

CMN 2017

Congress on Numerical Methods in Engineering

July 3 - 5, Valencia, Spain

Edited by: Irene Arias, Jesús María Blanco, Stephane Clain, Paulo Flores,
Paulo Lourenço, Juan José Ródenas and Manuel Tur



Congress on Numerical Methods in Engineering

CMN 2017

**July 3 - 5
Valencia, Spain**

EL CAUDAL MÁXIMO TEÓRICO EN REDES Y SU RELACIÓN CON EL ÍNDICE DE RESILIENCIA

Carlos Martins¹, Amilkar Ilaya-Ayza², Enrique Campbell² y Joaquín Izquierdo¹

1: FluIng-IMM
Universitat Politècnica de Valencia
Camino de Vera s/n, Edif. 5C, 46022 Valencia
Email: carlos.martins.a@gmail.com
e-mail: carlos.martins.a@gmail.com, jizquier@upv.es web: <https://fluing.upv.es/>

2: Facultad Nacional de Ingeniería,
Universidad Técnica de Oruro,
Ciudad universitaria s/n, Oruro, Bolivia
e-mail: amilkar.ilaya@uto.edu.bo

3: Berliner Wasserbetriebe,
10864 Berlin, Amtsgericht Charlottenburg, HRA 30951 Germany
e-mail: Enrique.Campbellgonzales@bwb.de

Palabras clave: Capacidad de red, índice de resiliencia, caudal máximo teórico

Resumen *A pesar de existir diversos indicadores en el funcionamiento de los sistemas de abastecimiento de agua potable, ninguno especifica de forma explícita cuál es la capacidad hidráulica de las redes de distribución. El caudal máximo teórico se define como el gasto máximo que puede aportar una red garantizando las presiones mínimas de servicio en los nodos de consumo más desfavorables. En este trabajo, se presenta su forma práctica de obtención para redes existentes y se analiza la aplicación de éste como indicador de la capacidad de las redes de distribución, además de su comparación con respecto al Índice de Resiliencia, otro indicador indirecto del funcionamiento de las redes de distribución de agua potable. La metodología aplicada consiste en obtener y comparar los indicadores en tres redes de prueba obtenidas a través de la literatura. Los resultados obtenidos demuestran que el caudal máximo teórico es un buen indicador de la capacidad máxima de funcionamiento de las redes de abastecimiento de agua existentes.*

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de abastecimiento de agua son unas de las infraestructuras más importantes y costosas de las ciudades, a la vez permiten mejorar la calidad de vida de sus habitantes; sin embargo, a pesar de esta importancia, son pocos los indicadores que permiten cuantificar el grado de funcionamiento de estos sistemas. Los ingenieros y administradores de los sistemas de abastecimiento de agua, requieren de indicadores fiables que les permitan hacer evaluaciones y pronósticos en base a los retos que enfrentan, como incrementos en la población, disminución de la disponibilidad de agua en las fuentes e inequidad en el suministro, por lo que, para sobrellevar estos cambios, es necesario contar con indicadores fiables que permitan lograr los objetivos en cuanto al suministro continuo y eficiente [1].

Los indicadores deben ser usados para evaluar el estado actual de los sistemas de abastecimiento de agua y, a su vez, investigar escenarios futuros en función de satisfacer las necesidades, tratando siempre de cumplir con las presiones de servicio mínimas necesarias y garantizando el caudal en los puntos de suministro. Asimismo, los indicadores deberán, en la medida de lo posible, ser fácilmente cuantificables, compactos, compresibles, predictivos, y estar basados en la información previa del funcionamiento de los sistemas, además de ser fáciles de entender, verificables y confiables.

Uno de los indicadores más usados y extendidos es el Índice de Resiliencia, presentado por Todini [2], el cual es una medida de la confiabilidad de la red, y está definido como la capacidad de la red para proporcionar más potencia de la requerida en cada nodo con el fin de tener un superávit suficiente para ser disipado internamente en caso de que se presenten eventualidades que afecten el comportamiento de esta [3]. Este índice varía entre 0 y 1, donde un valor alto significa alta resiliencia, lo que significa mayor capacidad de la red para adaptarse a las eventualidades en las condiciones que se puedan presentar en la red [4].

