

**XIX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**

**ESQUELETIZACIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO LOS  
CONCEPTOS DE RESILIENCIA Y POTENCIA UNITARIA**

*J.G. Saldarriaga<sup>1</sup>, L. Nieto<sup>2</sup>, S. Ochoa<sup>2</sup>, R. Córdoba<sup>2</sup>, y S. García<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental - Director, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email: jsaldarr@uniandes.edu.co.*

*<sup>2</sup> Investigadores, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email: la-nieto@uniandes.edu.co, s.ochoa24@uniandes.edu.co, rc.cordoba96@uniandes.edu.co, sa.garcia32@uniandes.edu.co*

**RESUMEN:**

Los modelos esqueletizados en Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP) son generados mediante la selección y eliminación de algunos tubos de la red de tal forma que el modelo obtenido represente adecuadamente las propiedades hidráulicas del modelo original que simula la red prototipo con todos sus tubos. Este tipo de modelos simplificados, son de gran utilidad en propósitos operacionales, como el manejo en tiempo real de la red, el monitoreo de la calidad de agua, las operaciones de mantenimiento y la reacción ante posibles emergencias. En la actualidad, existen modelos simplificados que representan las condiciones hidráulicas de la red original. En este artículo se presenta una metodología que involucra diferentes procesos de simplificación del modelo hidráulico de una red de distribución mediante el uso de criterios hidráulicos específicos.

**ABSTRACT:**

Skeletonized models Distribution Network Water (RDAP) are generated by selecting and removing some of the network pipes so that the model obtained adequately represents the hydraulic properties of the original. Such simplified models are very useful for operational purposes, such as real-time management, monitoring of water quality, operations, maintenance and response to emergencies. Currently, there are simplified models representing the hydraulic conditions of the original network. This article presents a methodology that involves different processes of simplification of the distribution network through the use of specific hydraulic criteria

**PALABRAS CLAVE:**

Redes de distribución, Modelos hidráulicos, Esqueletización.

## **INTRODUCCIÓN**

El proceso de esqueletización es un proceso que consiste en simplificar el tamaño de un modelo hidráulico de una red de distribución de agua potable (RDAP) sin afectar el comportamiento hidráulico del mismo. Este comportamiento hidráulico, se mide cuantitativamente mediante la comparación de las presiones en los nudos de consumo antes y después de aplicar la metodología de esqueletización.

En el análisis de una RDAP, se estudian las variables hidráulicas involucradas. Para el caso de la esqueletización, se están afectando las presiones en los nudos y los caudales en los tubos. Sin embargo, para efectos comparativos de cuánto afecta la simplificación que implica la esqueletización, sólo se consideran las presiones en los nudos, pues es la variable que busca modelarse adecuadamente, respetando los caudales consumidos en cada nudo.

La metodología de esqueletización propuesta considera cuatro elementos fundamentales en su desarrollo general. En primer lugar reduce los puntos de cálculo en el proceso de esqueletización y genera modelos simplificados que corresponden hidráulicamente con el modelo original. Incluye también la metodología de esqueletización por resiliencia y potencia unitaria, que en cada iteración, el tubo que es removido de la RDAP no deja ningún nudo de consumo desconectado y genera el menor impacto en el cambio del índice de resiliencia o potencia unitaria, dependiendo de cual criterio se está utilizando.

## **DEFINICIONES**

Entender los efectos de la metodología de esqueletización propuesta en la hidráulica de una RDAP requiere el manejo adecuado de los criterios hidráulicos y los términos técnicos presentados a continuación.

### **Esqueletización**

Proceso para eliminar tuberías de un modelo hidráulico sin desconectar ninguno de los nudos de la red, generando un modelo hidráulico equivalente que permite realizar los cálculos hidráulicos sustancialmente más rápido en términos computacionales, lo que permite un uso operacional más eficiente.

### **Resiliencia de una Red**

El concepto de resiliencia fue introducido por Ezio Todini en el año 2000; lo definió como "... la capacidad intrínseca que tiene una RDAP para superar fallas repentinas y se mide como la proporción entre el excedente de potencia que es entregado a los usuarios y la máxima potencia que puede ser disipada en la red cuando se cumplen exactamente los criterios y condiciones de diseño. El índice de resiliencia proporciona una medida general de la redundancia del sistema: un mayor valor del índice de resiliencia corresponde a una mayor redundancia."

## Índice de Resiliencia (Ir)

El índice de resiliencia de una red de distribución de agua potable  $I_r$  se define como: “la capacidad de un sistema de reaccionar y superar un estado de esfuerzos [ . . . ] o el incremento de la redundancia energética y decrecimiento de la energía disipada internamente en una red” (Todini, 2000).

$$I_r = 1 - \frac{P_{dis}^{real}}{P_{dis}^{opt}} \quad [1]$$

Finalmente, Todini (2000) llegó a la siguiente expresión teniendo los criterios mencionados con anterioridad.

