

Calibración de Redes de Distribución con Métodos de Inteligencia Artificial

Silvia Takahashi

Ingeniera de Sistemas y Computación. Ph.D. (Computación Científica)
Profesora Asociada, Universidad de los Andes, stakahas@uniandes.edu.co

Juan Saldarriaga

Ingeniero Civil, Máster en Ingeniería Hidráulica
Profesor Titular, Universidad de los Andes. Director, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: jsaldarr@uniandes.edu.co

Carolina Vega

Ingeniera Civil. Máster en Ingeniería de Sistemas y Computación.
Investigadora, Universidad de los Andes, m.vega222@egresados.uniandes.edu.co

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología
Sociedad Colombiana de Ingenieros
Bogotá, D.C. 22, 23 y 24 de mayo de 2008

Resumen. La calibración de redes de distribución de agua potables es de vital importancia para poder realizar una adecuada operación y mantenimiento de las mismas, puesto que permite que las simulaciones hidráulicas hechas sobre los modelos de la red sean confiables, válidas y ofrezcan los datos necesarios para tomar decisiones acertadas de operación. A través de este trabajo se explora el uso de dos técnicas de programación del campo de la inteligencia artificial (algoritmos genéticos y programación por restricciones) para calibrar las diferentes variables de las redes de distribución de agua potable de forma eficiente. Con lo anterior, se busca reducir el tiempo de cálculo y obtener resultados similares o mejores que al realizar la calibración de forma manual.

Palabras Clave. Calibración, Algoritmos Genéticos, Programación por Restricciones.

1 Introducción

La calibración de una red de distribución de agua potable es el proceso por el cual se determina el valor actual de cada uno de los atributos de los elementos de la red, puesto que estos atributos pueden haber cambiado con respecto a los valores que se tenían en un modelo hidráulico inicial. La calibración es de vital importancia debido a que permite que las simulaciones hidráulicas hechas sobre los modelos de la red sean confiables, válidas y ofrezcan los datos necesarios para tomar decisiones de operación acertadas.

En la actualidad, existe certeza en cuanto a las ecuaciones físicas que describen la hidráulica de redes cerradas y la forma de resolverlas. Se han desarrollado múltiples herramientas que calculan la hidráulica de una red de distribución, e incluso, se pueden diseñar fácilmente optimizando los costos. Sin embargo, los modelos hidráulicos que se tienen como entrada a las herramientas de simulación no están ajustados a la realidad, por lo que los resultados tampoco lo están. Esto hace que la calibración de la red de distribución sea un procedimiento esencial para poder utilizar modelos hidráulicos en situaciones reales.

Debido a que la calibración de redes no es un problema que pueda ser resuelto analíticamente al tener más incógnitas que ecuaciones, este artículo investiga, implementa y evalúa dos algoritmos que han resultado útiles para este tipo de problemas, de forma que sea posible llegar a soluciones cercanas a la óptima en un período de tiempo aceptable. La primera solución implementada es un algoritmo genético que busca los valores de cada uno de los atributos de la red de forma independiente, evaluando para cada individuo, la similitud entre su comportamiento hidráulico y los datos medidos en la red real. La otra solución propuesta es un módulo de programación por restricciones, a través del cual se busca establecer restricciones entre las variables involucradas en la calibración de forma que el espacio de búsqueda se reduzca y se encuentren soluciones para todos los atributos de la red simultáneamente.

Los algoritmos fueron implementados en lenguaje Object Pascal dentro del programa REDES, desarrollado por el Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA), el cual permite crear los modelos y realizar las simulaciones hidráulicas necesarias para calibrar las redes de distribución. Los módulos implementados se probaron en la red del municipio de Candelaria (Valle del Cauca, Colombia), obteniendo para las diferentes etapas de la metodología de calibración propuestas, resultados satisfactorios.

