

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**NUEVA METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE REDES INTERNAS DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

Silvia Takahashi, Pablo Nández

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
<stakahas@uniandes.edu.co>, <pa.nanez49@uniandes.edu.co>

RESUMEN: Las redes internas de distribución de agua potable (RIDAP), son el componente final del sistema de distribución de agua potable de cualquier asentamiento urbano. En la actualidad, las aproximaciones al análisis de estos sistemas son considerablemente obsoletas teniendo en cuenta, por ejemplo, que las metodologías vigentes de diseño en Colombia y América Latina son basadas en estudios de hace más de medio siglo (Hunter 1940), que no representan de manera aceptable el comportamiento real de éstos (Acero 2009, Cruz y Barrios 2001). Ello contrasta con las metodologías de análisis de las redes de distribución de agua potable (RDAP), en donde constantemente aparecen nuevos avances para la solución de problemas como el de calibración o el de diseño del sistema, haciendo uso de herramientas modernas como las técnicas de Inteligencia Artificial, las ecuaciones físicamente basadas, criterios de optimización multiobjetivo para minimizar costos constructivos y de operación, e incluso software capaz de implementar todas estas herramientas. Basado en el modelado de la demanda por medio de procesos de Markov, se presenta un método para el análisis y diseño de RIDAP. Finalmente se presenta un pseudocódigo del método y muestran los resultados obtenidos con una red de prueba.

ABSTRACT:

Nowadays, most used analysis methods for internal water distribution systems IWDS are obsolete, which are based on methods developed in the 40s. Recent studies shown that this previous approaches didn't fit properly in the dynamical behavior of the IWDS. On the other hand, the water distribution network WDN analysis methods are well developed, even more this field is very active. In this paper, we take borrow some succesful concepts in WDN analysis and a novel model for water demand in IWDS for develop a methodology for IWDS design. Finally, some results are drawn with a test network.

PALABRAS CLAVE: Redes internas de distribución de agua potable, modelos de demanda de agua en edificaciones, modelos estocásticos, método de Hunter.

INTRODUCCIÓN.

El diseño de redes internas de distribución de agua potable (RIDAP) supone un problema de optimización que busca los diámetros de las tuberías que conforman la red de tal forma que se cumplan con ciertas restricciones hidráulicas a un bajo costo. Para solucionar este problema primero es necesario estimar las condiciones de operación del sistema una vez este sea instalado. Estas condiciones son variantes en el tiempo y siguen procesos estocásticos derivados del comportamiento de los usuarios del sistema. Por lo tanto, la condición de operación de una RIDAP debe ser modelada mediante un proceso estocástico que relacione el número de usuarios, el número de aparatos y el tipo de uso (e.g., residencial, comercial, industrial, etc.). Una vez se establecen las condiciones de operación y dado un nivel de confiabilidad para el sistema, se seleccionan los diámetros de las tuberías dentro de un conjunto finito de diámetros disponibles.

Aproximaciones tradicionales hacen uso de modelos estocásticos (o métodos empíricos) para determinar el caudal máximo probable en las diferentes tuberías del sistema, y luego siguiendo algún tipo de aproximación se diseñan las tuberías e.g., el método de Hunter (Hunter 1940), el método británico (García Sosa 2001), el método de Dawson y Bowman (Castro Ladino, Garzón Garzón et al. 2006) el método Alemán o de raíz cuadrada (García Sosa 2001), el método del factor de simultaneidad (Melguizo 2002), el método racional (Roca Suárez and Carratalá Fuentes). La mayoría de metodologías siguen el enfoque de Hunter, presentando variaciones con respecto al modelo estocástico para obtener el caudal máximo probable, la forma de agregar los caudales, o simplemente variando los valores que relacionan caudal máximo probable por cada tipo de aparato.

