Aporte Santiaguino 8, 2015: 347-355
ISSN 2070-836X

Analisis de fourier aplicado al flujo de los vientos en la zona ecuatorial

Fourier analysis applied to stream winds in the equatorial zone

ELMER LLUEN CUMPA[1]

RESUMEN

El objetivo del tema "Análisis de Fourier aplicado al flujo de los vientos en la zona ecuatorial" es reflexionar sobre la interacción de las ciencias básicas y la meteorología para explicar y resolver temas de coyuntura, tales como el Fenómeno El niño que afecta a la región y los fenómenos naturales cada vez más frecuentes y más intensos en el planeta. Tal comportamiento meteorológico, se basa en la ley física experimental: "Si diferentes partes de un cuerpo tienen temperaturas diferentes, entonces, en el cuerpo aparecen unos flujos de calor, dirigidos desde las partes calientes hacia las frías" [2]. En este trabajo, hemos iniciado analizando las series de Fourier y la data para una fecha específica que nos proporcionó el Instituto del mar del Perú (IMARPE), institución que monitoreó continuamente la velocidad de los vientos y temperatura superficial del mar, para luego aplicar el análisis de Fourier al flujo de los vientos en la zona ecuatorial. Concluimos que el flujo de los vientos es modelado por la onda cosenoidal y observamos tal onda en el programa Matlab.

Palabras clave: análisis de Fourier; meteorología; Imarpe; vientos; zona ecuatorial.

ABSTRACT

The objective of issue "Fourier analysis applied to stream winds in the equatorial zone" is reflect on the interaction the basic sciences and meteorology for explaining and resolve issues short-term, such as the phenomenon El niño affecting the region and natural phenomena increasingly frequent and more intense on the planet. Such weather behavior, It is based on the experimental physical law: "If different parts of a body have different temperatures, then, in the body shows a heat fluxes, directed from the hot to the cold parts" [2]. In this work, we have started analyzing the Fourier series and the data for a given date granted by Instituto del Mar del Perú (IMARPE), institution that monitors continuously the wind speed and sea surface temperature, then apply Fourier analysis the flow of the winds in the equatorial zone. We conclude that, stream winds It is modeled by the cosine wave and wave observe such wave in the program Matlab.

Keywords: Fourier analysis; meteorology; IMARPE; winds; equatorial zone.

1 Universidad Nacional "Pedro Ruiz Gallo"

INTRODUCCIÓN

Hace aproximadamente 200 años (1827), el físico y matemático francés Joseph Fourier fue el primer científico en advertir en una publicación sobre el futuro calentamiento del planeta debido a la presencia de los gases efecto invernadero en la atmósfera [1]. Tal libro se tituló Theorie analitique de la chaleur (*Teoría analítica del calor*) en donde el problema a resolver era ¿Cómo se trasmite la temperatura en un sólido desde un punto A hacia un punto B? Para aproximar tales ondas empleó las funciones trigonométricas, funciones que tienen características especiales tales como su periodicidad. Las series de Fourier tienen actualmente múltiples aplicaciones en la física (meteorología), mecánica (dinámica de fluidos), economía (volatilidad de los precios), matemática (ecuación de la onda, del calor), electrónica (señal satelital), entre otros. Gracias a la visión de Fourier hoy tenemos grandes avances en la ciencia, pero sobre todo para mitigar el cambio climático.

Figura 1. La desglaciación, consecuencia del cambio climático

En el presente trabajo, presentamos la data de la velocidad de los vientos en la zona ecuatorial gracias al Instituto del mar del Perú (IMARPE) y formulamos la ecuación cosenoidal así como sus respectivos gráficos tanto en excel como en matlab.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Instituto del Mar del Perú (IMARPE), monitorea continuamente el flujo y la velocidad de los vientos en la zona ecuatorial, específicamente en la longitud promedio del Ecuador desde los 160ºE a 80ºW y latitud desde los 5ºN hasta 5ºS. Tal

monitoreo es importante porque la dinámica de dichas ondas está asociada al fenómeno El niño y a la prevención de fenómenos meteorológicos [4].
La ubicación de la zona ecuatorial, se aprecia en la figura 2.

Figura 2. Zona ecuatorial. Latitud: 5º N a 5º S, Longitud: 120º E (Este del Ecuador) a 80º W (Oeste cerca a Perú)

A continuación, se muestra los datos de la longitud en el Ecuador (variable espacial) y la velocidad del viento (variable de desplazamiento). El signo negativo indica la velocidad del viento en la dirección Oeste y, el signo positivo es la dirección del viento hacia el Este (también llamadas ondas Kelvin), tabla 1.

Tabla 1. Velocidad de los vientos en la zona ecuatorial para el 15 de Junio de 2015, a las 18 h.

120 E	121 E	122 E	123 E	124 E	125 E	126 E	127 E	128 E	129 E	130 E	131 E	132 E	133 E
1.14	1.06	-0.67	-0.59	-0.44	0.24	1.07	1.2	2.22	2.22	2.6	3.15	4.38	4.07
134 E	135 E	136 E	137 E	138 E	139 E	140 E	141 E	142 E	143 E	144 E	145 E	146 E	147 E
2.85	4.39	3.63	4.24	3.81	3.23	3.46	3.67	3.49	3.84	4.02	4.37	4.25	4.61

148 E	149 E	150 E	151 E	152 E	153 E	154 E	155 E	156 E	157 E	158 E	159 E	160 E	161 E
5.09	6.18	6.92	8.24	7.84	8.86	9.66	10.42	10.69	10.78	11.06	10.81	10.32	8.05
162 E	163 E	164 E	165 E	166 E	167 E	168 E	169 E	170 E	171 E	172 E	173 E	174 E	175 E
7.62	6.4	5.96	5.27	4.41	3.62	3.19	2.3	1.11	0.1	-0.74	-1.53	-2.17	-2.95
176 E	177 E	178 E	179 E	180	179 W	178 W	177 W	176 W	175 W	174 W	173 W	172 W	171 W
-3.59	-3.86	-4.23	-4.11	-3.64	-3.72	-4.59	-5.23	-5.83	-6.44	-5.57	-4	-4	-3.57

170 W	169 W	168 W	167 W	166 W	165 W	164 W	163 W	162 W	161 W	160 W	159 W	158 W	157 W
-3.31	-2.74	-2.59	-2.71	-2.61	-3	-2.85	-2.76	-2.73	-2.29	-2.27	-2.04	-2.44	-2.14
156 W	155 W	154 W	153 W	152 W	151 W	150 W	149 W	148 W	147 W	146 W	145 W	144 W	143 W
-2.96	-3.12	-4.07	-4.47	-4.72	-5.22	-5.16	-5.46	-5.27	-5.08	-4.91	-4.95	-4.84	-4.56
142 W	141 W	140 W	139 W	138 W	137 W	136 W	135 W	134 W	133 W	132 W	131 W	130 W	129 W
-4.6	-4.68	-5.03	-5.33	-5.42	-5.4	-5.14	-4.89	-4.2	-3.84	-3.83	-5.24	-5.79	-5.77

128 W	127 W	126 W	125 W	124 W	123 W	122 W	121 W	120 W	119 W	118 W	117 W	116 W	115 W
-6.12	-6.38	-6.78	-7.05	-6.9	-6.83	-6.83	-6.65	-6.67	-6.7	-6.47	-6.42	-6.18	-5.9

114 W - 6.03	113 W -5.7	112 W - 5.41	111 W - 5.44	110 W - 5.11	109 W - 5.06	108 W - 5.05	107 W - 5.02	106 W -5.2	105 W - 4.89	104 W - 5.11	103 W - 4.87	102 W - 4.57	101 W - 4.51

100 W - 4.63	99 W - 4.59	98 W - 4.54	97 W - 4.62	96 W - 4.08	95w -3.9	94 W - 3.41	93 W -2.8	92 W - 2.43	91 W - 2.34	90 W - 2.03	89 W -1.7	88 W - 1.47	87 W - 1.23

86 W - 0.75	85 W - 0.52	84 W 0.01	83 W 0.57	82 W 1.13	81 W 2.46	80 W 1.77

Fuente: Instituto del mar del Perú (IMARPE)

La circulación general de los vientos se aprecia en la figura 3.

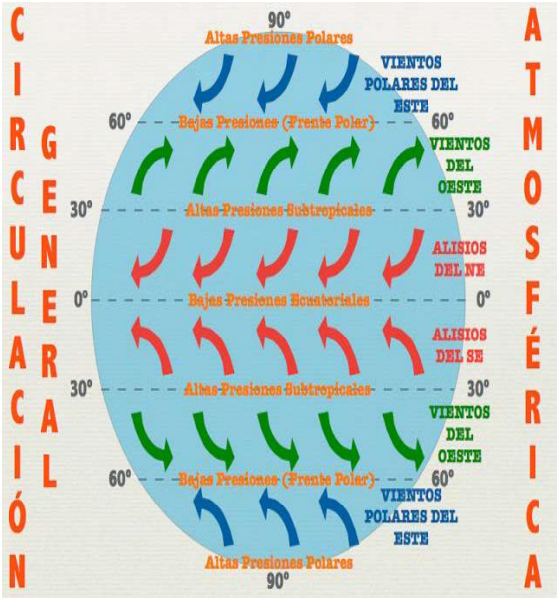


Figura 3. Circulación general de los vientos

Este fenómeno físico es modelado por la onda cosenoidal,

$$\boldsymbol{y(x,t) = Acos(k_x x + wt)} \quad \textbf{(I)}$$

Donde A es la amplitud (m)

k_x es el número angular de onda (rad/m)
w es la frecuencia angular (rad/s)
$y(x,t)$ es el desplazamiento
Para un instante $t = 0$, la ecuación (I) queda expresada por:

$$\boldsymbol{y(x,0) = Acos(k_x x)} \text{ ..... } \textbf{(II)}$$

Condiciones de contorno:
Consideremos como distancia inicial la longitud en el ecuador 160ºE y su correspondiente velocidad inicial 10.32 m/s (signo positivo indica hacia el Este, signo positivo del eje x).
La distancia final será la longitud en el ecuador de 80 º W (con velocidad de 1.77 m/s). Teniendo en cuenta la equivalencia internacional de 1 º = 110 km, la distancia final será (110 km)(120º), resultando 13 200 000 m.
En efecto, las condiciones de contorno son:

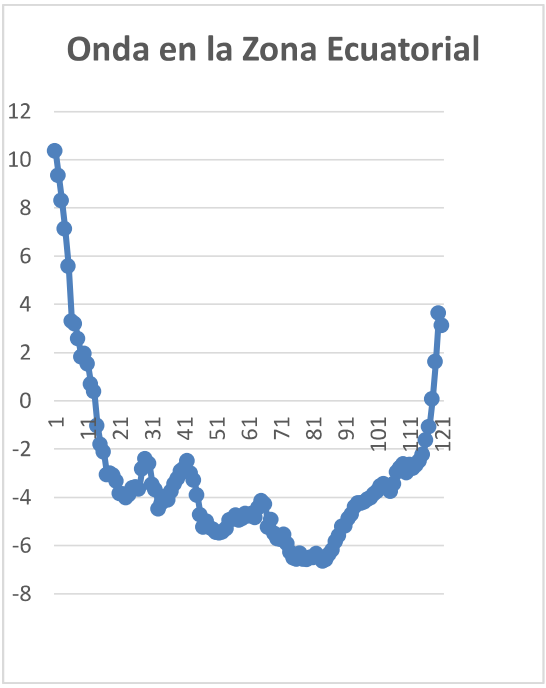
$$\begin{cases} y(0) = 10.32 \\ y(13\ 200\ 000) = 1.77 \end{cases}$$

Para el tiempo inicial t=0, remplazamos $y(0) = 10.32$ en (II) y obtenemos;
$10.32 = Acos(0)$, de donde la amplitud A=10.32
Luego, $y(x,0) = 10.32cos(k_x x)$.

