anterior (a esto hace referencia la monotonía: después de cada etapa la temperatura baja, se enfría el sistema). Por lo tanto hace falta un criterio de cambio de la temperatura (“cuánto tiempo” se espera en cada etapa para dar lugar a que el sistema alcance su “equilibrio térmico”).

Datos iniciales y parámetros a ser definidos para poder inicializar el algoritmo:

#### **Temperatura inicial ( $T_0$ )**

La temperatura inicial  $T_0$  debe ser una temperatura que permita casi (o todo) movimiento, es decir que la probabilidad de pasar del estado  $i$  al  $j$  (en  $N(i)$ ) sea muy alta, sin importar la diferencia  $c(j) - c(i)$ . Esto es que el sistema tenga un alto grado de libertad. Para muchos problemas puede tomarse  $T_0$  proporcional a la raíz cuadrada de la cantidad de nodos. En general se toma un valor  $T_0$  que se cree suficientemente alto y se observa la primera etapa para verificar que el sistema tenga un grado de libertad y en función de esta observación se ajusta  $T_0$ .

#### **Solución inicial ( $i_0$ )**

En todas las versiones, el sistema debe ser “derretido” antes de implementar el algoritmo. Esto es que la solución factible inicial que llamamos  $i_0$  debería ser una solución tomada al azar del conjunto de soluciones factibles. En algunos problemas esto puede hacerse utilizando pseudo-random numbers provistos por una máquina. Pero en muchos casos ya es problemático encontrar una solución, por lo que es imposible tomar una al azar. En estos casos se implementa un algoritmo “greedy” tipo local “search” para buscar una solución factible y se toma esta como  $i_0$  (ejemplo de esto es el TSP).

#### **Función entorno ( $N$ )**

Factor de enfriamiento

$T_{next} = \alpha T$  (factor de enfriamiento geométrico,  $\alpha < 1$ , muy cercano a 1)

$T_{next} = 1 / (1 + \beta T)$  (donde  $\beta$  es un real positivo cercano a cero)

Criterio de cambio de la temperatura

Se usan dos parámetros:  $K$  = cantidad de iteraciones que estamos dispuestos a hacer en cada etapa (equivalente a la cantidad de tiempo que vamos a esperar a que el sistema

alcance su equilibrio térmico para una dada temperatura  $T$ );  $A$  = cantidad de aceptaciones que se permiten hacer en cada etapa.

A medida que  $T$  disminuye se supone que al sistema le resulta más difícil alcanzar un equilibrio porque es más dificultoso el movimiento, entonces hay que esperar más tiempo, esto se traduce en aumentar  $K$ .

Parámetro de aumento de  $K$  ( $\rho$ , se usan valores alrededor de 1,05)

Criterio de Parada “STOP”

a) Lundy and Mees: si el algoritmo se detiene cuando  $T < \varepsilon / [\ln (\#S - 1)/\theta]$

Donde  $\#S$  es el cardinal del conjunto de soluciones (debe tenerse un método de estimar este valor).

Entonces, si  $i$  es la solución que da el algoritmo e  $i^*$  en un óptimo global,

$$P(|c(i) - c(i^*)| < \varepsilon) = \theta$$

b) En general se utiliza un parámetro de congelamiento (frozen: FRZN). Como a medida que disminuye la temperatura, aumenta el parámetro  $K$  y  $A$  permanece constante, la proporción  $A/K$  se hace pequeña. Asumimos que si  $A/K < FRZN$  el sistema está congelado (la cantidad de aceptaciones respecto de la cantidad de iteraciones es muy chica, esto da la idea de que cambiar de configuración es muy difícil).

El algoritmo:

1.  $i = i_0$
2.  $T = T_0$
3.  $K = K_0$
4. while (condición de STOP)
5.     while ( $k < K \ \&\& \ a < A$ )
6.         generar  $j$  en  $N(i)$
7.         if ( $c(j) - c(i) < 0$ )
8.              $i = j$
9.              $a = a + 1$
10.         else
11.             generar un número  $r$  al azar (pseudo-random number)
12.             if ( $r < \exp [(c(i) - c(j))/T]$ )
13.                  $i = j$
14.                  $a = a + 1$
15.          $k = k + 1$
16.      $T = \alpha T$
17.      $K = \rho K$
18.      $k = 0$
19.      $a = 0$
20. mostrar  $i, c(i)$

### *Versión no monótona (fast cooling)*

Se utiliza un factor de calentamiento que permite enfriar más rápidamente el sistema. Esto es, elegir un factor de enfriamiento  $\alpha$  menor y considerar que si en una etapa dada, con una temperatura  $T$ , el algoritmo no alcanza a realizar  $A$  aceptaciones es porque el sistema se enfrió “demasiado rápido” y entonces en la siguiente etapa se multiplica  $T$  por un factor de calentamiento  $\eta$  ( $1 < \eta < 2$ , valores clásicos: mayores a 1,25). Imaginar que en una etapa se alcanzó un mínimo local y la temperatura  $T$  es muy baja, entonces la probabilidad de poder salir del mínimo es también muy baja, por eso se aumenta un poco la temperatura para que en la siguiente etapa la probabilidad de “salir” del mínimo local sea mayor.

En este caso el algoritmo queda así:

1.  $i = i_0$
2.  $T = T_0$
3.  $K = K_0$
4. while (condición de STOP)
5.     while ( $k < K$  &&  $a < A$ )
6.         generar  $j$  en  $N(i)$
7.         if ( $c(j) - c(i) < 0$ )
8.              $i = j$
9.              $a = a + 1$
10.         else
11.             generar un número  $r$  al azar (pseudo-random number)
12.             if ( $r < \exp [(c(i) - c(j))/T]$ )
13.                  $i = j$
14.                  $a = a + 1$
15.          $k = k + 1$
16.     if ( $a = A$ )
17.          $T = \alpha T$
18.     else ( $k = K$ )
19.          $T = \eta T$
20.      $K = \rho K$
21.      $k = 0$
22.      $a = 0$
23. mostrar  $i, c(i)$

### **Un Ejemplo Simple “Polinomio”:**

Queremos hallar el máximo de  $f(x) = x^3 - 60x^2 + 900x + 100$  entre  $x=0$  y  $x=31$ . Describiremos como resolveríamos este problema por Recocido Simulado. Discretizando el rango de valores de  $x$  con vectores binarios de 5 componentes entre 00000 y 11111. Estos 32 vectores constituyen  $S$  las soluciones factibles del problema. Para cada  $i \in S$  definimos  $N(i) = \{j: j \text{ resulta de cambiar una componente de } i\}$  es decir  $N(i)$  tiene 5 elementos.

Le damos **un valor inicial a T** intuitivamente, por ejemplo,  $T_0 = 100$  o  $500$  y en cada iteración del algoritmo lo reduciremos en 10%, es decir,  $T_k = 0.9 T_{k-1}$  (**cooling schedule**).

Cada iteración consiste de lo siguiente:

- ◆ Dada una solución  $i$  elegir  $j$  al azar de  $N(i)$  y reemplazar  $j$  por  $i$  a menos que  
Rechazar  $j$  si  $f(j) \leq f(i)$  y  $\xi > \exp\{(f(j)-f(i))/T_k\}$  (donde  $\xi$  es un numero al azar en  $(0,1)$ )

Tabla 2. Ejemplo óptimo de un polinomio por S.A

Valores de la función $f(x) = x^3 - 60x^2 + 900x + 100$						
vector binario	valores x	f(x)		vector binario	valores x	f(x)
0	0	100		10000	16	3236
1	1	941		10001	17	2973
10	2	1668		10010	18	2692
11	3	2287		10011	19	2399
100	4	2804		10100	20	2100
101	5	3225		10101	21	1801
110	6	3556		10110	22	1508
111	7	3803		10111	23	1227
1000	8	3972		11000	24	964
1001	9	4069		11001	25	725
1010	10	4100	optimo	11010	26	516
1011	11	4071		11011	27	343
1100	12	3988		11100	28	212
1101	13	3857		11101	29	129
1110	14	3684		11110	30	100
1111	15	3475		11111	31	131

Tabla 3. Iteraciones partiendo de  $T_0$  100

T	bit	vecino(x)	f(vecino)	delta f	cambiar?	x
						10011
100	1	11	2287	112	no	10011
90	3	10111	1227	1172	no	10011
81	5	10010	2692	<0	si	10010
73	2	11010	516	2176	no	10010
66	4	10000	3236	<0	si	10000
59	3	10100	2100	1136	no	10000

Tabla 4. . Iteraciones partiendo de  $T_0$  500

T	bit	vecino	f(vecino)	delta f	cambiar?	vector
						10011
500	1	11	2287	112	si	11
450	3	111	3803	<0	si	111
405	5	110	3556	247	si	110
364	2	1110	3684	<0	si	1110
328	4	1100	3988	<0	si	1100
295	3	1000	3972	16	si	1000
266	4	1010	4100*	<0	si	1010
239	5	1011	4071	29	si	1011
215	1	11011	343	3728	no	1011

En la tabla 3 se muestran 5 iteraciones partiendo de un  $T$  inicial igual a 100. El algoritmo llega a 10000 y no puede salir de la atracción de dicho valor en las próximas 50 iteraciones. El valor 10000 ( $x=16$ ) es un máximo relativo dentro del entorno  $N(10000)$ . Esto muestra que el valor inicial de  $T$  es muy bajo para sacarlo de la trampa en que cae partiendo de 10011. En la tabla 4 mostramos 9 iteraciones partiendo de un  $T$  inicial de 500 y se llega al óptimo 1010 ( $x=10$ ) en la iteración 7. En las 150 iteraciones restantes el valor visitado fue el óptimo o uno de sus vecinos. Esto muestra la importancia de acertarla en  $T_0$

#### Parámetros para un planteo general

- 1) La codificación, la definición del entorno y la solución inicial
- 2) El valor inicial de  $T_0$  y el factor de enfriamiento  $\alpha$ .
- 3) Para cambiar la temperatura se consideran dos parámetros  
 $K$ = número de iteraciones  
 $A$ = número de iteraciones en que se acepta un cambio  
Factor de calentamiento  $\eta$ .
- 4) Si la fracción  $A/K < \text{FROZEN}$  se detiene el algoritmo.

## 2.3 Diseño y Optimización de Redes Hidráulicas usando Recocido Simulado (Simulated Anneling) – Software WATERNETGEN

“Base de WATERNETGEN, explicación de los Autores María da Conceição y Joaquim Sousa”

### APLICACIÓN EN REDES A PRESIÓN

La formulación del problema consiste en cambiar de una serie de diámetros discretos comerciales a la combinación de diámetros que provean el menor costo de la red cumpliendo con los requisitos de demanda y presión mínima requerida. El modelo que se explica a continuación no contempla el uso de bombas y reservorios de nivel variable debido a la dificultad del problema a resolver.

La formulación general del modelo sería la siguiente:

#### 1. La función objetivo:

$$\min \sum_{k \in NP} c_k D_k^\alpha L_k \quad (1)$$

Dónde:

C: costo por unidad de longitud

D: diámetro de la tubería

L: longitud de la tubería

NP: configuración de las tuberías (catálogo de tuberías)

$\alpha$ : coeficiente de regresión

La función objetivo sujeta y condicionada a varias restricciones

#### 2. Conservación de la masa en cualquier nodo

$$\sum_{i \in NP_{in,n}} Q_i - \sum_{j \in NP_{out,n}} Q_j = S_n, \quad \forall n \in NN \quad (2)$$

Dónde:

Q: flujo en la tubería

S: demanda en el nodo

NP<sub>in,n</sub>: configuración de tuberías que entran al nodo n

NP<sub>out,n</sub>: configuración de tuberías que sale de nodo n

NN: nodo establecido

#### 3. La segunda restricción expresa la conservación de la energía

$$\sum_{k \in \text{Loop}} \Delta H_k = 0, \quad \forall p \in NL \quad (3)$$

Dónde:

$\Delta H$ : pérdida en la cabeza de presión

NL: configuración de red

La pérdida de cabeza en cualquier tubería es la diferencia entre la cabeza de nodo y los nodos extremos. Si se utiliza la ecuación de Hazen Williams para representar tales pérdidas se obtiene:

$$\Delta H_k = H_{1,k} - H_{2,k} = w \frac{L_k}{C_k^\beta D_k^\gamma} Q_k |Q_k|^{\beta-1}, \quad \forall k \in NP \quad (4)$$

Dónde:

W: constante numérica (depende de las unidades)

C: coeficiente de rugosidad (depende del material de la tubería)

B y  $\gamma$ : coeficientes de regresión

4. La tercera restricción expresa la presión mínima requerida en cada nodo.

$$H_n \geq H_{n \min}, \quad \forall n \in NN \quad (5)$$

Dónde:

$H_n \min$ : mínima presión requerida en cada nodo

5. Mínimos diámetros requeridos

$$D_k \geq D_{\min}, \quad \forall k \in NP \quad (6)$$

Dónde:

$D_{\min}$ : mínimo diámetro, y debe corresponder a los diámetros comerciales establecidos en el catálogo de tuberías

$$D_k \in \{D\}, \quad \forall k \in NP \quad (7)$$

Donde (D): configuración de diámetros comerciales

**Algoritmo Recocido Simulado Utilizado en WATERNETGEN:**

“Base de WATERNETGEN, explicación de los Autores *María da Conceição* y *Joaquim Sousa*”

El Algoritmo de Recocido Simulado ha sido ampliamente utilizado en problemas de optimización, tal y como se explicó la analogía física y el algoritmo en general en el numeral 2.2.

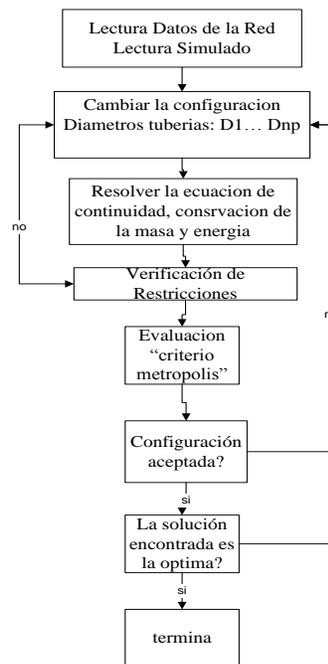
No obstante la herramienta a utilizar para la optimización de las redes propuestas es WATERNETGEN cuyos autores explican el algoritmo utilizado para dar un concepto de fondo y así poder utilizar el software, el cual es una herramienta muy práctica para el diseño y optimización de redes a presión.

En general el Algoritmo de Recocido simulado utilizado por los autores se resume en los siguientes pasos.