Con el objetivo de optimizar el diseño de RIDAP es indispensable conocer las características de la demanda que se requiere satisfacer. Los métodos de diseño tradicionales tienen en cuenta estimaciones de la demanda (e.g., método de Hunter) ya sea explícita o implícitamente. Debido a que múltiples análisis de sensibilidad en su comportamiento muestran que el factor más influyente es la variación de la demanda, es indispensable contar con modelos lo más acertados posibles para poder estudiar metodologías de optimización de diseño de RIDAP (García, García-Bartual et al. 2004). En general, las metodologías tradicionales de diseño de RIDAP involucran cierto conocimiento empírico y algunos factores probabilísticos a manera de modelos de predicción de demanda. En (Acero 2009), el autor explica claramente el método británico, el método alemán, el método racional, de la raíz cuadrada y de Hunter, siendo el último a la fecha el más comúnmente utilizado. Existen además ciertas metodologías de diseño de redes en general que están basadas en modelos estocásticos de la demanda. En (Buchberger and Wu 1995), el autor propone el modelado de patrones de consumo como variables aleatorias. A partir de esta aproximación se ha desarrollado una línea de investigación que busca mejorar el desempeño de los modelos de demanda. En (García, García-Bartual et al. 2004), los autores describen la demanda mediante 9 parámetros y 5 funciones estadísticas.

En este trabajo de investigación se propone una nueva metodología que si bien sigue la estructura clásica de Hunter, hace uso de herramientas computacionales para simulación de RIDAP que le permiten prescindir de simplificaciones con respecto al modelo estocástico que determina el caudal máximo probable. Así mismo, hace uso de cadenas de Markov para calcular la probabilidad de aparición de cualquier configuración de los nudos de consumo en la red, y dado un nivel de confiabilidad del sistema, permite encontrar un diseño que cumple con las restricciones en cuanto a presiones mínimas de operación y satisfacción de la demanda. Consecuentemente, en este proyecto de investigación el modelo de demandas planteado sigue un proceso estocástico (Pulsos Rectangulares no Homogéneos de Poisson PRNHP) definido de manera similar que en los modelos más aceptados en la actualidad (Buchberger and Wu 1995; Buchberger and Wells 1996; García, García-Bartual et al. 2004);

y adicionalmente, se propone un modelo basado en cadenas de Markov que define los escenarios de demanda a los cuales puede ser sometida una RIDAP dado un nivel de servicio.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.

En la actualidad, las RIDAPs son redes a las que se conectan un alto número de aparatos de consumo de agua, cada uno de los cuales tiene un comportamiento diferente tanto hidráulicamente como respecto a la manera en que las personas lo utilizan. Además, con fenómenos como la conciencia ambiental de los usuarios, y el encarecimiento del costo del servicio, se puede esperar el desarrollo de más aparatos sanitarios (Para el resto de este documento, la palabra aparatos, se referirá a aparatos sanitarios tales como sanitarios, lavamanos, duchas, etc.) que seguramente tendrán un comportamiento diferente a los ya existentes. Teniendo en cuenta esto, las metodologías de diseño deben buscar la facilidad de acoplamiento de nuevos aparatos, y en general, nuevas tecnologías que se desarrollen para el sistema. Está es una de las más notables deficiencias de los métodos tradicionales de diseño, que hacen de esta tarea algo notablemente impreciso y subjetivo. Si además se adiciona la variabilidad en el comportamiento de los usuarios, por efectos como el clima, la tarifa del servicio de distribución de agua o las costumbres de diferentes culturas, se encuentra que estos métodos son aplicables en situaciones muy específicas y por lo tanto se hace necesaria una metodología que sea de fácil aplicación para cualquier contexto.

Haciendo uso de un estudio previo sobre patrones de demanda en RIDAPs, se presenta un modelo del comportamiento de los usuarios en las RIDAPs basado en cadenas de Markov. Para esto se definen los escenarios de una red como las posibles combinaciones de nudos ocupados y libres. Son representados por vectores binarios (1/0, demanda/ no demanda). Por medio de los escenarios se describe el espacio muestral de las posibles situaciones de servicio en los que se puede encontrar la red. Por ejemplo, para una red de 4 nudos se tienen $e = 2^k = 2^4 = 16$ posibles escenarios de consumo. Luego, se definen estados del sistema como grupos de escenarios que comparten el número de nudos ocupados y libres, sin importar la forma como se distribuyan en la red. En todo el espacio muestral existen $n + 1$ estados, donde el valor n es igual al número de nudos en la red.