Si remplazamos la variable espacial x=0, entonces $y(0,0) = 10.32$, que es lo que se verifica en la ecuación **(II)** para el instante t=0. Análogamente, los 121 datos de la tabla 1 modelan gráficamente la onda cosenoidal, tal como se aprecia en la figura 4.

Figura 4. Gráfica en matlab de la Onda en la zona ecuatoria

Asimismo, la ilustración grafica con la hoja de cálculo Excel se observa en la figura 5.



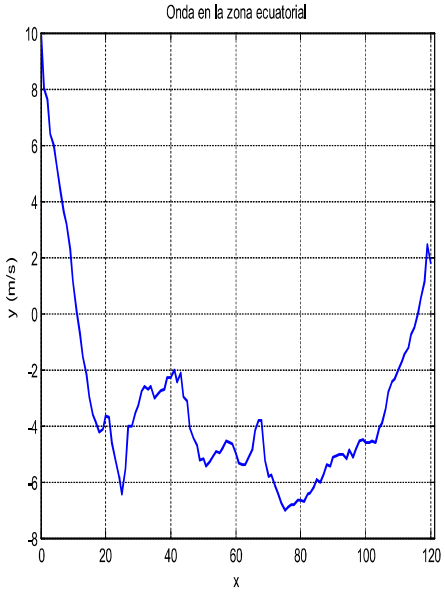


Figura 6. Gráfica con Excel de Onda cosenoidal en la zona ecuatorial

La figura describe la dinámica de los vientos al frente y a lo largo de la costa peruana y ecuatorial para el 15 de Junio de 2015, llegando a velocidades del viento mayores a 10 m/s. Cualquier movimiento del aire en el espacio, los cambios de velocidad, dirección del viento, así como las corrientes ascendentes y descendentes, constituye lo que se denomina "Gradiente del viento", los cuales se manifiestan como pequeños remolinos o ráfagas hasta fenómenos más intensos como los huracanes.
El modelo atmosférico GFS, Global Forecasting System, de la NOAA implementado con el software matlab permite mostrar la dinámica atmosférica y predecir el clima, figura 6.

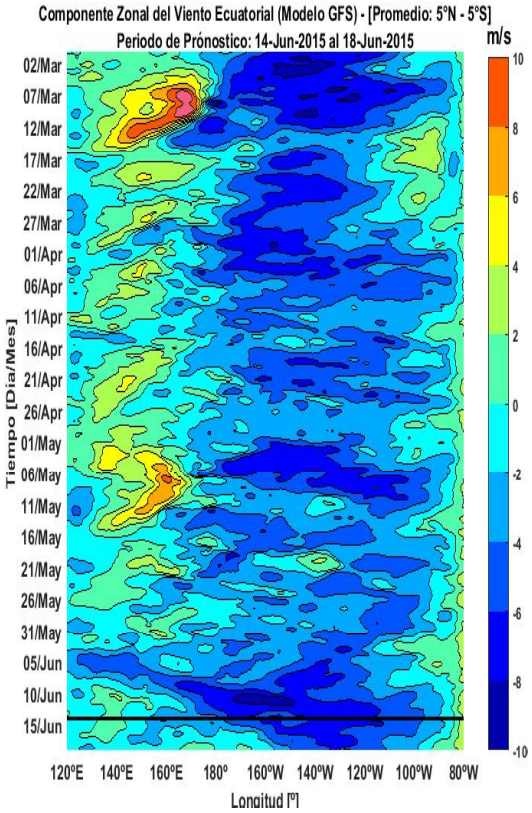


Figura 6. Modelo GFS en matlab

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha podido constatar que la data proporcionada por el Instituto del mar del Perú (Imarpe) queda simulada mediante la función cosenoidal.

Se puede pronosticar el estado del clima y anticipar fenómenos meteorológicos. El software matlab visualiza el flujo de los vientos mediante ondas. Es posible modelar fenómenos meteorológicos mediante el análisis de Fourier.

CONCLUSIONES

La data proporcionada por el Imarpe para la zona ecuatorial conlleva la representación de ondas. El análisis de Fourier modela el flujo de los vientos y establece las condiciones de contorno para la zona ecuatorial.
Las ondas generadas por el flujo de los vientos se visualizan con el software Matlab. Mediante el análisis de Fourier es posible pronosticar el estado del tiempo para una fecha determinada.

REFERENCIAS

[1] Bernex, Nicole. 2010. *Cambio climático, retroceso glaciar y GIRH*. Sociedad geográfica de Lima, Perú.

[2] Boyd, John. 2000. *Chebyshev and Fourier spectral methods*. University of Michigan, Dover Publications, New York.

[3] Canuto, Hussaini, Quarteroni, Zang. 2007. *Spectral methods. Evolution to complex geometries and applications to fluid dynamics*. Edit. Springer-Verlag, Berlin.

[4] Lluen, Elmer. 2013. *Ondas planetarias, calentamiento global y fenómeno El niño*, III congreso binacional Perú – Ecuador, pp. 215-216.

Correspondencia

Elmer Lluen Cumpa
elmermath@hotmail.com

Aporte Santiaguino 8, 2015: 357-368
ISSN 2070-836X

Evaluación del uso de polímeros en la concentración de la biomasa en un reactor de lodos activados

Evaluation of the use of polymers in biomass concentration in an activated sludge reactor

XIMENA DEL ROCÍO BORJA VELA[1], CRISTINA ELIZABETH ALMEIDA NARANJO[2], MARCELO ISAÍAS MUÑOZ RODRÍGUEZ[2]

RESUMEN

En un sistema de lodos activados de aireación prolongada y flujo continuo se evaluó la influencia de tres polielectrolitos: neutro, aniónico y catiónico en el comportamiento de la biomasa producida, en la calidad y concentración de los lodos y en la eficiencia de remoción de la materia orgánica en el tratamiento de depuración del agua residual doméstica sintética, con una DQO de 607 mg/L. Se trató agua residual doméstica sintética con tiempos de retención hidráulicos de 6, 8 y 10 horas y con dosis de polielectrolitos de 0.2, 0.3 y 0.5 mg/L. Las condiciones óptimas que favorecieron el incremento de la concentración de biomasa y la remoción de materia orgánica fueron: polielectrolito neutro, 8 horas y 0.2 mg/L para tipo de polielectrolito, tiempo de retención hidráulico y concentración respectivamente. Se determinó que la adición de polielectrolitos en el tratamiento de aguas residuales domésticas alcanzó porcentajes de remoción de materia orgánica superiores a 89%.

Palabras clave: Biomasa; lodos activados; polielectrolito, tratamiento de aguas residuales.

ABSTRACT

This research work evaluated, in an activated sludge system with extended aeration and continuous flow, the influence of three polyelectrolytes: neutral, anionic, and cationic in the behaviour of biomass produced, the quality and concentration of sludge, and the organic matter removal efficiency for the treatment of synthetic domestic wastewater whit 607 mg/l of COD. The treatment with synthetic domestic wastewater had a residence time of 6, 8, and 10 hours with polyelectrolytes dosages of 0.2, 0.3, and 0.5 mg/l. The optimal experimental conditions, that favoured the increment of biomass concentration and maximized the organic matter removal, were found to be neutral polyelectrolyte, 8 hours hydraulic residence time, and a concentration of 0.2 mg/l. Under these optimal conditions, it was also determined that the addition of polyelectrolyte during the domestic wastewater treatment, reached higher removal COD, in excess of 89%.

Keywords: Activated sludge;biomass; polyelectrolyte; wastewater treatment.

1 Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
2 Escuela Politécnica Nacional , Ecuador.

INTRODUCCIÓN

El sistema de lodos activados es muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales, sin embargo tiene varios problemas como: excesiva producción de lodos que normalmente están acompañados de productos químicos, fenómenos de esponjamiento, alto consumo de energía, uso de grandes espacios, los que inciden en altos costos de instalación y operación. La finalidad de la presente investigación es comprobar y comparar la eficiencia de reactores que utilicen polielectrolitos frente a un sistema convencional de lodos activados para mitigar los problemas mencionados. Los polilectrolitos son sustancias de alto peso molecular, cadenas largas y algunas de ellas se disocian en el agua formando iones, razones que facilitan el atrapar partículas dispersas en el medio y si en el reactor de lodos activados se tiene un cultivo en suspensión, el cual debe aglomerar a la materia orgánica para oxidarla y formar flóculos pesados que luego sedimenten con facilidad, con esta base, en este trabajo se investigó sobre la posibilidad de facilitar la formación de flóculos a través de la acción de polímeros, que promuevan la aglomeración del material disperso con los microorganismos para formar conglomerados pesados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron cuatro reactores aireados de mezcla completa y flujo continuo, construidos de tereftalato de polietileno conocido como PET, con un volumen de licor de mezcla de un litro y con sedimentadores en el interior de los mismos.
La aireación en el sistema se realizó utilizando una bomba de aire para pecera con cuatro distribuciones, marca BOYU, modelo S-4000 y capacidad 3 L/min en cada una de las cuatro salidas de aire y para disminuir el tamaño de la burbuja y mejorar el contacto del gas con el contenido del reactor se utilizó piedras difusoras que se ubicaron en la parte inferior de los equipos, para que a además de proporcionar la cantidad de oxígeno necesaria para el desarrollo de los microorganismos produzca un fenómeno de turbulencia que garantice la mezcla completa dentro del reactor.

Operación de los reactores

El afluente de los reactores fue agua residual doméstica sintética que se preparó con una DQO promedio de 607mg/L, a más del agua, en el reactor 1 se alimentó polielectrolito neutro, en el reactor 2 polielectrolito aniónico y en el reactor 4 polielectrolito catiónico, al reactor 3 no se le añadió ningún polímero para establecer comparaciones. Los polímeros se utilizaron en dosis de 0.2, 0.3 y 0.5 mg/L.
La formulación de agua residual doméstica sintética utilizada se encuentra en la tabla 1.

Tabla 4. Agua residual doméstica sintética

Reactivo	**(mg/L)**
gelatina	34.0
almidón	100.0
leche en polvo	200.0
jabón	3.0
fosfato ácido de potasio	44.5
bicarbonato de sodio	150.0
sulfato de amonio	74.2
sulfato de magnesio	3.0
azúcar	171.0

Arranque de los reactores

Inicialmente en los reactores se colocó inóculos de agua residual doméstica, estos se obtuvieron por maduración aireada de agua residual doméstica procedente de una descarga de la ciudad. Para analizar la evolución del sistema se evaluó la eficiencia de remoción de la DQO del sistema, para lo cual se tomaron datos de la demanda química de oxígeno a la entrada y salida de los reactores.
En 5 semanas de operación los reactores alcanzaron valores estables de DQO a la salida, lo que señaló que los sistemas se habían estabilizado, en la figura 1 se presenta este comportamiento.