Por otro lado, Ilaya-Ayza [5], presentó de forma práctica una medida de capacidad de las redes, denominada Caudal Máximo Teórico. Esta medida, basada, a su vez, en la curva de consigna de la red [6], trata de ofrecer una medida cuantitativa de caudal máximo que puede ofrecer una red de distribución existente, garantizando la presión mínima de servicio en todos los nodos de las red.

En este trabajo se presentará una comparación entre el Índice de Resiliencia y el Caudal Máximo Teórico; además, se intentará verificar la existencia de una correlación, tratando de validar este último indicador como un valor de referencia a buscar en las redes, para predecir su comportamiento y ayudar en la administración de las mismas.

2. METODOLOGÍA

La metodología planteada en el presente artículo se basó en la cuantificación de los dos índices anteriormente planteados a tres redes de prueba de distintos tamaños obtenidas a través de la literatura, siendo estas redes, la red de prueba usada por Ilaya en sus estudios [7], la red de existente de Apulia [8] y la red existente R-9 [9].

En cuanto a la forma de obtención de los índices, el Índice de Resiliencia se obtiene de su ecuación básica, que consiste de hacer una evaluación entre la energía disipada para satisfacer la demanda versus la máxima energía a ser disipada para satisfacer la demanda y la presión en

todos los nodos, según es mostrado en la ecuación 1 [2].

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^n q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^k Q_k H_k - \sum_{i=1}^n q_i^* h_i^*} \quad (1)$$

Por otro lado, el caudal máximo teórico, se obtiene a partir de la curva de consigna y esta, a su vez, se obtiene, para cada presión mínima de servicio requerida en la red. Para el cálculo de dicha curva, se requiere de un modelo fiable de la red, con la finalidad de obtener para cada nodo de la red la altura de la fuente de suministro y, de esta forma, garantizar el caudal demandado y la presión mínima de servicio [7].

La obtención de la curva de consigna se realiza de la siguiente forma: en primer lugar se fija una presión mínima de servicio deseada; posteriormente se fija un estado de carga en los nodos y se modela la red, obteniéndose de esta forma los valores de presión para cada uno de los puntos de la red. La altura de cabecera requerida para cumplir con la presión mínima se determinará mediante la diferencia entre la cota real en la fuente y la presión real en el nodo menos la presión mínima requerida, según se muestra en la ecuación 2.

$$\text{Altura de Cabecera}_{\text{nodo}} = \text{Cota de Fuente} - (\text{Presión}_{\text{nodo}} - \text{Presión mínima requerida}) \quad (2)$$

La altura de cabecera para el estado de carga será el mayor valor obtenido de todos los nodos, ya que, de esta forma, al cumplir la presión mínima para el punto más desfavorable, se cumple para todos los demás nodos. Ahora bien, si se generan varios estados de carga manteniendo una misma presión mínima de servicio, y se repite el proceso anteriormente descrito se podrá hallar, entonces, la curva de consigna o curva de comportamiento del sistema. La intersección de esta curva con la altura real de la fuente de suministro permite calcular el caudal máximo teórico con que puede trabajar la red, tal como se muestra en la Figura 1.

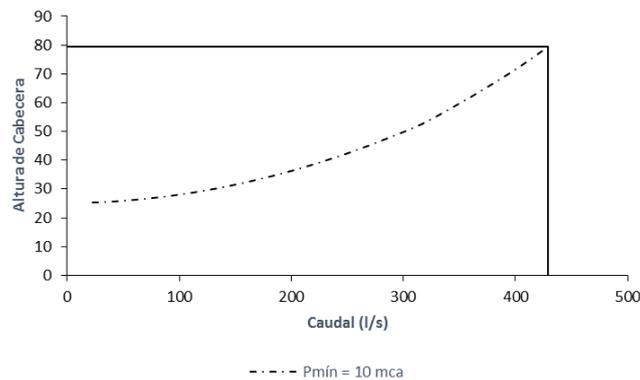


Figura 1. Curva de consigna red de Ilaya

Las redes de prueba se modelaron bajo análisis dependiente de la demanda DDA (Demand-Driven Analysis) con la ayuda de Epanet 2.0 [10], y bajo análisis dependiente de la presión PDD (Pressure-Driven Demand) con el software Epanet 2.0 Emitter [11]. Cada una de las redes de prueba se modeló para distintos valores de presión mínima de servicio, con la finalidad de hallar el caudal máximo según la metodología anteriormente descrita, así como el índice de resiliencia; la finalidad fue verificar el comportamiento de estos indicadores y la existencia de interrelaciones.