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^n q_i (h_i^* - h_i^{*, \min})}{(\sum_{e=1}^{n_e} Q_{ei} H_{ei} + \sum_{i=1}^{n_p} P_{bi}) - \sum_{i=1}^n q_i h_i^{*, \min}} \quad [2]$$

Este valor puede variar entre 0 a 1, siendo 1 la condición utópica para los sistemas reales de distribución, ya que siempre va a existir una diferencia sustancial entre la energía real que disipa el sistema y la energía óptima que debería disipar. Para Todini, el valor ideal del índice de resiliencia debe ser del (50%). Una red con índice menor a 0.5 es muy vulnerable a todo tipo de fallas (ruptura de tubos, fugas etc.).

## Potencia Unitaria del Tubo i (PUTi)

La  $P_{UTi}$  se define como la altura piezométrica disipada en una tubería dada, es decir, la diferencia de alturas piezométricas entre los nudos que conforman ese segmento de tubería, por el caudal que está pasando por ese tubo (Bernal A. , 2008):

$$P_{UTi} = q_i (h_{i, inicio}^* - h_{i, fin}^*) \quad [3]$$

La  $P_{UTi}$  corresponde a una potencia por unidad de peso disipada en una tubería dada.

## Agregación de Demandas

La agregación de demandas modifica la asignación de las demandas de una red de distribución de agua potable en los nudos disponibles de la misma, de tal forma que concentra demandas en los nudos, haciendo que las presiones sean calculadas en un número menor de nudos, ayudando a reducir el tiempo computacional de cálculo.

La agregación de demandas identifica nudos con poca relevancia hidráulica para remover aquellas demandas que se encuentren cercanas a cero. Se utilizan dos formas de determinar el impacto hidráulico de las demandas en la red de distribución de agua potable. En ambos casos se busca establecer fronteras para las demandas representativas. Los criterios utilizados para realizar la asignación se presentan a continuación:

1. Agrupación de nudos que no tuvieran tuberías aguas abajo y que tuvieran demandas inferiores al 5% de la demanda promedio de la RDAP.
2. Tomar las demandas inferiores al 5<sup>to</sup>, 10<sup>mo</sup>, 15<sup>vo</sup> y 20<sup>vo</sup> percentil de las demandas de la RDAP.

Para ambos casos, una vez se hayan establecido aquellos nudos que cumplan cualquiera de los criterios expuestos anteriormente, se distribuye la demanda de estos en los nudos que no fueron seleccionados; es decir, aquellos nudos que presentan demandas hidráulicamente significativas, adhieren las demandas de los nudos con poca representación mediante el software especializado llamado ASIGNA descrito más adelante.

Los criterios de relevancia hidráulica expuestos se han aplicado siguiendo dos modalidades de análisis de la red de distribución de agua potable. En la primera, se considera la red como una unidad total; mientras que la segunda modalidad considera que la red está conformada por pequeñas zonas, las cuales tienen independencia de las demás.

El concepto de independencia se aplica en el momento de aplicar los criterios de relevancia hidráulica para reagrupar las demandas en nudos de alto consumo. Para la primera modalidad, los criterios se aplican sin ningún tipo de discriminación especial sobre la topología de los consumos y la red. Sin embargo, para la segunda modalidad, se supone que cada zona es una red independiente de las demás, por lo que los consumos que se encuentren dentro de la misma serán asignados solamente a los nudos dentro de la zona, sin importar que existan nudos más cercanos en zonas adyacentes.

#### **Software ASIGNA 3.4**

ASIGNA 3.4 es un programa que relaciona usuarios de una red de distribución de agua potable con el nudo de la red del cual se alimentan. Las entradas del programa son archivos de texto que contienen información sobre los nudos, las tuberías, los vértices y los usuarios. La interfaz permite escribir el diámetro máximo de tuberías conectables por los usuarios. Esto es porque los usuarios generalmente solo se pueden conectar a la red a través de tuberías de cierto diámetro o menor. Las salidas del programa son archivos de texto que contienen información acerca de los usuarios y los nudos.

En las entradas, se especifica un identificador y las coordenadas para cada nudo. Para cada tubo se especifica su identificador, y dos identificadores de nudos, que son los nudos a los cuales se conecta el tubo, y el diámetro. Para los usuarios se especifica su identificador, sus coordenadas y su consumo de agua. Para los vértices se especifica el identificador del tubo al que se conecta, el orden del vértice en el tubo y las coordenadas del tubo. En las salidas, los archivos muestran para cada usuario, su identificador, el nudo al cual fue conectado por Asigna, y su consumo de agua. Para cada nudo, su identificador y su demanda de agua a la red. Esta corresponde a la suma de las demandas de los usuarios que se le conectaron.