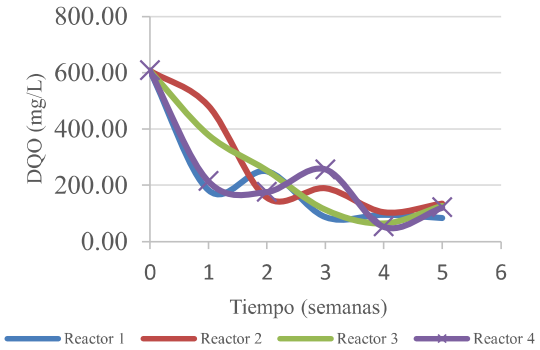


Figura 1. Disminución de la DQO en los efluentes

Bajo estas condiciones de operación se inició la experimentación para diferentes dosis y tipos de polielectrolitos. En el reactor 1 se trabajó con polielectrolito neutro, en el 2 con el aniónico y en el 4 con el catiónico, el reactor 3 se mantuvo como testigo durante toda la investigación

Parámetros de operación

Los caudales promedios en los reactores fueron de 2.80, 2.14 y 1.72 mL/min para tiempos de retención hidráulico de 6, 8 y 10 horas respectivamente. Además en los sistemas se controló oxígeno disuelto, pH y temperatura, en las semanas de investigación los promedios fueron 5.65, 5.50, 5.71 y 5.69 mg/L para oxígeno disuelto, 7.21, 7.77, 7.82 y 7.92 para pH en los reactores 1, 2, 3 y 4 respetivamente, la temperatura promedio de los cuatro reactores fue de 19°C.

Parámetros de control

La eficiencia de remoción de materia orgánica se evaluó mediante la medición de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) a la entrada y salida de los reactores y se expresó a través de porcentajes de eficiencia de remoción, para determinar la variación en la concentración de biomasa se cuantificó los sólidos suspendidos volátiles (SSV) con la Norma APHA 209D Fixed and Volatile Solids Ignited at 550 °C, por medio de este análisis también se obtienen sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos fijos. La calidad del lodo se determinó con el índice volumétrico del lodo (IVL).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La eficiencia de remoción de la DQO y la concentración de SSV fueron las variables respuestas que se analizaron para determinar los valores óptimos de los factores: concentración de polielectrolito, tipo de polielectrolito y tiempo de retención hidráulico.

Análisis de la dosis de polielectrolito

Se evaluó la concentración de 0.5 mg/L y en dos semanas de experimentación el crecimiento de SSV en el reactor 1 fue cinco veces mayor al ocurrido en el reactor que no recibió polielectrolito, en base a este buen resultado se decidió experimentar con concentraciones menores para disminuir la cantidad de químicos utilizados. Las siguientes seis semanas se experimentó con 0.2 mg/L. La evolución de sólidos suspendidos volátiles SSV, sólidos suspendidos totales SST y sólidos suspendidos fijos SSF en este periodo se muestran en las figuras 2, 3 y 4.

Comparativamente, entre las tres figuras se observa que el mayor crecimiento ocurrió para los SSV en el tratamiento con polielectrolito neutro y aunque los SSF también crecieron, fue en menor cantidad, esto evidenció que es la biomasa representa como

sólidos suspendidos volátiles la que más creció en el sistema con la adición de polielectrolito neutro.

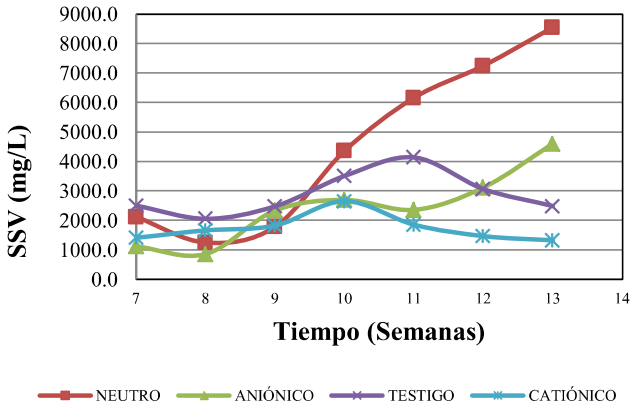


Figura 2 Variación de sólidos suspendidos volátiles con concentración de 0.2 mg/L

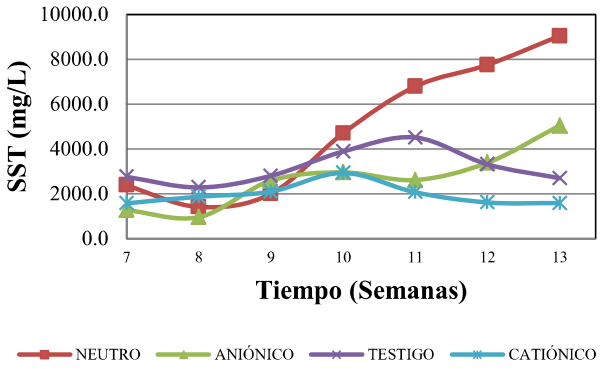


Figura 3 Variación de sólidos suspendidos totales con concentración de 0.2 mg/L

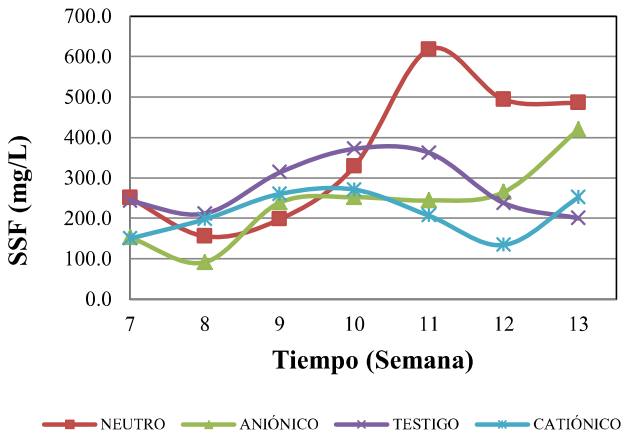


Figura 4. Variación de sólidos suspendidos fijos con concentración de 0.2 mg/L

En la figura 5 se puede observar que en la semana 11 se produce una disminución en la remoción de materia orgánica en el reactor 3, este decremento es mayor que en los reactores tratados con polielectrolitos, debido a la poca aglomeración de flóculos y baja sedimentación que puede ser provocada por la edad del lodo o la baja floculación. [1]

La floculación de los lodos resulta de la producción extracelular de polímeros secretados por las células, pero la interacción con otras sustancias poliméricas también es importante en el desarrollo y estabilidad del floc. [2]

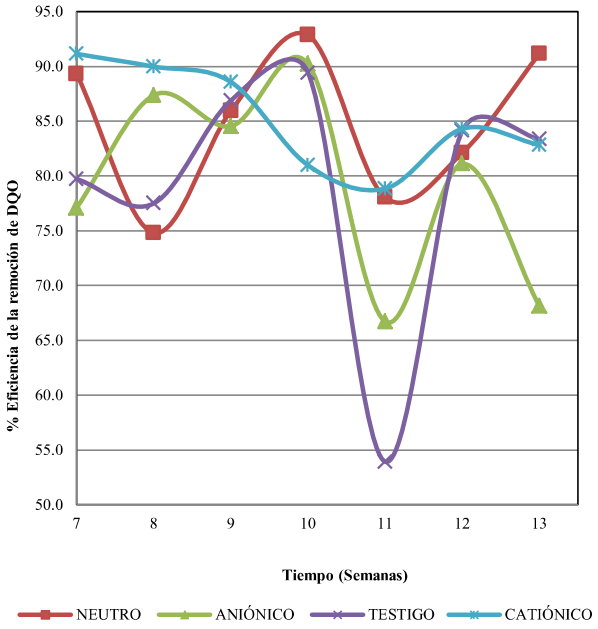


Figura 5 Remoción de materia orgánica con concentración de 0.2 mg/L

Los SSV y la remoción de la DQO se incrementaron durante el tratamiento con 0.2 mg/L, solamente el reactor con tratamiento catiónico presentó un menor crecimiento de los SSV.

En base a los incrementos de las variables respuestas se decidió aumentar la concentración de polímeros a 0.3 mg/L y en dos semanas de operación los 4 reactores disminuyeron su concentración de SSV y los decrementos fueron mayores para los reactores que recibieron polielectrolitos por lo que aunque la eficiencia de remoción de DQO en los reactores estuvo entre el 80 a 90% se consideró que el cambio no fue adecuado.

Análisis del tipo de polielectrolito

Para evaluar la influencia del factor "tipo de polielectrolito" sobre las variables respuestas SSV y la remoción de DQO se realizó un análisis estadístico factorial utilizando el programa estadístico InfoStat (versión libre) [3].

Los resultados mostraron que la mayor media de SSV corresponde al reactor tratado con polielectrolito neutro y la menor al reactor catiónico. La prueba de Shapiro Wilks modificado, expuso que los datos para los cuatro reactores siguen una distribución normal.

Tabla 5.Prueba de normalidad Shapiro Wilks modificado para la variable SSV

Reactor	Variable	n	Media	D.E.	p(Unilateral D)
2	SSV	6	2660.62	1218.15	0.880
4	SSV	6	1797.31	465.29	0.370
1	SSV	6	4887.82	2954.02	0.490
3	SSV	6	2953.82	770.11	0700

El análisis ANOVA señaló que "al menos un tipo polielectrolito influye en la variable respuesta SSV".

Tabla 6. Análisis de ANOVA para la variable SSV

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Reactor	30631237	3	10210412	3.70626	0.02863
Error	55098271	20	2754914		
Total	85729509	23			

Para determinar esta influencia se realizó la prueba de Duncan que mostró que únicamente el tratamiento con polielectrolito neutro es estadísticamente diferente.

Tabla 7.Prueba de Duncan para la variable SSV

Reactor	Medias	n	E.E.	Columna5	Columna6
4	1797.31	6	677.61	A	
2	2660.62	6	677.61	A	
3	2953.82	6	677.61	A	
1	4887.82	6	677.61		B

Estos grupos se verificaron también a través de la máxima concentración de SSV que obtuvo el sistema tratado con polielectrolito neutro y fue de 8538.97 mg/L, seguida del reactor 2 con 4586.67mg/L y que supera al reactor testigo en 9.5%.

Este comportamiento concuerda además con los presentados en las figuras 3,4 y 5 en las que señaló un marcado crecimiento de los SSV.

Estos resultados se deben a que los polielectrolitos neutros y aniónicos incrementan el tamaño y peso de los flocs, por tener alta masa molar y largas cadenas que forman puentes de polímeros que se interconectan entre ellos y forman aglomerados de buena calidad. Además, influye el mecanismo de acción del polímero neutro que actúa mediante la formación de puentes, partícula – polímero – partícula, que prevalece sobre la repulsión que generarían partículas igualmente cargadas presentes en el agua. [4].

Un mecanismo de acción similar ocurre para el polielectrolito aniónico, lo cual descarta la probable repulsión de la mayoría de las partículas coloidales del agua residual doméstica, que según Aguilar [5] son de carga negativa.

En el reactor tratado con polielectrolito catiónico existe un decremento del 6% de biomasa (SSV) lo cual ratifica que el crecimiento de la biomasa no estuvo influenciado por el mecanismo de acción por cargas, esta disminución puede producirse porque una parte del polielectrolito actúo como coagulante y neutralizó las cargas del material coloidal del agua residual, la parte restante aglutinó la biomasa, razón por la que presentó menores valores en la concentración de SSV pero buenos porcentajes de remoción de DQO. [6].

Se utilizó el mismo análisis estadístico para determinar la influencia del tipo de polielectrolito en la remoción de materia orgánica, se obtuvo que no existía significancia estadística en los distintos tratamientos.