2 Calibración

La calibración de una red de distribución de agua potable (RDAP) consiste en encontrar un modelo hidráulico que represente de forma precisa y confiable una red existente, con el fin de usar el modelo de forma operativa. La dificultad en calibrar un modelo de una RDAP radica en el poco conocimiento que se tiene de la misma debido a cambios en sus propiedades producidos por el tiempo, mantenimientos no reportados o inconsistencias en la información comercial y técnica. Es común que las empresas de acueducto no tengan conocimiento preciso de la conformación de las redes de distribución que administran y que no se tengan planos y/o registros completos de la topografía, topología y demás características físicas de las redes existentes. Los valores de los atributos de la red sobre los cuales se tiene incertidumbre al

crear el modelo hidráulico son las fugas, las demandas, los diámetros, las rugosidades y los coeficientes de pérdidas menores reales.

Las fugas son un elemento muy relevante en el contexto de las redes de distribución de agua potable latinoamericanas y su existencia debe tenerse en cuenta al hacer el modelo hidráulico acorde con la realidad. Las fugas se simulan en un modelo hidráulico a partir de emisores ubicados en los nodos, para los cuales, el caudal de emisión es dependiente de la presión en dicho nodo (ecuación [1]). El exponente de la ecuación [1] se mantiene como 0.5 al simular fugas, puesto que este es el valor utilizado para orificios. Por el contrario, el coeficiente “C” de esta ecuación sí depende de la magnitud de la fuga, por lo que es una variable que debe calibrarse según la red.

$$Q = CP^X \quad [1]$$

Aunque la presión, el material y la edad de las tuberías tienen incidencia sobre la producción de fugas, estas se pueden producir en cualquier punto de la red y pueden tener cualquier magnitud. No existe ningún método analítico para encontrarlas.

Las demandas son desconocidas debido a que éstas pueden aumentar o disminuir con el crecimiento de los usuarios o de su consumo, con el número de conexiones clandestinas y/o de fallas técnicas. Incluso con la ausencia de los medidores que se tienen en los diferentes puntos de toma de la red. El crecimiento de las demandas puede conocerse a partir de los medidores con los que se toma el consumo en cada punto de la red, pero el valor de las demandas clandestinas es incierto y no hay forma de calcularlo analíticamente.

Los diámetros y las rugosidades de las tuberías cambian con el tiempo debido a la aparición de biopelículas y de corrosión. Los valores reales no se pueden determinar analíticamente y medirlos es muy complicado debido a que las tuberías se encuentran enterradas y no hay instrumentos que permitan hacerlo sin penetrar en la red.

Finalmente, la incertidumbre en los coeficientes de pérdidas menores se debe a la cantidad de accesorios, tales como válvulas, tapones, codos y uniones, que se instalan como parte del mantenimiento y la operación de la red, pero que no están reportados en los planos y, por lo tanto, al realizar el modelo, no se sabe de su existencia. Nuevamente, no hay forma analítica de calcular estos coeficientes y debe hacerse calibrando.

La simulación hidráulica de una RDAP consiste en el cálculo de las presiones en los nodos y los caudales en las tuberías de la red a partir del conocimiento de su topología, los diámetros, rugosidades, longitudes y coeficientes de pérdidas menores de los tubos, los consumos (demandas) en los nodos y la energía disponible (altura de la línea de agua de las fuentes de alimentación). La calibración hidráulica, en este contexto, consistirá en encontrar los valores de las variables enumeradas para que se reproduzca el comportamiento hidráulico de la red real al hacer la simulación del modelo.

La comparación entre el modelo hidráulico y el prototipo se hace a partir de medidas de caudales y presiones tomadas en la red. Lo ideal sería tener medidas de presión en todos los nodos y medidas de caudal en todos los tubos de la red pero, debido a los altos costos de los equipos y su instalación, esto no es económicamente viable, por lo que la calibración debe hacerse con mediciones en pocos puntos de la red. Generalmente se ubican medidores de caudal en las tuberías que salen de las fuentes, con el fin de

controlar la cantidad de masa (caudal) que entra a la red. Adicionalmente se ubican medidores de presión en nodos que sufren impacto por cambios en la mayoría de la red (puntos en los extremos generalmente y bien distribuidos). A las series medidas de caudal se les llama curvas de masa y a las de presión curvas de energía.