De manera general, el procedimiento utilizado por ASIGNA para la asignación de demandas en un determinado nudo en la RDAP es el siguiente:

1. Identificar qué nudo es cercano al punto de consumo.
2. Determinar si es aceptable la asignación al nudo escogido en el punto 1. Para esto se determina que no existan cruces de calles.
3. Si el resultado del punto 2 es lógico; es decir, respeta el no cruce de calles, se realiza la asignación. De lo contrario se busca un nuevo nudo candidato en el punto 1.

4. Repetir de forma iterativa hasta completar la asignación de todos los nudos

Este procedimiento permite establecer las demandas para cada punto de la RDAP de acuerdo con los consumos reales medidos.

### **Ramificación**

El proceso de ramificación busca la eliminación de nudos con consumo cercanos a cero y que no tengan nudos de consumo aguas abajo, pues no tendrán un impacto considerable en la hidráulica de la RDAP. Debido a que se eliminan éstos del modelo, las tuberías que los conectan son eliminadas, ya que no tienen función alguna (no tienen caudal).

La ramificación es relevante en redes que tengan muchos extremos libres, pues cuando el tamaño de la red aumenta, deja de ser considerable el número de nudos que se pueden quitar por este medio.

### **Tuberías Equivalentes**

Cuando hay nudos sin consumo pero tienen consumos aguas abajo se utilizan tuberías equivalentes, que generen una tubería que tenga pérdidas equivalentes a la tubería en serie original. Estas pérdidas están compuestas por pérdidas por fricción y pérdidas menores o locales. Esta modelación permite la eliminación de aquellos nudos que no tienen consumo, simplificando el modelo general.

## **PROCEDIMIENTO**

Tal como se mencionó anteriormente, la metodología de esqueletización propuesta considera cuatro elementos fundamentales en su desarrollo general. Esta metodología reduce los puntos de cálculo en el proceso de esqueletización y genera modelos simplificados que corresponden hidráulicamente con el modelo original. Incluye también, la metodología de esqueletización por resiliencia y potencia unitaria, que en cada iteración, el tubo que es removido de la RDAP no deja ningún nudo de consumo desconectado y genera el menor impacto en el cambio del índice de resiliencia o potencia unitaria, dependiendo de cual criterio se está utilizando. Los pasos propuestos se presentan a continuación:

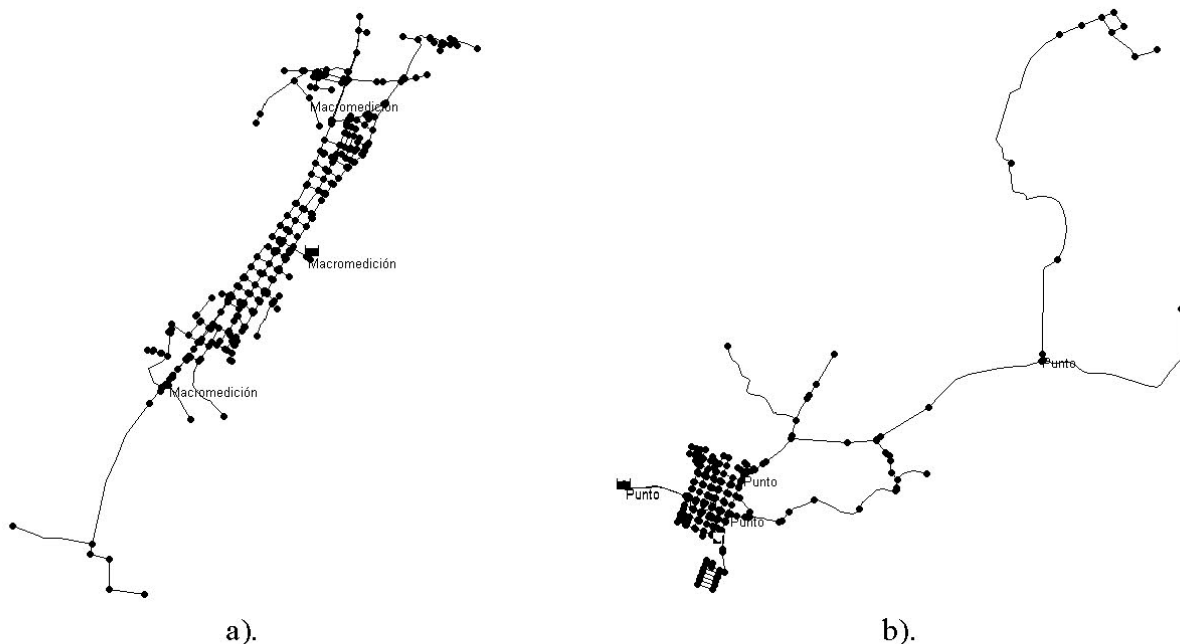
1. Agregación de demandas: Concentrar los nudos de bajo consumo en un solo nudo. Este paso identifica qué nudos son cercanos al punto de consumo y determina si es aceptable la asignación a un nudo particular. Si la asignación se encuentra lógica, se realiza la asignación, de lo contrario se busca un nuevo nudo candidato. El proceso continúa de forma iterativa hasta completar la asignación de todos los puntos de consumo.
2. Eliminación hidráulica de tubos: Se utiliza una de las metodologías de esqueletización. Para este paso es posible utilizar los criterios de resiliencia o potencia unitaria como criterio de parada del algoritmo de esqueletización.
3. Ramificación: Eliminación de nudos con consumo cercanos a cero y que no tengan consumos aguas abajo. Para este caso, las tuberías que conectan estos nudos son eliminadas.
4. Tuberías Equivalentes: Cuando hay nudos sin consumo pero que tienen consumos aguas abajo no es posible ramificar, por lo que se utiliza tuberías en serie de pérdidas equivalentes a la tubería original.

