

Modelo de llenado de grandes conducciones

Romero, A.M.^{a1}, Arrué, P.^{a2}, Garcia-Serra, J.^{a3}, Espert, V.^{a4} y Biel, F.^{b1}

^{a1}Universitat Politècnica de València, Camino de vera s/n (46022-Valencia), E-mail: ^{a1}aromeros@csa.upv.es, ^{a2}paarbu@csa.upv.es,

^{a3}jgarcias@ita.upv.es, ^{a4}vespert@ita.upv.es,

^{b1}Emimet, C/ Antiga Senda de Senent nº 8 5ª planta (46023-Valencia). E-mail: ^{b1}fbiel@emimet.es.

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

RESUMEN

El llenado de conducciones debe de realizarse en condiciones de máxima seguridad, ya que es una operación delicada que puede generar importantes sobrepresiones en el sistema. Surge por tanto la necesidad de elaborar un protocolo de llenado de grandes conducciones, para lo que se hace necesario contar con un modelo matemático de simulación. En otro trabajo se presenta la caracterización realizada del comportamiento de las ventosas, y en este se describen los ensayos realizados para caracterizar las válvulas de llenado. El modelo es capaz de predecir la evolución de presión y caudal durante la operación, así como el tiempo de llenado con bastante precisión, habiéndose comparado los resultados con datos experimentales obtenidos en campo y los que proporciona el modelo Allievi, que utiliza el modelo pistón y el método de las características. Tiene como limitación el que solo se puede aplicar a un tramo de pendiente constante, aunque es capaz de trabajar con hasta cinco ventosas distribuidas a lo largo de la conducción.

Palabras clave | Llenado; aire atrapado; ventosa; válvula de llenado; modelos de simulación.

INTRODUCCIÓN

La Universidad Politècnica de València (UPV) y la empresa Global Omnium trabajan conjuntamente en un proyecto de Investigación y Desarrollo que tiene como objetivo elaborar un protocolo para el llenado y vaciado de grandes conducciones. Para ello resulta imprescindible conocer muy bien el funcionamiento real de los elementos que intervienen en el sistema para decidir la forma en la que deben de realizarse estas operaciones en condiciones de máxima seguridad, dado que nos encontramos siempre en presencia de bolsas de aire que, como fluido fácilmente compresible que es, puede originar sobrepresiones importantes. Pero tan importante es la elección de las ventosas adecuadas, como el control de las válvulas de llenado y vaciado (desagües) para lograr una velocidad del flujo adecuada.

Por ello resulta imprescindible conocer muy bien el funcionamiento real de los elementos que intervienen en el sistema (conducciones y su geometría, válvulas de llenado y válvulas de vaciado o desagües y puntos de entrada y salida de aire del sistema, básicamente ventosas y grifos de purga).

Como primera fase de este estudio se planteó el ensayo de las ventosas a fin de contrastar su funcionamiento con los datos proporcionados por los fabricantes. En otro trabajo presentado en este mismo Congreso se recogen los resultados obtenidos. Posteriormente se pasó a caracterizar las válvulas con las que se realiza el llenado de la conducción y en una tercera fase está previsto ensayar los sistemas de desagüe para el vaciado de las conducciones.

El presente trabajo se centra en lograr la caracterización hidráulica de las válvulas de llenado (la de las ventosas ha sido objeto de otro trabajo) y en la confección de un modelo matemático de simulación válido, para una tubería de pendiente constante ascendente o descendente, en la que exista un punto de llenado y varias ventosas a lo largo de su perfil. Hay que destacar que en la mayoría de las grandes conducciones del área metropolitana de Valencia, a las que se va a aplicar en principio este protocolo, se trabaja con tuberías de pendiente constante de valores relativamente pequeños.

El modelo de simulación tiene en cuenta que a las bajas velocidades a las que se llena una conducción (entre 0.3 y 0.5 m/s aproximadamente) la conducción se comporta como un depósito, por lo que se considera la lámina de agua horizontal a lo largo de toda la conducción y se desprecian a efectos prácticos las pérdidas de carga por fricción en la tubería.

Finalmente, se compara el modelo con otros basados en el modelo pistón (Allievi) y se contrastan los resultados con los obtenidos mediante medición en campo, verificándose la bondad del mismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El llenado de un tramo de una conducción que se encuentra vacío se efectúa normalmente a través de uno de los puntos de conexión de la conducción con el resto del sistema. En el citado punto se encontrará una válvula de aislamiento, generalmente de compuerta para diámetros hasta 300 mm y de mariposa para diámetros superiores, diámetro igual al de la conducción a llenar. Asimismo, a lo largo de la conducción se ubicarán ventosas para proceder al purgado del aire del sistema.

Normalmente la operación se realiza introduciendo un pequeño caudal Q_{ll} en el sistema para no comprimir de manera excesivamente rápida el aire contenido en el interior de la conducción, la velocidad de llenado recomendable se encuentra entre 0.3 y 0.5 m/s, Ecuación (1):

$$Q_{ll} = V_{ll} \cdot A_{tub} \quad (1)$$

donde V_{ll} es la velocidad y A_{tub} la sección de la tubería.

El grado de apertura de la válvula de llenado debe de ser muy pequeño para lograr el caudal deseado salvo que la presión existente en el sistema desde el que se llena sea muy baja, lo que normalmente no ocurre. Por ello, es bastante difícil controlar el grado de apertura de la válvula para lograr el efecto deseado. En ocasiones, en paralelo con la válvula principal se coloca una válvula que solo se usa para el llenado (bypass), de menor diámetro que la tubería para lograr una mejor regulación del caudal de llenado.

Para caracterizar hidráulicamente las válvulas, los fabricantes suministran los valores del coeficiente de caudal K_v para cada grado de apertura de la válvula. El caudal circulante, Q , se expresa en función del citado coeficiente y de la pérdida de carga que se produce en la válvula (Δp) mediante la Ecuación (2):

$$Q = K_v \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (2)$$

En principio, el coeficiente de caudal depende solo del tipo de válvula, del diámetro de la misma y del grado de apertura, pero los fabricantes no suelen dar el valor de estos coeficientes para grados de apertura muy pequeños, precisamente aquellos en los que la válvula va a trabajar en ocasiones cuando se trata de llenar a baja velocidad un tramo de conducción. Asimismo el citado coeficiente se determina normalmente en banco de ensayo según normas UNE-EN 1267 e ISO 9644, generando una pérdida de carga a través de la válvula y disponiendo de una contrapresión aguas abajo, pero no se determina para el caso en que no existe presión aguas abajo, lo que ocurre en los llenados al principio de la operación.

Dado que ya se dispone de la caracterización hidráulica de las ventosas (ver otro trabajo presentado en este mismo evento), queda por caracterizar hidráulicamente la válvula teniendo en cuenta que el coeficiente de caudal será función, para cada tipo, modelo y tamaño de la válvula, del grado de apertura (θ), expresado en porcentaje de vueltas del eje, y de las presiones aguas arriba P_e y aguas abajo P_s .

Caracterización de las válvulas. Banco de ensayos.