Dado que el uso de los aparatos (nudos de consumo) sigue un proceso estocástico que puede ser descrito por el modelo de PRNHP, la secuencia de estados (es decir el número de aparatos ocupados en el tiempo) es también una variable aleatoria. Esta secuencia es una secuencia de Markov y es posible predecir su comportamiento en estado estacionario utilizando la teoría de cadenas de Markov. Este proceso aleatorio es estocásticamente estable; por lo tanto se tiene interés en la probabilidad estacionaria para 0, 1, 2, ... n aparatos encendidos simultáneamente. Es decir, dar respuesta a la pregunta ¿cuál es la probabilidad de que m aparatos de n estén ocupados simultáneamente? El modelo planteado para m aparatos ($m = 4$) puede observarse en la Figura 1, en donde los arcos que incrementan el número del estado están relacionados con la aparición de pulsos de consumo (parámetro $\bar{\lambda}$), mientras que los arcos que disminuyen el número del estado están relacionados con la duración de los pulsos de demanda (parámetro $\bar{\alpha}$), en donde los parámetros $\bar{\lambda}$, $\bar{\alpha}$ y μ son parte del modelo de PRNHP.

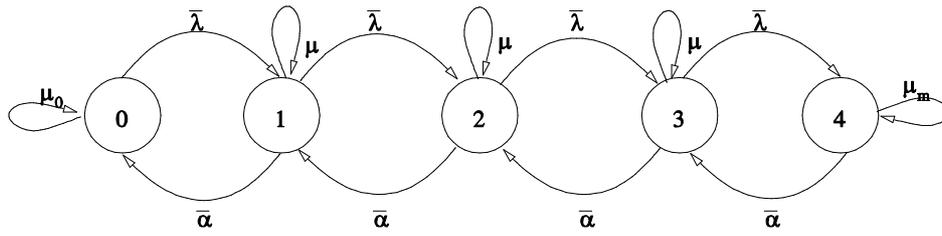


Figura 1. Cadena de Markov

Cada estado (escenario) tiene asociada una probabilidad de aparición en el tiempo (e.g, la probabilidad de que ningún aparato esté en uso es del 50%, y de que solo un aparato esté en uso es del 45%).

En la Figura 1 se puede observar un diagrama para una cadena de Markov en particular. En este grafo se pueden observar los elementos que constituyen una cadena, a saber, i) los estados como círculos enumerados de 0 a 4; ii) los arcos de transición, que unen los estados. Estos arcos están marcados con una variable que representa la probabilidad de que el sistema pase de un estado (desde donde sale el arco) a otro (hacia donde se dirige el arco). Dado que estas variables representan probabilidades, es claro que todas las probabilidades que salen de un estado deben sumar 1. De esta manera, para el ejemplo, en el estado cero se puede asegurar que $\bar{\lambda} + \mu_0 = 1$, y en el estado uno $\bar{\lambda} + \mu + \bar{\alpha} = 1$ y así sucesivamente. La probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado a_i en el instante n ($x_n = a_i$) se calcula como:

$$p[x_n = a_{i_n} | x_{n-1} = a_{i_{n-1}}, \dots, x_1 = a_{i_1}] = p[x_n = a_{i_n} | x_{n-1} = a_{i_{n-1}}], \quad [1]$$

que es una secuencia de Markov de tiempo discreto. La probabilidad de transición entre estados está determinada por:

$$p[x_n = a_i] = p_i(n) = \sum_j \pi_{ij}(n, s) p_j(s) \quad [2]$$

donde $p_i(n)$ es la probabilidad de que la cadena de Markov se encuentre en el estado i en el tiempo n . Por otra parte, la sumatoria sobre j representa la sumatoria de todos los pares estado arco que llevan a i . En consecuencia, $\pi_{ij}(n, s)$ es la probabilidad de transición entre el estado j al i en los instantes s y n , finalmente $p_j(s)$ es la probabilidad de que la cadena de Markov se encuentre en el estado j en el tiempo s . Así:

$$\pi_{ij}(n, s) = p[x_s = a_j | x_n = a_i] \quad [3]$$

Adicionalmente, como se explicó anteriormente, π_{ij} al representar probabilidades de transición desde i a j , l debe mantenerse a siguiente relación:

$$\sum_j \pi_{ij}(n, s) = 1, \quad [4]$$

Además,

$$\pi_{ij}(n, s) = \sum_r \pi_{ir}(n, n_2) \pi_{rj}(n_2, s) \quad [5]$$

Si el proceso x_n es homogéneo, las probabilidades de $\pi_{ij}(n, s)$ dependen únicamente de la diferencia $n - s$, es decir, dependen únicamente de $m = n - s$. Reescribiendo las ecuaciones para m (Papoulis, Pillai et al. 1965):

$$\pi_{ij}(m) = p[x_{n+m} = a_j | x_n = a_i] \quad [6]$$

$$\pi_{ij}(n + k) = \sum_r \pi_{ir}(k) \pi_{rj}(n), \text{ (Ecuación de Chapman Kolmogoroff)} \quad [7]$$