La red de prueba de Ilaya (ver Figura 2) está constituida por cuatro mallas y nueve nodos de consumo, está alimentada por un embalse, el cual tiene una altura total de 80 m., y todas las tuberías tienen una rugosidad de $\epsilon = 0.10$ mm; las características de los nudos y las tuberías se muestran en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

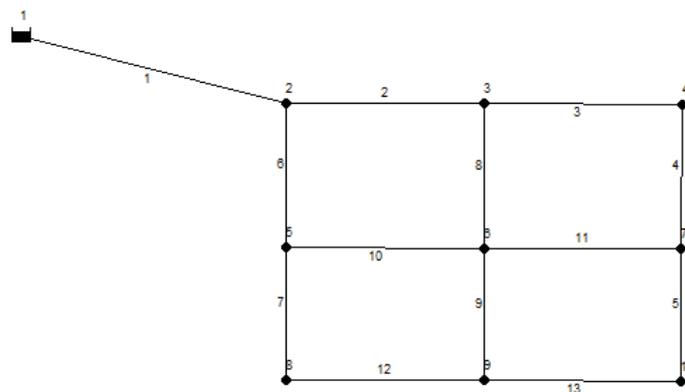


Figura 2. Red de prueba de Ilaya

Nodo	Cota (m)	Demanda (l/s)
1	80	-
2	15	25
3	15	32
4	8	30
5	0	25
6	10	25
7	5	25
8	7	21.5
9	3	22.5
10	0	20

Tabla 1. Nudos de la Red de prueba de Ilaya

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)
1	432	300
2	220	300
3	250	200
4	210	200
5	189	150
6	203	200
7	188	200
8	205	200
9	195	150
10	300	250
11	320	250
12	201	200
13	200	150

Tabla 2. Tuberías de la Red de prueba de Ilaya

La red de Apulia (ver Figura 3) está constituida por once mallas, veintitres nodos de consumo y treinta y cuatro tuberías. Está alimentada por un embalse, el cual tiene una altura total de 36.4 m, la rugosidad de las tuberías varía entre $CHW = 112$ y $CHW = 138$; asimismo las características de los nudos y las tuberías se muestran en las Tablas 3 y 4, respectivamente.

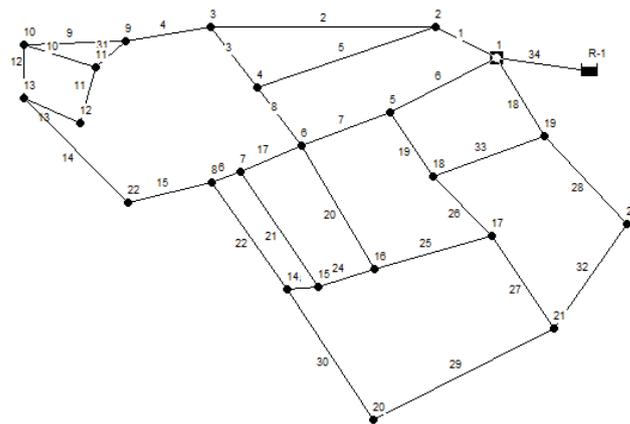


Figura 3. Red de Apulia

Nodo	Cota (m)	Demanda (l/s)
1	6.4	10.863
2	7	17.034
3	6	14.947
4	8.4	14.280
5	7.4	10.133
6	9	15.350
7	9.1	9.114
8	9.5	10.510
9	8.4	12.182
10	10.5	14.579
11	9.6	9.007
12	11.7	7.575
13	12.3	15.200
14	10.6	13.550
15	10.1	9.226
16	9.5	11.200
17	10.2	11.469
18	9.6	10.818
19	9.1	14.675
20	13.9	13.318
21	11.1	14.631
22	11.4	12.012
23	10	10.326
R-1	36.4	