## REDES ANALIZADAS

Para comprobar la metodología de esqueletización, de tal forma que resulte en un modelo que represente adecuadamente la hidráulica de la red, se estudiaron dos redes de distribución de agua potable. Estas redes han sido calibradas en investigaciones previas del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA de la Universidad de los Andes y ha sido utilizada como prototipo para la aplicación de la metodología general de esqueletización. Estas redes corresponden a municipios del Valle del Cauca, departamento de Colombia.

Cada una de las redes analizadas, presenta una topografía diferente, así como una distribución de demandas de consumo en los nudos distinta. Para ambos casos sólo se tiene una fuente de abastecimiento y no existen bombas de ningún tipo.

Para realizar los cálculos hidráulicos de ambas redes se utilizaron los programas REDES (CIACUA 2006) y EPANET (Rossman 2000).



**Figura 1.** a). Esquema de la red Andalucía Alta b). Esquema de la red Bolívar.

Las características principales de la red del municipio de Andalucía Alta antes de comenzar el proceso de esqueletización se presentan en la Tabla 1. Se puede apreciar un material de tuberías constante en toda la red y un número similar de nudos y tuberías.

**Tabla 1.-** Características de la red del municipio de Andalucía Alta.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	DESCRIPCIÓN
Número de Tuberías	360
Número de Nudos	329
Número de Tanques	1
Altura piezométrica del tanque	996 msnm
Longitud total de las tuberías	23587 m
Demanda Total	20 L/s

Material tuberías	PVC (ks = 0,0015 mm)
Diámetros Comerciales	5.08 – 10.16 cm

Para el municipio de Bolívar las características se presentan principales en la Tabla 2. De forma análoga a la red de Andalucía Alta, esta red presenta un solo material de tuberías y un único tanque.

**Tabla 2.-** Características de la red del municipio de Bolívar

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	DESCRIPCIÓN
Número de Tuberías	333
Número de Nudos	285
Número de Tanques	1
Altura piezométrica del tanque	957 msnm
Longitud total de las tuberías	29450.16 m
Demanda Total	11.97 L/s
Material tuberías	PVC (ks = 0,0015 mm)
Diámetros Comerciales	5.08 – 10.16 cm

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos para la red de Andalucía Alta se calcularon mediante la comparación de presiones en los nudos de la RDAP original y las presiones en los nudos de la red una vez aplicada la metodología de esqueletización. A esta red se le denomina modelo esqueletizado. Los resultados obtenidos presentan comparaciones únicamente de aquellos nudos que se mantienen en el modelo esqueletizado; es decir, no se comparan aquellos nudos que la red tiene antes de aplicar la metodología de esqueletización y no se encuentran luego de aplicar la misma.

La metodología de esqueletización fue aplicada para las redes de los municipios de Andalucía Alta y Bolívar y se utilizaron los criterios de resiliencia y potencia unitaria para comparar el estado de presiones en los nudos comparables, pues por los pasos de ramificación y tuberías equivalentes, aquellos nudos que no representen demandas considerables eran eliminados.

La influencia de los pasos de la aplicación de la metodología de esqueletización en la red se presenta en la Tabla 3, que permite identificar la evolución que ha tenido la red en cuanto al número de tuberías respecto al modelo original. Cada uno de los pasos de la metodología de esqueletización aumenta el número de tuberías eliminadas, manteniendo las condiciones hidráulicas en los nudos. Para el municipio de Andalucía Alta se obtiene una reducción del 40% en el número de tuberías, manteniendo las presiones en los nudos con una dispersión promedio del 5% respecto a la red original.