El análisis de normalidad de Shapiro Wilks modificado estableció que los datos de los reactores seguían una distribución normal, tabla 5:

Tabla 8. Prueba de normalidad Shapiro Wilks modificado para la variable eficiencia de remoción de la DQO

Reactor	Variable	n	Media	D.E.	p(Unilateral D)
2	ef DQO	6	79.67	9.98	0.18
4	ef DQO	6	84.24	4.32	0.65
1	ef DQO	6	84.14	7.17	0.62
3	ef DQO	6	79.20	13.01	0.05

El análisis de ANOVA tuvo un p-valor mayor a 0.05 lo que señaló que las diferencias entre los tratamientos no se pueden atribuir al tipo de polielectrolitos utilizados.

Tabla 9. Análisis de ANOVA para la variable eficiencia de remoción de la DQO

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Reactor	136.49	3	45.50	0.54	0.66
Error	1694.65	20	84.73		
Total	1831.15	23			

A pesar de este resultado, según Varila y Díaz [7] las medias de porcentaje de remoción de DQO fueron acordes a valores obtenidos en este tipo de tratamiento, alrededor del 90% para el agua depurada en los cuatro reactores.

Análisis del tiempo de retención hidráulico (TRH)

Cada tiempo de retención se evalúo durante una semana.
Se determinó que un TRH de 6 horas produjo un decremento de los SSV, pues se produjo un efecto de lavado producido por elevado caudal del fluido. Para 8 y 10 horas se registraron incrementos de SSV, lo que favoreció la formación del flóculo, lo expuesto se presenta en la figura 6.

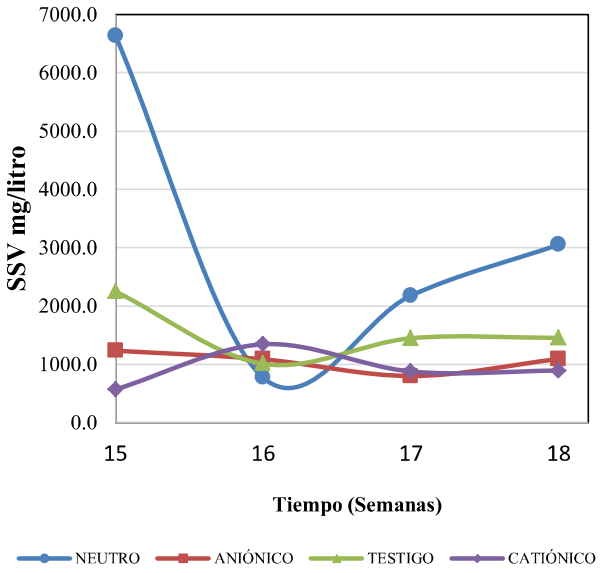


Figura 6. Sólidos suspendidos volátiles en relación al tiempo de retención hidráulico.

En cuanto a la variable eficiencia de remoción de DQO, durante los cambios del TRH los reactores tuvieron porcentajes de remoción entre el 69 y 95%.
Si se considera el comportamiento de los reactores en cuanto a las variables SSV y remoción de DQO, el mejor tiempo de retención hidráulico correspondió a 8 horas.

Índice volumétrico del lodo (IVL)

Los índices volumétricos de lodos se midieron al final de la investigación y fueron 68.53, 197.58, 250.94, y 279.32 mL/g, para los reactores: neutro, aniónico, testigo y catiónico respectivamente. Estos valores indicaron que el tratamiento con polielectrolito neutro tuvo un lodo con excelentes características de sedimentación y los demás pobre sedimentación [8].

La calidad del lodo se comportó igual que la concentración de SSV, fue mayor en el reactor 1 seguido del 2 y solo el reactor 4 obtuvo un lodo de calidad inferior al reactor que no recibió tratamiento.

CONCLUSIONES

Las condiciones óptimas de operación para el crecimiento de la biomasa en el tratamiento de agua residual a través del sistema de lodos activados estudiado, fueron: 8 horas para el tiempo de retención hidráulico, 0.2 mg/L de concentración de polielectrolito y tipo de polielectrolito, neutro.

En el tratamiento de agua residual se determinó que la presencia de polielectrolitos benefició el atrapamiento de la biomasa dentro del reactor, alcanzándose concentraciones máximas de biomasa de 8538.97 mg/L en el reactor con polielectrolito neutro y 4586.67 mg/L con el aniónico. El polielectrolito catiónico no presentó la misma eficiencia en retención de la biomasa, pues alcanzó una concentración de 2657.67 mg/L.

El mejor índice volumétrico de lodo promedio fue el del polielectrolito neutro con un valor de 68.53 mL/g, lo que establece que el lodo tiene excelentes características de sedimentación, y el más bajo el del polielectrolito catiónico con 219.32 mL/g, es decir, que tiene baja sedimentación.

La concentración de biomasa en el reactor tratado con polielectrolito neutro y el reactor que no recibió polielectrolito establecen notables mejorías al sistema conveniconal de lodos activados, pues cambios como disminución del volumen del reactor, posibilidad de tratar aguas de mayor carga contaminante o mantener una relación adecuada de alimento/microorganismos se aplicarían con el uso del polímero neutro.

La eficiencia de remoción estadísticamente no es diferente para los tratamientos investigados sin embargo los porcentajes de remoción son mayores para las aguas residuales que se trataron con polielectrolito.

RECONOCIMIENTOS

A la Escuela Politécnica Nacional por haber dotado a este proyecto de los requerimientos para realizarlo y la Universidad Politécnica Salesiana por su aporte a esta investigación.

REFERENCIAS

1. Pacheco, V., Pavón, T., Sánchez, J. y Mejía, G. "Reingeniería de una planta de tratamiento de lodos activados para abatir el fenómeno del esponjamiento". Ciencia y Tecnología, 2003.

2. Zhu, L., Lv, M., Dai, X., Yu, Y., Qj, H. y Xu X. "Role and significance of extracelular polymeric substances on the property of aerobic granule". BioresourseTechnology. 107, 46-54, 2012
3. Di Rienzo JA, Robledo CW, Balzarini MG, Casanoves F, Gonzalez L, Tablada M., InfoStat/E 3.0, Registro del derecho de autor de obra de software 960318
4. Walter, J., Weber. JR.,"Control de la calidad del agua Procesos fisicoquímicos". Editorial Reverté, S.A., España, 2003, 645 pp.
5. Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler, Ortuño, J. "Tratamiento Fisicoquímico de aguas residuales, Coagulación – Floculación". Universidad de Murcia, 2002, Servicio de Publicaciones, España, 153 pp.
6. Acosta, Y. "Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación - floculación". ICIDCA. XL (2), 2006, 10 -17 pp.
7. Varila, J. y Díaz F. "Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio", Revista de Tecnología. Vol. 7-2, 2008.
8. Ferrara, F. y Ramírez, A. "Análisis de la sedimentabilidad de los lodos biológicos producidos en un RCS durante la desnitrificación de un efluente de un biorreactor de crecimiento adherido", Revista de la Facultad de Ingeniería 2013, U.C.V., 28(1), pp. 37-44.

Correspondencia

Ximena del Rocío Borja Vela
xborja@ups.edu.ec

Aporte Santiaguino 8, 2015: 369-387
ISSN 2070-836X

Un marco multiagente para transitorios hidráulicos en abastecimientos de agua

JOAQUÍN IZQUIERDO[1], IDEL MONTALVO[2], AMILKAR ERNESTO ILAYA-AYZA[1] Y RAFAEL PÉREZ-GARCÍA[1]

RESUMEN

La preocupación más importante para los gestores de las empresas de abastecimiento de agua es la falta de integridad de sus sistemas. De fallar, las consecuencias son variadas: interrupciones del servicio, roturas de tuberías que causan la pérdida de agua, grietas en las tuberías que causan fugas de agua, y la intrusión de patógenos, un riesgo grave para la salud humana. A pesar de su importancia, el golpe de ariete, una de las principales vulnerabilidades de los sistemas de agua, todavía representa un desafío, debido al alto nivel de complejidad que presenta este problema. La falta de eficiencia en este aspecto suele ser grande, ya que se necesita herramientas de decisión muy potentes. Uno de los inconvenientes de los paquetes informáticos para la simulación de transitorios hidráulicos en sistemas complejos reside en la modelación de los dispositivos complejos que se encuentran en instalaciones reales. Los programas de ordenador disponibles en el mercado son capaces de modelar dispositivos independientes con exactitud. Sin embargo, la modelación de dispositivos compuestos ha demostrado ser problemática. Las tendencias que se utiliza para modelar dispositivos complejos son dos. O bien, se define cada combinación de elementos simples como un nuevo elemento (simple, aunque mucho más complejo); o se unen diferentes elementos simples mediante tubos cortos. El primer método produce multiplicación de código, lo que hace que los paquetes sean ineficientes. El segundo está fuertemente limitado por la condición de Courant - una condición necesaria para la estabilidad que hace los cálculos inaccesibles tanto desde el punto de vista de los recursos computacionales como del tiempo de simulación requerido. Además, se presenta DiagastIng, una plataforma para simular fenómenos transitorios en redes de tuberías. Utiliza un enfoque multi-agente para superar con éxito los problemas mencionados. Por último, aunque no menos importante, un sistema basado en un enfoque multi-agente favorece la paralelización del algoritmo de cálculo. Consideramos que el paquete presentado es un sistema de soporte a la decisión eficiente en la gestión del agua urbana.

Palabras clave: transitorios hidráulicos; redes de distribución de agua; vulnerabilidad; sistemas multi-agente; apoyo a la decisión.

ABSTRACT

The most important concern for managers of water supply companies is the lack of integrity of their systems. Under failure conditions, the consequences are varied: service disruptions, broken pipes causing water loss, cracks in pipes causing water

1 FluIng – IMM, Universitat Politècnica de Valencia, España.
2 IngeniouWare GmbH, Karlsruhe, Alemania.

leaks, and pathogen intrusion, a serious risk to human health. Despite its importance, water hammer, one of the main vulnerabilities of water systems, remains a challenge due to the high level of complexity presented by this problem. The lack of efficiency in this area is usually large, as powerful decision tools are needed. One of the drawbacks of the simulation software packages of hydraulic transients in complex systems resides in modelling the complex devices that are found in actual installations. Computer programs available in the market are able to model accurately separate devices. However, modelling of composite devices has proven problematic. The trends used to model complex devices are twofold. Either each combination of simple elements is defined as a new element (simple, even though much more complex), or simple different elements are linked through short pipes. The first method produces code multiplication, causing software to be inefficient. The latter is strongly limited by the Courant condition – a condition for stability – that makes calculations inaccessible from the point of view of computational resources and of simulation time required. In this paper, we present a new platform to simulate transients in pipe networks, DiagastIng. It uses a multi-agent approach to successfully overcome these problems. Last but not least, a system based on a multi-agent approach favours the parallelization of the calculation algorithm. We claim that the package presented is an efficient decision support system in urban water management.

Keywords: hydraulic transients; water distribution networks; vulnerability; multi-agent systems; decision support.

INTRODUCCIÓN

Una red hidráulica es un sistema distribuido realmente complejo [1]. Está constituido por un conjunto interconectado e intricado de tuberías que, además, incluye una amplia variedad de elementos (nodos, depósitos, bombas, dispositivos de control varios,…) que tienen comportamientos específicos no necesariamente autónomos, y que interactúan entre sí, a través de las tuberías que los conectan, de manera parcialmente determinada a priori, pero también influidos por ciertas sucesiones de eventos.

Los gestores de las empresas de suministro de agua deben preocuparse por la falta de integridad de sus sistemas ya que las consecuencias de los fallos son múltiples. Las irregularidades en el servicio pueden llegar a ser inaceptables, y dar lugar a interrupciones severas del servicio. Las roturas de las tuberías pueden causar grandes pérdidas de inversión, desperdicio de agua, y daños a terceros. Las grietas en las tuberías pueden causar dos efectos de gran preocupación en la gestión del agua urbana: fugas de agua, lo que representa una pérdida sustancial y continua, e imperceptible, del agua; y la intrusión de patógenos, lo que afecta la calidad del agua y representa un grave riesgo para la salud humana. Algunos de estos fallos están causados por flujos transitorios en el sistema.