Tabla 3. Nudos de la Red de Apulia

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)
1	348.5	327
2	955.7	290
3	483	100
4	400.7	290
5	791.9	100
6	404.4	368
7	390.6	327
8	482.3	100
9	934.4	100
10	431.3	184
11	513.1	100
12	428.4	184
13	419	100
14	1023.1	100
15	455.1	164
16	182.6	290
17	221.3	290
18	583.9	164
19	452	229
20	794.7	100
21	717.7	100
22	655.6	258

Tabla 4. Tuberías de la Red de Apulia

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)
23	165.5	100
24	252.1	100
25	331.5	100
26	500	204
27	579.9	164
28	842.8	100
29	792.6	100
30	846.3	184
31	164	258
32	427.9	100
33	379.2	100
34	158.2	368

Tabla 4. Continuación Tuberías de la Red de Apulia

La red R-9 (ver Figura 4), ubicada en la ciudad de Joao Pessoa (Brasil), está constituida por cincuenta y tres nodos de consumo y setenta y dos tuberías; además, está alimentada por un embalse, el cual tiene una altura total de 80 m; las tuberías tienen una rugosidad que varía de $\epsilon = 0.10$ mm a $\epsilon = 0.01$ mm. Los archivos con los datos de esta red son de acceso público y puede descargarse desde <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/benchmarks.html>.

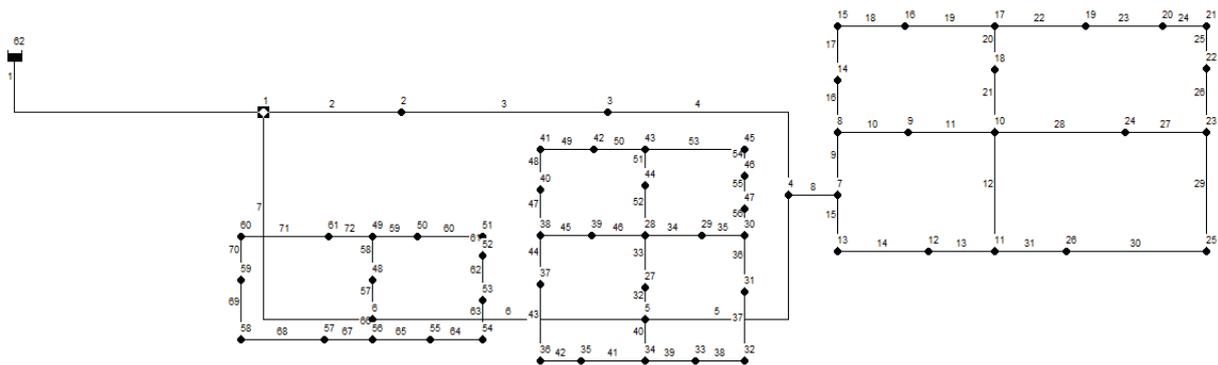


Figura 4. Red R-9

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La primera red en la cual se verificó el comportamiento de los indicadores fue la red de prueba de Ilaya; para ello se elaboraron curvas de consigna para valores de presión mínima de servicio de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 mca, para así obtener todo el espectro posible de operación de dicha red, obteniéndose la siguiente información:

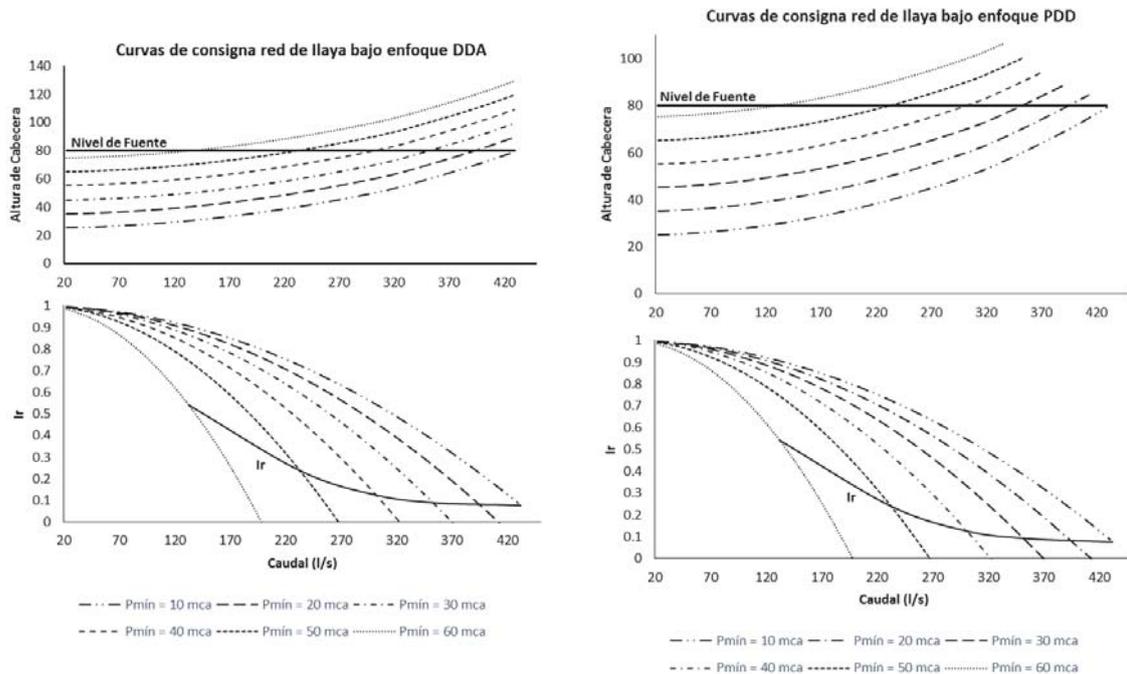


Figura 5. Grupo de curvas de consigna red de Ilaya

En primer lugar, se puede apreciar que para ambos enfoques el punto de intersección entre el nivel real de la fuente y las curvas de consigna representa al caudal máximo teórico que puede aportar la red. Partiendo de este punto, podemos decir entonces que a menor presión mínima de servicio el caudal máximo teórico que puede aportar la red es mayor. Asimismo, si nos desplazamos del punto de intersección antes mencionado hacia la gráfica inferior, podremos obtener el índice de resiliencia con el que trabaja la red para dicho caudal máximo teórico, observando de esta forma el comportamiento o variabilidad del índice de resiliencia con el caudal máximo teórico. Es decir, apreciamos que, para ambos enfoques, a medida que el caudal máximo teórico se incrementa, se reduce el índice de resiliencia con el que funcionará la red. Si bien las curvas de Caudal vs Altura de Cabecera cambian un poco en los enfoques DDA y PDD, se puede apreciar que el comportamiento del índice de resiliencia para todas las presiones mínimas de servicio evaluadas es muy similar tal como se puede apreciar en la Tabla 5 y la Figura 6. De hecho, en la Figura 6 se superponen las curvas del comportamiento del índice de resiliencia para las diversas presiones de servicio.

Enfoque	P _{mín}	Caudal Máx Teórico (l/s)	Ir
DDA	10	431.96	0.08
	20	394.26	0.08
	30	352.59	0.09
	40	301.46	0.12
	50	232.90	0.24
	60	132.38	0.54
PDD	10	431.97	0.08
	20	394.50	0.08
	30	352.44	0.09
	40	301.89	0.12
	50	232.65	0.24
	60	132.37	0.54