**Tabla 3.** Resultados para el municipio Andalucía Alta.

Red Andalucía		
		Acumulado
No. de tubos iniciales	360	--
No. de tubos removidos usando el Índice de Resiliencia	31	31
% de tubos removidos usando el Índice de Resiliencia	8.61%	8.61%



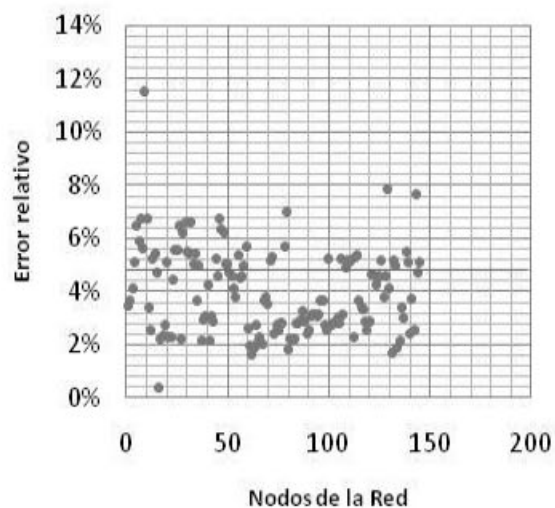
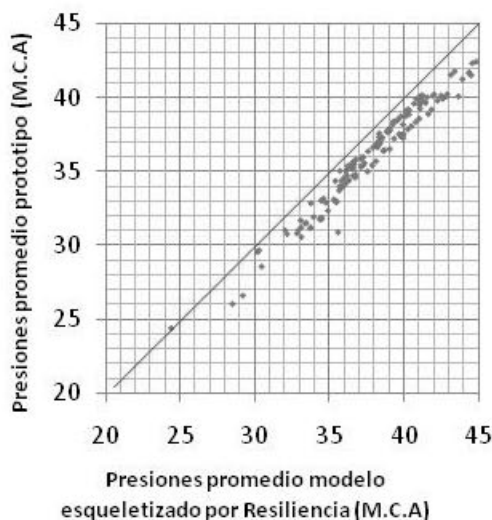
No. de tubos removidos por ramificaciones	82	113
% de tubos removidos por ramificaciones	22.78%	31.39%
No. de tubos removidos por tuberías equivalentes	32	145
% tubos removidos	8.89%	40.28%

Para entender la influencia de la esqueletización sobre la hidráulica de la red se comparan las presiones en los nudos del modelo original con las del modelo esqueletizado, obteniendo un error relativo y un error promedio general para toda la red. El error relativo se calcula como la diferencia de presiones en ambos modelos en relación con la presión del modelo original, mientras que el error promedio general es el promedio de errores relativos de cada uno de los nudos comparables.

La comparación hidráulica para las presiones en los nudos se presenta a continuación. La línea a 45 grados representa la idealización del problema, en donde el valor de cada presión es el mismo en ambos modelos (prototipo y esqueletizado), lo que implica que la metodología no tiene ningún efecto sobre la hidráulica de la red. Se busca que los puntos graficados se encuentren cercanos a la recta de 45 grados, pues indica un menor impacto sobre la hidráulica de la red.

La Figura 2.a presenta las presiones en los nudos en la red en período estable, lo que aumenta su dispersión pues no se comparan los promedios de todo el día sino un momento en particular. Se muestra una tendencia a aumentar las presiones en el modelo esqueletizado en relación con el modelo original, lo que muestra una eficiencia energética en el transporte de agua por la red, pues para un mismo punto de análisis, la presión en el modelo esqueletizado resulta mayor.

La Figura 2.b muestra el error relativo por cada uno de los nudos. Presentan un promedio del 5 % la dispersión de presiones entre la red original y la red una vez se ha aplicado la metodología de esqueletización propuesta. Los errores relativos para cada nudo comparable se presentan a continuación en la Figura 2.b, la línea indica el error promedio general de la red, que para esta red tiene un valor del 5%. Es decir, en general los datos del modelo esqueletizado presentan un aumento del 5% en sus presiones en relación con las presiones del modelo original. Aunque los datos de la Figura 2.a no se encuentren sobre la línea de 45 grados, se encuentran alejados en un porcentaje promedio del 4%.





a).

b).

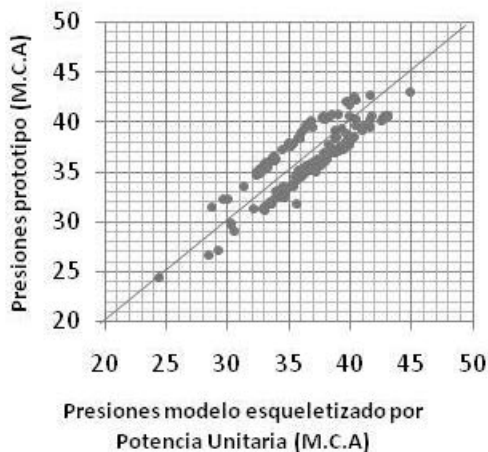
**Figura 2.** a). Comparación del estado de presiones en los nudos entre el prototipo y el modelo esqueletizado por resiliencia para la red de Andalucía Alta. b). Error relativo de las presiones en cada nudo por la metodología de esqueletización por resiliencia.