Transitorios hidráulicos

A pesar de su importancia, el comportamiento transitorio, especialmente los transitorios rápidos (también conocidos como golpe de ariete) siguen representando un reto para muchas empresas de agua. Se hace imprescindible potentes herramientas para la toma de decisiones sobre este tema.

Los análisis de la mayoría de los transitorios hidráulicos en sistemas presurizados se llevan a cabo suponiendo flujo unidimensional y se basan en las ecuaciones de continuidad y movimiento que describen el comportamiento general de un fluido dentro de una tubería (cilíndrica) en términos de dos variables dependientes, a saber, $H(t,x)$, altura piezométrica, y $V(t,x)$, velocidad del fluido [2-4], que dependen del tiempo y el espacio.

Las ecuaciones de continuidad y de movimiento aplicadas a la tubería constituyen un sistema de primer orden de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDPs) que se puede escribir [5], utilizando notación matricial, como

$$\begin{pmatrix} H \\ V \end{pmatrix}_t + A(V)\begin{pmatrix} H \\ V \end{pmatrix}_x = B(V) \quad (1)$$

Donde los subíndices t y x denotan derivadas parciales con respecto al tiempo y el espacio, respectivamente, y

$$A(V) = \begin{pmatrix} V & a^2/g \\ g & V \end{pmatrix}, B(V) = \begin{pmatrix} -V\sin\theta \\ -fV|V|/(2D) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

La celeridad o propagación de la onda de velocidad a, la fricción f, el diámetro D, y la pendiente θ, son parámetros de la tubería que son constantes con el tiempo. Estos parámetros, sin embargo, pueden ser diferentes para diferentes tubos. Por último, g es la aceleración de la gravedad.

La expresión (1) constituye un sistema de EDPs no lineal e hiperbólico, ya que la matriz $A(V)$ tiene valores propios reales simples para cada V. En efecto, la ecuación característica de $A(V)$ es

$$(V - \square)^2 - a^2 = 0,$$

con raíces $\square = V \pm a$, que son reales y diferentes, teniendo en cuenta que a es al menos un orden de magnitud mayor que V en sistemas presurizados.

En la mayor parte de casos prácticos $V << a$. Como resultado, los términos convectivos de la aceleración son despreciables. Además, el término de la pendiente se puede ignorar, y es práctica común en Ingeniería Hidráulica utilizar Q, caudal, en lugar de V como la variable de flujo. Finalmente, suponiendo flujo incompresible, y tubo de sección transversal constante, A, las ecuaciones (1) se pueden escribir para un tubo como

$$H_t + \frac{a^2}{gA} Q_x = 0$$

$$Q_t + gAH_x + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \qquad (3)$$

Estas ecuaciones (de onda) gobiernan el comportamiento de las perturbaciones (ondas viajeras) a través del sistema de tuberías. Sin embargo, otros elementos, a saber, uniones, puntos de alimentación, bombas, válvulas, etc., situados en puntos específicos (en los extremos de los tubos), también son partes importantes constituyentes de una red hidráulica. Los comportamientos de estos elementos se denominan condiciones de contorno.

Desde un punto de vista topológico, estos elementos pueden ser clasificados (véase, por ejemplo [6]), como elementos en paralelo y elementos en serie. Las ecuaciones constitutivas típicas para elementos paralelos son de la forma $H(\mathrm{P}) = \mathbf{F}(Q\mathrm{e})$, donde Qe es el flujo a través del elemento y H es la altura piezométrica en el punto P. Para elementos en serie, las ecuaciones constitutivas toman la forma $\square H_e = H(\mathrm{P}_1) - H(\mathrm{P}_2) = \mathbf{F}(Q_e)$, donde $\square H_e$ es el gradiente de presión a través del elemento ubicado entre los puntos P_1 y P_2, y Q_e es el flujo a través del elemento. En ambos casos, **F**(.) describe el comportamiento hidráulico de estos elementos, y puede variar desde una o varias relaciones simples hasta sistemas (mixtos) de ecuaciones algebraicas y/o diferenciales.

Hoy en día, hay unanimidad generalizada sobre la necesidad de ayuda computacional para hacer frente a la complejidad global del fenómeno. El trabajo para construir simuladores de transitorios hidráulicos eficientes sigue siendo objeto de estudio en la actualidad.

¿Por qué sistemas multi-agente?

La idea principal de este trabajo es que los transitorios hidráulicos pueden abordarse mediante técnicas multi-agente, y las ventajas son múltiples.

Es un hecho bien conocido por quienes han tenido algún contacto con los transitorios hidráulicos – y con los fenómenos transitorios en general, que el fenómeno de la transmisión de perturbaciones es un fenómeno de transmisión de información, es decir, un fenómeno de comunicación. En este proceso, los elementos que intervienen poseen pautas de comportamiento individuales que pueden ser influidas o modificadas por los comportamientos de otros elementos. A su vez, una parte fundamental del fenómeno es la sucesión en el tiempo de preguntas y respuestas, es decir, intercambio de información, entre los distintos elementos del sistema. Ese diálogo permanente entre tales elementos caracteriza a los eventos que suceden.

Pensemos en el caso más simple, el de una onda simple unidimensional que se propaga en el espacio (de manera más concreta, por una tubería). Una de estas ondas viajeras se propaga a una velocidad característica de la onda en el medio por el que

viaja. La clásica expresión $f(x \equiv at)$ representa a una de tales ondas propagándose unidimensionalmente en la dirección positiva del eje de abscisas (ver Figura 1) a velocidad *a*. Es importante recordar que si $f(x)$ es una función que representa determinada curva, entonces la misma función *f*, pero con x sustituido por $x - b$, representa una curva de idéntica forma pero desplazada sobre el eje positivo de abscisas una distancia *b*. Análogamente $f(x + b)$ representa la misma curva desplazada en sentido negativo sobre el eje horizontal una distancia *b*. Es decir, la situación de la perturbación original se transmite haciendo fluir la información, en general, en cualquier dirección (ver, por ejemplo, el capítulo 3 de [2]).

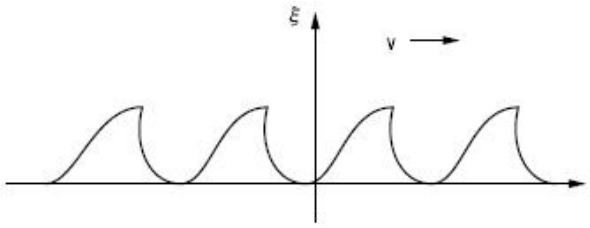


Figura 1. Transmisión de información mediante una onda viajera

La solución analítica de la llamada ecuación de ondas,

$$u_{tt} - a^2 u_{xx} = 0,$$

obtenida por Von Riemann en 1869, [7], se obtiene por la superposición de las soluciones de los factores en que se descompone:

$$(u_t + au_x)(u_t - au_x) = 0,$$

donde los subíndices denotan derivadas parciales de la función $u(x,t)$
Von Riemann observó que las ecuaciones

$$u_t + au_x = 0 \text{ y } u_t - au_x = 0$$

admitían soluciones constantes sobre las denominadas rectas características,

$$x - at = \text{constante y } x + at = \text{constante},$$

respectivamente, por lo que la solución general de la ecuación de ondas se podía obtener como superposición de dos ondas viajeras

$$u(x,t) = F(x + at) + f(x - at)$$

Así, dada la información correspondiente a una condición inicial, es posible construir su evolución futura simplemente transmitiendo dicha información sobre las rectas

características. La representación es todavía más clara si se examina el método numérico más utilizado para la resolución de esta ecuación. Nos referimos al método de las características (MC), que recordamos brevemente más tarde y que genera un conjunto discreto de puntos de cálculo en cada tubería que son los poseedores de cierta información que comparten a ciertos impulsos en el tiempo. A su vez, el comportamiento emergente de tales puntos de cálculo convierte a una tubería en un agente de nivel superior que se comunica con los restantes elementos del sistema hidráulico ubicados en los extremos de las tuberías.

Estas nuevas clases de elementos tienen comportamientos específicos, denominados condiciones de contorno, e interaccionan con el sistema, en parte de manera autónoma, y en parte como respuesta a condiciones nuevas que aparecen en el sistema. Es decir, tales elementos pueden ser influenciados por otros elementos. Puede decirse que una parte fundamental del fenómeno es la sucesión en el tiempo de preguntas y respuestas, es decir, un intercambio de información entre los elementos del sistema. Este diálogo permanente caracteriza los eventos que tienen lugar. La información se transmite a requerimiento de unos elementos para con otros, y la información recibida permite a un elemento completar su propia información, definiéndose así su comportamiento y produciendo respuestas que son utilizadas por otros elementos.

Al final de esta introducción hemos alcanzado un punto de vista completamente correspondiente a la metodología multi-agente. En la siguiente sección concretamos más los aspectos anteriores. Para ello, presentamos una somera descripción de un sistema multi-agente y proporcionamos después el diccionario que permite traducir los transitorios hidráulicos al lenguaje multi-agente. Esto nos permite, a continuación proporcionar detalles sobre la plataforma multi-agente que presentamos para la simulación de transitorios hidráulicos en sistemas de tuberías. La última sección presenta las conclusiones y cierra el artículo.

METODOLOGÍA

En el estudio de los sistemas complejos, como el que se trata en este artículo, los programas de ordenador han jugado un papel muy importante. Sin embargo, el proceso actual de la creación de software es una tarea complicada fuertemente sujeta a error. La filosofía multi-agente adopta un formalismo de modelación basado en una colección de agentes independientes que interaccionan a través de eventos discretos. La simulación de las interacciones discretas entre agentes se erige en contraste con la simulación en sistemas continuos, en que los fenómenos simulados utilizan magnitudes de un sistema acoplado de ecuaciones, aunque los sistemas discretos pueden realizar virtualmente todas las operaciones de los continuos.

Paradigma multi-agente

Un agente es un actor cualquiera del sistema: cualquier entidad que pueda generar eventos que afecten tanto a él mismo como a otros agentes. En el problema que consideramos aquí los agentes están organizados con determinada estructura dictada

por las características de las redes de distribución de agua. Existen agentes simples como los puntos de cálculo en que se discretiza un tubo. También son agentes los propios tubos, los nodos de consumo conectados por tubos, los distintos elementos que constituyen de manera individual o compuesta las condiciones de contorno, y también los facilitadores, que presentamos más adelante, y que concilian el diálogo entre los agentes ya citados. Incluso la red entera es un agente que sigue determinadas acciones programadas. En el caso de un tubo, respecto de sus puntos de cálculo, y el de la propia red, respecto de todas sus componentes, el comportamiento del agente viene determinado, en parte, por las acciones colectivas emergentes de los agentes que contienen.

Los agentes definen los objetos básicos del sistema, es decir, las componentes simuladas. La simulación ocurre en el *mundo* modelado y es frecuente hablar de agentes que *viven* en un determinado *entorno* o *mundo* que, a su vez, es un agente.