Los ensayos de caracterización hidráulica de válvulas han sido realizados en el banco de ensayo de elementos dispuesto al efecto por la empresa EMIMET en las instalaciones anejas al depósito de Albalat dels Sorells (Valencia). El citado banco se alimenta del depósito con un grupo de velocidad variable de 180 CV de potencia, capaz de suministrar un caudal de 160 l/s con una altura manométrica de 58 mca, y dispone de una conducción de 600 mm de diámetro que alimenta el elemento a

caracterizar. Aguas abajo del mismo es posible generar más o menos contrapresión mediante un juego de válvulas y un tubo piezométrico de 5 metros de altura. Se dispone asimismo de transductores de presión, medidores de nivel y caudalímetros para la recogida de datos.

La conducción que alimenta la válvula deberá ser del mismo diámetro que esta, por lo que se instalarán aguas arriba y aguas abajo de la misma sendos carretes. En el caso de los ensayos realizados en válvulas de 400 mm, el carrete situado aguas abajo es transparente, que permite la visualización del flujo.

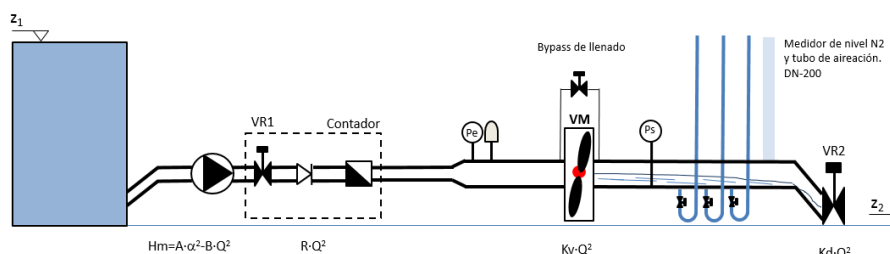


Figura 1 | Esquema del banco de ensayos de válvulas de mariposa en la empresa Aguas de Valencia.

Resultados de la caracterización de las válvulas.

Los ensayos se realizaron para válvulas de mariposa de diámetro 400 y 600 mm, y de bypass en la válvula de 600 mm con válvula de mariposa de 200 mm. Las presiones de entrada fueron de 30, 40 y 50 mca, y las de salida de 0 (sin contrapresión con tubería vacía), 10, 20 y 30 mca. El grado de apertura se midió en vueltas del mecanismo de accionamiento, siendo el número de vueltas ensayadas de 15 a 20 en la de 200 mm, de 5 a 10 en la de 400 mm y de 6 a 10 en la de 600 mm.

Para cada una de las válvulas se confeccionó una tabla de resultados en la que se recogía el número de vueltas, la presión a la entrada y la presión a la salida, determinándose al valor del coeficiente de caudal correspondiente. En la Tabla 1 se recogen los valores del coeficiente de caudal, expresados en $\text{m}^3/\text{h}/\text{bar}^{0.5}$.

Tabla 1 | Coeficiente de caudal K_v ($\text{m}^3/\text{h}/\text{bar}^{0.5}$) de válvula de mariposa DN-600.

Número de vueltas (θ)	6	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	10	10	10
$P_{\text{salida}} \setminus P_{\text{entrada}}$	30	40	50	30	40	50	30	40	50	30	40	50	30	40	50
0	94	97	95	152	151	141	194	197	198	276	270	263	369	370	x
10	164	155	153	189	177	168	239	230	225	316	308	289	446	436	x
20	182	166	163	206	187	182	276	248	247	356	325	307	476	426	x
30	x	180	172	x	209	193	x	269	253	x	361	324	x	482	431

Como puede observarse, el coeficiente de caudal no se mantiene constante para un grado de apertura determinado, sino que varía al hacerlo las presiones de entrada y salida. Cuando la contrapresión es nula, el coeficiente de caudal disminuye sensiblemente respecto de los casos en los que la presión a la salida es distinta de cero. Se ha determinado el coeficiente de caudal para cada grado de apertura mediante la Ecuación (3).

$$K_v(DN, \theta) = A(DN, \theta) + B(DN, \theta) \cdot P_s + C(DN, \theta) \cdot \Delta P + D(DN, \theta) \cdot P_s^2 + E(DN, \theta) \cdot \Delta P^2 \quad (3)$$

$K_v(DN, \theta)$: Coeficiente de caudal para un diámetro DN y un número de vueltas θ , expresado en $\text{m}^3/\text{h}/\text{bar}^{0.5}$

A, B, C, D, E: Coeficientes de la expresión, dependientes de DN y de θ

P_s : Presión salida en mca

ΔP : Diferencia de presión entre entrada y salida, en mca

Mediante estas expresiones se puede modelizar la capacidad de la válvula en el proceso de llenado.

METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Modelo matemático de cálculo del tiempo de llenado.

El modelo de cálculo está diseñado para una conducción de diámetro y pendiente constante, con válvula de llenado de mariposa y un máximo de cinco ventosas, indicando su posición en la conducción. Se define el protocolo de llenado fijando el diferencial de tiempo de cálculo, la presión existente en la red que alimenta la conducción a llenar y el protocolo de apertura de la válvula que admite hasta seis posiciones diferentes a lo largo del proceso de llenado. El modelo calcula la evolución del llenado manteniendo la lámina de agua horizontal y reproduciendo el proceso real con la volumetría dependiente de la pendiente de la tubería, diferenciando 4 casos (A, B, C ó D) para pendiente ascendente y descendente, Figura 2.

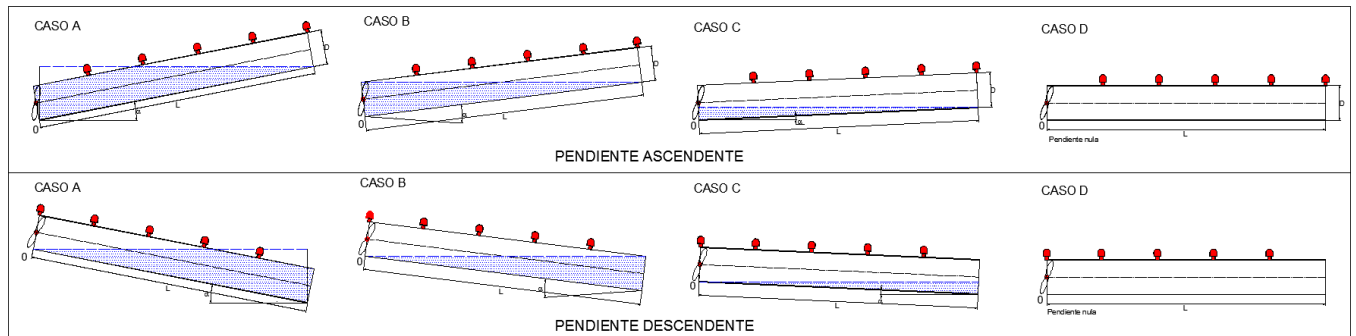


Figura 2 | Geometría de la conducción.

Este modelo tiene en cuenta las ventosas que realmente están actuando en cada instante, Figura 3 a), a diferencia del modelo pistón, con una volumetría cilíndrica ascendente, Figura 3 b). El modelo calcula para cada instante de tiempo, el caudal de agua en la conducción, la cota del nivel de agua, la presión del aire, el caudal de aire expulsado del conjunto de ventosas, etc.