2.1 Metodología de Calibración

En el Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA) se ha trabajado en una metodología para calibrar redes de distribución de agua potable. Dicha metodología se ha utilizado satisfactoriamente para calibrar redes de distribución de agua potable reales como parte de los proyectos de Plano Óptimo de Presiones llevados a cabo en el Valle del Cauca y en la ciudad de Bucaramanga. Antes de empezar a calibrar el modelo, éste tiene que ensamblarse (Línea Base 1 en la Figura 1) a partir de los datos que se tienen. Es necesario conocer la topología de la red, los diámetros, las rugosidades, las longitudes y los coeficientes de pérdidas menores iniciales (obtenidos de los planos), así como la energía disponible en los embalses y tanques, y las demandas conocidas.

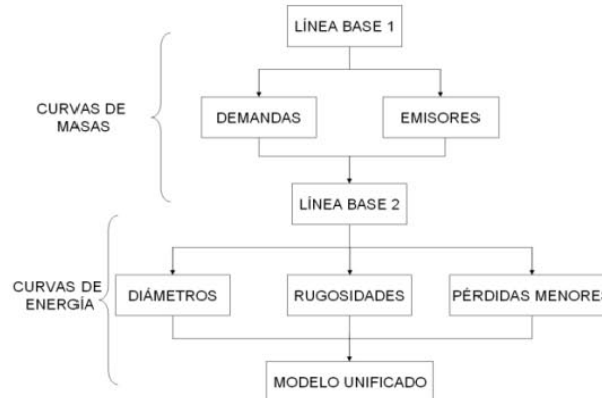


Figura 1. Metodología de calibración desarrollada por el CIACUA.

Una vez la Línea Base 1 está construida, se puede realizar la primera parte de la calibración: el análisis de sensibilidad. Éste consiste en evaluar cómo responde la red a cambios en cada una de las variables de calibración haciendo cálculos hidráulicos de la red con diversos valores, los cuales no deben obedecer un criterio específico. De esta manera, es posible encontrar qué variables tienen más impacto sobre la presión o sobre el caudal, o cuáles no tienen ningún efecto sobre ninguno de los anteriores, ayudando a formar un criterio sobre el trato que debe darse a cada una de las variables durante el siguiente paso: la calibración del modelo.

Con el modelo Línea Base 1 y el conocimiento adquirido al hacer el análisis de sensibilización de la red, se hace una primera calibración con las variables que mayor impacto tienen sobre las curvas de masas (caudal) y de energía (presión). Estas variables son calibradas por separado utilizando criterios de uso del suelo, estrato socioeconómico y edad de las tuberías. Se debe tener en cuenta que el caudal de entrada a la red debe ser el mismo que sale, por lo que es importante tener una medición de caudal a la salida de los tanques (o embalses) alimentadores. A partir de los dos modelos resultantes al calibrar cada una de las variables, se hace un solo modelo que contempla el cambio en los valores de demandas y de coeficientes de

fuga y que hace un ajuste, tanto de los caudales, como de las presiones medidas (Línea Base 2 de la Figura 1). Finalmente, basándose en la Línea Base 2 se calibran las llamadas variables topológicas (los diámetros, las rugosidades y los coeficientes de pérdidas menores) por separado para finalmente unirlos en un Modelo Unificado que simule el comportamiento real del prototipo.

3 Algoritmos

Por el carácter de la calibración, en la cual se tienen un gran número de valores para diversas variables de entrada, es necesario buscar algoritmos que sean aplicables, proporcionando eficiencia y reduciendo el tiempo de búsqueda y los recursos computacionales a utilizarse.

Para resolver este tipo de problemas, pueden ser de utilidad los algoritmos genéticos y la programación por restricciones, ya que basándose en restricciones y propiedades de las variables, deshecha posibles valores del espacio de búsqueda, reduciéndolo.

3.1 Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos son un campo de la inteligencia artificial que abstrae las ideas de la evolución natural y de la genética de los seres vivos para hacer búsquedas optimizadas en problemas donde el conjunto de posibles soluciones es extenso.