Una vez que se hayan definido los agentes y se haya establecido sus relaciones, falta definir un calendario de acciones discretas para tales agentes que se desarrolle en el tiempo. Las acciones individuales se llevan a cabo en determinados tiempos concretos; y el tiempo avanza conforme se van realizando los eventos programados en tiempos sucesivos. Un calendario es una estructura de datos que combina acciones en un orden específico en que se deben ejecutar. El paso del tiempo se modela mediante la ejecución de los eventos en una secuencia determinada. Se dan instrucciones a cientos o miles de agentes que operan independientemente y esto hace posible explorar la conexión entre el comportamiento a nivel micro de los individuos y los patrones a nivel macro que emergen de la interacción de los individuos. El calendario es, aquí, el que se deriva del denominado método de los intervalos prefijados (capítulo 3 de [2]).

El paso final consiste en la observación del modelo registrando lo que ocurre. Los *observadores* llevan a cabo tal acción. En la mayor parte de plataformas multi-agente son también agentes con tareas específicas, tales como plotear, almacenar datos, monitorizar y mostrar ciertas variables, etc.

Los agentes poseen las siguientes propiedades: autonomía, movilidad, reactividad, pro-actividad, adaptabilidad, comunicatividad, robustez, capacidad de aprender, orientación basada en tareas y orientación basada en objetivos globales [8].

La tendencia a la utilización de técnicas multi-agente como una alternativa interesante para la resolución de ciertos problemas complejos distintos al presentado en esta contribución es clara. Véase, por ejemplo, [9] sobre aplicaciones multi-agente en hidráulica urbana; [10] en arquitectura de sistemas de drenaje y alcantarillado; [11] en sistemas de control del agua a nivel municipal; [12] en diagnosis de la contaminación del agua; [13] en gestión de la demanda de agua en un acuífero de acceso libre; [14] sobre calidad del agua; [15] en gestión del agua a nivel de captación; [16] sobre optimización de redes de agua; [17] en gestión del agua a escala de cuenca; [18] en distribución de agua en condiciones de escasez; [19] en disponibilidad de agua; [20] en transvases entre cuencas; [21] sobre monitorización en sistema de riego; [22-24] sobre sectorización de redes de distribución de agua; [25] sobre mercados de transferencia de derechos de aguas; [26, 27] sobre identificación de activos

enterrados en sistemas de distribución de agua; [28, 29] sobre diseño de redes de distribución de agua, entre otros.

Sistema multi-agente para los transitorios hidráulicos

El desarrollo de una plataforma basada en agentes para la simulación de transitorios hidráulicos es un reto ya que dos conjuntos de conceptos muy diferentes, que no comparten ni los mismos problemas ni las mismas preocupaciones, deben ponerse a trabajar en una sinergia que, no sólo tiene que conciliar estas diferencias, sino permitir las interacciones fructíferas que buscamos. Sin embargo, hay un punto de encuentro claro, a saber, la naturaleza distribuida del problema que tratamos aquí.

En los párrafos siguientes proporcionamos los detalles necesarios para acomodar nuestro problema a la metodología que proponemos para manejar dicho problema.

La plataforma (que se describe en su totalidad en la sección III) es el mundo o el entorno en el que viven los agentes que participan en la simulación de transitorios hidráulicos en sistemas complejos. En los sistemas multi-agente hay diferentes clases de agentes con características específicas. Algunos son pasivos, otros son reactivos y, por último, otros son proactivos [30]. Independientemente de sus características específicas, todos tienen características comunes importantes: están situados en un espacio geo-referenciado, deben estar al tanto de alguna manera de (los) otros agentes en este espacio, e interactúan en el entorno. Es estimulante señalar aquí que esta clasificación se adapta perfectamente a la clasificación clásica de condiciones de contorno utilizada durante años en Ingeniería Hidráulica: condiciones de contorno autónomas, no autónomas y dinámicas, véase, por ejemplo, [2, 31].

Esta sección describe los diversos agentes que dicha plataforma tiene que acomodar, con respecto a las especificaciones hidráulicas y sus implementaciones.

Los puntos de cálculo

En el MC se discretiza el espacio y el tiempo. Esto genera un conjunto discreto de puntos de cálculo, que son los elementos activos poseedores de determinada información que cambia a impulsos definidos con el tiempo. La discretización en el tiempo marca el calendario o programa de la actividad conjunta. Dicha información es transmitida a otros elementos a requerimiento de estos. La información obtenida permite a los distintos elementos completar la información para definir su comportamiento y elaborar determinada respuesta que, a su vez, puede alimentar a otros elementos.

El comportamiento 'impreso' en tales elementos y el mecanismo de traspaso de información son bien conocidos. Un elemento típico, P, recibe información de sus vecinos (referida al instante anterior), X e Y, y utiliza esa información para acabar de perfilar su comportamiento (actual). Específicamente, en el caso que consideramos, el comportamiento de uno de esos elementos (interiores) de un tubo, pertenecientes a la discretización, viene definido por la solución del sistema lineal

$$\begin{aligned} Q(\mathrm{P}) + C_a H(\mathrm{P}) &= C_p \\ Q(\mathrm{P}) - C_a H(\mathrm{P}) &= C_n \end{aligned} \qquad (3)$$

donde

$$C_p := Q(\mathrm{X}) + C_a H(\mathrm{X}) - RQ(\mathrm{X}) \mid Q(\mathrm{X}) \mid (t_\mathrm{P} - t_\mathrm{X})$$
$$C_n := Q(\mathrm{Y}) - C_a H(\mathrm{Y}) - RQ(\mathrm{Y}) \mid Q(\mathrm{Y}) \mid (t_\mathrm{P} - t_\mathrm{Y})$$

Las constantes son $C_a = gA/a$ y $R = f/(2DA)$, siendo g la aceleración de la gravedad, A la sección de la tubería, D su diámetro y a la celeridad; t_P, t_X y t_Y son instantes discretos de tiempo.
Este sistema algebraico elemental define el comportamiento del elemento denominado nodo interior, P, de una tubería en el sentido de que le permite obtener valores para sus variables asociadas, a saber, el caudal Q(P) y la altura piezométrica H(P) utilizando análoga información transmitida desde X e Y. De esta manera este elemento se actualiza y será capaz de transmitir dicha información actualizada cuando algún otro elemento adecuado se la solicite. Los detalles sobre el MC, en general, y sobre estas ecuaciones, en particular, pueden verse, por ejemplo, en el capítulo 3 de [2].

Las tuberías, agentes de nivel superior
El comportamiento emergente de los distintos nodos interiores de un tubo permite contemplar al propio tubo como un elemento de otro nivel cuyo comportamiento completo aún necesita de nuevas reglas que le permitan ponerse en comunicación con el resto de elementos de la red. Se conoce con el nombre general de condiciones de contorno a esos otros elementos de la red a los que se conectan los tubos. El comportamiento de unos y otros está mutuamente influenciado. Así, se hace imprescindible definir no solo a todos los posibles elementos sino también a sus posibles interrelaciones.
El comportamiento de una tubería puede describirse de manera simple ya que comunica con otros elementos exclusivamente a través de sus extremos. Esta comunicación utiliza las dos características salientes de los nodos extremos de la tubería. A través de estas características la tubería se comunica con los elementos conectados a sus extremos proporcionándoles información en forma de relación entre caudal y altura piezométrica que el elemento conectado tiene que acomodar con su propia información. En los siguientes subapartados introducimos de manera somera algunos de tales elementos.

Los nodos de consumo: puntos de cálculo de nivel superior
Los elementos más comunes en una red son los denominados nodos de consumo. El comportamiento de un nodo de consumo típicamente gestiona las características de cada una de las conducciones que concurren en el nudo (ver una descripción detallada en [2, 5, 32], elabora una información propia que determina su comportamiento y, a su vez, distribuye de manera adecuada una información específica a cada uno de los tubos confluyentes. Ni desde el punto de vista conceptual, ni desde el físico, ni desde el de la programación existen diferencias sustanciales con el comportamiento de los nodos interiores de una tubería, salvo

porque el nodo de consumo puede tener, como su nombre indica, un consumo asociado y porque en el nodo de consumo pueden concurrir más de dos tubos, es decir, tiene que manipular posiblemente más de dos características.

Otros dispositivos: los agentes especialistas

Otras condiciones de contorno, en cambio, son más complejas. Se trata de elementos específicos con funciones específicas. Son los diferentes dispositivos y combinaciones de ellos que pueden aparecer en una instalación hidráulica y que provocan, amortiguan, incrementan, controlan, etc. las perturbaciones. Los dispositivos individuales (bombas, válvulas, calderines, etc.) están descritos de manera satisfactoria en la literatura utilizando diferentes tipos de modelos; se trata, en general, de modelos en régimen permanente o modelos de parámetros concentrados, básicamente [2, 5].

Sin embargo, los paquetes informáticos comerciales existentes en el mercado y los códigos de carácter más doméstico dedicados a la simulación de transitorios en sistemas complejos están fuertemente condicionados por diversos problemas. Uno de los más serios, si no el más grave, se deriva de la dificultad de modelación (programación) de condiciones de contorno compuestas que aparecen en las instalaciones reales. La definición de tales dispositivos compuestos representa un punto crucial que es capaz de marcar la diferencia entre un código eficiente de otro que no lo es [32].

Los facilitadores: los brokers

Básicamente existen dos tendencias utilizadas para la modelación de tales dispositivos compuestos. Una pasa por definir cada posible combinación de elementos simples como un nuevo elemento, que seguiremos llamando simple en el sentido de que viene definido por una rutina única y es accesible mediante un ícono propio en el entorno computacional; tal es el caso de DYAGATS [33], entre otros. La otra considera distintos elementos simples unidos mediante tramos cortos de tubería. Con la primera alternativa los códigos de los elementos, tras sufrir modificaciones adecuadas no necesariamente inmediatas, se multiplican en diferentes rutinas (aparece toda una fauna de íconos) y esto hace ineficiente y obsoleta a la programación. Con la segunda se cae de lleno en la llamada *maldición del tramo corto*. Se trata de un hecho bien conocido [2]. La condición de Courant-Friedricks-Lewy, que es absolutamente necesaria para asegurar la estabilidad, lleva a los cálculos a situaciones no admisibles en términos de recursos computacionales (tiempo y memoria). Existen códigos en el mercado que simplemente asignan, de manera transparente para el usuario, una longitud mínima a los tramos más cortos, para obviar tal circunstancia. En la literatura se ha descrito otras alternativas, como la de utilizar los llamados tramos rígidos para modelar tales tramos cortos (ver [2]). En todo caso, estamos ante aproximaciones del problema asumiendo ciertas hipótesis, siempre discutibles.

El paquete informático para la simulación de transitorios en redes de tuberías que presentamos en este artículo utiliza técnicas multiagente. Por un lado, toda la

filosofía subyacente en la simulación de transitorios es coherente, ya que incluye en la categoría de agente a cualquier elemento que tenga un comportamiento definido y que interactúe con los demás elementos. Además, se obvia de manera elegante a la vez que eficiente los citados problemas en la definición de condiciones de contorno compuestas. Por supuesto, los elementos simples están definidos de manera adecuada (como se hace en DYAGATS, por ejemplo), pero, a la vez, única. Es decir, no existe repetición de código alguna. Y, mediante el enfoque multiagente, las combinaciones de diferentes elementos simples en un único punto se realizan a través de la introducción de nuevos agentes, denominados *facilitadores*, que armonizan el tráfico de preguntas y respuestas entre los elementos simples, es decir, los *facilitadores* se constituyen en los moderadores del diálogo entre ellos.