1. Cambio S1 (S1 es la configuración inicial)
2. Cambio t1 ( t1 es la temperatura inicial)
3. Cambio Tf (Tf es la temperatura final a la cual para la iteración)
4.  $J \leftarrow 0$
5. Repite
6.  $J \leftarrow J + 1$
7. Cambie aleatoriamente  $S^j \in N(s_j)$   $N(s_j)$  está en la vecindad de  $S_j$
8. Cambie aleatoriamente  $p \in \{0,1\}$
9. Si  $p \leq \min\{1, \exp ( c(S_j) - c(S^j))/ t_j\}$  “test criterio de metrópolis”  
 $C(S_j)$  es el costo de la configuración “actual” y  $C(S^j)$  es el costo de la configuración “candidata”  
 Desde  $S_{j+1} \leftarrow S^j$   
 Mientras  $t_{j+1} \leftarrow \leq t_f$

Fin

Figura 4. Diagrama de flujo algoritmo WaterNetGen



En todos los pasos del algoritmo se producen cambios en la configuración del sistema de redes, y su costo es evaluado. La nueva configuración se cambia y se repite en el vecindario de la actual configuración  $S_j$ . “ver figura 5” en el vecindario se incluye la configuración teniendo en cuenta todas las tuberías por una con el mismo diámetro en la actual configuración. La nueva configuración es aceptada o no de acuerdo con el criterio de “metrópolis” Si  $p \leq \min\{1, \exp (c(S_j) - c(S`j))/ t_j\}$  si es aceptada esta configuración puede ser usada como punto de partida para el siguiente paso. Si NO la configuración original puede ser la utilizada para este roll.

Si la temperatura  $t$ . decrece a una taza apropiada el sistema puede tender a un óptimo global es decir al mínimo costo, al igual de si la temperatura inicial es lo suficientemente alta como para no quedar atrapada en un óptimo local “ejemplo del polinomio”

Siguiendo el enfoque adoptado por Johnson (1989) es necesario tener en cuenta cuatro parámetros para desarrollar el Recocido Simulado con apropiados resultados.

Figura 5. Cambios configuración sistema tubería hacia el vecindario

		Diametros				
		1	2	3		ND
tuberías	1					
	2		← x →			
	3					
					← x →	
	NP			← x →		

**a:** La probabilidad de aceptación de un cambio en la configuración inicial a un candidato cuya configuración es más costoso que la configuración inicial dado por un porcentaje. Este parámetro es llamado elasticidad de aceptación y es usado para definir la temperatura inicial del proceso de recocido. Se puede expresar por la siguiente expresión.

$$t_1 = - \frac{0.1 C_0}{\ln a}$$

Dónde:

$C_0$ : es el costo inicial de la configuración

$a$ : elasticidad de aceptación.

Esta expresión hace posible encontrar una temperatura que para  $a\%$  de soluciones con un costo 10% superior al costo de la configuración inicial, Sea aceptado.

**n1:**

**r:** es la taza con que la temperatura decrece. Este parámetro es llamado factor de enfriamiento, puede ser cambiado por diferentes formas:

- Como significado de un factor constante entre 0.8 y 0.99
- O haciendo variaciones de un paso a otro acorde con el comportamiento del algoritmo.

En la implementación del nivel de temperatura  $t_k$  es gradualmente reducido durante el recocido, y se puede expresar como

$$t_{k+1} = r t_k$$

**n2:** el número de veces que la temperatura decrece conforme se acerca al valor óptimo. Después para el algoritmo

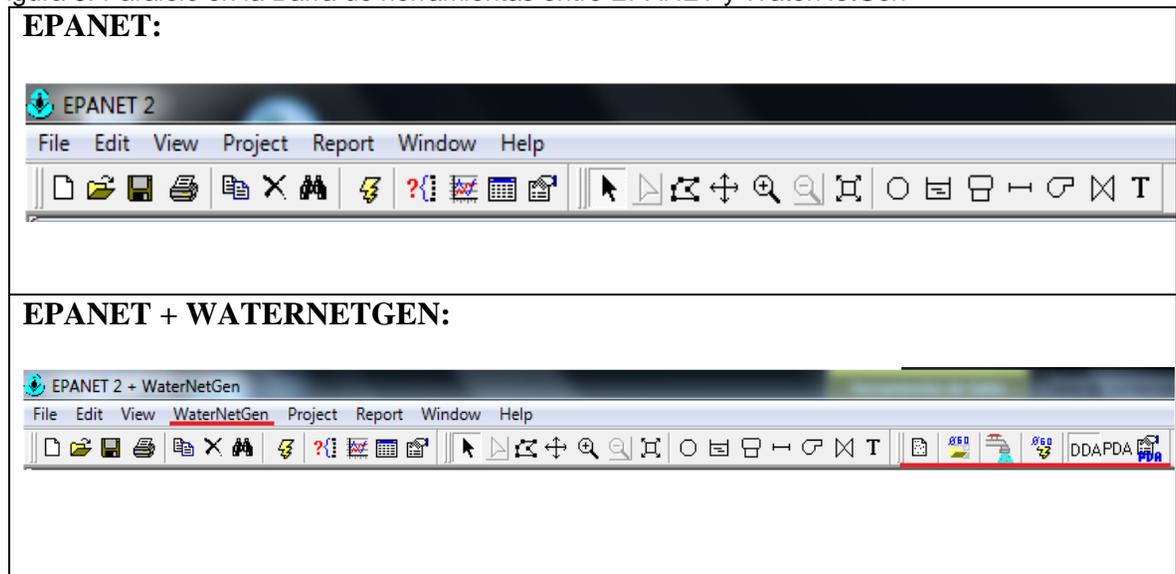
## 2.4 PARÁMETROS Y HERRAMIENTAS INTRODUCIDAS EN EPANET PARA LA OPTIMIZACIÓN DE REDES “WATERNETGEN”

Una vez analizada la teoría de algoritmos genéticos y de Recocido simulado aplicados a la optimización de redes a presión, así como los parámetros utilizados por los autores *María da Conceição* y *Joaquim Sousa* en el algoritmo base de WATERNETGEN, vale la pena hacer un paralelo entre EPANET y EPANET+WATERNETGEN ya que por lo general los interesados están familiarizados con EPANET y pues la introducción de WATERNETGEN para la optimización de redes trae consigo nuevas herramientas las cuales se mostraran y explicaran a continuación.

En el siguiente capítulo se hará la modelación de cada una de las redes escogidas para el presente trabajo en donde se explicará paso a paso la modelación y la utilización de las herramientas descritas en el presente numeral.

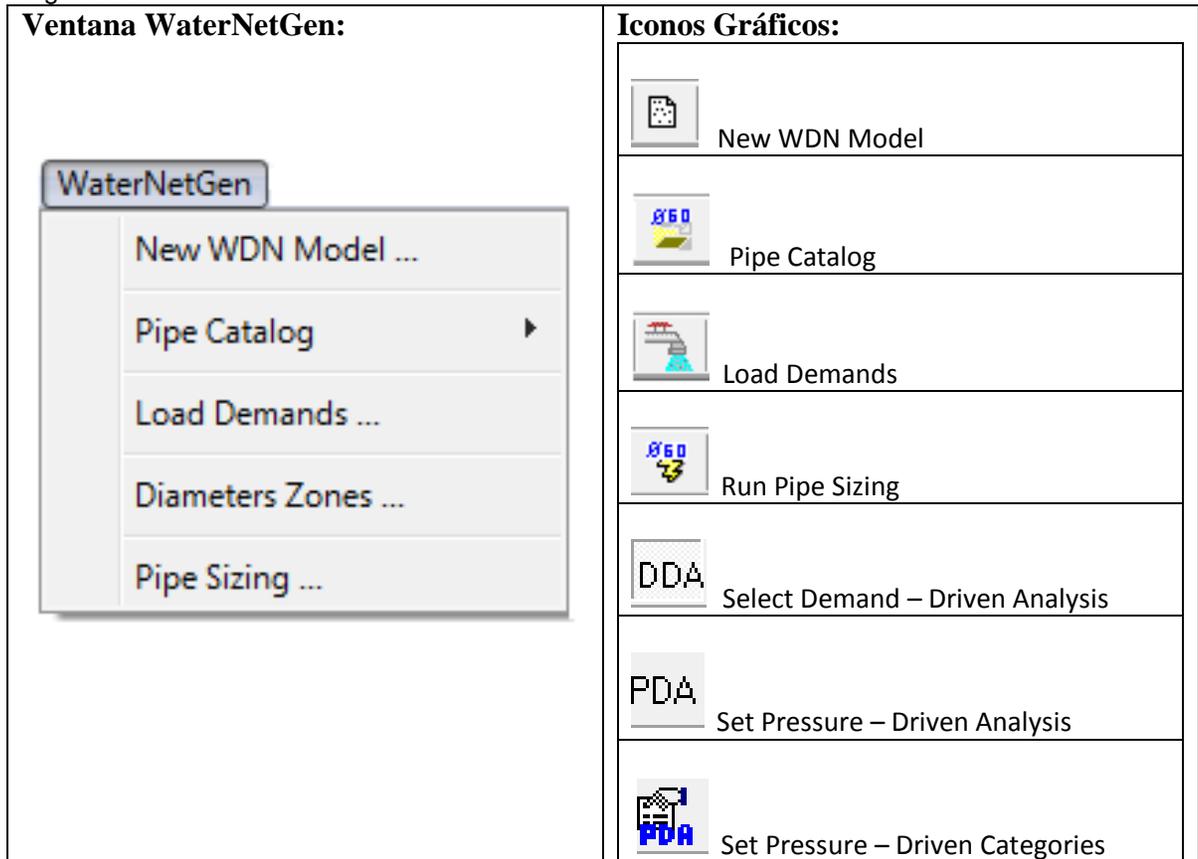
### 1. BARRA DE HERRAMIENTAS

Figura 6. Paralelo en la Barra de herramientas entre EPANET y WaterNetGen



Básicamente la barra de herramientas no cambia, se resalta en rojo las aplicaciones o herramientas introducidas en el software para la optimización de redes. Se pueden utilizar las herramientas graficas o desplegar la ventana WaterNetGen las funciones son similares aunque se complementan.

Figura 7. Herramientas introducidas en WaterNetGen



**New WDN Model:** mediante esta opción se puede generar un modelo pre dimensionándolo rápidamente, mediante opciones como numero de nodos, conectores entre sí, cantidad de tanques y dividir el área en zonas de concentración “clusters”, no obstante para la construcción de redes específicas es mejor utilizar los elementos de dibujo comúnmente utilizados y realizar la modelación de la red manualmente.

**Pipe Catalog:** Es imprescindible para la optimización de redes pues mediante esta opción se crea el LISTADO o catálogo de los diámetros a utilizar y se asignan los costos por metro lineal de cada uno así como también la rugosidad del material, entre otras características. De este LISTADO o catalogo el Algoritmo selecciona la configuración de la red dentro de este rango de diámetros y analiza si la configuración es la más económica y cumple con las restricciones, si no procede a cambiar la configuración asignando nuevos diámetros del CATALOGO

Figura 8. Vista menú New WDN Model.

Nodes: N.Clusters: 4 N.Juncs: 10 % Dead Ends: 20

Elevations: Base: 1000.0 Change Rate: 5.0 Tank: 30.0

Cluster	N. Junctions	Have Tank?	Tank Elevation	Base Elevation	Change Rate	Current State
1	1	N		1000.0	5.0	
2	1	N		1000.0	5.0	
3	1	N		1000.0	5.0	
4	7	N		1000.0	5.0	

Pipe Generation Method:  
 K-nearest Nodes: 3  
 Random K-nearest Nodes: 5  
 Connect: 3 Qf: 5

Status

Buttons: Generate, Close

Figura 9. Vista menú Pipe Catalogue

Units System: SI Diameters in millimeters

Roughness formula:  
 Hazen-Williams  
 Darcy-Weisbach  
 Chezy-Manning

ID	Description	Commercial= Internal?	Roughness Hazen-Williams	Roughness (mm) Darcy-Weisbach	Roughness Chezy-Manning

Pipe Classes for Pipe Type:

ID	Description

**Attention: Project and Catalog Units System Divergence!**

Pipe Diameters for Pipe Type/Class:

Commercial Diameter	Wall Thickness	Price	H-W	D-W (mm)	C-M	Internal Diameter	Max. Allowed Velocity (m/s)	Max. Allowed Flow (m <sup>3</sup> /s)

Buttons: Ok, Cancel, Preview

**Load Demands:** mediante esta opción el Software da la posibilidad de asignar un consumo a cada nodo partiendo de consumo Per Cápita según la población, para el análisis de las redes cuyo consumo es variable en cada nodo se asignan las demandas manualmente.

Figura 10. Vista menú Demand Assignment

Demand Assignment

Demand

Inhabitants: 2

Per Capita Demand: 5 GPM

Multiplier: 1.0

Total Demand

Total Average Demand: 10.0000 [ GPM ]

Leaks and Losses

Concentrated Demand: 0.0000 [ GPM ]

Leaks and Losses (%): 0 0.0000 [ GPM ]

Details

Average Demand: **10.0000 [ GPM ]**

Leaks & Losses: **0.0000 [ GPM ]**

Total to Supply: **10.0000 [ GPM ]**

Ok Cancel

**Diameters Zones:** mediante esta opción se establecen Zonas de diámetros mínimos, es decir cuando se construya la red a cada tubería se le puede obligar a que pertenezca a una de estas zonas seleccionándola y asignándole una zona si así lo desea el usuario.

Figura 11. Vista menú Diameters Zones

Diameters Zones

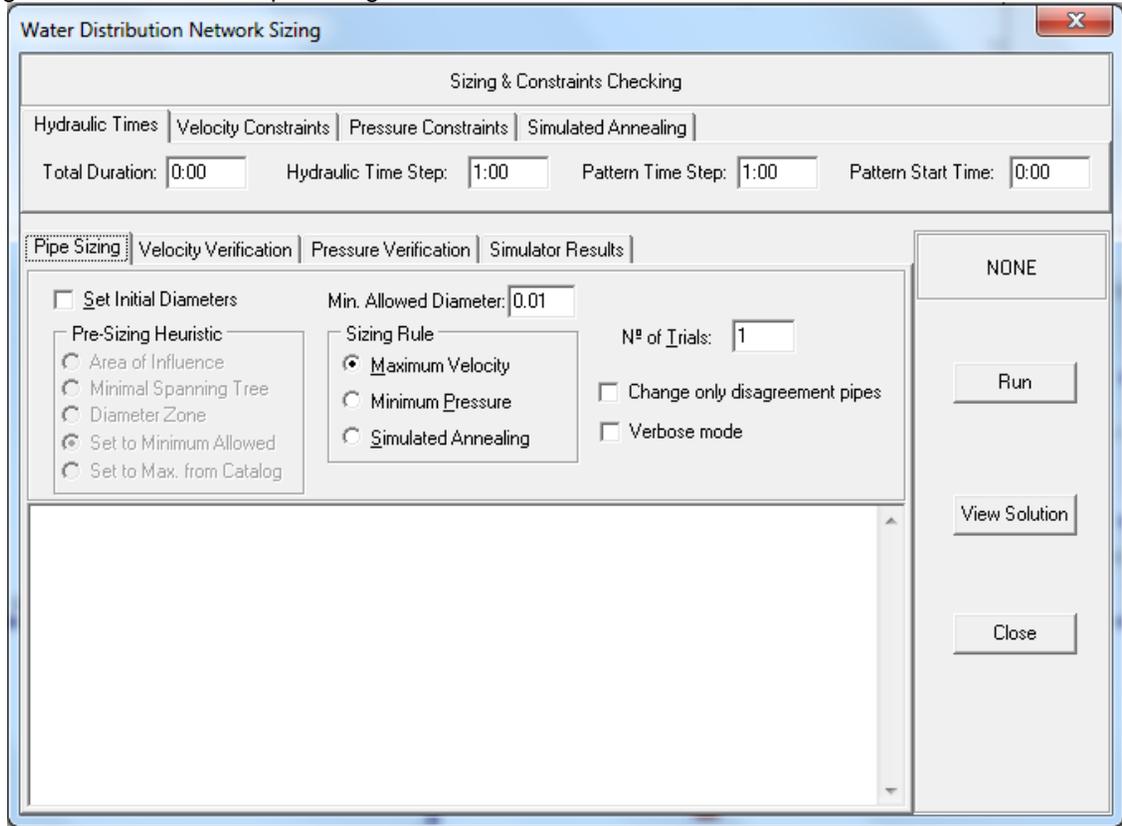
Nominal Diameters ...