Al igual que en la evolución natural, en el algoritmo genético se tiene una población con individuos de la misma especie clasificados según su aptitud para llevar a cabo cierta función o tener cierta característica. Los mejores individuos, según la clasificación de su adaptabilidad, tendrán una mayor probabilidad de sobrevivir y reproducirse para dar vida a una nueva población de individuos que, en su mayoría, habrá heredado aquellos genes que la permiten tener una mayor adaptabilidad, mejorando la especie de generación en generación (Figura 2). La forma como un individuo transmite las características a sus hijos es a través de los genes, que son cadenas de ADN que tienen la información sobre las características del individuo. La representación física de dichas características (el color del pelo, el color de los ojos, la forma de la nariz, etc.) se denomina fenotipo.

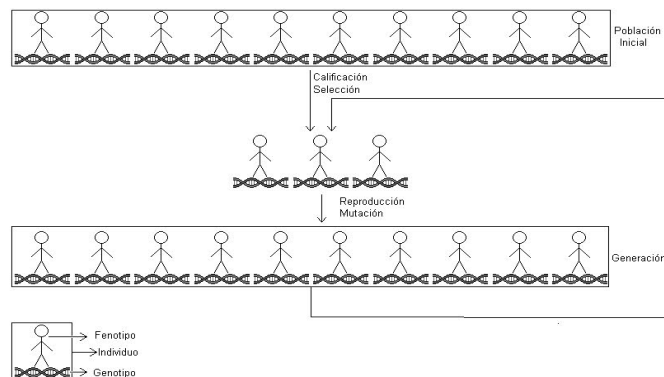


Figura 2. Esquema del algoritmo genético.

La reproducción de un individuo se hace a partir del intercambio genético entre dos individuos, de manera que el descendiente tomará genes tanto del padre como de la madre y esto se verá reflejado en su fenotipo (tendrá características físicas del padre y de la madre). En algunas ocasiones, agentes exógenos

presentes en la reproducción generan mutaciones en el genotipo del nuevo individuo, de forma que los genes no serán todos idénticos a los del padre o la madre, sino que algunos tendrán una ligera variación respecto a ellos.

3.2 Programación por Restricciones

La programación por restricciones busca solucionar problemas de optimización a partir de la aplicación y propagación de restricciones sobre sus variables, disminuyendo el espacio de búsqueda y validando los resultados. Al igual que en otros métodos de Inteligencia Artificial, es posible resolver problemas complejos utilizando razonamientos lógicos.

Existen tres principios básicos que interactúan entre sí mientras se ejecutan paso a paso (Figura 3). El primer principio es mantener la información actualizada, de forma que en cada paso de la búsqueda y la propagación se debe tener reunida la mayor cantidad de información posible (dominios de las variables, restricciones sobre el problema y restricciones adicionales deducidas). A partir de la información disponible, se deben propagar las restricciones, deduciendo nueva información que permita reducir el dominio de las variables o planteando nuevas restricciones que no se tenían. Por último, se debe realizar una búsqueda controlada paso a paso haciendo, entre uno y otro, las deducciones que sean posibles y agregando información a la que ya se tiene. Al realizar la búsqueda se debe tener una estrategia de distribución o heurística de búsqueda que, en cada paso, indique qué se debe hacer. Es decir, cuál valor escoger para cada variable.

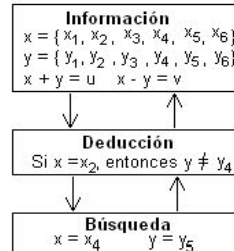


Figura 3. Principios para resolver problemas de satisfacción de restricciones.

4 Métodos

Se implementaron dos métodos: algoritmos genéticos y programación por restricciones, para hacer una herramienta útil y eficiente que sirva como apoyo importante al proceso de calibración de RDAP, siguiendo la metodología desarrollada por el CIACUA, la cual fue descrita en el numeral 2.1.

4.1 Algoritmos Genéticos

En el algoritmo genético desarrollado para calibrar RDAP cada individuo es un modelo hidráulico diferente, cuyo genotipo lo conforman los valores de las variables de la red y el fenotipo lo conforman las curvas de presión y caudal obtenidos al realizar el cálculo hidráulico en período extendido (Figura 4).

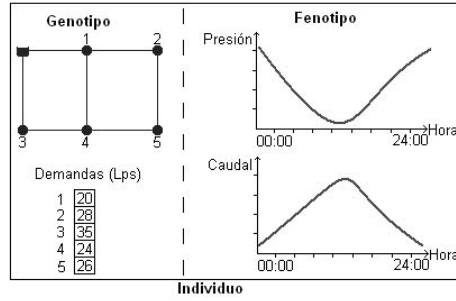


Figura 4. Individuo de una RDAP, con genotipo y fenotipo.