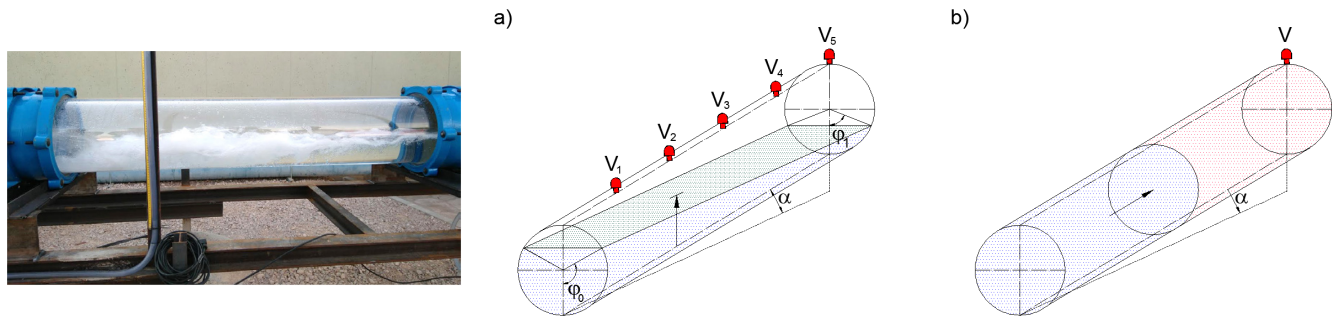


Figura 3 | Modelo de cálculo con lámina de agua horizontal a) y b) y modelo pistón c).

Teniendo en cuenta la caracterización de la válvula de llenado, ventosas, geometría, características mecánicas de la tubería, características físicas del estado bi-fase agua-aire, temperatura, presión atmosférica local, humedad relativa del aire y densidades, se confecciona el modelo matemático de simulación del llenado, partiendo de la ecuación de continuidad y de la ecuación de la energía.

Ha de tenerse en cuenta el concepto de caudal másico, Ecuación (4):

$$G = Q_{CI} \cdot \rho_{CI} = Q_{CN} \cdot \rho_{CN} \quad (4)$$

donde Q_{CI} es el caudal volumétrico en m^3/s y ρ_{CI} la densidad del aire en kg/m^3 , ambos en condiciones del interior de la tubería, mientras que Q_{CN} y ρ_{CN} son el caudal volumétrico en Nm^3/s y la densidad kg/Nm^3 en condiciones normales, que son presión atmosférica en condiciones normales ($P_{aire(CN)} = 101324.2691$ Pa), obtenida mediante una columna de mercurio de 0.76 m, con una densidad del mercurio de $13.595 \cdot kg/cm^3$ y una aceleración normal de caída libre de $9.80665 m \cdot s^{-2}$

En condiciones interiores la densidad del aire viene dada mediante la Ecuación (5)

$$\rho_{CI} = \frac{P_{atm local} + P_{relativa}}{R_{aire} \cdot (273.15 + T_{ambiente} (^{\circ}C))} \quad (5)$$

donde $p_{atm local}$ es la presión atmosférica local en Pa indicada en la Ecuación (6), (NASA, 1976), teniendo en cuenta la altitud Z en metros sobre el nivel del mar donde se realiza la prueba.

$$P_{atm local} = P_{aire (CN)} \cdot (1 - 2.25577 \cdot 10^{-5} \cdot Z)^{5.2559} \quad (6)$$

$T_{ambiente}$ es la temperatura del aire ambiente en $^{\circ}C$ y $p_{relativa}$ es la presión manométrica en Pa, que puede ser tanto positiva, cuando se expulsa aire hacia el exterior, como negativa en el caso de admisión de aire. R_{aire} es la constante del aire, que depende de su peso molecular, y por lo tanto, de su composición y humedad.

Sustituyendo la densidad del aire de la Ecuación (5) en la Ecuación (4), se obtiene la Ecuación (7)

$$Q_{CI} \cdot \left[\frac{P_{atm local} + P_{relativa}}{273.15K + T_{ambiente} (^{\circ}C)} \right] = Q_N \cdot \left[\frac{P_{aire (CN)}}{273.15K + 20^{\circ}C} \right] \quad (7)$$

A través de la Ecuación (7) puede obtenerse el valor de Q_{CI} y el de Q_N . En ocasiones puede que se cumpla que $Q_{CI} > Q_N$ y en otras $Q_{CI} < Q_N$, simplemente variando las condiciones de presión ($p_{atm local} + p_{relativa}$) y de temperatura ($T_{ambiente}$).

El modelo de cálculo precisa de los siguientes datos previos:

- Características de la tubería: Tipo ascendente o descendente, diámetro interior, longitud, pendiente uniforme y características mecánicas del material.
- Características de la válvula: Diámetro y curvas caracterizadas del Kv en función de la presión de salida, diferencia de presión, diámetro y grado de apertura en forma de número de vueltas admitiendo hasta seis posiciones a lo largo del proceso.
- Características ambientales: Temperatura ambiente, humedad relativa y altitud.
- Caracterización de las ventosas: Cota de ubicación, modelo que determina la presión del cierre dinámico en su caso y la curva modelizada del caudal de aire expulsado en condiciones normales en función de la presión relativa del aire.
- Protocolo de cálculo: Presión de entrada a la válvula correspondiente de la red de distribución, diferencial de tiempo de estudio y velocidad aproximada del tiempo de llenado.

El modelo sigue el algoritmo de cálculo indicado en la Figura 4, utilizando las ecuaciones de conservación de la energía, la geometría de la tubería, la ley de los gases perfectos y las ecuaciones modelizadas de la caracterización de las válvulas y de las ventosas y finaliza el proceso indicando el tiempo de llenado. No se ha tenido en cuenta la inercia del fluido.