Zone	Minimum Diameter (mm)
1	50.00
2	90.00
3	100.00
4	125.00
5	150.00

Ok Cancel

**Pipe Sizing o Run Pipe Sizing:** mediante esta opción se ejecuta el Algoritmo para realizar la optimización, una vez se tengan todas las características de la red y el catálogo de la misma, se ingresa a esta opción, el menú desplegado se explicara cuando se haga la modelación en el capítulo siguiente.

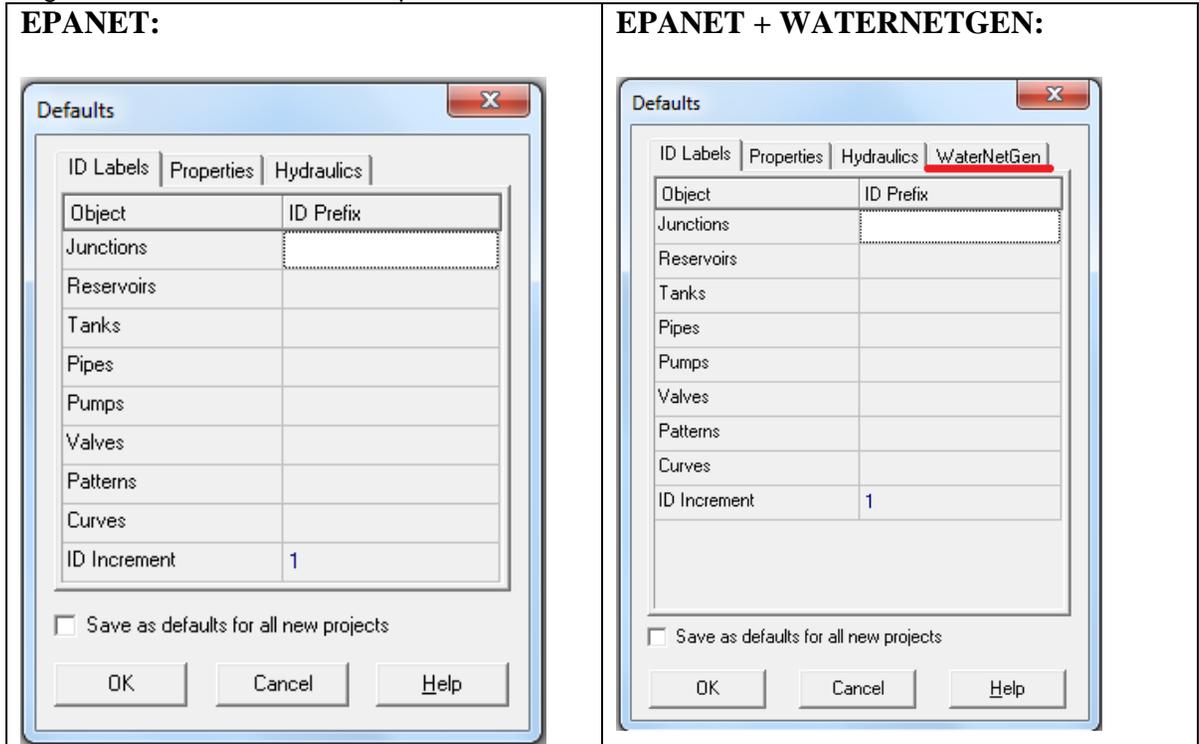
Figura 12. Vista menú Pipe Sizing



## 2. VALORES POR DEFECTO:

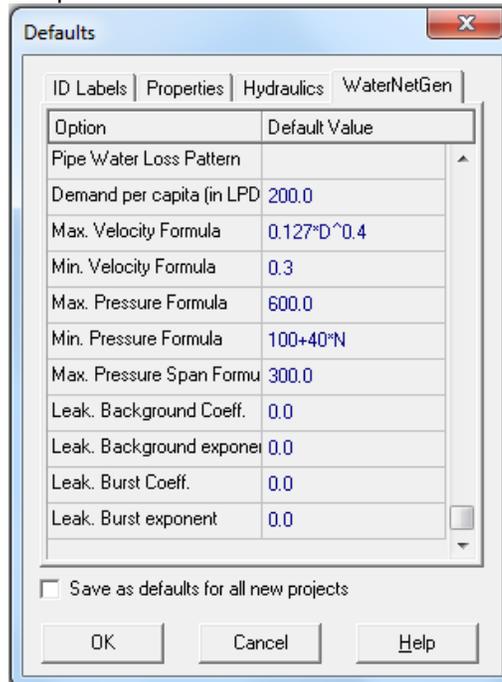
Otro cambio importante introducido en EPANET + WATERNETGEN para la optimización de redes se evidencia en los menús de valores por defecto tal como se resalta:

Figura 13. Vista menús Valores por defecto



Adicionalmente a los parámetros u opciones utilizadas en EPANET y que se pueden predeterminar previo a la modelación de un sistema de redes a presión tales como etiquetas “identificación”, propiedades de cada elemento o accesorio que componen la red, y los aspectos hidráulicos, EPANET + WATERNETGEN incorpora valores por defecto para los parámetros que se utilizan en los proceso de optimización y que el usuario puede predeterminar y modificar previo a realizar la modelación u optimización tales como son las restricciones de velocidad, de presión, las demandas per cápita y coeficientes de pérdida en las tuberías etc..

Figura 14. Vista Menú - Valores por defecto → WaterNetGen



En general los dos puntos anteriores sintetizan los cambios más significativos a la hora de utilizar el software de optimización, se exponen con la finalidad de apreciar las diferencias entre EPANET y EPANET+WaterNetGen, en el siguiente capítulo se hará la modelación y optimización para las redes propuestas (Red de Hanói y Red de Alperovits - Shamir) por lo tanto se analizarán y explicarán estas opciones de una manera más detallada en el siguiente capítulo.

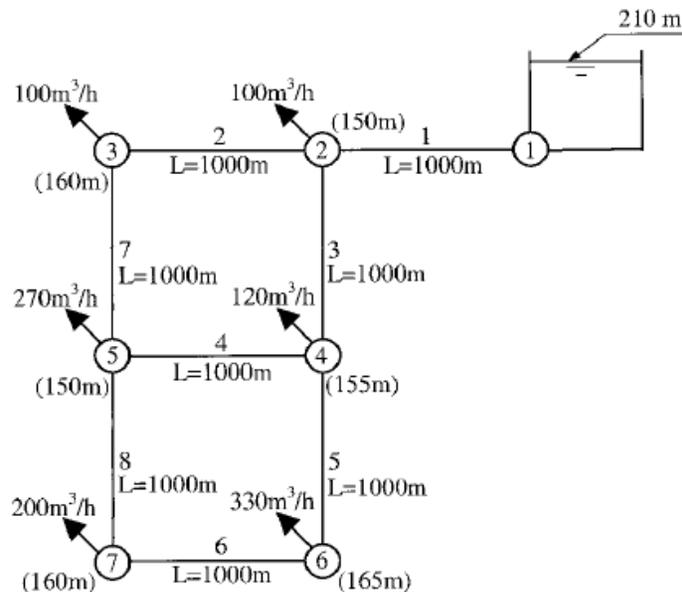
### 3 CAPITULO III – PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las redes planteadas en el presente trabajo son escogidas debido a que en la bibliografía son frecuentemente utilizadas lo que permite puntos de comparación entre varios autores, así mismo tienen tamaños y características que permiten que el Algoritmo utilizado por WaterNetGen realice la optimización de una manera relativamente corta, teniendo en cuenta que muchas veces se deben hacer varias iteraciones con diferentes parámetros para verificar que la configuración y costo de la red obtenida corresponde a la red más óptima posible.

#### 3.1 REDES DE ALPEROVITS – SHAMIR Y DE HANOI

**3.1.1 Red Alperovits – Shamir:** La red fue propuesta en 1977 por Alperovits y Shamir, consta de dos mallas, 6 nodos de consumo y 8 conducciones con un único punto de alimentación. Es una red clásica comúnmente utilizada para la verificación de modelos de diseño de redes de abastecimiento.

Figura 15. Red Alperovits - Shamir



Para efectos del diseño se utiliza coeficiente de pérdida Hazen-Williams de **130** y la presión mínima requerida en cualquier nodo es de **30 m.c.a**, los diámetros nominales y costos se discriminan a continuación:

Tabla 5. Catalogo tuberías para red Alperovits - Shamir

Øint (mm)	Costo
25.4	\$ 2.000,0
50.8	\$ 5.000,0
76.2	\$ 8.000,0
101.6	\$ 11.000,0
152.4	\$ 16.000,0
203.2	\$ 23.000,0
254	\$ 32.000,0
304.8	\$ 50.000,0
355.6	\$ 60.000,0
406.4	\$ 90.000,0
457.2	\$ 130.000,0
508	\$ 170.000,0
558.8	\$ 300.000,0
609.6	\$ 550.000,0

**3.1.2 Red Hanói:** Comúnmente conocida como red de las Torres de Hanói fue propuesta por Fujiwara y Khang (1990) la cual consta de tres mallas, 32 nudos de consumo, 34 conducciones y un único punto de alimentación, como característica importante todos los nodos se encuentran al nivel de referencia excepto la alimentación.

Figura 16. Red de Hanói

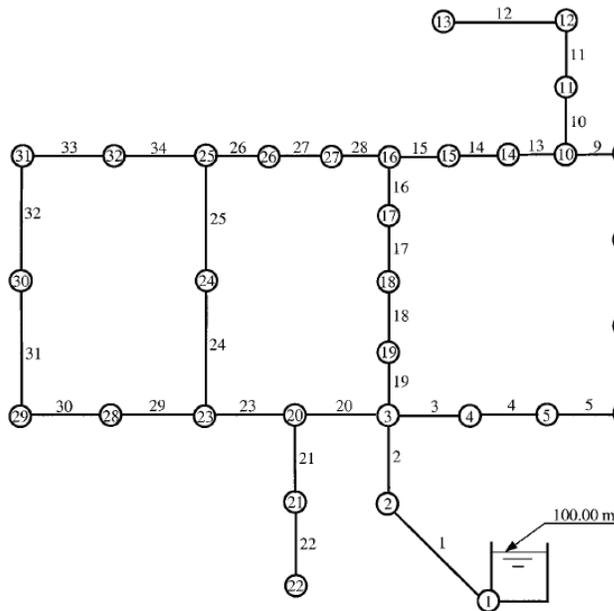


Tabla 6. Catálogo de tuberías para red Hanói

<b>Ø (IN)</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Costo (UNIDADES)</b>
12	304,8	\$ 45,726
16	406,4	\$ 70,400
20	508	\$ 98,378
24	609,6	\$ 129,333
30	762	\$ 180,748
40	1016	\$ 278,280

Tabla 7. Datos de entrada red de Hanói

<b>NODO</b>	<b>DEMANDA (M3/H)</b>	<b>TUBERÍA</b>	<b>LONGITUD (M)</b>
1	19940	1	100
2	890	2	1350
3	850	3	900
4	130	4	1150
5	725	5	1450
6	1005	6	450
7	1350	7	850
8	550	8	850
9	525	9	800
10	525	10	950
11	500	11	1200
12	560	12	3500
13	940	13	800
14	615	14	500
15	280	15	550
16	310	16	2730
17	865	17	1750
18	1345	18	800
19	60	19	400
20	1275	20	2200
21	930	21	1500
22	485	22	500
23	1045	23	2650
24	820	24	1230
25	170	25	1300
26	900	26	850
27	370	27	300
28	290	28	750
29	360	29	1500
30	360	30	2000
31	105	31	1600
32	805	32	150
		33	860
		34	950

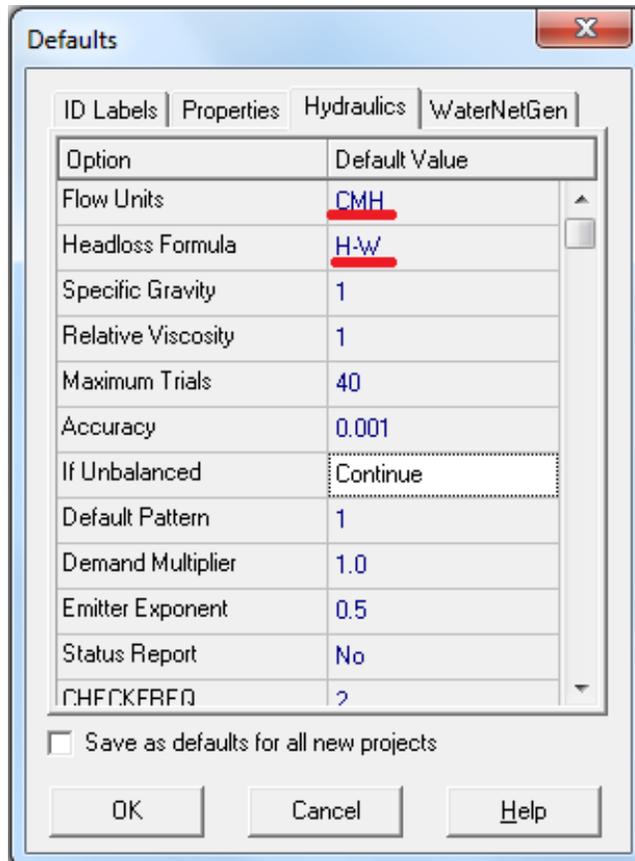
### 3.2 MODELACIÓN EN PROGRAMA EPANET + WATERNETGEN

A continuación se hará la modelación de las redes propuestas en el software EPANET + WATERNETGEN, utilizando la red de Alperovits – Shamir como ejemplo en la modelación, dado a que la cantidad de tramos es menor y se pueden ver los resultados con mayor facilidad, no obstante los resultados obtenidos para cada una de las redes se mostraran y analizaran más adelante.

#### 1. VALORES POR DEFECTO:

- Previo a dibujar la red, Se establecen los valores por defecto
- Propiedades Hidráulicas: dentro de las más importantes, se establece las unidades de flujo como  $m^3/h$  y la formula de perdida de energía por fricción como la de Hazen Williams H-W.