El mismo análisis se utilizó con la esqueletización por potencia unitaria, obteniendo de igual forma una comparación de presiones en aquellos nudos de la red comparables, es decir, que se encuentren en el modelo original y en el modelo esqueletizado por potencia unitaria en la Figura 3. También presenta la variación de los datos con el error relativo para cada nudo y el error promedio general para la red en conjunto.

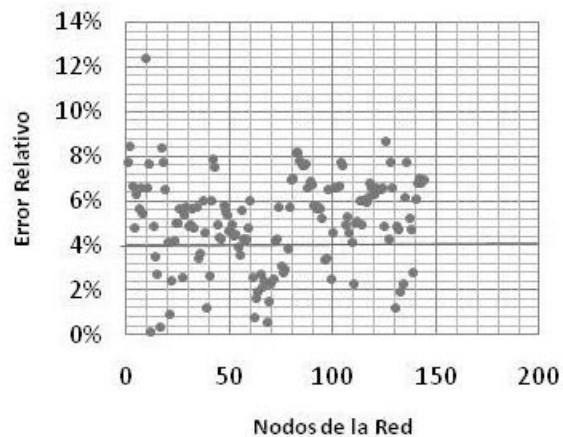
La Figura 3.a presenta la comparación de presiones en los nudos comparables. Se muestra que los datos se distribuyen alrededor de la recta de 45 grados. Cerca de la mitad de los datos se encuentran por debajo de la recta, mientras que la mitad faltante se encuentra por encima.

Para el cálculo del error relativo el procedimiento es análogo al desarrollado para la metodología de esqueletización por resiliencia. Para el error promedio se utiliza el valor absoluto de la dispersión o error relativo, pues se busca establecer la diferencia entre los datos del modelo original y el modelo esqueletizado, sin importar que se encuentren por encima o por debajo de la recta de 45 grados.

La Figura 3.a y 3.b presentan gráficas análogas para la red del mismo municipio Andalucía Alta; la única variación está en el criterio hidráulico para esqueletizar. En este caso, no se utiliza la resiliencia de la, sino la potencia unitaria como criterio en el segundo paso de la metodología. Para este criterio, la dispersión promedio de los errores relativos de presión en los nudos es del 4 %.



a).



b).

**Figura 3.** a). Comparación del estado de presiones en los nudos entre el prototipo y el modelo esqueletizado por potencia unitaria para la red de Andalucía Alta. b). Error relativo de las presiones en cada nudo por la metodología de esqueletización por potencia unitaria.

Para la red del municipio de Bolívar se realizó el mismo análisis de presiones en los nudos, comparando el estado de presiones en la red original respecto a la presión que tenía la misma red una vez se aplicaba la metodología de esqueletización. Se compara su relación en la recta de 45 grados para las Figura 4.a y Figura 5.a y la dispersión de los errores relativos en las Figuras 4.b y 5.b.

La influencia de los pasos de la aplicación de la metodología de esqueletización en la red se presenta en la Tabla 4, que permite identificar la evolución que ha tenido la red en cuanto al número de tuberías eliminadas respecto al modelo original. Si se comparan los resultados de este municipio con los de Andalucía Alta, se presentan condiciones muy parecidas, pues el porcentaje final de tubos removidos es casi el mismo.

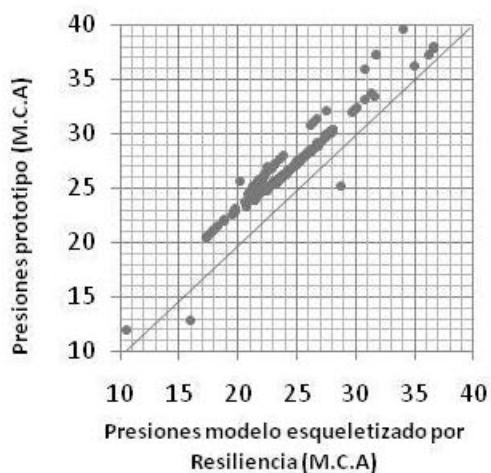
**Tabla 4. Resultados Bolívar**

Red Bolívar		
		<b>Acumulado</b>
No. de tubos iniciales	333	--
No. de tubos removidos usando el índice de resiliencia	48	48
% de tubos removidos usando el índice de resiliencia	14.41%	14.41%
No. de tubos removidos por ramificaciones	91	139
% de tubos removidos por ramificaciones	27.33%	41.74%
No. de tubos removidos por tuberías equivalentes	55	194
% tubos removidos	16.52%	58.25%