La adaptabilidad para calibración que tiene una red se relaciona con su similitud a las curvas de presión y caudal medidas en campo, las cuales son parejas hora – valor. Para cada hora de la simulación, el error de un modelo respecto a la curva de medición es la diferencia entre el valor calculado y el valor medido para dicha hora. El error porcentual de cada hora es la diferencia entre los valores dividido entre el valor medido. El error de una serie respecto a la medida, es la suma de los errores porcentuales en cada hora dividido entre el número de horas de la simulación (ecuación 2).

$$E_{\text{serie}} = \frac{\sum_{i=1}^{NP} \left(\frac{x_{\text{medido } i} - x_{\text{calculado } i}}{x_{\text{medido } i}} \right)}{NP} \quad (2)$$

Para calibrar una RDAP se deben tener mediciones de series de presión y series de caudal y, generalmente, se debe comparar más de una serie por cada escenario que se modele. El error de un modelo sería la suma del error de cada una de sus series, dividido entre el número de estas (ecuación 3).

$$E_{\text{modelo}} = \frac{\sum_{i=1}^{NS} E_{\text{serie}}}{NS} \quad (3)$$

Durante la ejecución del algoritmo genético, se calcula el error de cada individuo (modelo hidráulico) respecto a las series de medición que se están utilizando para calibrar. En cuanto el error sea menor, se dirá que el individuo está mejor adaptado.

El algoritmo se implementó de forma parametrizada, de manera que dando diferentes valores para el algoritmo genético, se pueden obtener mejores resultados. Los parámetros que se incluyen son: hora inicial, duración y delta de tiempo del cálculo hidráulico, variable que se va a calibrar, número de generaciones, tamaño de la población, método de reproducción (uniforme o n puntos), método de generación inicial (basado en la red actual o aleatoria) y probabilidad de mutación. La selección se hace por rango, escogiendo siempre los mejores individuos.

4.2 Programación por restricciones

Para utilizar la programación por restricciones, los dominios de las variables deben ser discretos. En calibración solamente las variables topológicas pueden discretizarse de forma válida, ya que la variación de demandas y fugas es muy alta. La creación de los dominios de las variables se realiza discretizando los valores de un rango obtenido a partir del valor que tiene el modelo hidráulico original.

Las deducciones que pueden realizarse son dependientes de los resultados que se hayan obtenido para las curvas de energía del modelo. Para cada una de las variables, se puede hacer una relación con la presión:

- Si la presión medida es, en general, superior a la calculada, el diámetro de una tubería debe aumentar.
- Si la presión medida es, en general, inferior a la calculada, la rugosidad y el coeficiente de pérdidas menores de una tubería debe aumentar.

El primer cálculo se hace con los valores del modelo Línea Base 2. Posteriormente, si la presión calculada fue inferior a la presión medida, se procederá a tomar el siguiente valor menor para las rugosidades y los coeficientes de pérdidas menores y el siguiente valor mayor para los diámetros, y viceversa.

Siguiendo el principio de búsqueda controlada, el cambio de valores no se hará en todas las tuberías al tiempo, sino que se escogerá alguna tubería al azar para realizar el cambio.

5 Resultados

Para comprobar el correcto funcionamiento de los módulos desarrollados y compararlos con otras formas de calibración, se utilizó la red de Candelaria (Valle del Cauca), la cual fue calibrada de forma manual en el CIACUA. La red tiene topografía suave y es alimentada por dos tanques con una altura de lámina de agua constante en la cota 1002 m.s.n.m. Tiene 463 nodos, y 567 tuberías. Se ubicaron dos tipos de medición de caudal y cuatro de medición de presión, y se obtuvieron series de medidas cada 15 minutos durante un día típico. El modelo inicial a partir del cual se realizó la calibración se creó en 2006 a partir de información entregada al CIACUA por Acuavalle S.A. y se calculó un error de 20,068% respecto a las series medidas.