Figura 17. Menú valores por defecto “Defaults”



- Propiedades WaterNetGen: en este caso el criterio de optimización es la presión mínima en cada nodo, la cual corresponde a 30 m.c.a, se debe expresar en Newton (N) por lo tanto corresponde a 294.18 N y se introduce en la opción correspondiente dentro del menú de valores por defecto así:

Figura 18. Presión mínima como valor por defecto

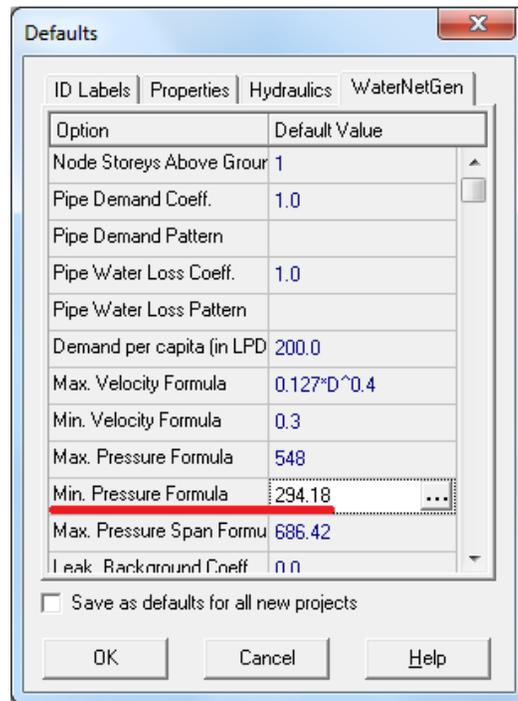
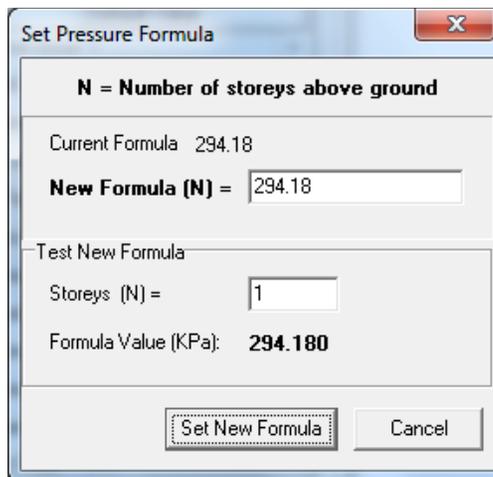


Figura 19. Configuración de presión mínima



## 2. CATALOGO DE TUBERÍAS:

Se procede a crear el catálogo de tuberías, en este caso según la Tabla 5. para la red de Alperovits – Shamir.

Utilizando el menú WaterNetGen→ Pipe catalog o el icono Pipe Catalog  
Como características importantes se deben tener en cuenta las siguientes:

- Sistema Internacional para diámetro en milímetros
- Seleccionar la Formula para el cálculo de las pérdidas por fricción en este caso Hazen-Williams, e introducir el valor de la constante
- Introducir los diámetros con su respectivo precio
- Adicionalmente se pueden tener en cuenta los espesores de las tuberías y las descripciones y clases de las mismas, por lo tanto se pueden introducir los catálogos reales de los fabricantes, en este caso se tomaron espesores de las paredes de cero (0) y se nombraron las tuberías arbitrariamente.

El menú y los datos se muestran a continuación:

Figura 20. Vista herramienta para crear catálogos de tubería

ID	Description	Commercial= Internal?	Roughness Hazen-Williams	Roughness (mm) Darcy-Weisbach	Roughness Chezy-Manning
pvc21	acueducto	N	130.000000	0.000000	0.000000

ID	Description
xxx	xxx

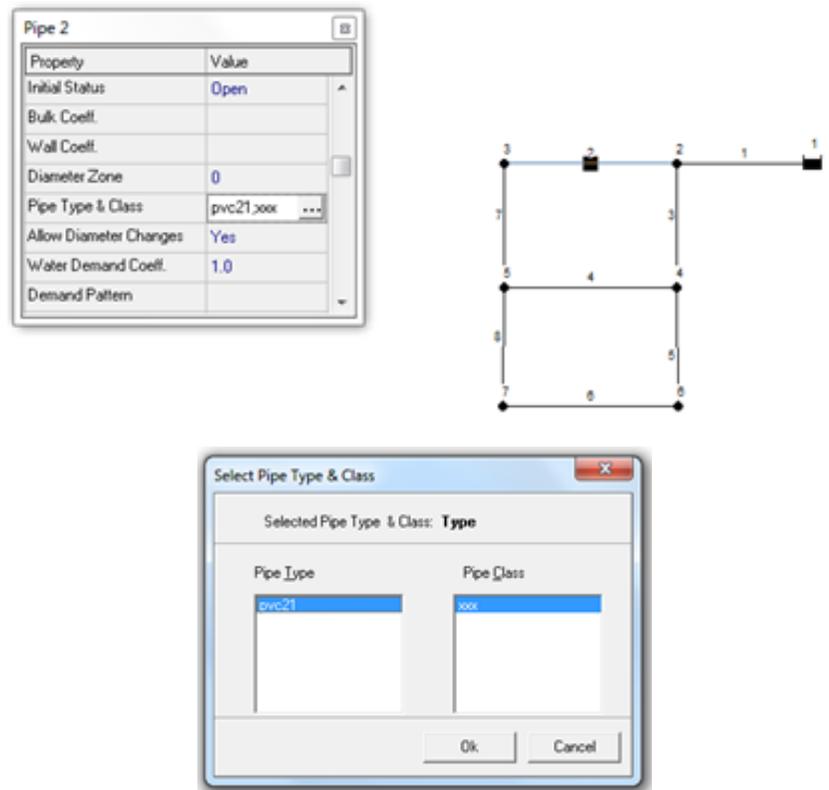
  

Commercial Diameter	Wall Thickness	Price	H-W	D-w (mm)	C-M	Internal Diameter	Max. Allowed Velocity (m/s)	Max. Allowed Flow (m³/s)
25.40	0.00	2.000				25.40	0.463	0.0002
50.80	0.00	5.000				50.80	0.611	0.0012
76.20	0.00	8.000				76.20	0.719	0.0033
101.60	0.00	11.000				101.60	0.806	0.0065
152.40	0.00	16.000				152.40	0.948	0.0173
203.20	0.00	23.000				203.20	1.064	0.0345
254.00	0.00	32.000				254.00	1.163	0.0590
304.80	0.00	50.000				304.80	1.251	0.0913
355.60	0.00	60.000				355.60	1.331	0.1322

Una vez creado el catalogo se puede visualizar en WaterNetGen→ Pipe catalog→ View current y se verá así:



Figura 22. Menú asignación de tipo y clase de tuberías a cada tramo

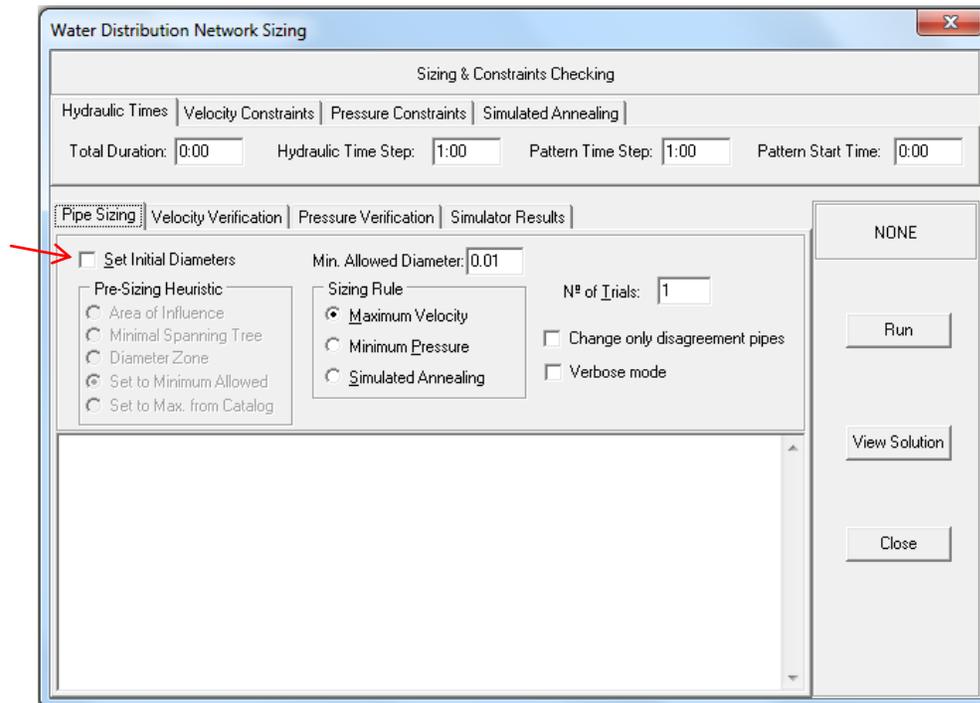


Este paso es necesario, de lo contrario en el momento de optimizar NO correrá el programa debido a que las tuberías de la red creada que estén por fuera del catálogo no tienen costos asignados.

#### 4. OPTIMIZACIÓN – HERRAMIENTA PIPE SIZING:

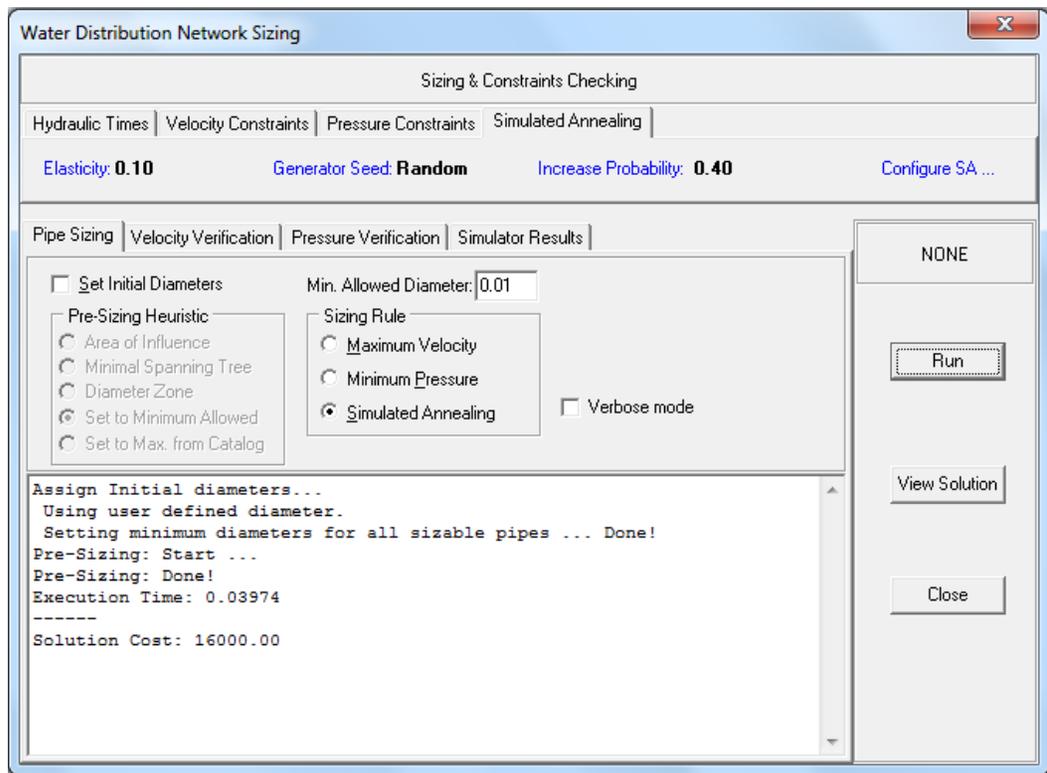
Una vez se tenga la red construida con todos los atributos correspondientes al problema, las restricciones asignadas en los valores por defecto y la asignación de clase a cada tubería que conforma la red, se procede a realizar la optimización, se desplegará el siguiente menú.

Figura 23. Menú optimización WaterNetGen



Previo a realizar una optimización con “Simulated Annealing”, se debe hacer un pre dimensionamiento de la red seleccionando Set Initial Diameter, para que el algoritmo siempre haga un recorrido desde un punto conocido, para ello se selecciona “Set to Minimum Allowed” para empezar desde la configuración más económica posible “ver figura 24” es decir todas las tubería con el mínimo diámetro o por lo contrario Set to Max from Catalog para empezar de la configuración más costosa, no obstante según el análisis de las gráficas construidas en el presente trabajo que se explicarán más adelante se deben recorrer diferentes caminos para verificar que la solución encontrada efectivamente corresponde a la más económica posible y no se está encontrando un óptimo local.

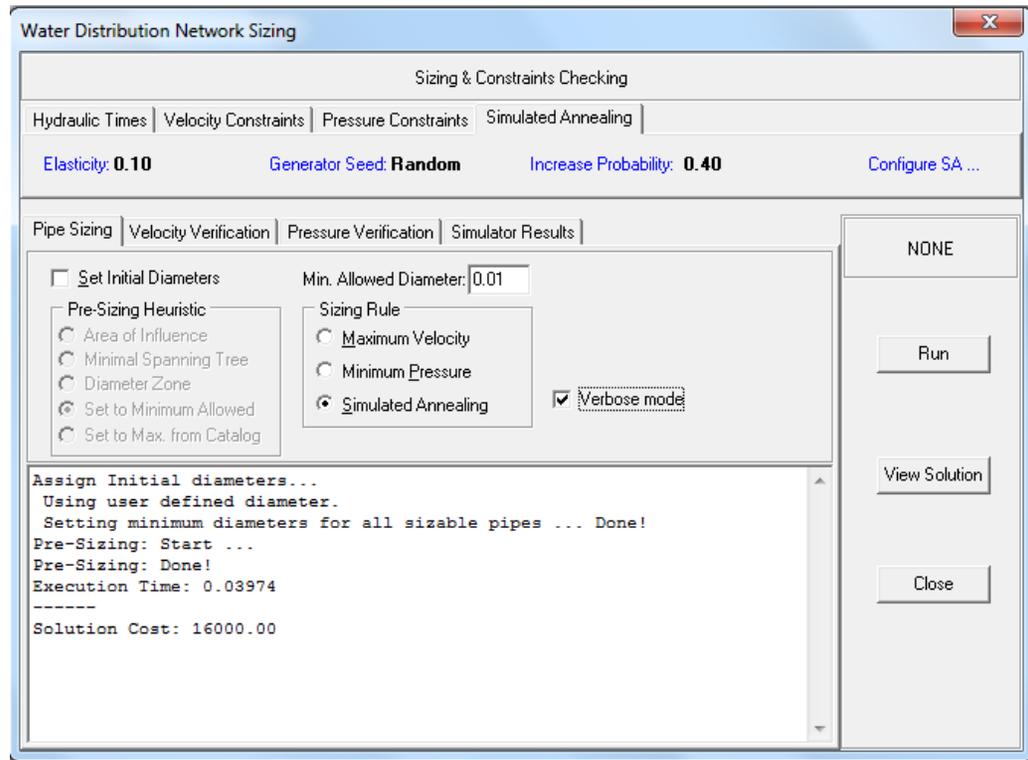
Figura 24. Vista Pantalla pre dimensionamiento red – seleccionando diámetro mínimo



Previo a la simulación con Recocido Simulado se puede restringir el rango de diámetros con la opción “Min. Allowed Diameter”, solo si se desea.

Luego del paso anterior Se selecciona en Sizing Rule - Simulated Annealing y se verá el siguiente pantallazo

Figura 25. Vista Sizing Rule – Simulated Annealing



Al seleccionar Simulated Annealing, se pueden ver los parámetros de Elasticidad, valor semilla “Generator Seed”, incremento en la probabilidad y configuración de SA (Simulated Annealing)

Es recomendable seleccionar Verbose mode, para poder verificar paso a paso los valores obtenidos en la ejecución del algoritmo

Se debe ingresar a configure SA, para verificar o cambiar los parámetros según se requiera.