Reescribiendo la última ecuación de manera matricial se obtiene,

$$\Pi(n + k) = \Pi(k) \Pi(n) \quad [8]$$

Por definición la matriz de la primera transición es $\Pi(1) = \Pi$. Por lo tanto,

$$\Pi(n) = \Pi^n \quad [9]$$

Utilizando la notación matricial y la ecuación anterior, se reemplaza en la Ecuación [2]; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y se obtiene la ecuación en diferencias recursiva para el vector de $p_i(n)$, ó $P(n)$:

$$P[n] = P[n - k]\Pi^k = P[0]\Pi^n, \quad [10]$$

donde $P[n] = [p_1(n), p_2(n), p_3(n), \dots, p_m(n)]$. Si el proceso es estadísticamente estable (Papoulis, Pillai et al. 1965), después de muchos instantes de tiempo $n \rightarrow \infty$, $P[n]$ se hace independiente de n , es más si $P[1]$ es tal que $P[2] = P[1] = P$, entonces $P[n] = P$ para todo n . Si el sistema es estadísticamente estable el vector de estados en estado estacionario P es la solución del sistema de ecuaciones descrito por:

$$P\Pi = P \quad [11]$$

Es decir, P es un eigenvector de Π asociado con el eigenvalor $\lambda = 1$. Adicionalmente, si Π^n tiende a un límite cuando $n \rightarrow \infty$ entonces el proceso x_n es estadísticamente estable (asintóticamente). Para continuar con el modelado del sistema, es necesario encontrar las probabilidades de transición en función de los parámetros del modelo PRNHP. La aparición de los pulsos está relacionada con el incremento en el estado de la cadena de Markov (e.g., Figura 1) ó la probabilidad $\bar{\lambda}$; por otra parte, la disminución en el estado de la cadena de Markov está relacionado con la duración de los pulsos de consumo, es decir, que cada vez que un pulso de consumo termina, un aparato se libera, y el estado de la cadena de Markov cambia (e.g., $\bar{\alpha}$); este proceso es conocido como un birth-dead process en la teoría de colas. La evolución de las probabilidades para cada uno de los estados de la cadena de Markov de la Figura 1, es mostrada en la Figura 2.

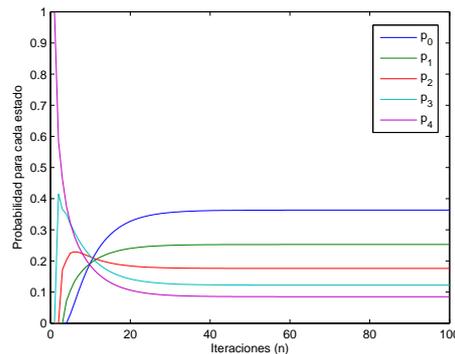


Figura 2. Evolución de la probabilidad de aparición de los estados

METODOLOGÍA DE DISEÑO

Una vez las probabilidades de los escenarios son calculadas se procede a diseñar la RIDAP para aquellos escenarios que acumulen la probabilidad de aparición para la confiabilidad seleccionada. Para propósitos de diseño, se seleccionó como parámetro de diseño el porcentaje de tiempo en el cuál el sistema opera correctamente, (e.g., en el 95% del tiempo se cumplen las restricciones hidráulicas), de esta manera solo interesan los estados (escenarios) que acumulen esa probabilidad de aparición (e.g., solamente los escenarios con cero y un aparatos en uso). Finalmente, se diseña exhaustivamente para los escenarios críticos que cumplan con la confiabilidad requerida (e.g., 95%).

Sin embargo la metodología de análisis descrita anteriormente presenta un reto importante a la hora de realizar los diseños de las redes. Este consiste en que, el número de soluciones para el modelo hidráulico necesarios para comprobar que el diseño una red cumpla con E aparatos encendidos es muy

alto. Por ejemplo, el número de posibles escenarios es del orden de $\binom{n}{E}$ (aproximadamente 5 millones) para una red con $N=25$ y $E=12$, y si se tiene en cuenta que en el procedimiento de diseño se requieren varias soluciones del modelo hidráulico, el número de ejecuciones hacen que el tiempo de diseño no sea aceptable para el usuario. Por lo tanto se presenta un método que divide la red en subredes más pequeñas para luego solucionarlas por separado y así disminuir el número de ejecuciones del motor hidráulico. El método se resume en los siguientes pasos:

1. Se define una línea de gradiente hidráulico LGH recta para todas las ramas de la red, en donde se cumpla con las restricciones de presión en el nudo más alejado.
2. Se calcula el estado de Markov que cumpla con la confiabilidad seleccionada para toda la red M_0 , ($i = 0$).
3. Se identifican las subredes que contienen menos de M_i nudos de consumo
4. Para estas subredes se calcula un nuevo estado de Markov M_i , ($i = i + 1$).
5. Para el peor de los casos (sumatoria de los M_i caudales requeridos en los nudos), revisar si es posible transportar ese caudal con el diámetro menor dada la LGH calculada en 1.
6. Se regresa al paso 3.
7. Se continua dividiendo las subredes hasta que todas las ramas cumplan con 5
8. Una vez la red es dividida en subredes, cada una de las subredes es analizada como un nudo de consumo con un modelo de demanda modificado; así cada nivel es diseñado para los casos críticos siguiendo la LGH descrita en 1.
9. Finalmente se comprueba todo el diseño con simulaciones en tiempo extendido, y con perfiles de demanda generados a partir del modelo de PRNHP.

• SUPOSICIONES NECESARIAS EN LA METODOLOGÍA

A fin de desarrollar la metodología de solución del problema anteriormente descrito, se hacen necesarias una serie de suposiciones que se muestran a continuación. La primera suposición necesaria es que las RIDAPs son redes abiertas. Es decir que, topológicamente, solo existe un camino para unir cualquier nudo de la red con la conexión de la misma al sistema de acueducto (embalse). Esta suposición permite prescindir de cálculos hidráulicos de la red durante la etapa de diseño. La segunda suposición es que la demanda de todo aparato conectado a la red puede ser modelada con pulsos de Poisson no homogéneos de duración aleatoria que siguen una Distribución Exponencial con media α en segundos, y de frecuencia tal, que la aparición de un evento sigue un proceso de Poisson con tasa $\lambda = f(t)$, donde $f(t)$ es una función del tiempo usualmente periódica con periodo igual a 1 día. La tercera suposición hecha es que, si bien la mayoría de aparatos conectados a una red interna tienen un comportamiento que se ajusta idealmente al de un emisor (Acero 2009), para el método presentado se modelan los estos como nudos de demanda independientes de la presión. Se especifica para cada nudo el caudal mínimo aceptable como el caudal demandado, y la presión correspondiente a dicho caudal como la presión mínima de acuerdo con la ecuación del emisor. Finalmente se supone que a lo largo de la red las propiedades del fluido no cambian (densidad y viscosidad), de manera que el diseño de redes de distribución de agua fría debe hacerse independiente del diseño de redes de distribución de agua caliente en caso de querer tener en cuenta los cambios en las propiedades del agua producidos por los cambios en la temperatura de la misma.

• PSEUDO ALGORITMO DEL MÉTODO DE DISEÑO

Para resolver el problema de diseño de RIDAP, teniendo en cuenta las suposiciones anteriormente mencionadas, así como los resultados del análisis del sistema y sus correspondientes consideraciones, se plantea el siguiente algoritmo de diseño:

1. Leer la red y calcular atributos de los tubos y los nudos: Dentro de este paso se espera que se reciba como dato de entrada la red con los parámetros hidráulicos de tubos y nudos así como los

parámetros de caracterización de la demanda de los nudos. Además se calculan datos como la ruta que toma el agua para llegar a cada nudo, así como la distancia de cada nudo al embalse, el número de nudos aguas abajo de cada tubo y sus tubos inmediatamente aguas abajo.

2. Asignar a cada nudo su LGH objetivo: Utilizando criterios de optimización de los costos constructivos (Wu, 1975; Ochoa, 2009), se asigna una LGH objetivo para cada nudo. De esta manera el diseño buscará que la red presente dichos valores cuando ocurra el (o los) escenario(s) de diseño. Dado que Wu (1975) encuentra que la diferencia entre la distribución óptima de presiones y la distribución de presiones utilizando líneas rectas no es considerable en términos de costos constructivos, se recomienda el uso de distribuciones de presiones rectas, dada su facilidad de cálculo.