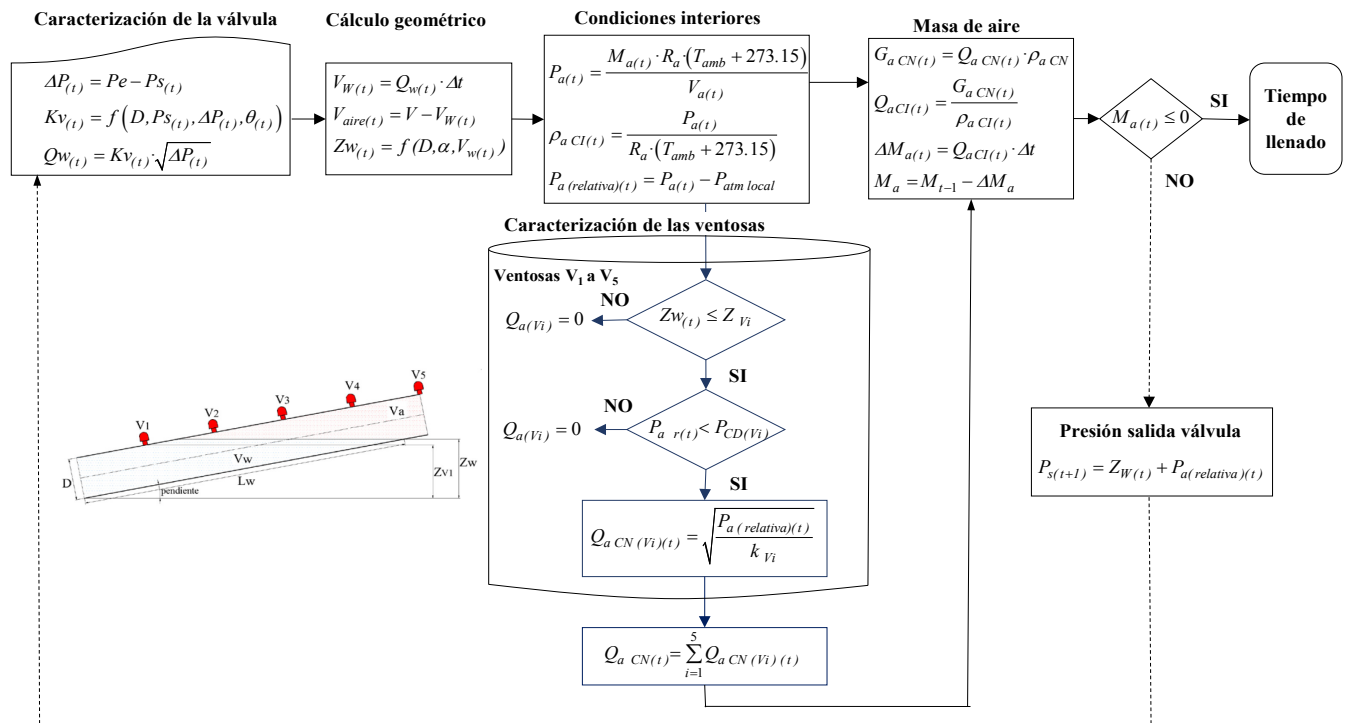


Figura 4 | Algoritmo de cálculo del tiempo de llenado.

El modelo produce un aviso en los casos de llenado incompleto. Estos avisos son:

- Llenado incompleto_Presiones negativas. Cuando el modelo detecta alguna presión negativa debida a oscilaciones de presión del aire en el interior de la conducción, en ese instante de tiempo el modelo deja de calcular y se indica el tiempo en el que se ha producido, así como la cuantía del volumen de aire que queda por expulsar y la presión relativa del aire en ese instante.
- Llenado incompleto_Aire atrapado. Puede ocurrir porque se han cerrado todas las ventosas por nivel de agua, pero la última que lo ha hecho no está exactamente en el final de la conducción ó porque se ha producido un cierre dinámico en la ventosa de cota más elevada. En este caso, desde que deja de expulsarse el aire de la conducción, en la misma se continúa introduciendo caudal de agua, por lo que el volumen de aire se comprime hasta que la presión del interior de la conducción se iguala a la de la red y se detiene el llenado. En este instante el modelo muestra cuál es la cuantía del volumen de aire atrapado y la presión relativa del aire.
- También se indica el comportamiento de las ventosas (el instante de tiempo en el que se ha producido el cierre de cada ventosa y la causa del cierre). Esta puede ser porque el nivel del agua ha alcanzado la ventosa o porque se haya producido un cierre dinámico. Se muestra un ejemplo en la Tabla 2.

Tabla 2 | Ejemplo de resultado del tiempo de llenado con aviso de presiones negativas, aire atrapado y condiciones de cierre de las ventosas.

RESULTADO DEL TIEMPO DE LLENADO	
Tiempo de llenado t_{ll} (s)=	1.576,00
	26,27 min
LLENADO INCOMPLETO_PRESIONES NEGATIVAS	
Volumen aire por expulsar:	5,81 litros
Presión relativa aire:	-0,32 mca
RESULTADO DEL TIEMPO DE LLENADO	
Tiempo de llenado t_{ll} (s)=	1.576,00
	26,27 min
LLENADO INCOMPLETO_AIRE ATRAPADO	
Volumen aire por expulsar:	8,28 litros
Presión relativa aire:	35,85 mca

VENTOSAS	V1	V2	V3	V4	V5
FICHA					
MODELO	ARI D-046	ARI D-060 NS	IRUA MONOBLOCK FIG.940	IRUA MONOBLOCK FIG.940	IRUA DOBLE CUERPO FIG.952
DN	80	80	50	50	80
NON SLAM	NO	SI	NO	NO	NO
$k_{1F} (Pa/(Nm^3/s)^2)$		3,12E+05			
$P_{max1F} (bar)$		4,90E-03			
$k (Pa/(Nm^3/s)^2)$	1,49E+05	1,04E+07	1,31E+06	1,31E+06	7,84E+04
$P_{CD} (bar)$	4,28E-01				5,00E-04
$P_{max} (bar)$	4,28E-01	9,85E-01	7,42E-01	7,42E-01	3,82E-02
$Z_v (m)$	0,4076	0,4304	0,4455	0,4607	0,4759
Tiempo de cierre:	1.451,80 s	1.491,60 s	1.506,40 s	1.513,40 s	2,00 s
Causa del cierre:	Por nivel del agua	Por nivel del agua	Por nivel del agua	Por nivel del agua	CIERRE DINAMICO

Estudio experimental.

Para comprobar la fiabilidad del modelo se han realizado ensayos de llenado de una tubería de fundición DN-400 que alimenta al depósito de Museros en Valencia, cuyo esquema de la instalación se indica en la Figura 5. Se realizaron tres ensayos de llenado: de P2 a P3, de P3 y P4 y de P2 a P4, con dos ventosas instaladas V3 en el punto P3 y V4 en el punto P4.

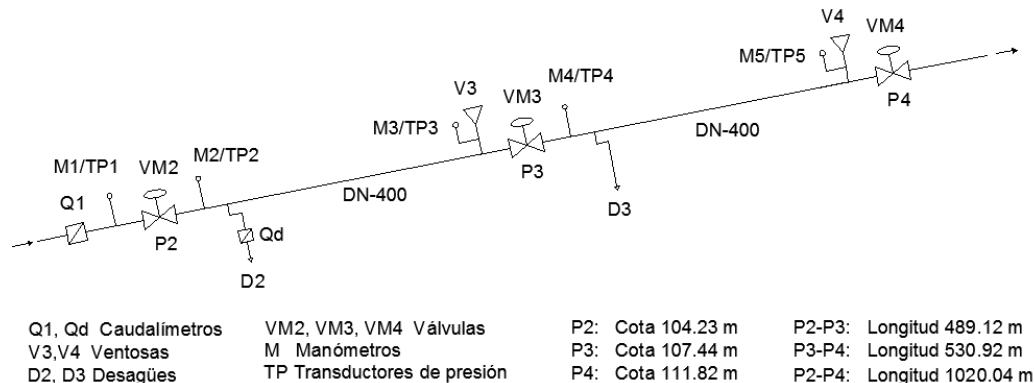


Figura 5 | Esquema del tramo de conducción a estudio.

Las válvulas de llenado situadas en P2 y P3 son del tipo mariposa, caracterizada en ensayos previos, con diámetro DN-400. La válvula se abre a una posición correspondiente a 9 vueltas. Las ventosas situadas en el punto P3 (V3) y en el punto P4 (V4) son del tipo IRUA MONOBLOCK Fig.940. DN-50. A continuación se muestran los resultados del llenado de P2 a P4. En este ensayo no se dispone de la lectura del caudal trasagado. Los resultados se indican en la Tabla 3.

Tabla 3 | Resultados experimentales del llenado del tramo P2 a P4.

Resultados	Inicio	Final	Duración
Tiempo (h:m:s)	00:00:00	0:34:56	34.93 min
Presión promedio red previo al ensayo (TP1) (mca)	38.66		2096 s
Presión promedio red durante el ensayo (TP1) (mca)	35.45		

La evolución de las presiones con el tiempo durante el llenado del tramo P2-P4 se indica en la Figura 6 y en mayor detalle se indica la maniobra de inicio en la Figura 7 y de finalización en la Figura 8.