Allí se pueden modificar:

La función objetivo en nuestro caso “Least Cost” mínimo costo

La Elasticidad, parámetro con el cual decrece la temperatura, según la bibliografía puede ir entre 0.001 y 0.1

Función de Penalización que use la suma de todas las restricciones

Los otros parámetros tales como % Acceptance, Cooling Rate, Evaluation per Temp. No se modifican pues son los valores por defecto que quieren decir por ejemplo: tomando Cooling Rate 0.90: que para una tasa de enfriamiento de 0.90 el porcentaje de soluciones que pasa son de 20% y el algoritmo realiza 50 iteraciones, es decir a menor porcentaje se está acercando a la respuesta ya que la temperatura sigue descendiendo y la tasa de enfriamiento NO puede ser mayor. Lo anterior se puede verificar corriendo el algoritmo “Simulated Annealing” con Verbose Mode.

Figura 26. Valores por defecto “parámetros” Simulated Anneling

Simulated Annealing Options

Elasticity: 0.10 Generator Seed: 0 Increase probability: 0.40

Parameters

% Acceptance (<=)	20.0	35.0	50.0	70.0	100.0				
Cooling Rate	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50				
Evaluations per Temp.	50	40	30	20	10				

Obj. Function Penalties

Use Greatest Constraint Violation

Use the sum of all constraint violations

Objective Function Criteria

Least Cost  Best Performance (PI)

Max. Entropy  Max. Resilience

Reference Cost: -1.00

Cost Upper Bound (%): 10.00

Service Level | Performance Indicators

Pressure

Min.: 100000.00

Max.: 0.00

Velocity

Min.: 0.00

Max.: 100000.00

Stop Criterion

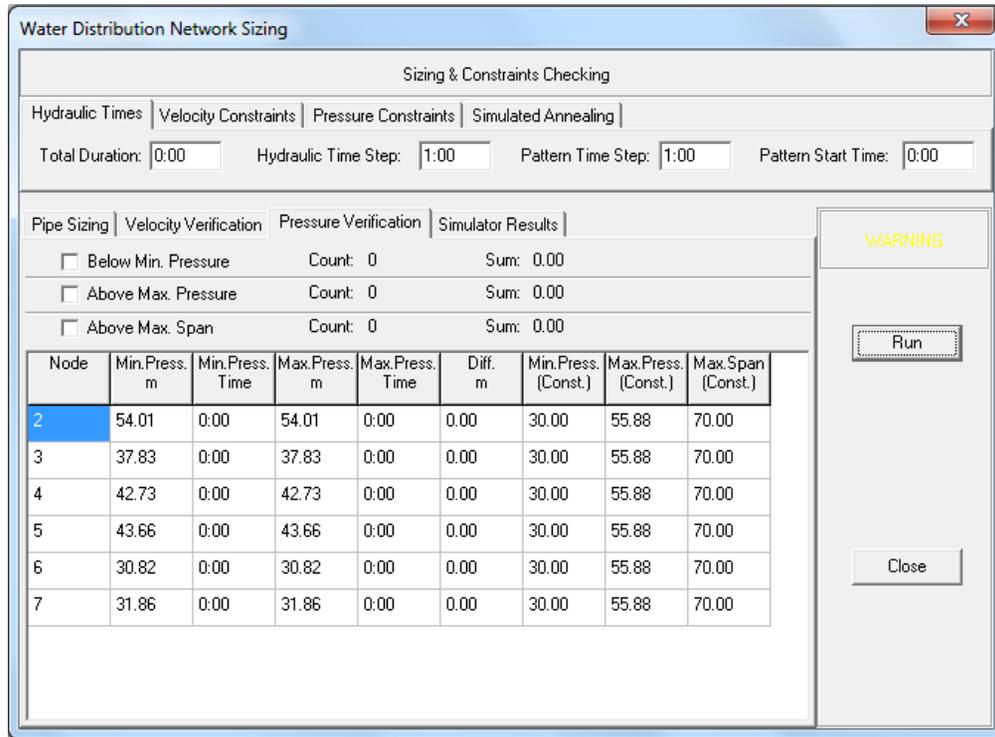
% Accept solutions below : and with: 5.0000

N. of "temps" without improvement: 2

Ok Cancel

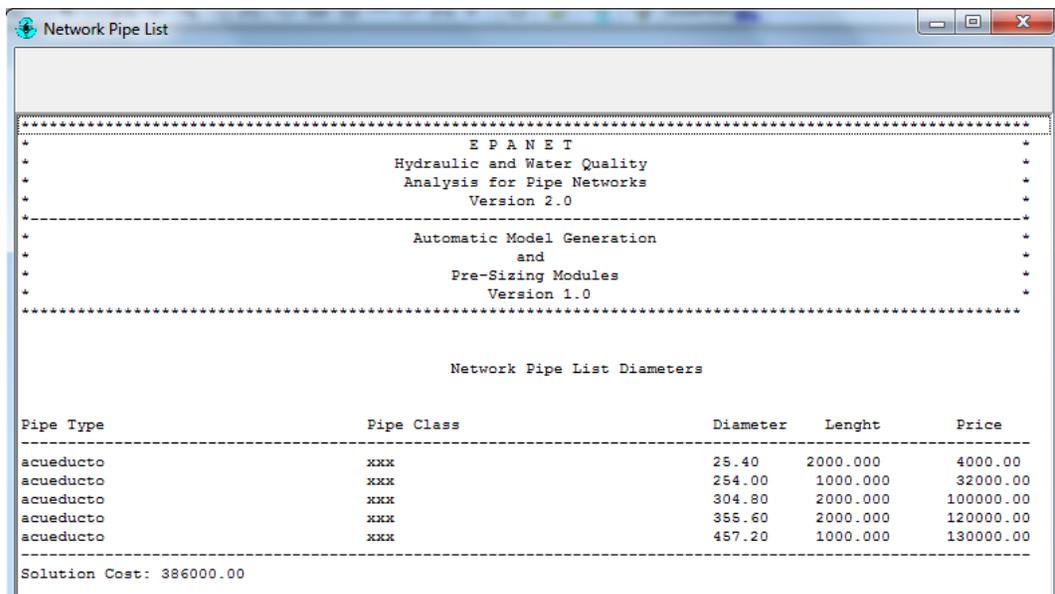
Luego de corrido el sistema se procede a verificar la presión en los nodos con Pressure Verification, para verificar que la presión en los nodos sea superior a los 30 m.c.a.

Figura 27. Menú verificación de presiones



Se puede observar que la presión mínima se da en el nodo 6 y corresponde a 30.82 m.c.a, luego se cumple la restricción, por lo tanto se verifica el costo y la configuración de la red obtenida mediante “View Solution”.

Figura 28. Menú “view solution”



Se obtiene una solución que cumple las restricciones a un costo de 386000 (unds), lo que la hace una excelente solución pues como se puede observar más adelante en el cuadro comparativo de soluciones es la más económica, debido a que la solución NO especifica la tubería tramo a tramo la configuración se debe obtener seleccionando cada tramo de tubería la cual se resume en la Tabla 8. Del siguiente numeral.

### 3.3 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN Y ANÁLISIS

En el numeral anterior se presentó la modelación completa para la red de Alperovits Shamir, en el presente numeral se presentaran los resultados obtenidos mediante optimización en WaterNetGen para las redes seleccionadas en el presente trabajo que como ya se indicó anteriormente tienen una literatura extensa con la cual se puede comparar.

Como complemento de lo descrito anteriormente y basándose en lo explicado en la teoría del capítulo II más adelante se explican las gráficas construidas en las simulaciones u optimizaciones para la red de Hanói, donde se varían los parámetros de elasticidad.

#### 3.3.1 RED ALPEROVITS SHAMIR

En el numeral anterior se mostraron y analizaron los pantallazos de los resultados para la red de Alperovits Shamir, también se verificaron las restricciones. Vale la pena recordar que en el menú “view solution” NO se especifica la solución tramo a tramo, por lo tanto para construir la siguiente tabla se debe seleccionar directamente sobre el dibujo de la red cada tramo y así verificar la configuración encontrada en el proceso de optimización.

Tabla 8. Configuración obtenida para la red Alerovits - Shamir

NODO	Cabeza de Presión (m)	TUBERÍA	Diámetro (mm)	COSTO RED (UNIDADES)
1	210	1	457.2	\$ 130.000,0
2	54.01	2	355.6	\$ 60.000,0
3	37.83	3	304.8	\$ 50.000,0
4	42.73	4	25.4	\$ 2.000,0
5	43.66	5	304.8	\$ 50.000,0
6	30.82	6	25.4	\$ 2.000,0
7	31.86	7	355.6	\$ 60.000,0
		8	254	\$ 32.000,0
				<b>\$ 386.000</b>

Tabla 9. Cuadro comparativo soluciones red Alperovits - Shamir

<b>SOLUCIONES PARA EL PROBLEMA RED (ALPEROVITS AND SHAMIR)</b>												
TUBERIA	Alperovits and shamir (1987)		goulter et al (1986)		Kessier and Shamir (1989)		Savic AND Walters (1997)		Cunha and Sousa		EPANET+WATERN ETGEN (presente)	
	L (m)	D (in)	L (m)	D (in)	L (m)	D (in)	L (m)	D (in)	L (m)	D (in)	L (m)	D (in)
1	256	20	383	20	1000	18	1000	18	1000	18	1000	18
	744	18	617	18								
2	996,38	8	1000	10	66	12	1000	10	1000	10	1000	14
	3,62	6			934	10						
3	1000	18	1000	16	1000	16	1000	16	1000	16	1000	12
4	319,38	8	687	6	713	3	1000	4	1000	4	1000	1
	680,62	6	313	4	287	2						
5	1000	16	1000	16	836	16	1000	16	1000	16	1000	12
					164	14						
6	784,94	12	98	12	109	12	1000	10	1000	10	1000	1
	215,06	10	902	10	891	10						
7	1000	6	492	10	819	10	1000	10	1000	10	1000	14
			508	8	181	8						
8	990,93	6	20	2	920	3	1000	1	1000	1	1000	10
	9,07	4	980	1	80	2						
costo (unidades)	<b>497.525,0</b>		<b>435.015,0</b>		<b>417.500,0</b>		<b>419.000,0</b>		<b>419.000,0</b>		<b>386.000,0</b>	

Fuente: Sousa Joaquim y Conceicao Cunha, Water Distribution Network Desing Optimization: Simulated Annealing Approach, Journal of Water Resources Planning and Management July-August 1999 pag. 218.

#### 4.1.2 RED DE HANÓI

Llevando acabo el mismo procedimiento descrito en el numeral 3.2, se lleva a cabo la simulación para la red de Hanói encontrando como la solución óptima la siguiente configuración.

Tabla 10. Configuración obtenida para la red de Hanói

NODO	Cabeza de Presion (m)	TUBERIA	Diametro (in)	COSTO RED (UNIDADES)
1	100	1	1016	\$ 27.828,0
2	97,14	2	1016	\$ 375.678,0
3	61,67	3	1016	\$ 250.452,0
4	56,92	4	1016	\$ 320.022,0
5	51,02	5	1016	\$ 403.506,0
6	44,88	6	1016	\$ 125.226,0
7	43,35	7	1016	\$ 236.538,0
8	41,61	8	1016	\$ 236.538,0
9	40,23	9	1016	\$ 222.624,0
10	39,2	10	762	\$ 171.711,0
11	37,64	11	609,6	\$ 155.200,0
12	34,21	12	609,6	\$ 452.666,0
13	30,01	13	508	\$ 78.702,0
14	35,52	14	406,4	\$ 35.200,0
15	33,72	15	304,8	\$ 25.149,0
16	31,3	16	304,8	\$ 124.832,0
17	33,41	17	406,4	\$ 123.200,0
18	49,93	18	609,6	\$ 103.466,0
19	55,09	19	508	\$ 39.351,0
20	50,61	20	1016	\$ 612.216,0
21	41,26	21	508	\$ 147.567,0
22	36,1	22	304,8	\$ 22.863,0
23	44,52	23	1016	\$ 737.442,0
24	38,93	24	762	\$ 222.320,0
25	35,34	25	762	\$ 234.972,0
26	31,7	26	508	\$ 83.621,0
27	30,76	27	304,8	\$ 13.718,0
28	38,94	28	304,8	\$ 34.295,0
29	30,13	29	406,4	\$ 105.600,0
30	30,42	30	304,8	\$ 91.452,0
31	30,7	31	304,8	\$ 73.162,0
32	33,18	32	406,4	\$ 10.560,0
		33	406,4	\$ 60.544,0
		34	609,6	\$ 122.866,0
				<b>\$ 6.081.087</b>



... Continuación Figura 30.

10	39.20	0:00	39.20	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
11	37.64	0:00	37.64	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
12	34.21	0:00	34.21	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
13	30.01	0:00	30.01	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
14	35.52	0:00	35.52	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
15	33.72	0:00	33.72	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
16	31.30	0:00	31.30	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
17	33.41	0:00	33.41	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59

18	49.93	0:00	49.93	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
19	55.09	0:00	55.09	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
20	50.61	0:00	50.61	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
21	41.26	0:00	41.26	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
22	36.10	0:00	36.10	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
23	44.52	0:00	44.52	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
24	38.93	0:00	38.93	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
25	35.34	0:00	35.34	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59

26	31.70	0:00	31.70	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
27	30.76	0:00	30.76	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
28	38.94	0:00	38.94	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
29	30.13	0:00	30.13	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
30	30.42	0:00	30.42	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
31	30.70	0:00	30.70	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59
32	33.18	0:00	33.18	0:00	0.00	29.98	1019.74	30.59

Encontrando que la presión mínima se establece en el nodo 29 y corresponde a 30.13 m.c.a la cual es mayor a 30 m.c.a que es la presión mínima por lo tanto el sistema cumple las restricciones y se configura como una buena solución de acuerdo al siguiente cuadro comparativo de soluciones para la red de Hanói.