Un facilitador es una nueva clase de agente diseñado para poner en comunicación adecuadamente a varios elementos. Es un agente-tubería que hereda, por tanto, las propiedades y características de los agentes tubería, las interpreta con una perspectiva personal e incorpora otras características nuevas. El facilitador modifica las variables internas necesarias para desempeñar su función específica de manera autónoma. Conoce a los elementos que tiene que poner en contacto, qué preguntarles, cómo preparar la información necesaria, cómo negociar con ellos, y cómo responder a cada uno con la información que necesita. El comportamiento del facilitador viene descrito por una estructura jerárquica de objetivos que tienen asociadas reglas de activación, ejecución y compleción del objetivo. Además, para cumplir los objetivos, el agente tiene un conjunto de recursos disponibles.

Como se ha comentado anteriormente, los facilitadores consiguen solucionar dos de los problemas de otras aplicaciones del mercado: la repetición de código y los tramos cortos.

Los observadores

Dentro de esta categoría se incluye diversas clases de agentes que tienen el objetivo principal de la comunicación del usuario con el entorno en el que viven los agentes que operan. Estos agentes van desde simples indicadores de error, pasando por cuadros de texto para mostrar los mensajes, hasta gráficos más o menos sofisticados e informes automáticos totalmente personalizables por el usuario.

El usuario

Como se ha dicho, el usuario es seguramente el agente más importante en este sistema multi-agente. Muchas tareas son dependientes del usuario.

El usuario puede crear, personalizar y definir muchos aspectos, las tendencias, los agentes, los observadores, etc., e incluso puede resolver el ritmo de la temporalización de la simulación manipulando adecuadamente la condición de Courant.

El usuario puede agrupar a los agentes para que formen parte de un nuevo agente de nivel superior de modo que se puedan llevar a cabo acciones conjuntas en todos los agentes pertenecientes a un determinado grupo. Por ejemplo, el factor de fricción o la rugosidad de todas las tuberías que pertenecen a un determinado grupo de tuberías

o todo un sector pueden cambiar con una sola acción del usuario si la nueva información sobre el estado, la edad, etc., de las tuberías en una cierta área cambian tras un nuevo estudio.

LA PLATAFORMA DE DIAGASTING

El paquete informático que presentamos se denomina DiagastIng que significa Diseño Inteligente Anti Golpe de Ariete en Sistemas de Tuberías; Ing hace referencia a la marca del prototipo IngeniousWare©. Sin embargo, la mayor ventaja del enfoque que constituye la base de DiagastIng es que un sistema basado en agentes favorece la paralelización del algoritmo de cálculo lo que conduce a una mejor utilización de los recursos del ordenador. La plataforma de DiagastIng es el mundo o entorno en el que viven los agentes que participan en la simulación de transitorios hidráulicos en sistemas complejos. En la figura 2 puede observarse, además del menú y las barras de herramientas, cuatro marcos. El inferior izquierdo es el marco de dibujo y contiene a la instalación que se ve en planta. Los otros tres corresponden a tres perfiles seleccionados.

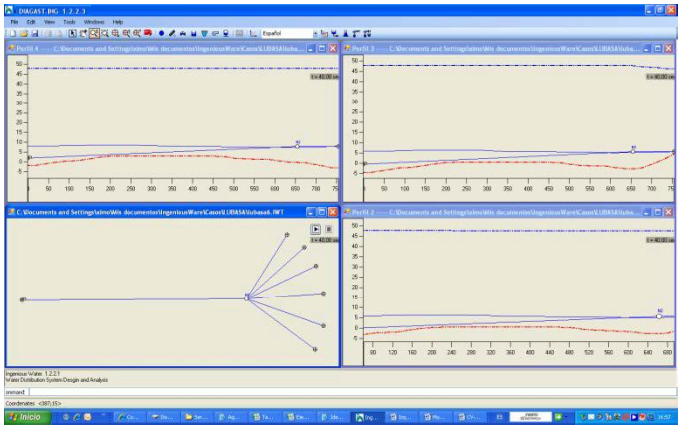


Figura 2. Plataforma DiagastIng

Como se ha observado ya, las especies de agentes que intervienen en esta plataforma son, básicamente, el nodo de cálculo de un tubo, el propio tubo (tubo ordinario o facilitador), el nodo de consumo, los demás elementos, tales como el embalse, el tanque, la válvula, la bomba, el calderín, la chimenea de equilibrio, el tanque unidireccional, y otros dispositivos simples; los perfiles, los monitores, los gráficos temporales, los gráficos espacio-temporales, las tablas de datos, la propia instalación. El propio usuario es un agente que interacciona con algunos de los demás agentes.
Los agentes pertenecientes a especies distintas se crean, se incorporan a la plataforma de manera individual o colectiva. Algunos agentes se crean individualmente utilizando las herramientas del entorno que permiten ubicar elementos específicos en coordenadas específicas. Otros agentes se crean de manera automática cuando se inicializan determinados procesos. Por ejemplo, los nodos internos de cálculo se

crean cuando se define la discretización a utilizar. Los distintos gráficos u outputs de datos se crean a requerimiento del usuario, quien puede, a su vez, interaccionar con sus propiedades, etc.

Una vez creado un agente, este tiene asociado un conjunto de propiedades que lo definen. Tales propiedades pueden ser internas, y el agente las utiliza en su interior de manera exclusiva, o de relación (participativas), y también en su relación con los demás agentes. Estas últimas propiedades encapsulan los protocolos de intercambio de información. Durante el proceso, cada agente sabrá, de esta manera, reconocer a cualquier otro agente que se dirija a él, sabrá dialogar adecuadamente con dicho agente y estará en condiciones de ofrecerle la respuesta que espera.

El propio MC es un mecanismo de transmisión de la información entre ciertos agentes. Lo utilizan los nodos internos de cálculo de un tubo y también los propios tubos para dirigirse a los nodos de consumo y otros elementos a los que están conectados. Su comportamiento (la actividad que realizan), dado por las ecuaciones (3), establece claramente un diálogo con otros agentes, realizado siguiendo un calendario que se construye en el momento de decidir el número de puntos de cálculo y el intervalo temporal de la discretización. En ese diálogo, los agentes interrogan a otros agentes, demandando determinadas respuestas y, a su vez, responden a las preguntas que se les dirigen. Este es, pues, un ejemplo en el que la metodología multiagente acomoda de manera perfecta los requerimientos clásicos basados en las distintas ecuaciones que definen el modelo.

También los agentes bomba, depósito, válvula, etc., están definidos por sus denominadas ecuaciones constitutivas de la manera conocida, aunque con algunas variantes [2, 5, 32]. Son agentes de otras especies con sus variables características y comportamientos perfectamente definidos. Algunos de estos agentes acomodan su comportamiento al calendario común preestablecido. Otros, a su vez, utilizan calendarios propios que conviene sincronizar con el calendario global de la discretización temporal. Estos calendarios individuales describen con precisión las maniobras de tales dispositivos.

Finalmente, dada su función específica de facilitar la interconexión y diálogo entre distintos agentes simples que puedan constituir una condición de contorno compuesta, nos detenemos de manera especial en los *facilitadores* en la sección siguiente y mostramos algunos ejemplos de su funcionamiento.

El agente facilitador

El agente facilitador es un nuevo tipo de agente cuyo cometido, como se ha comentado más arriba, es el de poner en contacto de manera adecuada a los distintos dispositivos simples que puedan componer un elemento compuesto o condición de contorno general.

Se trata de un agente tubo que hereda, por tanto, todas las propiedades y características de los agentes tubo, las interpreta con una óptica propia e incorpora otras características nuevas. Para utilizar un elemento facilitador se lo debe, por tanto, declarar como tal. Entonces, de manera autónoma el propio agente modifica aquellas variables internas que sea necesario para llevar a cabo el cumplimiento de su

función. Como consecuencia de sus propiedades, el agente conocerá perfectamente los elementos a los que debe poner en contacto, es decir, sabrá qué preguntas debe realizar a cada uno de ellos, sabrá elaborar la información necesaria y sabrá responder a cada uno con la información que le reclaman. Presentaremos aquí dos casos simples.

El primero es el facilitador entre válvula y depósito. Este agente es un tramo de tubería sin propiedades físicas de interés que mantiene la relación entre la válvula y el depósito mediante una acción realmente simple: pregunta al depósito por la cota del agua en su interior y su sección a esa cota y pregunta a la válvula por su estado de apertura, su caudal y su altura; entonces, elabora internamente tales datos y devuelve información adecuada a ambos dispositivos. A la válvula le responde como si se tratase de una característica (negativa o positiva) qué es lo que la válvula (genérica) espera. Al depósito se transmite la información necesaria para que este modifique adecuadamente su nivel de agua. Hay que hacer notar, pues, que la física y las matemáticas del fenómeno están permanentemente presentes. De manera parecida es posible explicar la actividad del facilitador entre otros elementos.

En la figura 3 se aprecia una pequeña red ramificada. Se trata de un depósito que alimenta a otros tres.

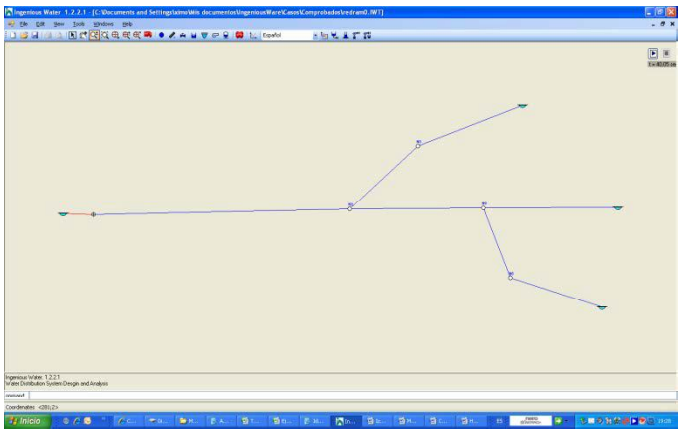


Figura 3. Facilitador (en rojo) entre depósito y válvula

El depósito fuente está regulado por una válvula, que también se aprecia en su proximidad. Mientras que todos los tramos que unen la válvula con los demás nodos intermedios y éstos con los depósitos de cola, son tubos estándar, el tramo que une el embalse fuente con la válvula es un facilitador (en rojo). Se dibuja, se identifica, se conecta topológicamente, etc., como los demás tubos, pero no es un tubo más.

El formulario para este facilitador es el que se emplea para cualquier otro tubo (figura 4). Sin embargo, algunas de sus propiedades no son relevantes. La propiedad que lo caracteriza es la denominada 'Tramo Corto' que está declarada con el valor True. Sabiendo, además a qué otros elementos está conectado, el facilitador llevará a la perfección el papel de mediador en el diálogo depósito-válvula.

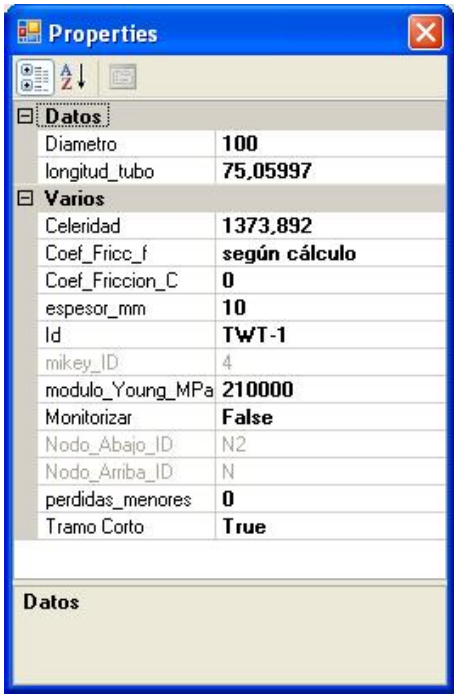


Figura 4. Formulario para un tubo con característica de facilitador (tramo corto) activada

En la figura 5 se presenta otra instalación que incluye dos facilitadores. En efecto se trata de un bombeo a tres depósitos a través de una red. Este bombeo está protegido por un calderín situado próximo al grupo de bombeo. A su vez, uno de los depósitos está regulado por una válvula. Los tramos que unen bomba con calderín y válvula con depósito son facilitadores. Ambos tienen un formulario idéntico al que aparece en la figura 4, excepto por su identificación y su información topológica.