Tabla 5. Resultados Red Ilaya

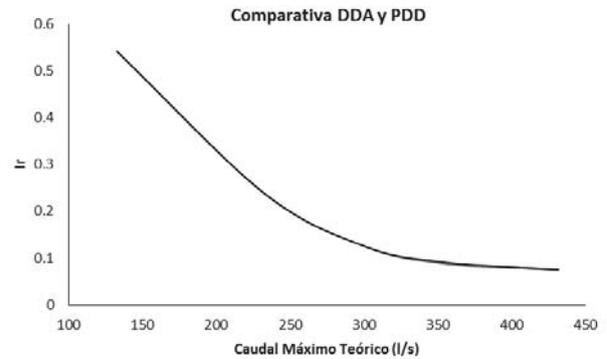


Figura 6. Comparativa Ir de DDA y PDD

En cuanto a la segunda red de prueba, es la red de Apulia. Esta es una red real ubicada en Italia y la cual ha sido usada con fines de optimización en procesos de sectorización. Para esta red sólo se realizaron modelaciones con presiones de servicio de 10, 20 y 30 mca, esto debido a que la altura real de la fuente es muy baja. En cuanto a los resultados obtenidos, se puede apreciar en la Figura 7, que son muy similares en comportamiento a los obtenidos en la red de Ilaya, constatándose que el índice de resiliencia disminuye con presiones menores de servicio. Igualmente puede constatarse en la Figura 8, como el comportamiento de este índice no varía en gran medida, superponiendo prácticamente las gráficas.

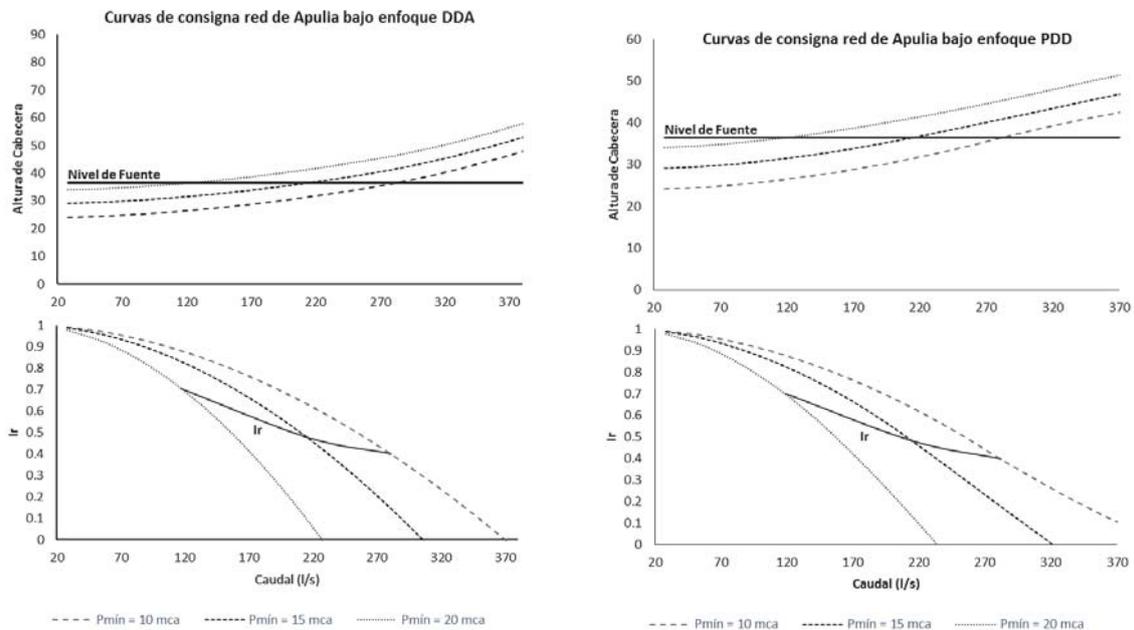


Figura 7. Grupo de curvas de consigna red de Apulia

Enfoque	Pmín	Caudal Máx Teórico (l/s)	Ir
DDA	10	280.65	0.40
	15	215.42	0.48
	20	116.78	0.71
PDD	10	282.32	0.40
	15	214.16	0.48
	20	118.67	0.70