Tabla 11. Cuadro comparativo soluciones red de Hanói

	Matias (2003)	SaVIC AND Walters (1997)	SaVIC AND Walters 2 (1997)	P. Iglesias, J. Martinez (AG) Sol1	Cunha and Sousa	EPANET+WATERNETGEN (presente trabajo)
TUBERIA	D (in)	D (in)	D (in)	D (in)	D (in)	D (in)
1	1016	1016	1016	1016	1016	1016
2	1016	1016	1016	1016	1016	1016
3	1016	1016	1016	1016	1016	1016
4	1016	1016	1016	1016	1016	1016
5	1016	1016	1016	1016	1016	1016
6	1016	1016	1016	1016	1016	1016
7	1016	1016	1016	1016	1016	1016
8	1016	1016	1016	1016	1016	1016
9	1016	762	1016	1016	1016	1016
10	762	762	762	762	762	762
11	609.6	762	609.6	609.6	609.6	609.6
12	609.6	609.6	609.6	609.6	609.6	609.6
13	508	406.4	508	508	508	508
14	406.4	406.4	406.4	406.4	406.4	406.4
15	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8
16	304.8	406.4	304.8	304.8	304.8	304.8
17	406.4	508	406.4	406.4	406.4	406.4
18	609.6	609.6	508	609.6	508	609.6
19	609.6	609.6	508	508	508	508
20	1016	1016	1016	1016	1016	1016
21	508	508	508	508	508	508
22	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8
23	1016	1016	1016	1016	1016	1016
24	762	762	762	762	762	762
25	762	762	762	762	762	762
26	508	508	508	508	508	508
27	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8
28	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8
29	406.4	406.4	406.4	406.4	406.4	406.4
30	304.8	406.4	406.4	304.8	304.8	304.8
31	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8	304.8
32	406.4	304.8	304.8	406.4	406.4	406.4
33	406.4	406.4	406.4	406.4	406.4	406.4
34	609.6	508	508	609.6	609.6	609.6
<b>COSTO UNIDADES:</b>	<b>\$ 6.093.000</b>	<b>\$ 6.187.000</b>	<b>\$ 6.073.000</b>	<b>\$ 6.081.087</b>	<b>\$ 6.056.000</b>	<b>\$ 6.081.087</b>

\* Datos tomados de - Iglesias Rey Pedro, Martínez Solano Javier, Pérez García Rafael – Algoritmo Genético Modificado para Diseño de Redes de Abastecimiento de Agua, Seminario Hispano Brasileiro sobre sistema de abastecimiento urbano de agua 8 a 10 de Noviembre 2004

<b>Otros Autores:</b>						
Saldarriaga Juan AOC 2004	<b>\$ 6.080.919</b>					
Fujiwara and Khang (1990)	<b>\$ 6.116.000</b>					
Sonaj and Bhave (1993)	<b>\$ 6.045.000</b>					

### 3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS:

En las tablas 9 y 11 se pueden observar las soluciones comparativas para las redes de Alperovit Shamir y Hanói respectivamente, según los resultados obtenidos se puede decir que:

1. El costo para la configuración de tuberías encontrada para la red de Alperovits Shamir Tabla 9. se constituye como una “excelente” solución pues cumple con las restricciones de presión mínima ver figura 27, y se respetó la configuración original pues la suma de los tramos da los 8000 m ver figura 28.
2. La red de Hanói da una buena solución si bien no es la más económica encontrada en la literatura está dentro de la media de los mejores trabajos ver Tabla 11, lo que demuestra que el software es eficiente pues la red de Hanói se constituye en 34 tramos de diferentes longitudes, por lo tanto es un problema altamente NO lineal y que como se puede observar en las tablas 12 y 13 la solución se encuentra en un tiempo de computo promedio 1313 s. (21,88 min) en solo tres corridas.
3. Es importante tener en cuenta que el parámetro de la elasticidad de aceptación determina la temperatura inicial del sistema “ver tablas 12 y 13” y que como se explicó en el ejemplo del polinomio sección 2.2 la temperatura inicial juega un papel importante para que la solución no se quede atrapada en un óptimo global.

Según las tablas y gráficas construidas a través de cada simulación seleccionando previamente “verbose mode” en el menú de simulated annealing “figura 25”, se puede apreciar y concluir lo siguiente:

1. Que a medida que la temperatura del sistema va descendiendo se alcanza una solución mejor, lo cual es la analogía física del algoritmo con el recocido simulado.
2. Que se debe dar varias alternativas de recorrido al algoritmo, es decir se hicieron simulaciones partiendo de la solución más económica y desde el extremo opuesto la solución más costosa para el sistema, encontrando diferentes soluciones para cada una de ellas, así mismo con diferentes valores de elasticidad que según Sousa y COUNCA se recomienda este entre 0.001 y 0.1
3. Se observa una convergencia a una solución en menos iteraciones partiendo desde la solución más costosa, sin embargo son soluciones menos óptimas que las encontradas partiendo de la solución más económica.
4. Para la construcción de las gráficas 1 y 2 se obvian las dos primeras líneas de las tablas 12 y 13 pues el algoritmo al elevar la temperatura al máximo, también la configuración de la red es la más costosa posible, lo que afecta el rango de costos y para hacer más legible la gráfica no se tienen en cuenta los dos primeros pasos del algoritmo.

5. Para diferentes valores de elasticidad se observa una tendencia similar en el % de individuos que pasan para ser evaluados en las iteraciones siguientes con cada disminución de la temperatura “ver grafica 3”

Tabla 12. Variación del parámetro de Elasticidad – partiendo solución más costosa

<i>Partiendo de la Configuración de tuberías <b>MAS COSTOSA</b></i>						
ELASTICIDAD						
PASO	0.001		0.01		0.1	
	Temp	Costo	Temp	Costo	Temp	Costo
1	158.804	\$ 10.969.797	238.206	\$ 10.969.797	476.412	\$ 10.969.797
2	127.043	\$ 7.996.925	142.923	\$ 7.101.148	285.847	\$ 6.992.303
3	115.767	\$ 7.996.925	100.046	\$ 6.631.965	171.508	\$ 6.969.047
4	69.490	\$ 7.156.700	70.032	\$ 6.561.721	120.055	\$ 6.770.548
5	48.622	\$ 6.609.157	49.022	\$ 6.467.204	84.039	\$ 6.636.023
6	38.897	\$ 6.470.055	39.218	\$ 6.445.494	58.827	\$ 6.537.473
7	31.118	\$ 6.470.055	31.374	\$ 6.351.162	41.179	\$ 6.529.167
8	24.894	\$ 6.398.038	25.099	\$ 6.351.162	32.943	\$ 6.529.167
9	19.915	\$ 6.398.038	22.589	\$ 6.351.162	26.354	\$ 6.459.373
10	17.924	\$ 6.398.038	20.330	\$ 6.351.162	23.719	\$ 6.412.753
11	16.131	\$ 6.381.757	18.297	\$ 6.337.125	21.347	\$ 6.412.753
12	14.518	\$ 6.381.757	16.467	\$ 6.328.926	19.212	\$ 6.412.208
13	13.066	\$ 6.381.357	14.821	\$ 6.305.875	17.291	\$ 6.395.600
14	11.760	\$ 6.381.357	13.339	\$ 6.300.292	15.562	\$ 6.395.600
15	10.584	\$ 6.381.357	12.005	\$ 6.300.292	14.005	\$ 6.368.939
16	9.525	\$ 6.381.357	10.804	\$ 6.300.292	12.605	\$ 6.368.939
17	8.573	\$ 6.381.357	9.724	\$ 6.300.292	11.344	\$ 6.368.939
18	7.715	\$ 6.381.357	8.751	\$ 6.300.292	10.210	\$ 6.368.939
19	6.944	\$ 6.381.357	7.876	\$ 6.300.292	9.189	\$ 6.368.939
20	6.294	\$ 6.381.357	7.088	\$ 6.300.292	8.270	\$ 6.368.939
21	6.249	\$ 6.381.357	6.380	\$ 6.300.292	7.443	\$ 6.368.939
22	6.249	\$ 6.381.357	5.742	\$ <b>6.300.292</b>	6.699	\$ 6.368.939
23	5.624	\$ 6.381.357			6.029	\$ 6.368.939
Tiempo ejecucion: 1140 seg		Tiempo ejecucion: 1153 seg		Tiempo ejecucion: 1182 seg		

Grafica 1.

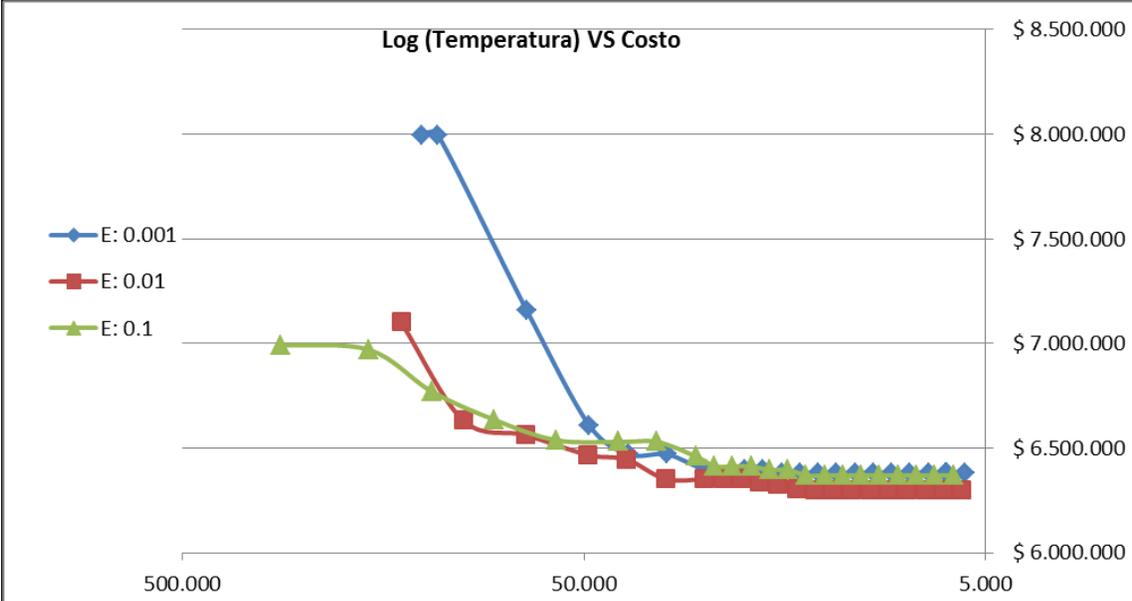


Tabla 13. Variación del parámetro de Elasticidad – partiendo solución más económica

Partiendo de la Configuración de tuberías <b>MAS ECONOMICA</b>							
PASO	ELASTICIDAD						
	0.001		0.01		0.1		
	Temp	Costo	Temp	Costo	Temp	Costo	
1		\$ 1.802.519	1.609.366.096	\$ 1.802.519	1.609.366.114	\$ 1.802.519	
2	1.072.910.743	\$ 74.114.047.857	1.609.366.096	\$ 74.114.047.858	804.683.057	\$ 74.114.047.857	
3	536.455.371	\$ 942.751.905	804.683.048	\$ 824.557.692	402.341.528	\$ 640.360.005	
4	268.227.685	\$ 510.704.438	402.341.524	\$ 715.657.188	201.170.764	\$ 488.567.248	
5	134.113.842	\$ 510.704.438	201.170.762	\$ 555.597.190	100.585.382	\$ 488.567.248	
6	67.056.921	\$ 200.214.299	100.585.381	\$ 473.796.598	50.292.691	\$ 266.001.043	
7	33.528.460	\$ 198.955.179	50.292.690	\$ 153.125.098	25.146.345	\$ 217.617.509	
8	16.764.230	\$ 181.242.560	25.146.345	\$ 104.864.768	12.573.172	\$ 83.575.875	
9	8.382.115	\$ 73.385.467	12.573.172	\$ 50.673.090	6.286.586	\$ 40.604.549	
10	5.029.269	\$ 25.079.343	6.286.586	\$ 50.673.090	3.771.951	\$ 18.639.937	
11	3.017.561	\$ 9.249.239	3.771.951	\$ 12.864.580	2.263.171	\$ 11.119.534	
12	1.810.537	\$ 7.825.390	2.263.171	\$ 7.788.896	1.131.585	\$ 7.351.561	
13	1.086.322	\$ 6.842.068	1.357.902	\$ 7.788.896	678.951	\$ 7.194.991	
14	651.793	\$ 6.624.471	814.741	\$ 6.691.020	407.370	\$ 6.945.288	
15	391.076	\$ 6.624.471	488.845	\$ 6.691.020	244.422	\$ 6.875.895	
16	234.645	\$ 6.624.471	293.307	\$ 6.691.020	146.653	\$ 6.601.790	
17	164.251	\$ 6.624.471	175.984	\$ 6.584.926	102.657	\$ 6.453.952	
18	98.551	\$ 6.416.592	105.590	\$ 6.537.513	71.860	\$ 6.374.584	
19	68.985	\$ 6.416.592	73.913	\$ 6.468.187	50.302	\$ 6.374.584	
20	55.188	\$ 6.328.347	59.130	\$ 6.284.991	40.241	\$ 6.300.967	
21	44.150	\$ 6.287.158	47.304	\$ 6.248.308	32.193	\$ 6.191.353	
22	35.320	\$ 6.251.480	37.843	\$ 6.248.308	25.754	\$ 6.184.646	
23	28.256	\$ 6.166.978	30.274	\$ 6.188.495	20.861	\$ 6.095.258	
24	22.605	\$ 6.166.978	21.797	\$ 6.146.070	18.775	\$ 6.095.258	
25	20.344	\$ 6.115.868	17.656	\$ 6.145.374	16.897	\$ 6.095.258	
26	18.310	\$ 6.109.444	15.890	\$ 6.129.404	13.687	\$ 6.095.258	
27	16.479	\$ 6.100.248	11.584	\$ 6.128.973	12.318	\$ 6.095.258	
28	14.831	\$ 6.081.115	9.383	\$ 6.128.973	9.977	\$ 6.095.258	
29	12.013	\$ 6.081.115	7.600	\$ 6.128.973	8.980	\$ 6.095.258	
30	8.757	\$ 6.081.115	6.840	\$ 6.128.973	7.273	\$ 6.095.258	
31	7.093	\$ 6.081.115	6.156	\$ 6.128.973	6.546	\$ 6.095.258	
32	6.384	\$ 6.081.115	5.540	\$ 6.128.973	5.891	\$ 6.095.258	
33	5.745	\$ 6.081.115			5.302	\$ 6.085.355	
34							
35							
		Tiempo ejecucion: 1442 seg		Tiempo ejecucion: 1486 seg		Tiempo ejecucion: 1477 seg	

Gráfica 2.