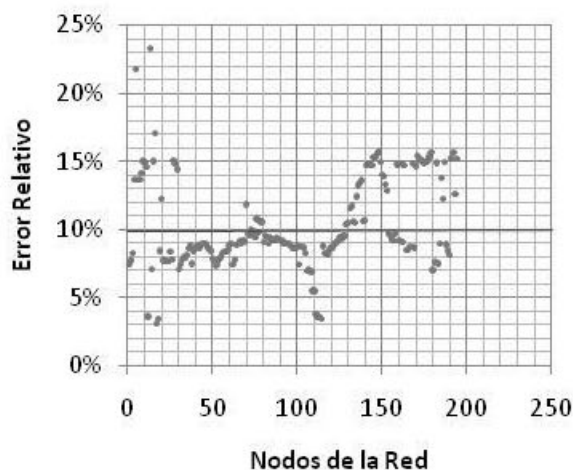
La Figura 4.a muestra una disminución en las presiones en la red una vez se le aplicó la metodología de esqueletización con el criterio de resiliencia. Esto muestra un desgaste energético en el transporte de agua por la red, pues para un mismo punto de análisis, la tendencia muestra una presión menor. Este resultado es contrario al encontrado en el análisis del municipio Andalucía Alta, pues la tendencia era contraria a esta.

Como los análisis no son concluyentes sobre la tendencia a aumentar o disminuir las presiones en los nudos una vez se aplica la metodología de esqueletización, se analiza nuevamente los errores relativos para cada nudo comparable.

La línea indica el error promedio general de la red, que para esta red tiene un valor del 10%. Esta comparación se presenta en la Figura 4.b.



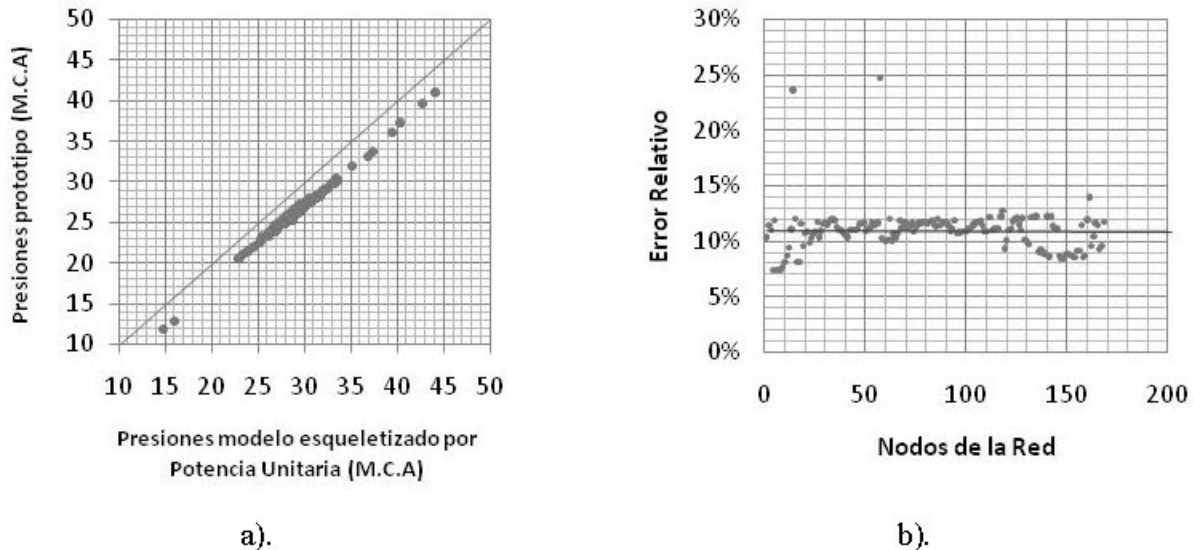
a).



b).

**Figura 4.** a). Comparación del estado de presiones en los nudos entre el prototipo y el modelo esqueletizado por resiliencia para la red de Bolívar. b). Error relativo de las presiones en cada nudo por la metodología de esqueletización por resiliencia.

De igual forma que en el municipio de Andalucía Alta, para la red del municipio de Bolívar se aplicó la metodología de esqueletización por potencia unitaria. La Figura 5 a) evidencia que las presiones aumentan en la red una vez se aplica la metodología de esqueletización, mientras que la Figura 5 b) muestra una dispersión promedio del 11 % en las presiones.



**Figura 5.** a). Comparación del estado de presiones en los nudos entre el prototipo y el modelo esqueletizado por potencia unitaria para la red de Bolívar. b). Error relativo de las presiones en cada nudo por la metodología de esqueletización por potencia unitaria.