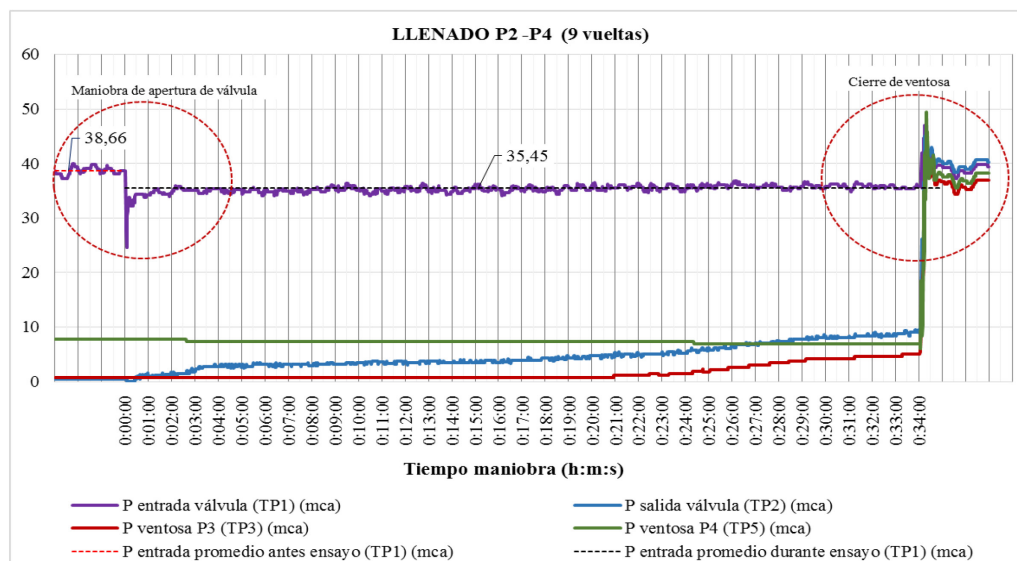


Figura 6 | Ensayo llenado P2-P4, 9 vueltas. Presiones en la válvula y presión en ventosas P3 (TP3) y P4 (TP5) vs. Tiempo de maniobra (h).

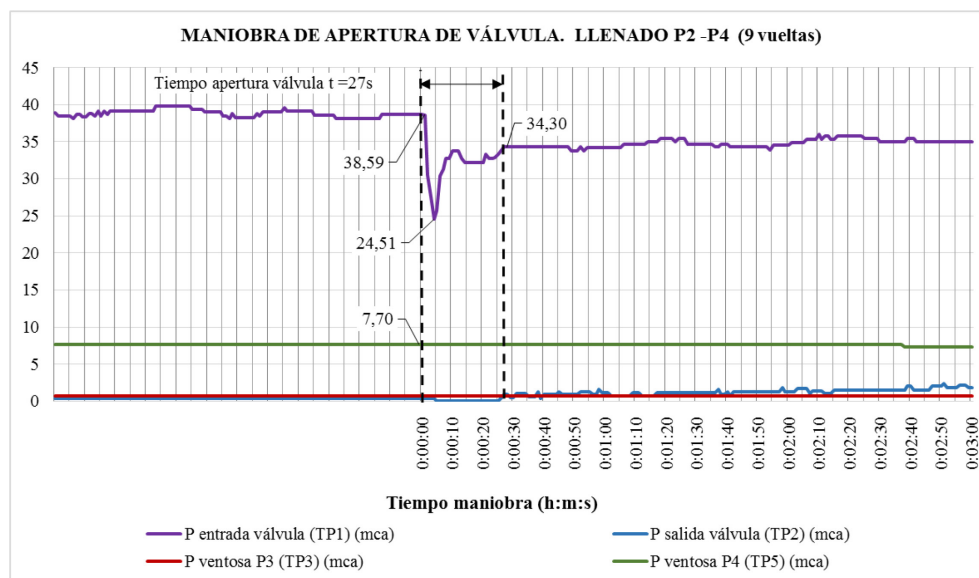


Figura 7 | Maniobra de apertura de válvula. Ensayo llenado P2-P4, 9 vueltas. (De 0:00:00 a 0:03:00). Presión entrada y salida válvula, presión en ventosa P3 (TP3) y P4 (TP5) vs. Tiempo de maniobra (h).

La posición de apertura de la válvula es de nueve vueltas, intermedia respecto a los otros dos ensayos P2 a P3 y de P3 a P4, pero la presión de la red es mayor (38.66 mca). En estas condiciones el valor teórico de la modelización de la válvula de mariposa de eje horizontal indicaría un caudal de 61.94 l/s y velocidad de 0.47 m/s, pero no se ha podido contrastar con el caudal real debido a que durante el ensayo no se pudieron obtener las lecturas del caudal mediante instrumentación.

En este caso cabe destacar el comportamiento debido a la instalación de dos ventosas. En la Figura 8 se observa con mayor detalle (periodo de 0:34:00 a 0:34:54), las oscilaciones de presión en las ventosas presentando picos coincidentes con las presiones en la válvula pero con un tiempo de desfase, debido al recorrido de la onda de presión. El primero se produce inicialmente en la ventosa V4 al final de la conducción y se traslada hasta la presión de entrada a la válvula. En la ventosa V4 la oscilación es mayor que en la ventosa V3 debido al volumen de aire existente en la tubería de conexión a la ventosa V3.

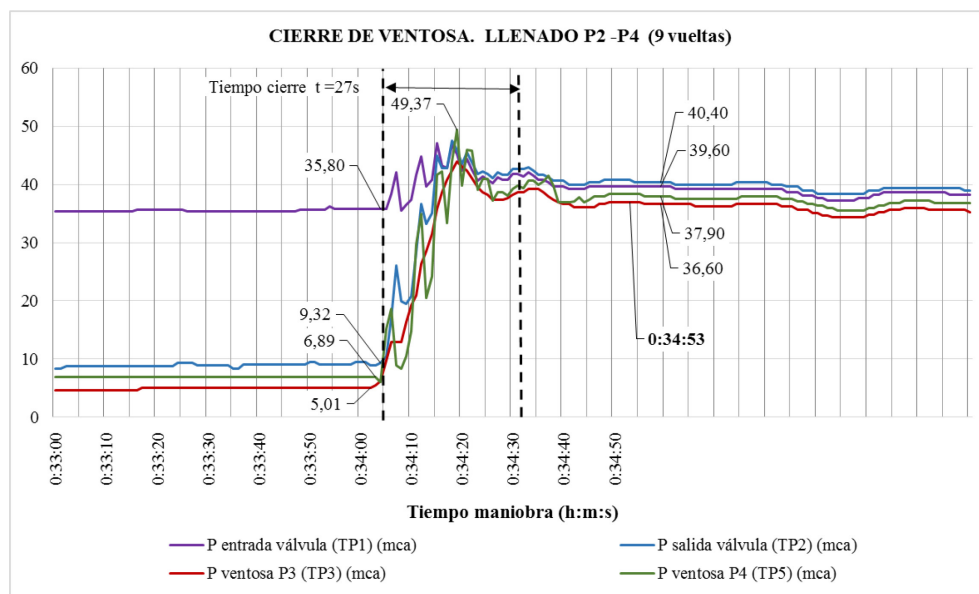


Figura 8 | Cierre de ventosa. Ensayo llenado P2-P4, 9 vueltas. (De 0:33:00 a 0:36:00). Presión entrada y salida válvula, caudal entrada válvula, presión en ventosa P3 (TP3) y P4 (TP5) vs. Tiempo de cierre (h).