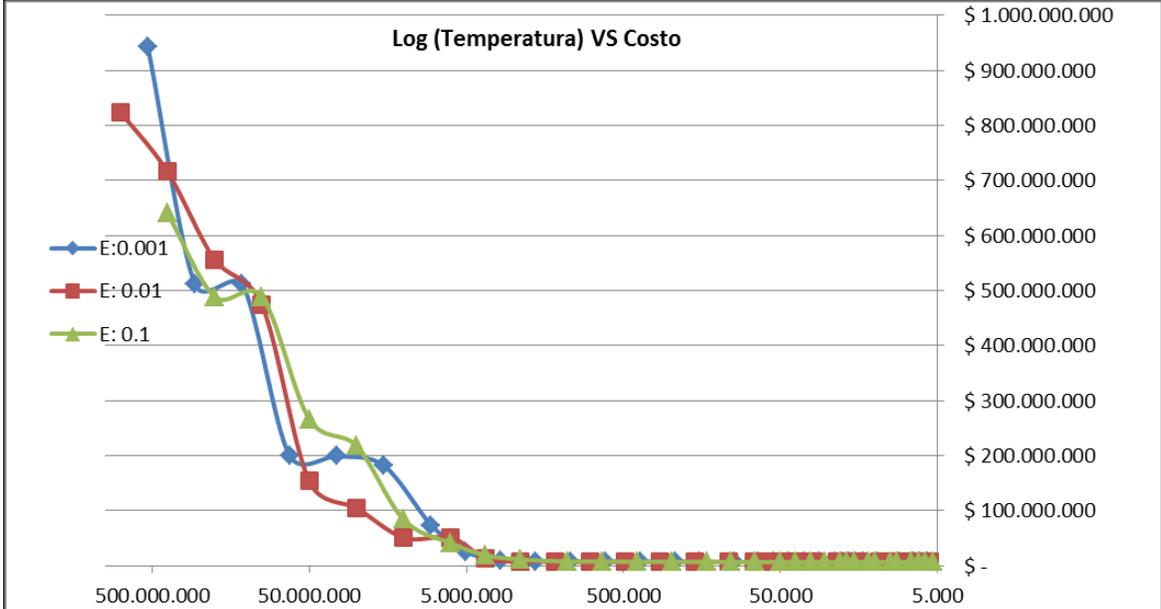
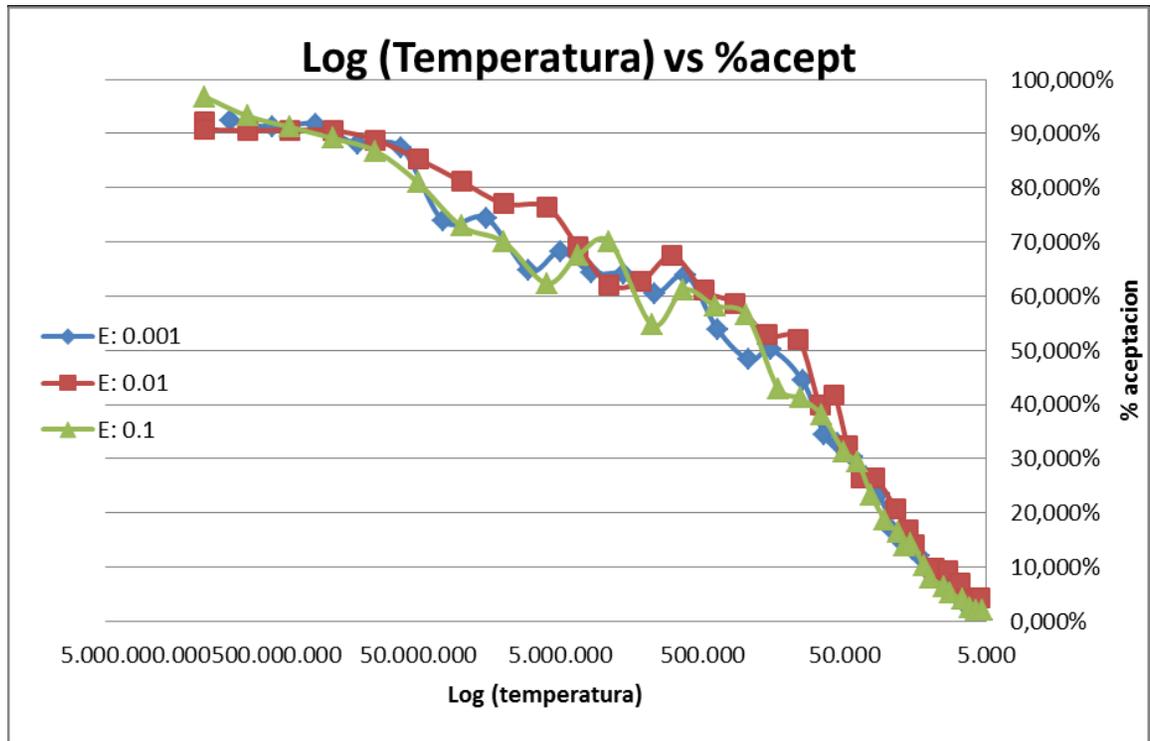


Tabla 14. % aceptación individuos que pasan a medida que cambia la temperatura

Partiendo de la Configuración de tuberías <b>MAS ECONOMICA</b>						
% ACEPTACION (CANTIDAD DE SOLUCIONES QUE PASAN)						
PASO	0.001		0.01		0.1	
	Temp	% ACEPT	Temp	% ACEPT	Temp	% ACEPT
1	1.072.910.743	92,353%	1.609.366.096	92,059%	1.609.366.114	96,765%
2	536.455.371	91,176%	1.609.366.096	90,882%	804.683.057	93,235%
3	268.227.685	91,765%	804.683.048	90,588%	402.341.528	91,176%
4	134.113.842	87,941%	402.341.524	90,588%	201.170.764	89,118%
5	67.056.921	87,471%	201.170.762	90,588%	100.585.382	86,765%
6	33.528.460	73,824%	100.585.381	88,824%	50.292.691	80,882%
7	16.764.230	74,412%	50.292.690	85,294%	25.146.345	72,941%
8	8.382.115	64,706%	25.146.345	81,176%	12.573.172	70,000%
9	5.029.269	68,235%	12.573.172	77,059%	6.286.586	62,353%
10	3.017.561	64,265%	6.286.586	76,471%	3.771.951	67,500%
11	1.810.537	64,118%	3.771.951	69,118%	2.263.171	70,000%
12	1.086.322	60,441%	2.263.171	62,059%	1.131.585	54,706%
13	651.793	63,824%	1.357.902	62,647%	678.951	61,176%
14	391.076	53,824%	814.741	67,500%	407.370	58,235%
15	234.645	48,235%	488.845	61,029%	244.422	56,471%
16	164.251	50,098%	293.307	58,676%	146.653	42,941%
17	98.551	44,412%	175.984	52,794%	102.657	41,176%
18	68.985	34,314%	105.590	52,059%	71.860	38,039%
19	55.188	32,868%	73.913	39,853%	50.302	31,275%
20	44.150	30,294%	59.130	41,667%	40.241	29,338%
21	35.320	26,691%	47.304	32,353%	32.193	23,162%
22	28.256	23,382%	37.843	26,544%	25.754	18,750%
23	22.605	16,618%	30.274	26,544%	20.861	16,294%
24	20.344	14,941%	21.797	20,809%	18.775	13,824%
25	18.310	14,824%	17.656	16,765%	16.897	14,294%
26	16.479	13,294%	15.890	14,000%	13.687	10,235%
27	14.831	12,000%	11.584	9,882%	12.318	8,059%
28	12.013	8,706%	9.383	9,294%	9.977	6,412%
29	8.757	6,412%	7.600	6,941%	8.980	5,118%
30	7.093	3,059%	6.840	4,118%	7.273	4,000%
31	6.384	4,059%	6.156	3,824%	6.546	2,412%
32	5.745		5.540	4,353%	5.891	2,059%
33					5.302	2,000%
34						
35						

Gráfica 3.



#### 4.0 CONCLUSIONES:

- Los algoritmos genéticos y de Recocido simulado, son métodos heurísticos basados e inspirados en situaciones naturales como la evolución humana y procesos de fundición y enfriamiento, que han demostrado ser útiles en la solución de problemas complejos altamente no lineales, con óptimos locales y con múltiples espacios de soluciones y que dada su versatilidad y robustez por lo general escapan hacia la solución más óptima, si bien llevan años de ser desarrollados hoy en día al ser implementados en las herramientas computacionales que son cada vez más potentes y rápidas ayudaran a resolver problemas cada vez más complejos y en diversos campos de la ciencia y la tecnología en tiempos relativamente cortos y con soluciones bastante buenas.
- El estudio, análisis y aplicación de los Algoritmos Genéticos y de Recocido simulado requieren de conocimientos matemáticos, estadísticos y lenguajes de computación, que hacen compleja su implementación en los problemas que se quieran resolver utilizando los mismos. No obstante en el mercado hay programas comerciales que ya vienen programados con herramientas que utilizan dichos algoritmos para la solución y optimización de problemas, tal es el caso de Excel, Matlab, y en nuestro caso específico de estudio el EPANET que con su herramienta WaterNetGen facilita el diseño y optimización de redes a presión, en tiempos relativamente cortos. Sin embargo la utilización de dichos programas debe tener un estudio previo de los algoritmos mencionados para conocer sus limitaciones y diferentes variables, para que al momento de utilizarlos este conocimiento permita encontrar una solución realmente óptima.
- La optimización de un sistema hidráulico de redes a presión se constituye como un problema altamente NO lineal en donde por lo general se busca el costo mínimo cambiando la configuración de diámetros, cumpliendo las restricciones. En la mayoría de los casos, dependiendo al tamaño de la red, es imposible resolver por métodos convencionales de optimización. Es por esto, que la utilización software de dominio público o comercial que incluya la implantación de algoritmos genéticos o de recocido simulado facilitan el estudio y la solución de sistemas de redes a presión.
- El software Epanet con WaternetGen, demuestra ser una herramienta eficiente para el diseño y optimización de redes, con buenos resultados como se pudo ver en las secciones 4.1.1 y 4.1.2 pues las soluciones para las redes seleccionadas comparándolas con otros trabajos son buenas. Para la red de Hanói la cual consta de 34 tramos y 32 nodos, el tiempo de ejecución como se puede ver en las tablas 12 y 13 no excede los 25 minutos de cómputo y se obtienen respuestas cercanas con 6 corridas diferentes.

- Si bien la herramienta de optimización del software se llama WaterNetGen el algoritmo en cual se basa es el de recocido simulado contrario a lo que se creería por el nombre, por lo tanto se debe tener especial enfoque en las sección 2.2 y 2.3 así como de la profundización de la bibliografía.
- Se debe observar en las tablas y gráficas construidas que a mayor temperatura inicial del sistema, la cual depende de la elasticidad, es mayor el espacio de búsqueda recorrido, lo que aumenta la probabilidad de encontrar el óptimo global del sistema y no encontrar óptimos locales muy cercanos al global. Así mismo, basándose en la teoría de recocido simulado, a medida que ocurre el enfriamiento se van estructurando las posibles soluciones (“cristalización del material”). Se puede ver en la tabla 14 que entre más frío se encuentre el sistema, es menor el % de individuos aptos para pasar a la siguiente evaluación.
- Se debe tener en cuenta que el Software Epanet+WaterNetGen también se puede quedar atrapado en óptimos locales como se explicó en la teoría de Algoritmos Genéticos y de Recocido Simulado pues como se evidencia en las tablas construidas 12 y 13 “con los resultados en verbose mode, ver anexo” se pueden llegar a soluciones muy cercanas pero que no siempre son las óptimas tal es el caso de la tabla 13 en donde para una elasticidad de 0.1 se obtuvo una solución de \$ 6.085.355 la cual es muy cercana a la obtenida con elasticidad de 0.001 encontrando como solución \$ 6.081.115 siendo esta ultima la seleccionada como la mejor solución. Para tratar de escapar de estos óptimos locales se recomienda siempre tomar diferentes puntos de partida como las configuraciones más económica y la más costosa, así como de variar los valores de la Elasticidad en la configuración de S.A, para que así el Algoritmo pueda recorrer diferentes espacios de soluciones y con la variación del parámetro de la elasticidad empiece la configuración con diferentes temperaturas.
- El software tiene herramientas muy prácticas y confiables para la verificación de las restricciones como lo son las presiones mínimas o máximas o las velocidades mínimas o máximas permitidas, como se evidenció en la figura 27.
- Una desventaja del software puede ser que para la verificación de la configuración obtenida como la óptima se debe verificar seleccionando uno a uno cada tramo de tubería para así visualizar el diámetro encontrado, pues en la vista de “view solution” como en la figura 29 se puede observar que el software da la solución en totales por cada diámetro seleccionado del catálogo.
- El software tiene limitaciones en la optimización de redes que cuenten con elementos como bombas, turbinas o tanques de almacenamiento que tengan

variación de nivel. Por lo tanto se debe hacer una modelación y optimización de dichas redes sin estos elementos.

## BIBLIOGRAFÍA

- CONCEICAO Cunha and SOUSA Joaquim - Journal of Water Resources Planning and Management Vol 125 No.4 Julio / Agosto 1999 pp 215 – 221.
- CONCEICAO Cunha and SOUSA Joaquim - Journal of Infrastructure Systems Vol 7 No.1 Marzo 2001.
- MURANHO João ([muranho@mail.telepac.pt](mailto:muranho@mail.telepac.pt)), FERREIRA Ana ([amferreira@ipcb.pt](mailto:amferreira@ipcb.pt)), SOUSA Joaquim ([jjoseng@isec.pt](mailto:jjoseng@isec.pt)), GOMES Abel ([agomes@di.ubi.pt](mailto:agomes@di.ubi.pt)), MARQUES Alfeu Sá ([jasm@dec.uc.pt](mailto:jasm@dec.uc.pt)) WATERNETGEN – User`s Manual octubre 2011.
- PATIÑO Jaime, MARBELLO Pérez Ramiro – DOPRHAG un programa para el Diseño Optimo de Redes Hidráulicas Interiores en edificios. XVI Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología Sociedad Colombiana de Ingenieros Universidad del Quindío Octubre 2004
- SALDARRIAGA Juan Guillermo, VILLALVA Fernández de Castro German - Algoritmos de Optimización Combinatoria (AOC) aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable, revista de ingeniería N.22 Facultad de Ingeniería universidad de los Andes, Noviembre 2005
- SANCHEZ Agustín Matías Diseño de redes de distribución de Agua contemplando la fiabilidad mediante Algoritmos Genéticos, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia (2003)
- SAN VICENTE Sánchez Héctor – Optimización de los diámetros de las Tuberías de una Red de distribución de Agua mediante algoritmos de recocido simulado. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Cuernavaca, México, ingeniería Hidráulica en México Vol. XVIII, núm. 1 pp. 105 – 118 enero marzo de 2003
- IGLESIAS Rey Pedro, MartínezMARTINEZ Solano Javier, PEREZ García Rafael – Algoritmo Genético Modificado para Diseño de Redes de Abastecimiento de Agua, Seminario Hispano Brasileiro sobre sistema de abastecimiento urbano de agua 8 a 10 de Noviembre 2004.
- Link descarga de software EPANET+WATERNETGEN <http://www.dec.uc.pt/~WaterNetGen/waternetgen.php?DownloadData=Nothing>

Anexo A. Ejemplo de una serie de datos arrojada en una simulación para la red de Hanói  
“verbose mode”

Solution Cost: 1802519.00  
Simulated Annealing Start  
Objective Function Value: 74114047857.9677  
Optimum Obj Function Value: 74114047857.9677 (=1802518.9886 + 74112245338.9791)  
Temperature: 3218732228.6213  
Working... 0 ... 340  
Accept(%):96.765 CoolRate: 0.5 ITERS: 10  
Temperature: 1609366114.3106  
Optimum Obj Function Value: 1226988239.2165 (=4038500.4773 + 1222949738.7392)  
Working... 1 ... 340  
Accept(%):95.588 CoolRate: 0.5 ITERS: 10  
Temperature: 804683057.1553  
Optimum Obj Function Value: 1226988239.2165 (=4038500.4773 + 1222949738.7392)  
Working... 2 ... 340  
Accept(%):93.235 CoolRate: 0.5 ITERS: 10  
Temperature: 402341528.5777  
Optimum Obj Function Value: 640360005.2399 (=6027989.5900 + 634332015.6499)  
Working... 3 ... 340  
Accept(%):91.176 CoolRate: 0.5 ITERS: 10  
Temperature: 201170764.2888  
Optimum Obj Function Value: 488567248.7790 (=5754064.8249 + 482813183.9540)  
Working... 4 ... 340  
Accept(%):89.118 CoolRate: 0.5 ITERS: 10  
Temperature: 100585382.1444  
Optimum Obj Function Value: 488567248.7790 (=5754064.8249 + 482813183.9540)  
Working... 5 ... 340  
Accept(%):86.765 CoolRate: 0.5 ITERS: 10  
Temperature: 50292691.0722  
Optimum Obj Function Value: 266001043.0658 (=5540174.1593 + 260460868.9066)  
Working... 6 ... 340  
Accept(%):80.882 CoolRate: 0.5 ITERS: 10  
Temperature: 25146345.5361  
Optimum Obj Function Value: 217617509.4767 (=6657395.0176 + 210960114.4591)  
Working... 7 ... 340  
Accept(%):72.941 CoolRate: 0.5 ITERS: 10  
Temperature: 12573172.7681  
Optimum Obj Function Value: 83575875.6680 (=6293311.3768 + 77282564.2912)  
Working... 8 ... 340  
Accept(%):70.000 CoolRate: 0.5 ITERS: 10  
Temperature: 6286586.3840  
Optimum Obj Function Value: 40604549.5274 (=6346840.8767 + 34257708.6507)  
Working... 9 ... 340  
Accept(%):62.353 CoolRate: 0.6 ITERS: 20  
Temperature: 3771951.9803  
Optimum Obj Function Value: 18639937.0101 (=6589756.5823 + 12050180.4278)