## CONCLUSIONES

Los cuatro pasos propuestos en la metodología general de esqueletización permiten un adecuado conocimiento de las presiones de una RDAP. A medida que se avanza en la metodología de esqueletización propuesta, el número de tuberías removidas aumenta considerablemente sin influir proporcionalmente en la distribución de presiones en los nudos. Si bien las condiciones hidráulicas referentes a las tuberías, como lo son el caudal, la velocidad y el número de Reynolds varían sustancialmente con la aplicación de la metodología de esqueletización, no sucede lo mismo con las presiones en los nudos respetando el caudal consumido en toda la red. Para efectos de análisis prácticos se busca una dispersión mínima en esta variable, lo que hace de la esqueletización un proceso efectivo para modelar la hidráulica de una RDAP.

La metodología general de esqueletización satisface los requerimientos hidráulicos de una RDAP, pues reproduce adecuadamente el estado de presiones en los nudos comparables. A pesar de que la metodología elimina algunos nudos, éstos no afectan la hidráulica de la red de distribución ya que no tienen consumo.

La metodología de esqueletización presenta dispersiones promedio admisibles para la comparación de las presiones. Si bien las presiones no son iguales en el modelo sin afectar y en la misma red

afectada por la metodología de esqueletización, la diferencia mostró estar en niveles admisibles, con un máximo del 11% y un mínimo del 4%. Estas variaciones permiten realizar ajustes para modelar las presiones.

No hay evidencia suficiente para mostrar una tendencia constante al aumento o disminución de las presiones en los nudos una vez se aplica la metodología de esqueletización. Dependiendo del criterio de esqueletización utilizado, bien sea la resiliencia o la potencia unitaria, las presiones mostraron tendencias a aumentar o disminuir, por lo que no hay pruebas concluyentes de una tendencia única.

Las condiciones hidráulicas en los nudos se representan adecuadamente en la metodología de esqueletización. Sin embargo, si se quiere evaluar las propiedades hidráulicas en las tuberías, debe intentarse otra aproximación, pues la esqueletización afecta notoriamente el flujo de masa a través de la red.

## REFERENCIAS

- Bahadur, R., Johnson, J., Janke, R., & Samuels, W. B.** (2006). Impact of Model Skeletonization on Water Distribution Model Parameters as Related to Water Quality and Contaminant Consequence Assessment. Proceedings of the 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio.
- Bernal, A.** (2008). Diseño optimizado de ampliaciones de redes de distribución utilizando los conceptos de Potencia y Resiliencia en la red. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Bogotá.
- CIACUA**, 2006. Programa REDES. University of Los Andes. Bogotá D.C., Colombia.
- CIACUA**, 2007. Manual del Programa ASIGNA V.3.5. University of Los Andes. Bogotá D.C., Colombia.
- Duziniewicz, K., & Cimini, A.** (2006). Drinking Water Distribution System Modelling - An approach to skeletonization. Applications of Large Scale Industrial Systems, Volume # 1 | Part# 1. Finland.
- Grayman, W. M., & Rhee, H.** (2004). Assessment of Skeletonization in Network Models. Proceedings of the 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, Minneapolis, Minnesota
- Janke, R., Murray, R., Uber, J., Bahadur, R., Taxon, T., Samuels, W., y otros.** (2007). Using TEVA to Assess Impact of Model Skeletonization on Contaminant Consequence Assessment and Sensor Placement Design. Proceedings of the 2007 World Environmental and Water Resources Congress, Tampa, Florida.
- Perelman, L., Masli, M. L., Ostfeld, A., & Sautner, J. B.** (2008). Using aggregation/skeletonization network models for water quality simulations in epidemiologic studies. Journal AWWA, 122-133.
- Rossman L.** (2000) *User's manual EPANET*, USA.
- Saldarriaga J.G.** (2007). Hidráulica de Tuberías. Universidad de los Andes, Bogotá Colombia. Alfaomega.
- Saldarriaga, J., Ochoa, S., Rodríguez, D., & Arbeláez, J.** (2008). Water Distribution Network Skeletonization Using the Resilience Concept. Proceedings of the Water Distribution Systems Analysis Conference 2008, Kruger National Park, South Africa.

- Todini, E.**, 2000. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(3), 115 – 122.
- Todini, E.**, 2008. Design, expansion and rehabilitation of water distribution networks aimed at reducing water losses. Where are we? Proceedings of the 10th International Water Distribution System Analysis Conference 2008, Kruger National Park, South Africa.
- Ulanicki, B., Zehnpfund, A., & Martinez, F.** (1996). Simplification of Water Distribution Network Models. Proceedings of the Hydroinformatics 96 International Conference, International Association for Hydraulic Research, Zürich.