RESULTADOS

Resultados del modelo matemático de cálculo de tiempo de llenado aplicado al caso de estudio.

En el modelo se introducen los datos indicados en la Tabla 4 en las celdas de fondo azul.

Tabla 4 | Características de la instalación.

Datos a introducir									
TUBERÍA (GEOMETRÍA)			ASCENDENTE		VENTOSAS EN EXPULSIÓN				
DIÁMETRO	D=	0.40	m		FICHA	V1	V2	V3	V4
LONGITUD	L=	1.020.04	m		MODELO			7.2.D50	7.2.D50
PENDIENTE	p=	0.7441	%		DN _v			IRUA MONOBLOCK FIG.940	IRUA MONOBLOCK FIG.940
	α =	0.43	Grados (°)		DN _v (mm)=			50	50
	α =	0.01	Radianes		NON SLAM			NO	NO
COTA MÁXIMA VENT.	Z _{v max} =	7.99	m		Caracterización Cierre 1º Flotador				
					Ec. equivalente: $P = k_{1f} \cdot Q^2$				
					Presión máxima 1º Flotador				
TUBERÍA (MATERIAL)			FUNDICIÓN		Caracterización Cierre Expulsión				
MATERIAL				Coefficiente Manning	Ec. equivalente: $P = k \cdot Q^2$				
DESIGNACIÓN	F1			0.013	Presión Cierre Dinámico $P_{cd}(\text{bar})=$			1.01E-06	1.01E-06
Límite elástico	R _{m0.5}	270.00	MPa		Presión máxima ensayada $P_{max}(\text{bar})=$			7.42E-01	7.42E-01
Resistencia a tracción	R _m	420.00	MPa		DISTANCIA A ORIGEN			489.12	1.020.04
Espesor	e=	10.00	mm		COTA			4.04	7.99
Módulo de elasticidad	E _{mat}	200000.00	MPa						
VÁLVULA			MARCA		Características del aire				
MODELO					Temperatura	T (°C)=	18.00	Presión atmosférica local	P _{atm} (Pa)=
DIÁMETRO	D=	400	mm		Humedad relativa	e (%)=	82.00	Presión de saturación	P _{ws} (Pa)=
					Altitud	z (m)=	10.00	Presión parcial	P _{rw} (Pa)=
					Características del agua				Constante máscia aire húmedo
					Módulo elasticidad volumétrico	E _{agua} (Pa)=	2.175.522.861.77	Densidad inicial del aire seco	R _{aire,hum} (m³·Pa/kg·K)=
					Densidad	ρ (kg/m³)=	998.18	Densidad inicial del aire húmedo	P _{aire ini,sec} (kg/m³)=
					Viscosidad cinemática	ν (m²/s)=	1.052E-06	Densidad aire en CN (101324.26Pa, 20°C)	P _{aire,cn} (kg/m³)=

La geometría del tramo indica que se trata del caso A, el protocolo de llenado establece una presión relativa antes de la válvula en el instante inicial de 3.87 kp/cm² y la apertura de la válvula se realiza con una única posición de nueve vueltas. Los resultados obtenidos son el tiempo de llenado de 36.14 min y un caudal promedio de 59.10 l/s, Tabla 5.

Tabla 5 | Resultado del tiempo de llenado.

TUBERÍA			ASCENDENTE		PROTOCOLO DE LLENADO				
DIÁMETRO	D=	0.40	m		Diferencial tiempo de estudio recomendable	dt > 0.22 s			
LONGITUD	L=	1.020.04	m		Diferencial tiempo de estudio	dt (s)=	0.22		
PENDIENTE	α =	0.43 °			Presión relativa antes válvula	P _r (kp/cm²)=	3.87		
	α =	0.01 rad							
CASO DE ESTUDIO			A		VÁLVULA				
	Volumen (m³)	Z (m)			DN_400	Nº vueltas: 5, 6, 7, 8, 9, 10		Cálculo del nº de vueltas en función de la velocidad inicial de llenado	
A2	3.38	0.40			MARCA			Velocidad inicial de llenado: V _{ini} (m/s)=	0.50
A4	124.80	7.59			MODELO			Nº de vueltas =	9.03
A6	128.18	7.99			DIÁMETRO	400mm		Kv (m³/h)/bar ^{0.5}	116.26
RESULTADO DEL TIEMPO DE LLENADO			A		PROTOCOLO APERTURA DE VÁLVULA				
Tiempo de llenado	t _{ll} (s)=	2.168.54			Posición	T _{inicial} (s)	T _{final} (s)	Nº vueltas	A
		36.14 min			1	0.00	10000.00	9.00	153.8243
					2	10000.00			0.0646
					3	0.00			-1.8600
					4	0.00			0.0002
					5	0.00			0.0219
					6	0.00	2195.16		
TIEMPO DE LLENADO TOTAL			A		Kv= A+B·Ps+C·ΔP+ D·Ps²+E·ΔP²				

En la Figura 9 se representan gráficamente los resultados correspondientes a las ventosas instaladas V3 y V4. El caudal de aire expulsado individualmente por la ventosa V3 (verde) y V4 (azul), con líneas superpuestas al ser las dos ventosas idénticas, y el caudal total (rojo). Se observa que el caudal de aire es expulsado inicialmente por las dos ventosas y a partir del instante 1072.50 s se cierra la ventosa V3 del punto P3 y solo expulsa aire la ventosa V4 del punto P4. En ese instante la presión del aire aumenta haciendo que el caudal expulsado por la ventosa V4 sea mucho mayor.

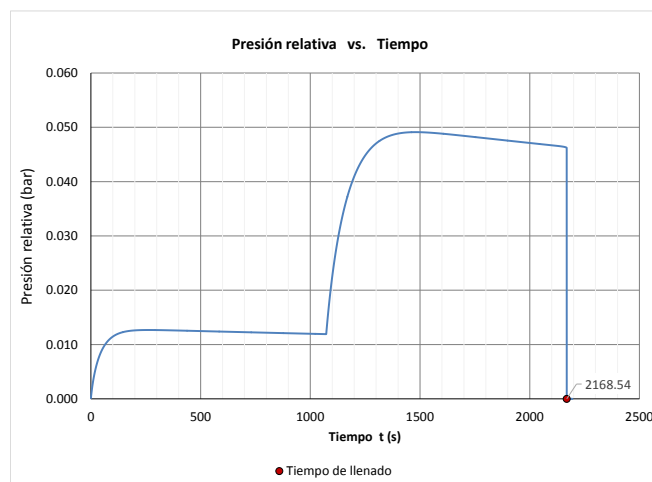
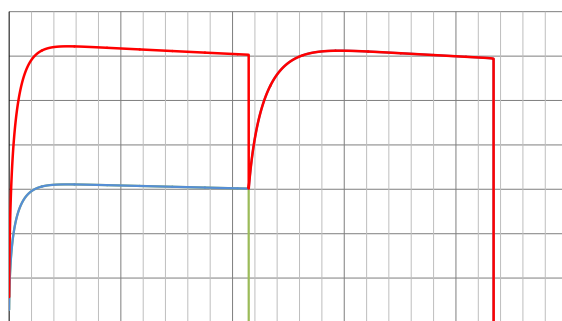


Figura 9 | Ensayo llenado P2-P4, 9 vueltas. Caudal de aire expulsado por la ventosa en CN y CI vs. Tiempo, y presión relativa vs. Tiempo.