Working... 10 ... 680  
 Accept(%):67.500 CoolRate: 0.6 ITERS: 20  
 Temperature: 2263171.2781  
 Optimum Obj Function Value: 11119534.7196 (=6869547.3772 + 4249987.3424)  
 Working... 11 ... 680  
 Accept(%):70.000 CoolRate: 0.5 ITERS: 10  
 Temperature: 1131585.6391  
 Optimum Obj Function Value: 7351561.4408 (=7351561.4408 + 0.0000)  
 Working... 12 ... 340  
 Accept(%):54.706 CoolRate: 0.6 ITERS: 20  
 Temperature: 678951.4104  
 Optimum Obj Function Value: 7194991.2763 (=6822145.9314 + 372845.3450)  
 Working... 13 ... 680  
 Accept(%):61.176 CoolRate: 0.6 ITERS: 20  
 Temperature: 407370.8624  
 Optimum Obj Function Value: 6945288.4348 (=6934981.4907 + 10306.9441)  
 Working... 14 ... 680  
 Accept(%):58.235 CoolRate: 0.6 ITERS: 20  
 Temperature: 244422.5272  
 Optimum Obj Function Value: 6875895.0196 (=6857902.0623 + 17992.9573)  
 Working... 15 ... 680  
 Accept(%):56.471 CoolRate: 0.6 ITERS: 20  
 Temperature: 146653.5221  
 Optimum Obj Function Value: 6601790.7283 (=6601790.7283 + 0.0000)  
 Working... 16 ... 680  
 Accept(%):42.941 CoolRate: 0.7 ITERS: 30  
 Temperature: 102657.4637  
 Optimum Obj Function Value: 6453952.6487 (=6452883.6515 + 1068.9972)  
 Working... 17 ... 1020  
 Accept(%):41.176 CoolRate: 0.7 ITERS: 30  
 Temperature: 71860.2234  
 Optimum Obj Function Value: 6374584.1143 (=6374584.1143 + 0.0000)  
 Working... 18 ... 1020  
 Accept(%):38.039 CoolRate: 0.7 ITERS: 30  
 Temperature: 50302.1555  
 Optimum Obj Function Value: 6374584.1143 (=6374584.1143 + 0.0000)  
 Working... 19 ... 1020  
 Accept(%):31.275 CoolRate: 0.8 ITERS: 40  
 Temperature: 40241.7250  
 Optimum Obj Function Value: 6300967.9638 (=6300967.9638 + 0.0000)  
 Working... 20 ... 1360  
 Accept(%):29.338 CoolRate: 0.8 ITERS: 40  
 Temperature: 32193.3805  
 Optimum Obj Function Value: 6191353.6759 (=6191353.6759 + 0.0000)  
 Working... 21 ... 1360

Accept(%):23.162 CoolRate: 0.8 ITERS: 40  
Temperature: 25754.7048  
Optimum Obj Function Value: 6184646.6666 (=6184646.6666 + 0.0000)  
Working... 22 ... 1360  
Accept(%):18.750 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 23179.2337  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 23 ... 1700  
Accept(%):16.118 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 20861.3098  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 24 ... 1700  
Accept(%):16.294 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 18775.1783  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 25 ... 1700  
Accept(%):13.824 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 16897.6600  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 26 ... 1700  
Accept(%):14.294 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 15207.8936  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 27 ... 1700  
Accept(%):10.647 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 13687.1039  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 28 ... 1700  
Accept(%):10.235 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 12318.3932  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 29 ... 1700  
Accept(%):8.059 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 11086.5536  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 30 ... 1700  
Accept(%):7.118 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 9977.8979  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 31 ... 1700  
Accept(%):6.412 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 8980.1079  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 32 ... 1700  
Accept(%):5.118 CoolRate: 0.9 ITERS: 50

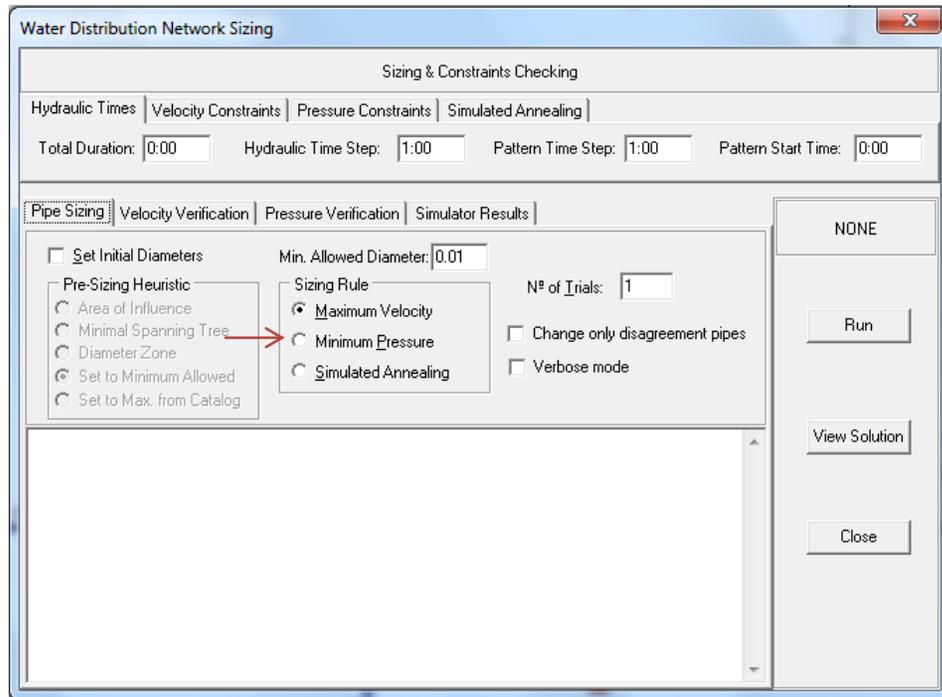
Temperature: 8082.0969  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 33 ... 1700  
Accept(%):4.000 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 7273.8870  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 34 ... 1700  
Accept(%):5.235 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 6546.4981  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 35 ... 1700  
Accept(%):2.412 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 5891.8482  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Working... 36 ... 1700  
Accept(%):2.059 CoolRate: 0.9 ITERS: 50  
Temperature: 5302.6632  
Optimum Obj Function Value: 6095258.6804 (=6085355.0343 + 9903.6461)  
Simulated Annealing: Done!  
Execution Time: 1477.74300  
-----  
Solution Cost: 6085355.00

## Anexo B. Optimización de una red mediante el criterio de mínima presión

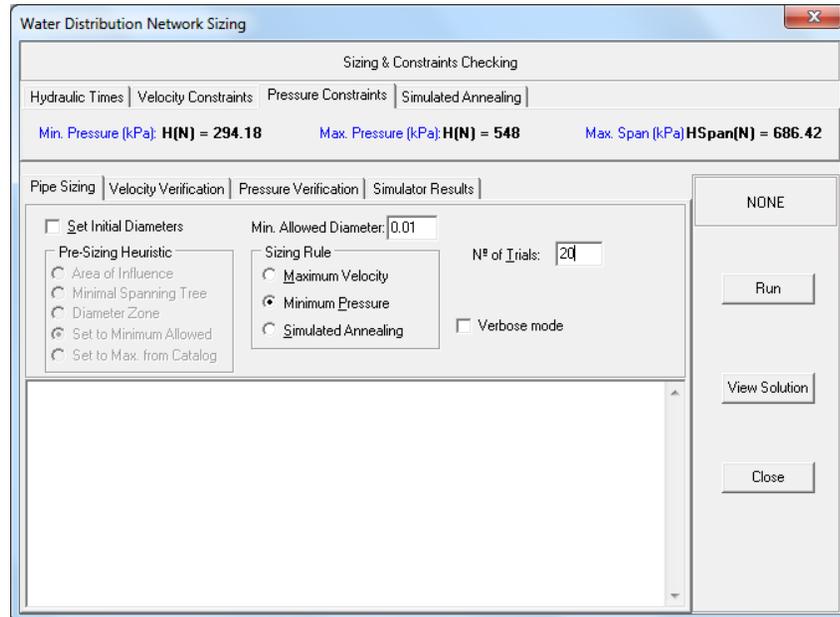
El software EPANET + WaterNetGen, realiza optimización de redes mediante criterios de velocidad máxima y/o mínima presión, de los cuales no se es claro el método matemático o algoritmo utilizado, ya que ni los autores del software, ni el manual de utilización del mismo hacen referencia a la operación de estos métodos, sin embargo se considera pertinente enunciar el método de mínima presión en el presente trabajo, ya que este criterio es ampliamente utilizado en la optimización de redes y el software arroja buenos resultados mediante el mismo, sin embargo vale la pena recalcar que no se conocen las limitaciones o ventajas de utilizar estas herramientas ya que como se dijo anteriormente no se conoce la forma de operar de las mismos y puede ser motivo de estudio e investigación por parte de las personas interesadas en su utilización.

### Modo de Utilización: (Ejemplo Red Alperovits – Shamir)

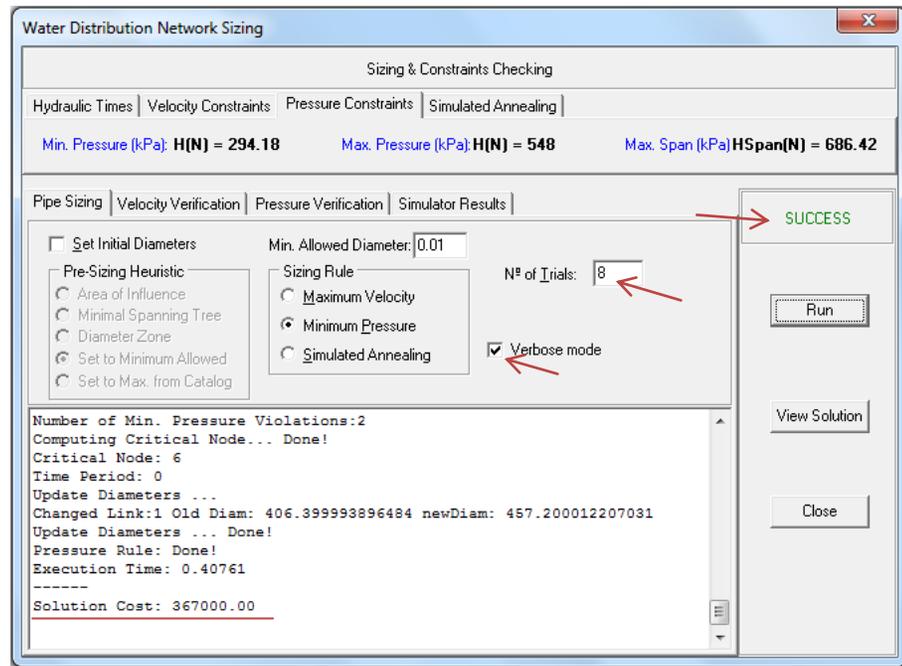
1. En el menú Run Pipe Sizing: click en **Mínimum Pressure**



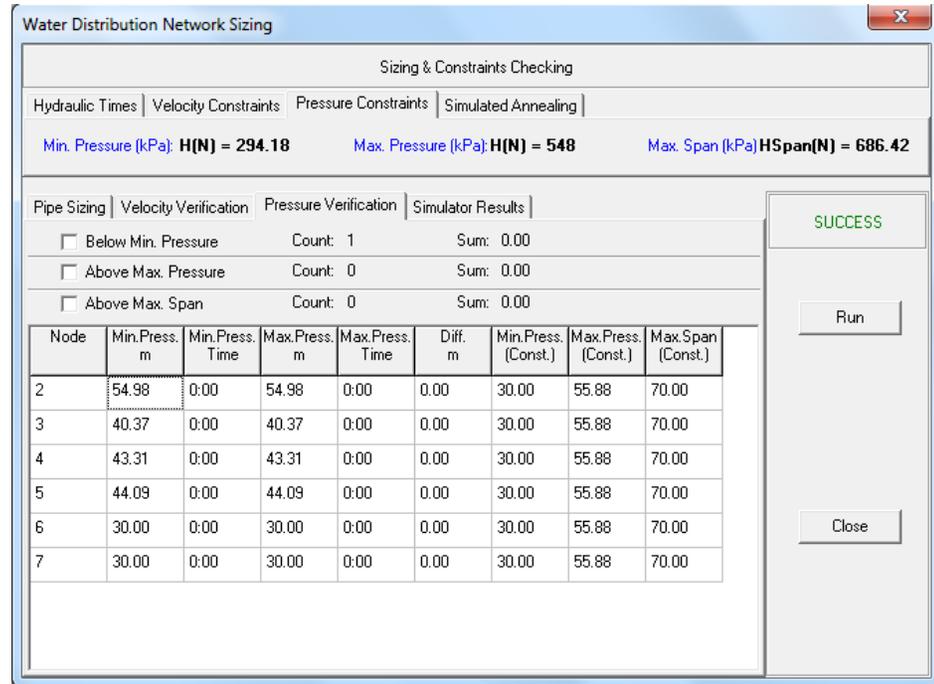
2. Digitar el número de iteraciones deseadas:



3. Seleccionar Verbose mode: con la finalidad que se despliegan los valores que se han cambiado en las iteraciones, así como el tiempo de ejecución
4. iterar hasta que el sistema se encuentre balanceado, es decir que las presiones del mismo sean positivas, el indicador de esto es cuando en verde aparece "success"



5. Se verifican las presiones del sistema: “para la solución de 367000 (unds)



Se obtuvo una solución que cumple con la restricción de 30 m.c.a, utilizando 8 iteraciones por cada ejecución en un tiempo menor a 2 minutos y “**más económica**” que la obtenida por el método de Simulated Annealing, con la siguiente configuración de tuberías:

NODO	Cabeza de Presion (m)	TUBERIA	Diametro (mm)	COSTO RED (UNIDADES)
1	210	1	457.2	\$ 130.000,0
2	54.01	2	355.6	\$ 60.000,0
3	37.83	3	304.8	\$ 50.000,0
4	42.73	4	25.4	\$ 2.000,0
5	43.66	5	304.8	\$ 50.000,0
6	30.82	6	25.4	\$ 2.000,0
7	31.86	7	304.8	\$ 50.000,0
		8	203.2	\$ 23.000,0
				<b>\$ 367.000</b>

Teniendo en cuenta que se obtuvo una “**excelente**” solución, que cumple con las restricciones y que además es más económica que la obtenida previamente en el presente trabajo, se deja este anexo con motivo de análisis y estudio por parte de las personas interesadas, y se invita a las mismas a conocer las limitaciones y teoría del uso de esta herramienta previo a la utilización de la misma.