Tabla 7. Resultados Red Apulia

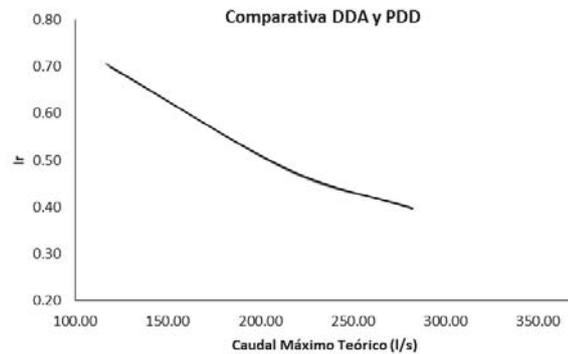


Figura 8. Comparativa Ir de DDA y PDD

En cuanto a la última red de prueba, la red R-9 la cual es de mayor tamaño, se realizaron modelaciones para presiones mínimas de servicio de 10, 20, 30 y 40 mca., en las cuales vuelve a repetirse el comportamiento del índice de resiliencia con el caudal máximo teórico. Pero en este caso se ve una variación pequeña en algunos puntos de la comparativa entre el enfoque DDA y PDD, donde se nota que bajo este último tipo de modelación la red podría aportar un poco más de gasto en los nodos, ya que al ser el caudal dependiente de la presión las curvas son un poco más horizontales, generando que la intersección de esta con el nivel de la fuente genere más de caudal que las modelaciones bajo DDA.

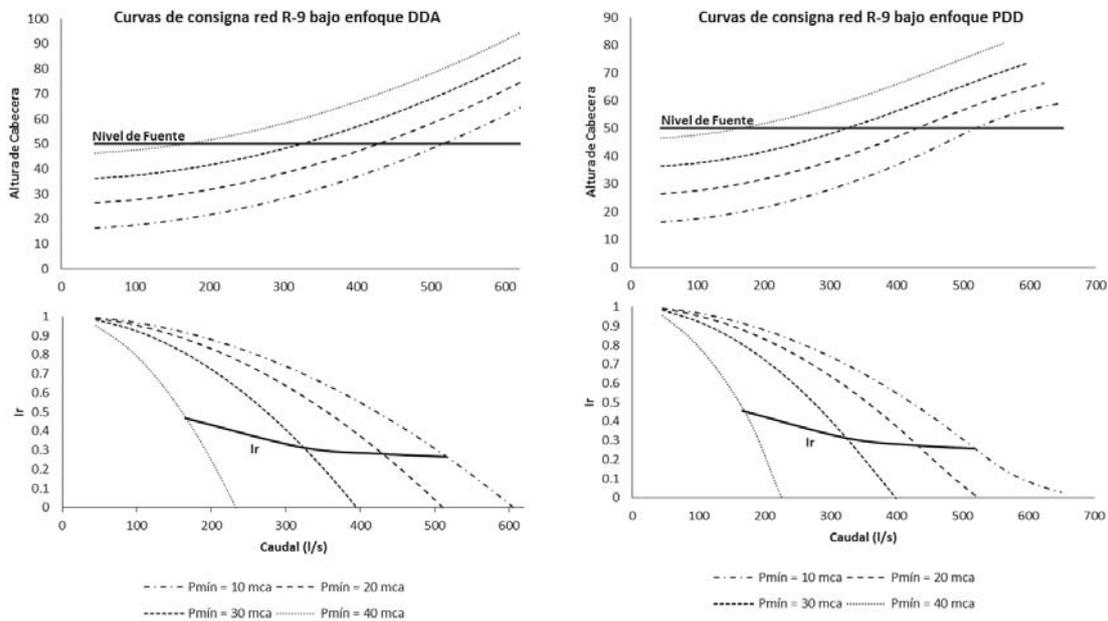


Figura 9. Grupo de curvas de consigna red R-9

Enfoque	Pmín	Caudal Máx Teórico (l/s)	Ir
DDA	10	515.73	0.27
	20	429.78	0.28
	30	323.73	0.31
	40	165.76	0.47
PDD	10	518.03	0.26
	20	431.43	0.28
	30	324.29	0.31
	40	166.13	0.46