También puede observarse que el caudal expulsado en condiciones normales es ligeramente superior al caudal en condiciones interiores. Esto se justifica porque la densidad del aire en condiciones interiores de la tubería (obtenida con una presión atmosférica local de 101204.93 Pa para altitud de 10 m.s.m., una presión relativa que va aumentando con el llenado de la conducción, y una temperatura de 18°C) es mayor que la densidad en condiciones normales, obtenida con la presión atmosférica en condiciones normales (101324.27 Pa) y una temperatura de 20°C. Esto hace que el caudal de aire en condiciones del interior de la tubería (CI) en este caso sea inferior que en condiciones normales.

El modelo reproduce la influencia de la presión atmosférica local según la altitud y la temperatura ambiente. Si esta misma instalación con los mismos parámetros de contorno estuviese instalada en una localidad con una altitud de 330 m.s.m. y la operación de llenado se realizará con una temperatura de 30°C y humedad relativa de 40%, se obtendrían los resultados que parecen recogidos en la Figura 10. El tiempo de llenado de 36.18 min, 0.04 minutos mayor que el caso de estudio, presión atmosférica local de 97423.06 Pa, el caudal volumétrico en condiciones interiores mayor que en condiciones normales y la presión relativa máxima de 0.0416 bar, menor que el caso de estudio de 0.0491 bar.

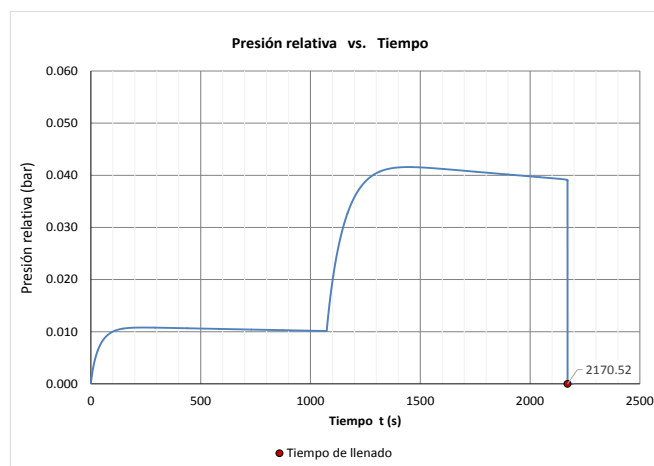
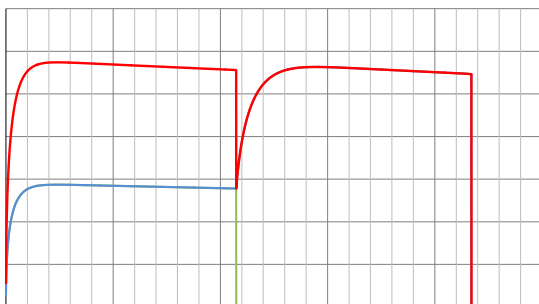


Figura 10 | Caudal de aire expulsado por la ventosa en CN y CI vs. Tiempo y presión relativa vs. Tiempo. En Serra a 330 m.s.m. y 30°C.

En el caso de estudio, el modelo también muestra los resultados de la variabilidad del nivel del agua según la Figura 11, observando mayor variación al inicio y al final del proceso por la geometría de la tubería, y la evolución del caudal de llenado con el tiempo, disminuyendo este debido a la contrapresión que va teniendo la válvula a medida que se llena la tubería.

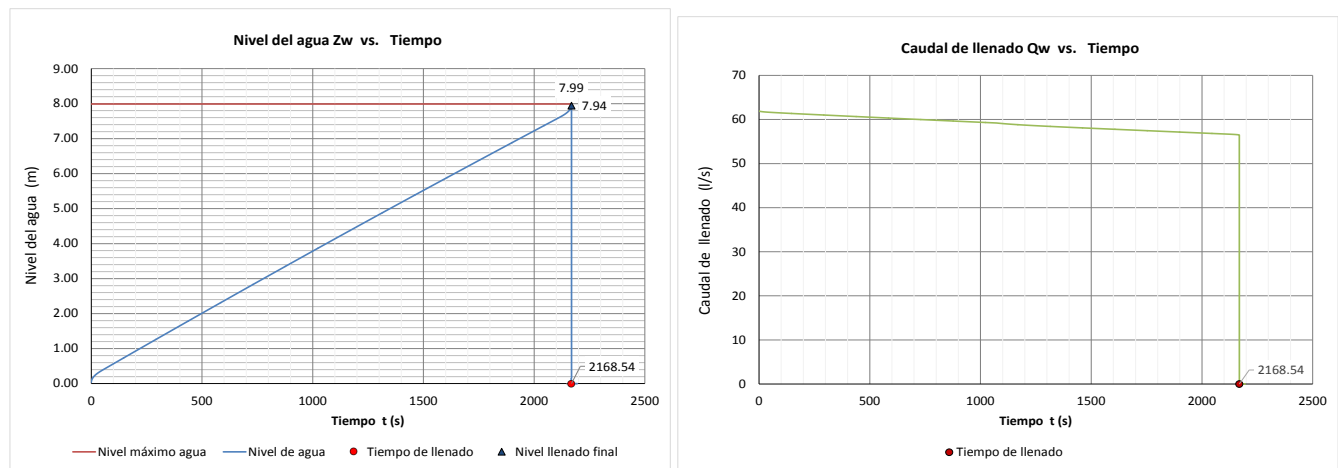


Figura 11 | Ensayo llenado P2-P4, 9 vueltas. Nivel del agua en la conducción vs. Tiempo. Y caudal de llenado en la conducción vs. Tiempo.

Comparativa del estudio experimental y modelo de cálculo.

La comparativa entre los resultados experimentales y teóricos de los tres ensayos (P2-P3, P3-P4 y P2-P4) presenta las variaciones indicadas en la Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 6 | Comparativa de resultados de tiempo de llenado experimentales y teóricos.

Ensayo	Tiempo de llenado experimental, t_{exp} (min)	Tiempo de llenado teórico (modelo), $t_{teórico}$ (min)	Variación $\Delta t = 100 \cdot (t_{teórico} - t_{exp}) / t_{exp}$ (%)
Llenado del tramo P2 a P3	25.66	27.19	5.96
Llenado del tramo P3 a P4	12.93	14.47	11.75
Llenado del tramo P2 a P4	34.93	36.14	3.46

Tabla 7. Comparativa de resultados de caudales experimentales y teóricos.