3. Dividir la red en ramas de diseño:

- i. Ejecutar el algoritmo de cadenas de Markov para toda la red, conociendo para ello, el número de nudos de demanda, el promedio de los parámetros α de todos los nudos y el promedio de los parámetros λ de todos los nudos. Como resultado del proceso se obtiene el estado de Markov de diseño de la red E_{Red} .
- ii. Hacer una comprobación de diseño del tubo principal de la red suponiendo que tiene el diámetro mínimo, y que la energía disponible es la diferencia entre la LGH objetivo del nudo aguas arriba y del nudo aguas abajo. En caso de que el caudal que puede transportar ese tubo sea mayor que la suma de los caudales de los E_{Red} nudos con mayor caudal demandado aguas abajo del tubo ($Q_{Crítico}$), se puede suponer que el resto de tubos aguas abajo quedarán bien diseñados si se les asigna el diámetro mínimo, de manera que el diseño hidráulico finalizaría en este punto. Sin embargo si el caudal que puede transportar la tubería es inferior a $Q_{Crítico}$, entonces es necesario seguir con el paso iii.
- iii. Calcular J como un porcentaje FJ de la diferencia entre N y E_{Red} :

$$J = FJ \cdot (N - E_{Red}) \quad [15]$$

- iv. Dado que puede llegar a tardarse mucho el procedimiento de diseño evaluando los $\binom{N}{E_{Red}}$ posibles escenarios, se dejan en la rama de nivel 1, solo aquellos tubos con más de $(E_{Red} + J)$ nudos de demanda aguas abajo.
 - v. Para cada tubo que esté inmediatamente aguas abajo de la rama recién definida, volver a ejecutar el algoritmo de cadenas de Markov (paso i) utilizando el número de nudos de demanda aguas abajo del tubo, y el promedio de los parámetros α y λ de dichos nudos. Después realizar una comprobación de diseño (paso ii) para verificar si el tubo puede cumplir con los requerimientos de caudal aguas abajo en caso de ser diseñado con el diámetro mínimo.
 - vi. Repetir el paso v para los tubos inmediatamente aguas abajo de la rama recién definida, incrementando el nivel de la rama con cada iteración hecha, hasta que todos los tubos de la red cumplan alguna de las siguientes condiciones: a) Pertenecer a una rama de diseño, o b) Tener asignado el diámetro mínimo.
4. Diseñar cada rama de diseño:
 - i. Seleccionar todas las ramas con nivel máximo. Para cada rama de dicho nivel contar el número de nudos de demanda dentro de la rama N_{Rama} y ejecutar el algoritmo de cadenas de Markov para dicho número de nudos y con el promedio de los parámetros α y λ para ese conjunto de nudos. Como resultado se obtiene el estado de Markov de diseño para la rama analizada E_{Rama} .
 - ii. Generar cada posible escenario de E_{Rama} nudos encendidos en la rama a diseñar. Dado que la rama tiene N_{Rama} nudos, el total de posibles escenarios es $\binom{N_{Rama}}{E_{Rama}}$. Para cada

escenario posible, diseñar todos los tubos de la rama a partir de la diferencia de LGH objetivo entre el nudo aguas arriba y el nudo aguas abajo del tubo

- iii. Dado que en el paso anterior se generaron $\binom{N_{\text{Rama}}}{E_{\text{Rama}}}$ escenarios de demanda, se debe disponer de $\binom{N_{\text{Rama}}}{E_{\text{Rama}}}$ caudales transportados por el tubo padre de la rama en cuestión. Utilizando los anteriores datos se deben modificar los parámetros de demanda del nudo inmediatamente aguas arriba del tubo padre de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_{\text{Modificado}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{Rama}}} \alpha_i}{N_{\text{Rama}}} \quad [16]$$

$$\lambda_{\text{Modificado}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{Rama}}} \lambda_i}{N_{\text{Rama}}} \quad [17]$$

$$Q_{\text{Modificado Alto}} = \text{máx.} \left(Q_{\text{Nudo}}, P_{\text{PA}}(\text{Caudales}_{\text{Tubo Padre}}) \right) \quad [18]$$

$$Q_{\text{Modificado bajo}} = \text{mín.} \left(Q_{\text{Nudo}}, P_{\text{PB}}(\text{Caudales}_{\text{Tubo Padre}}) \right) \quad [19]$$

donde:

Q_{Nudo} : Caudal demandado por el aparato conectado al nudo en cuestión.

$P_A(B)$: Función que calcula el percentil A-avo de la lista B de caudales.