Tabla 8. Resultados Red R-9

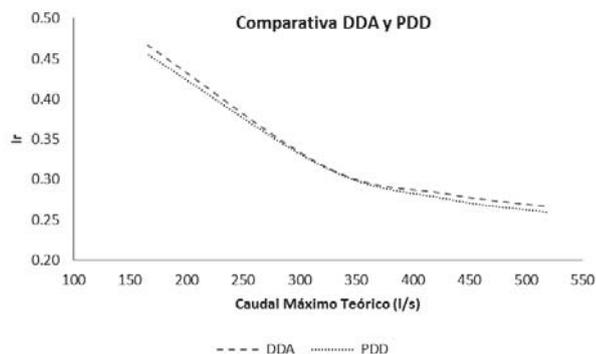


Figura 10. Comparativa Ir de DDA y PDD

4. CONCLUSIONES

Existe una relación clara entre el índice de resiliencia y el caudal máximo teórico: se pudo verificar que, a medida que este último incrementa, el valor de la resiliencia disminuye, significando esto que la red tiene menos posibilidades de sobreponerse a eventualidades que pudieran afectar su funcionamiento. Asimismo, esto se cumple para cualquier presión de funcionamiento mínima impuesta, ya que el desarrollo de las curvas se comporta de forma idéntica. Todo esto es debido a que el incremento de la capacidad de la red está asociado con un incremento del gasto, que, a su vez, incide en una disminución de las presiones y, por ende, en una disminución del índice de resiliencia.

Las modelaciones bajo los enfoques DDA y PDD, si bien difieren por muy poco, permiten conocer mejor cómo es el comportamiento real de la red, por lo que se recomienda para este tipo de análisis realizarlo bajo un esquema PDD.

La utilización conjunta de ambos indicadores pudiese permitir mejorar los planos de expansión de las redes, ya que, a la vez de aumentar su operabilidad a través del índice de resiliencia, podremos mejorar su capacidad con la evaluación del caudal máximo teórico.

REFERENCIAS

- [1] A. Bagheri, A. Asgary, J. Levy, and M. Rafieian, “A performance index for assessing urban water systems: A fuzzy inference approach” *J. AWWA* Vol. 98, no. 11, pp. 84–92, (2006).
- [2] E. Todini, “Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach” *Urban Water* Vol. 2, no. 2, pp. 115–122, (2000).
- [3] R. Dziedzic and B. W. Karney, “Performance Index for Water Distribution Networks under Multiple Loading Conditions” *J. Water Resour. Plan. Manag.* Vol. 142, no. 1, p. 4015040, (2016).

- [4] EPA, *System Measures of Water Distribution Resilience*. Cincinnati, OH: National Homeland Security Research Center, (2015).
- [5] A. Ilaya-Ayza, “Propuesta para la transición de un sistema con suministro de agua intermitente a suministro continuo” Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Valencia, España, (2016).
- [6] F. Martínez, R. Vidal, and M. Andrés Folgado, “La regulación de los sistema hidráulicos,” en *Ingeniería Hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua. Volumen II*, 3rd ed., E. Cabrera, V. Espert, J. García-Serra, and F. Martinez, Eds. Valencia: ITA-Universidad Politècnica de Valencia, (2009).
- [7] A. E. Ilaya-Ayza, J. Izquierdo, R. Pérez-García, C. Martins, and D. Ayala-Cabrera, “La curva de consigna, una herramienta útil para la esqueletización , sectorización y determinación de la capacidad de una red de suministro de agua” *Acta Univ. Multidiscip. Sci. J.* Vol. 26, no. 26(NE-3), pp. 49–58, (2016).
- [8] O. Giustolisi, D. Savic, and Z. Kapelan, “Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks” *J. Hydraul. Eng.* Vol. 134, no. 5, pp. 626–635, (2008).
- [9] K. Formiga, “Otimização Multiobjetivo De Projetos De Redes” Tesis Doctoral, Universidade de São Paulo, (2005).
- [10] L. A. Rossman, “Epanet2 user manual.” U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, (2000).
- [11] A. Pathirana, “EPANET2 Desktop Application for Pressure Driven Demand Modeling” *Water Distrib. Syst. Anal.* Vol. 41203, no. 2005, pp. 65–74, (2010).