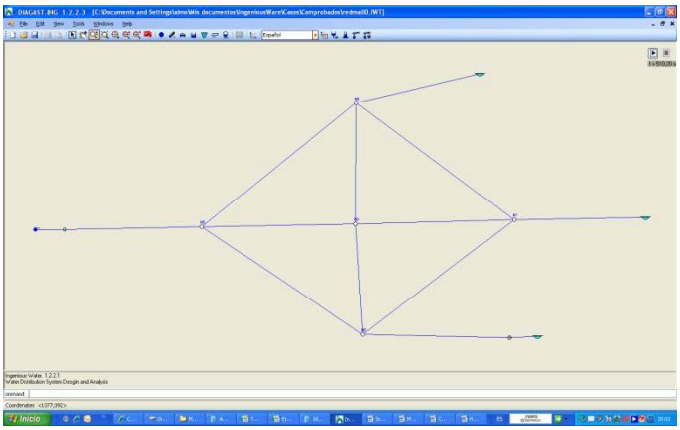


Figura 5. Facilitadores entre bomba y calderín y entre válvula y depósito

CONCLUSIONES

El abastecimiento de agua es uno de los servicios ciudadanos más importantes y que más contribuyen a la calidad de vida. Por ello, la seguridad total de dicho servicio debe estar garantizada. Uno de los fenómenos que hacen peligrar tal seguridad es el de los transitorios hidráulicos. Se trata de un fenómeno muy complejo, descrito por modelos complicados, resuelto de manera general mediante métodos numéricos delicados, difícil de visualizar e interpretar y no proclive a la emisión inmediata y sencilla de juicios y a la toma de decisiones. La implementación computacional de las metodologías para resolverlo implica el uso intensivo de computación. En los momentos actuales, la potencia de cálculo y las distintas capacidades, en general, de los ordenadores son suficientes como para modelar tal fenómeno. No obstante, aún hay que considerar ciertos aspectos derivados directamente de las características de los modelos que obligan a tener cuidado con tales implementaciones.

En este artículo hemos presentado un nuevo paquete informático, DiagastIng, basado en tecnología multiagente, que aborda el problema de una manera eficiente, ya que consigue obviar ciertos problemas de importancia descritos. Por una parte, evita de manera elegante los problemas en la definición de condiciones de contorno compuestas. Esto se traduce en que no existe repetición de código alguna y se evita los tramos cortos. En efecto, mediante el enfoque multi-agente, las combinaciones de diferentes elementos simples en un único punto se realizan a través de nuevos agentes, denominados facilitadores, que moderan el tráfico de preguntas y respuestas entre los elementos simples, es decir, armonizan el diálogo entre ellos. Sin embargo, la mayor ventaja del enfoque que constituye la base de DiagastIng es que un sistema basado en agentes favorece la paralelización del algoritmo de cálculo lo que conduce a una mejor utilización de los recursos del ordenador.

El paquete presentado constituye, pues, una herramienta de enorme interés para los abastecimientos que tienen a los transitorios, muchas veces, como su asignatura pendiente. La utilización de un mecanismo de simulación completo como el que brinda DiagastIng permitirá resolver los dos problemas siguientes: evitar la desprotección del sistema por análisis deficientes y/o excesivamente simplificados [34, 35] y evitar la sobreprotección del mismo por acogerse a márgenes de seguridad excesivamente grandes, con la inversión extra que esto conlleva, por no contar con una herramienta suficientemente potente.

Entre las líneas de investigación próximas debemos, finalmente, citar la paralelización del algoritmo, ya que mejorará claramente algunos de los procedimientos del paquete.

REFERENCIAS

[1] Izquierdo J., Montalvo I., Pérez-García R. y Matías A. "*On the Complexities of the Design of Water Distribution Networks*," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2012, pp. 1-25, 2012.

[2] Abreu J.M., Guarga R. e Izquierdo J. (Editores) *Transitorios y oscilaciones en sistemas*

hidráulicos a presión, Universidad de Coimbra, Universidad Politécnica de Valencia y Universidad de la República Oriental del Uruguay, 1995.

[3] Chaudhry M.H. "*Applied Hydraulic Transients*," Van Nostram Reinhold, New York, 1986.

[4] Wylie E.B. y Streeter V.L. "Fluid Transients in Systems," Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1993.

[5] Izquierdo J., Pérez R. e Iglesias P. L. "*Mathematical models and methods in the water industry*," Mathematical and Computer Modelling, vol. 39, pp. 1353–1374, 2004.

[6] Izquierdo J. e Iglesias P.L. "*Mathematical Modeling of Hydraulic Transients in Simple Systems*," Mathematical and Computer Modelling, vol. 35, pp. 801-812, 2002.

[7] Von Riemann B. "*Partielle Differentailgleichungen*," Ed. Braunwnschweig, 1869.

[8] Lee R. S. T. "*Fuzzy-Neuro Approach to Agent Applications: From the AI Perspective to Modern Ontology*," Springer-Verlag, 2006.

[9] Izquierdo J., Montalvo I. y Pérez R. "*Aplicaciones de la inteligencia colectiva (multiagente) para la optimización de procesos en hidráulica urbana*," Invited talk at VIII Seminario Iberoamericano – SEREA Influencia sobre el Cambio Climático, la eficiencia energética, de operaciones y Sistemas de Seguridad en el abastecimiento y el drenaje urbano, Lisboa, Portugal, 2008.

[10] Maturana F.P., Kotina R., Staron R., Tichý P. y Vrba P. "*Agent-based water\waste water control system architecture*," IADIS International Conference Applied Computing, 2006.

[11] Kotina R., Maturana F.P. y Carnahan D. "*Multi-agent control system for a municipal water system*," Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases, Madrid, Spain, 464-469, 2006.

[12] Nichita C. y Oprea M. "*Water Pollution Diagnosis with a Multi-Agent Approach*," Proceedings, Artificial Intelligence and Soft Computing, 2007.

[13] Feuillette S., Bousquet F. y Le Goulven P. "*SINUSE: a multi-agent model to negotiate water demand management on a free access water table*," Environmental Modelling and Software, vol. 18, nº 5, pp. 413-427, 2003.

[14] Hai-bo L., Guo-chang G., Jing S. y Yan F. "*Multi-agent immune recognition of water mine model*," Journal of Marine Science and Application, vol. 4, nº 2, pp. 44-49, 2005.

[15] Becu N., Perez P., Walker A. y Barreteau O. "*CatchScape: An integrated multi-agent model for simulating water management at the catchment scale, a northern Thailand case study*," de Ghassemi, F. et al. (Eds.) Integrating Models for Natural Resources Management Across Disciplines, Issues and Scales. International Congress on Modelling and Simulation, Canberra, Australia, 1141-1146, 2001.

[16] Cao K., Feng X. y Ma, H. "*Pinch multi-agent genetic algorithm for optimizing water-using networks*," Computers & Chemical Engineering, vol. 31, nº 12, pp. 1565-1575, 2007.

[17] Mikulecký P., Bodnárová A., Olševičová K., Ponce D. y Haviger J. "*Application of multi-agent systems and ambient intelligence approaches in water management*," 13th IWRA World Water Congress, Montpellier (France), 2008.

[18] Hailu A. y Thoyer S. "*Multi-Unit Auctions to Allocate Water Scarcity Simulating*

Bidding Behaviour with Agent Based Models," LAMETA 2005-01, EconWPA, 2005.

[19] Van Oel P. R., Krol M. S., Hoekstra A. Y. y Taddei R.R. "*Feedback mechanisms between water availability and water use in a semi-arid river basin: A spatially explicit multi-agent simulation approach*," Environmental Modelling and Software, vol. 25, nº 4, pp.433-443, 2010.

[20] Huang W., Zhang X. y Wang J. "*Multi-agent system computing and simulation of inter-basin water transfer*," Intelligent Automation and Soft Computing, vol. 17, nº 7, pp. 897-908, 2011.

[21] Zhao T., Ding R. y Man Z. "*Long-range monitoring system of irrigated area water-use based on Multi-Agent*," International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), Jilin, China, pp. 580 – 583, 2011.

[22] Izquierdo J., Herrera M., Montalvo I. y Pérez-García R. "*Division of water supply systems into district metered areas using a multi-agent based approach*," Software and Data Technologies, de Communications in Computer and Information Science, Springer, Berlin, Heidelberg, Ch. 13, pp. 167–180, 2011.

[23] Herrera M. "*Improving water network manangement by efficient division into supply clusters,*" PhD thesis, Universitat Politécnica de Valéncia, Valencia, Spain, 2011.

[24] Herrera M., Gutiérrez-Pérez J. A., Izquierdo J. y Pérez-García R. "*Combining multiple perspectives on clustering. Node-pipe case in hydraulic sectorization*," International Journal of Complex Systems in Science, vol. 2, nº 1, pp.17-20, 2012.

[25] Igual-Herrero F. J. "*An electronic institution based on Multi-Agent Systems for a water right transfer market in Spain*," Universitat Politècnica de València, 2012.

[26] Ayala-Cabrera D., Herrera M., Izquierdo J. y Pérez-García R. "*Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images*," Journal of Applied Geophysics, vol. 75, nº 4, pp. 679–686, 2011.

[27] Ayala-Cabrera D., Izquierdo J., Montalvo I. y Pérez-García R. "*Water supply system component evaluation from GPR radargrams using a multi-agent approach*," Mathematical and Computer Modelling, vol. 57, pp. 1927–1932, 2013.

[28] Montalvo I. "*Diseño óptimo de sistemas de distribución de agua mediante Agent Swarm Optimization,*" Ph.D. thesis, Universitad Politècnica de València, Valencia, Spain, 2011.

[29] Montalvo I., Izquierdo J., Pérez-García R. y Herrera M. "*Water Distribution System Computer-aided Design by Agent Swarm Optimization*," Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 29, nº 6, pp. 433-448, 2014.

[30] Wooldridge M. "*An Introduction to Multiagent Systems*," John Wiley and Sons, 2002.

[31] Evangelisti G. "*Waterhammer Analysis by the Methods of Characteristics*," L'Energia Elettrica, nº 10, 11, 12, 1969.

[32] Izquierdo J. e Iglesias P. L. "*Mathematical Modeling of Hydraulic Transients in Complex Systems*," Mathematical and Computer Modelling, vol. 39, nº 4-5, pp. 529-540, 2004.

[33] Izquierdo J., Iglesias P. L. y Cabrera E. "DYAGATS- *Simulación mediante*

ordenador personal de transitorios hidráulicos en sistemas simples". VII Encontro nacional de Saneamento Basico, Coimbra, Portugal, 1996.

[34] Izquierdo J., Montalvo I., Pérez-García R. y Alonso C. D. "*Sobre ciertas simplificaciones en la simulación de transitorios hidráulicos*", IX SEREA'09 Planificación, proyecto y operación de redes de abastecimiento de agua, Valencia, España, 2009.

[35] Jung B. S., Karney B. W., Boulos P. F. y Wood D.J. "*The need for comprehensive transient analysis of distribution systems*," Journal AWWA, vol. 99, nº 1, pp.112-123, 2007.

Correspondencia

Joaquín Izquierdo
jizquier@upv.es