$\text{Caudales}_{\text{Tubo Padre}}$: Lista de los $\binom{N_{\text{Rama}}}{E_{\text{Rama}}}$ caudales transportados por el tubo padre de la rama.

$Q_{\text{Modificado Alto}}$: Caudal que demandará el nudo en cuestión cuando se modele como encendido.

$Q_{\text{Modificado Bajo}}$: Caudal que demandará el nudo en cuestión cuando se modele como apagado.

Con este paso se pretende resumir las demandas de la rama recién diseñada en dos demandas representativas ubicadas en el nudo aguas arriba de dicha rama.

- iv. Seleccionar todas las ramas de nivel anterior al nivel ya diseñado y repetir los pasos i, ii y iii
- v. Repetir el paso iv hasta que sea diseñada la rama de nivel 1. Exportar red.

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Dado que los métodos más utilizados hoy en día son variaciones del método de Hunter, a continuación se presenta una comparación cuantitativa de los resultados obtenidos con el método tradicional de Hunter y el método aquí propuesto. Esta comparación busca encontrar las diferencias en el desempeño hidráulico y en los costos constructivos de la red. A continuación se presentan los diseños obtenidos por ambas metodologías. La metodología de Hunter se puede resumir de la siguiente manera: Primero se calculan los caudales siguiendo las unidades de Hunter, donde se considera una disminución en el caudal a medida que el sistema aumenta en complejidad. Posteriormente, se calcula una Línea de Gradiente Hidráulico (LGH) recta desde el embalse hasta cada nudo de consumo de la red. Esta LGH se considera ideal, y con ésta es posible obtener las pérdidas totales ideales que tendría cada tubo perteneciente a la RIDAP. Una vez se tiene las pérdidas de las tuberías, es posible realizar el diseño tubo a tubo con todos los materiales disponibles y con el conjunto de diámetros comerciales que se

tengan. También es posible utilizar diámetros continuos para una solución tubo a tubo exacta. Particularmente se utiliza una presión mínima de 7 mca para el cálculo de la LGH ideal.

A continuación se presentan diferentes comparaciones entre los diseños generados por las metodologías. El primer criterio de comparación es el costo de construcción de cada sistema. Dados los diseños con diámetros continuos, se utiliza una función de costos de la siguiente forma:

$$C = \sum_{Tubos} K \cdot L_{Tubo} \cdot (D_{Tubo})^x, \quad [20]$$

donde: C es el costo constructivo calculado de la red, L_{Tubo} : Longitud del tubo analizado, D_{Tubo} : Diámetro del tubo analizado. K, x : Parámetros de la función de costo. La Ecuación [20] ha sido utilizada para estimar los costos constructivos de las RDAPs y por lo tanto se está suponiendo que los costos de las RIDAPs tienen un comportamiento similar. Los parámetros de la función de costos utilizados para la comparación, fueron $K = 0.015$ y $x = 1.46$ y (los diámetros de las tuberías en milímetros). A continuación se presenta una comparación de los valores encontrados para cada red:

Costo (USD)	
Diseño Hunter	Diseño Propuesto
\$73,109.68	\$60,056.33

Tabla 1. Comparación de costos constructivos para la red de ejemplo

En la Tabla 1 se puede ver que no existe una diferencia clara en los costos constructivos entre las dos metodologías, siendo más barato el diseño alcanzado por la metodología propuesta. Así, un costos altos corresponden a escenarios de demanda más exigentes que los utilizados por Hunter, para asegurar una probabilidad de falla igual o menor a la aceptable, mientras un costo más bajo puede corresponder a un escenario menos exigente que asegura una probabilidad de falla aceptable, o a un diseño que resulta minimizando costos por su uso de energía. Por otro lado es posible comparar los diámetros de cada tubería de la red, lo cual es equivalente a una comparar los caudales de diseño. Teniendo en cuenta que para ambas metodologías se ajustó una superficie de altura piezométrica objetivo igual. Respecto a esta última observación, cabe mencionar que el diseño tradicional de Hunter implementado en el ámbito profesional, difícilmente tiene en cuenta una superficie óptima de alturas piezométricas, y por lo tanto el diseño tradicional presentado en esta sección es un diseño basado en una metodología tradicional pero optimizado en su uso de energía y, por lo tanto en los costos constructivos. Es decir que los costos de las redes diseñadas con la metodología de Hunter, en el ámbito profesional resultarían mayores al no tener en cuenta ningún criterio de minimización de costos.