5.1 Análisis de Sensibilidad

Para realizar el análisis de sensibilidad de la red, se ejecuta un algoritmo genético con un número de generaciones e individuos suficiente (8 para en los dos casos) para explorar la respuesta hidráulica de la red a los distintos cambios producidos en los valores de una variable.

La primera variable a la cual se le realizó un análisis de sensibilidad fue la demanda base con una amplitud de mutación de 0,2 Lps, puesto que las demandas del modelo inicial muestran que es una red que maneja caudales bajos: entre 0 y 0.4 Lps. La ejecución del algoritmo genético arrojó una alta sensibilidad de la red a los cambios en los valores de esta variable.

Al ejecutar el algoritmo genético de manera similar, para encontrar la sensibilidad de la red al cambio en el coeficiente de emisión (fugas), se encontró que la red no es alterable con altos valores de fugas, mientras que al realizarlo para las variables topológicas se encontró predisposición a los cambios.

Del análisis de sensibilidad, se puede concluir que la red responde satisfactoriamente a cambios en las demandas y, en menor medida, a las variables topológicas. Es indiferente a las fugas. Por lo tanto, se calibrarán todas las variables excepto los coeficientes de emisión.

5.2 Modelo Unificado

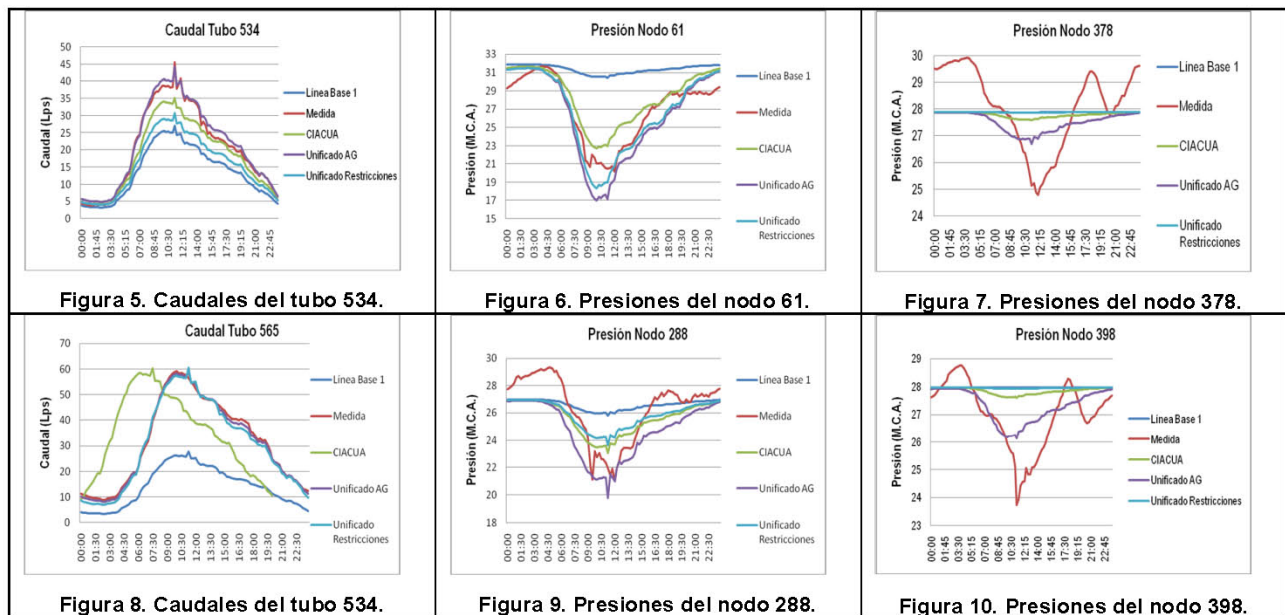
A partir del modelo Línea Base 2 (obtenido con algoritmos genéticos), se utilizaron el módulo de algoritmos genéticos (Unificado AG) y el módulo de programación por restricciones (Unificado Restricciones) de manera independiente para llegar a dos modelos unificados diferentes. Los resultados obtenidos se comparan con las series medidas y con el modelo obtenido por el CIACUA en el año 2006, cuando se llevó a cabo la calibración manual de la red de distribución a partir del mismo modelo inicial utilizado en este trabajo.