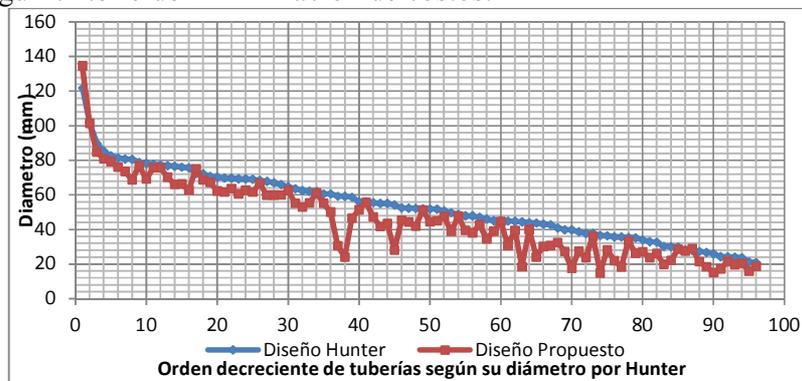


Figura 3. Comparación de diámetros obtenidos en los diseños realizados por Hunter y la metodología propuesta

Como se puede ver en la Figura 3, los diseños generados por ambas metodologías son relativamente similares, aunque presentan algunas diferencias que pueden implicar un comportamiento hidráulico considerablemente diferente. Por otro lado, las diferencias en algunas tuberías responden especialmente al método de agregación de caudales implementado por ambos métodos. Así, el método propuesto llega a un caudal acumulado para las tuberías más cercanas al embalse (punto de unión de la RIDAP con la RDAP), considerablemente mayor que el método de Hunter. Este déficit de capacidad de las tuberías principales, puede generar comportamientos no aceptables del sistema en condiciones de demanda alta, como presiones bajas en aparatos como duchas y grifos, o largos tiempos de recarga en el caso de las cisternas de los inodoros. Además diámetros subestimados para el caso de tuberías principales puede implicar la necesidad de diámetros más grandes aguas abajo de éstas, y si el número de tuberías y su longitud, son suficientes.

CONCLUSIONES

Se presenta una nueva metodología para el diseño de RIDAP utilizando cadenas de Markov para modelar las demandas. Usando un método de división de las redes se propone una metodología que permite aplicar este método a redes de tamaño real. Finalmente se presentan resultados comparativos con diseños obtenidos con métodos tradicionales.

Los resultados obtenidos con respecto al diseño muestran que es posible mejorar en gran medida los diseños obtenidos con los métodos tradicionales, ya que estos sobreestiman los caudales máximos probables. Además al utilizar el método de división por subredes, el tiempo requerido para diseñar RIDAPs es adecuado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero, M. F.** (2009). Revisión Crítica de los Métodos de Diseño de Abastecimiento de Agua Potable al Interior de edificaciones. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá, Universidad de los Andes. **Master in Science**.
- Acero, M. F.** (2009). Revisión Crítica de los Métodos de Diseño de Abastecimiento de Agua Potable al Interior de edificaciones. Bogotá, Universidad de los Andes.
- Buchberger, S. G. and G. J. Wells** (1996). "Intensity, Duration, and Frequency of Residential Water Demands." Journal of Water Resources Planning and Management **122**(1): 11-19.
- Buchberger, S. G. and L. Wu** (1995). "Model for Instantaneous Residential Water Demands." Journal of Hydraulic Engineering **121**(3): 232-246.
- Castro Ladino, N. Y., J. E. Garzón Garzón, et al.** (2006). "Aplicación de los métodos para el cálculo de caudales máximos probables instantáneos, en edificaciones de diferente tipo." Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua, João Pessoa (Brasil).
- García Sosa, J.** (2001). Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias. México D.F., Fernando Cuna Rojas.
- García, V. J., R. García-Bartual, et al.** (2004). "Stochastic Model to Evaluate Residential Water Demands." Journal of Water Resources Planning and Management **130**(5): 386-394.
- Hunter, R.** (1940). "Methods of Estimating Loads in Plumbing Systems." Building Materials and Structures National Bureau of Standards.
- Melguizo, S.** (2002). Fundamentos de Hidráulica e Instalaciones de Abasto en Edificaciones.
- Papoulis, A., S. U. Pillai, et al.** (1965). Probability, random variables, and stochastic processes, McGraw-hill New York.
- Roca Suárez, M. and J. Carratalá Fuentes** Manual de fontanería. España, CA.