En la Tabla 1 se puede observar que el tiempo de calibración con los métodos implementados es considerablemente menor al de la calibración manual mientras que el error, en el caso de los algoritmos genéticos, es menor y, en el caso de programación por restricciones, es mayor.

Tabla 1. Comparación de error y tiempo de los modelos calibrados obtenidos.

Modelo	Error	Tiempo Aproximado
Línea Base 1	20,068%	-
Unificado AG	5,212%	12:41 horas
Unificado Restricciones	7,734%	5:13 horas
CIACUA	6,298%	192 horas

En las figuras 6 a 11, se pueden ver las series de caudal y presión obtenidas por cada uno de los métodos comparadas con las series medidas y las series del modelo original. En ellas se puede ver el excelente comportamiento ofrecido por el modelo calibrado utilizando algoritmos genéticos, y el acercamiento general de las series obtenidas utilizando programación por restricciones.



6 Conclusiones

El objetivo de esta investigación era implementar dos métodos de Inteligencia Artificial con el fin de realizar la calibración de redes de distribución de agua potable de forma eficiente, reduciendo el tiempo que

tarda el proceso y obteniendo mejores resultados. Los dos módulos desarrollados demostraron que este objetivo se cumplió, pues fue posible calibrar una red real de tamaño medio en un tiempo menor al que se tardaba tradicionalmente y mejorando el resultado con uno de los métodos, reduciendo el tiempo hasta en un 94%. También se han encontrado, en general, mejores ajustes de las curvas medidas en campo.

El análisis de sensibilidad de la red permite conocer la red y formar criterios acerca de la forma como debe ser calibrada, ahorrando tiempo importante en la etapa de calibración. El uso de algoritmos genéticos para realizar este análisis es altamente eficiente, debido a que los escenarios se crean solos y se busca un mejor ajuste de manera inherente.

El método de programación por restricciones fue menos exitoso que el de algoritmos genéticos, puesto que las restricciones entre variables son pocas y su comportamiento tiende a ser independiente. El uso de un lenguaje no orientado a programar por restricciones también pudo haber afectado el rendimiento, pues la propagación de los errores no se hace de forma intuitiva y es probable que por esto el tiempo de ejecución y el uso de memoria fuera mayor. Adicionalmente, este método sigue siendo dependiente de la existencia de un modelo Línea Base 2, el cual debe obtenerse por otro método.

Debido a la relación existente entre las variables de entrada a la calibración y su efecto sobre la presión y el caudal, al calibrar de forma independiente las variables, pueden presentarse desajustes en las curvas que ya han sido calibradas. La posibilidad de volver a calibrar rápidamente por una de las variables ya ajustadas ofrece una ventaja importante en el momento de unir las calibraciones de cada una de las variables

7 Bibliografía

Saldarriaga Valderrama, Juan Guillermo (2007). "Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos", Editorial Alfaomega, Ediciones Uniandes.

López Giraldo, Carlos Santiago (2003). "Diseño de redes de distribución de agua potable de mínimo costo con algoritmos genéticos", Universidad de los Andes.

Salas Useche, Daniel Eduardo (2003). "Evaluación de Métodos de Inteligencia Artificial para la Calibración de Redes de Acueducto", Universidad de los Andes.

Villalba Fernández de Castro, Germán (2004). "Algoritmos de Optimización Combinatoria Aplicados al Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable", Universidad de los Andes.

Jurado Toro, César Mauricio (2007). "Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable", Universidad de los Andes.

Van Roy, Peter y Haridi Seif (2003). "Concepts, Techniques, and Models of Computer Programming", Swedish Institute of Computer Science.

Saraswat, Vijay (1995). "Principles and Practice of Constraint Programming: The Newport Papers", Cambridge, MA, London: The MIT Press.

Krzysztof, R. (2003). "Principles of Constraint Programming", Cambridge University Press.

Frühwirth, Thom (2003). "Essentials of Constraint Programming", New York : Springer.

Horowitz, Ellis, Sahni Sartaj (1978). "Fundamentals of Computer Algorithms" Computer Science Press.