Ensayo	Caudal experimental, Q_{exp} (l/s)	Caudal teórico (modelo), $Q_{teórico}$ (l/s)	Variación $\Delta t = 100 \cdot (t_{teórico} - t_{exp}) / t_{exp}$ (%)
Llenado del tramo P2 a P3	39.28	37.67	4.12
Llenado del tramo P3 a P4	86.34	76.83	11.01
Llenado del tramo P2 a P4	-	59.10	-

Las posibles causas de la variación de tiempo entre el modelo teórico y el ensayo experimental son:

- Geometría de la tubería. El perfil de la conducción en la instalación presenta cambios de pendiente ascendente y descendente, así como cambios de dirección que afectan a las diferencias entre la volumetría real con la volumetría teórica. El modelo está diseñado para calcular un tramo de tubería continuo y de pendiente ascendente o descendente constante. En el ensayo del tramo P2-P3, compuesto por dos partes, los primeros 104.44 m tienen una pendiente geométrica de 2.77% y los 384.69 m restantes con una pendiente de 0.083%. Sin embargo en el modelo se ha introducido una pendiente geométrica de 0.66%, obtenida a partir de la cota del punto P4 y P2 y la longitud total de 489.13 m que engloba los dos tramos P2-P3, lo que produce una variación en el primer tramo del 76.29%, respecto de la pendiente real y en el segundo tramo del -87.35%. Esto prevé una variación entre los resultados experimentales y teóricos.
- Tipología y modelización de la válvula. La válvula utilizada es de mariposa de eje horizontal. El modelo depende directamente del grado de confianza en la modelización de la válvula. El rango de caudales experimentales y obtenidos de la modelización de la válvula presentan valores muy similares entre un 4.12% y 11.01% de variación influyendo en una variación similar en el tiempo de llenado. El caudal experimental es siempre mayor, lo que deriva en tiempos de llenado menores que los teóricos con una variación aceptable entre un 3.46% y 11.75 % a excepción del tramo P2-P4 del

que no se dispone del caudal de llenado experimental.

- c).- Error de los aparatos de medición utilizados en la monitorización de los ensayos experimentales, tales como caudalímetros, transductores de presión, etc.
- d).- Maniobra de apertura de válvula. El periodo de tiempo necesario en la maniobra de apertura de la válvula hasta alcanzar el número de vueltas establecidas para el ensayo, genera variabilidad en el caudal, en las pérdidas de carga, en el Kv de la válvula, hasta conseguir alcanzar condiciones estables de llenado en el ensayo.
- e).- Presión de la red de conexión. La presión en la red previa a la apertura de la válvula es siempre ligeramente superior a la que se observa durante el llenado, mientras que en el modelo se considera que la presión inicial a la entrada de la válvula es constante en todo el tiempo de llenado, afectando al Kv de la válvula y al caudal de llenado. Las sobrepresiones generadas sobre la presión final obtenidas en los ensayos no son elevadas debido a que la maniobra de llenado se ha realizado a velocidades comprendidas entre 0.3 y 0.6 m/s (en el llenado del tramo P2-P3 la velocidad promedio fue de 0.31 m/s y en el llenado del tramo P3-P4 la velocidad promedio fue de 0.69 m/s).

Resultados de la simulación del proceso de llenado mediante el programa Allievi.

En este apartado se presenta la simulación del llenado de los tramos de tubería ensayados haciendo uso del programa Allievi. Este programa simula el flujo transitorio en un sistema hidráulico a presión resolviendo las ecuaciones de dicho flujo mediante el método de las características. El programa se aplica tanto a tubería simple como a un sistema complejo formado por una red de distribución mallada o ramificada. El programa contempla como origen de los transitorios las maniobras de parada o puesta en marcha de bombas, cierres o aperturas de válvulas, y rotura de tuberías, considerando como sistemas de protección la instalación de calderines, chimeneas de equilibrio, ventosas, tanques unidireccionales, etc.

Para simular el proceso de llenado de una tubería el programa tiene que ser capaz de considerar la tubería vacía de agua en condiciones iniciales, o lo que es lo mismo, llena de aire a presión atmosférica. Dicho aire saldrá a través de la o las ventosas instaladas en la tubería mientras ésta se vaya llenando de agua.

Para llevar a cabo esta simulación el programa Allievi lleva incorporado un recurso que corresponde a la instalación de una bomba de pozo. Este recurso consiste en la disposición de una bomba sin válvula de retención ni de regulación, de la que parte la tubería de impulsión hasta un nudo superior donde se dispone una válvula, la cual puede ser de retención o de regulación. En el extremo final de esta tubería, en el nudo de conexión con la válvula, se dispone además una ventosa que permite extraer el aire de la tubería en el arranque de la bomba, o bien admitir aire al interior de la misma en la maniobra de parada.

En el caso de estudio el llenado de la tubería se realiza desde una conducción de agua potable a presión donde no existe una bomba para el llenado de la tubería, pero el programa Allievi la necesita para simular el llenado. Por ello, para llevar a cabo la simulación se dispondrá de una estación de bombeo en el punto inicial de la tubería a llenar, con la particularidad de que los grupos de esta estación de bombeo, de caudal nominal elevado y en número suficientemente alto, estarán parados y no se pondrán en marcha durante la simulación. En estas condiciones dichos grupos de bombeo actúan como elementos resistentes, aunque con unas pérdidas prácticamente despreciables al circular por ellos un caudal muchísimo menor que su caudal nominal.

Se ha realizado la simulación de los tres tramos P2-P3, P3-P4 y P2-P4. A continuación se muestran los datos de las simulaciones efectuada del tramo P2-P4, los resultados obtenidos, y su comparación con las pruebas de campo. En este caso la válvula de mariposa en P3 estará completamente abierta, y estando cerrada la válvula en P4. En el tramo de estudio existen ahora dos ventosas, una en la sección P3 y otra en la sección P4, las cuales expulsarán el aire en la primera parte del llenado. Cuando el nivel del agua en la tubería de prueba alcance la cota de la ventosa en P3 esta se cerrará, continuando la expulsión de aire solamente por la ventosa en P4 hasta el llenado completo.

La existencia de las dos ventosas en la tubería en proceso de llenado no puede ser simulado mediante el programa Allievi, pues como se ha comentado anteriormente, el recurso bomba de pozo solamente admite una ventosa al extremo final de la tubería de impulsión de la bomba, justo aguas arriba de la válvula de retención y/o de regulación. Sin embargo, como en este caso el caudal de llenado está impuesto principalmente por la apertura de la válvula de alimentación, los resultados obtenidos al

simular con una sola ventosa al final de la tubería de ensayo se consideran aceptables.

Para el caso de estudio, la válvula de llenado situada a la cota 104.23 m se abre 9 vueltas en un tiempo de 27 s, siendo la presión de alimentación de 38.66 mca. Para este grado de apertura de la válvula, el K_v es de $116.26 \text{ m}^3/\text{h}/\text{bar}^{0.5}$, con un coeficiente de pérdidas adimensional de 3028.27.

En la Figura 12 se indica el esquema del sistema a simular, y en la Figura 13 las tablas de datos propios de este caso.

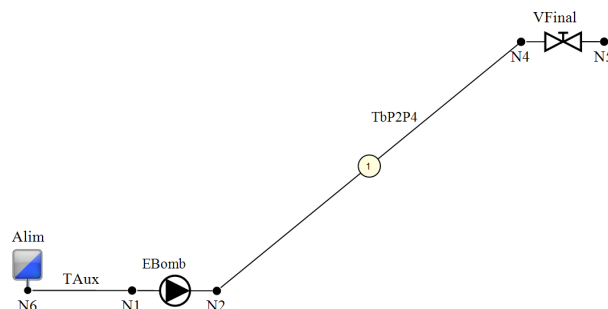


Figura 12 | Esquema de la instalación para simular el llenado de la tubería entre las secciones P2 y P4.

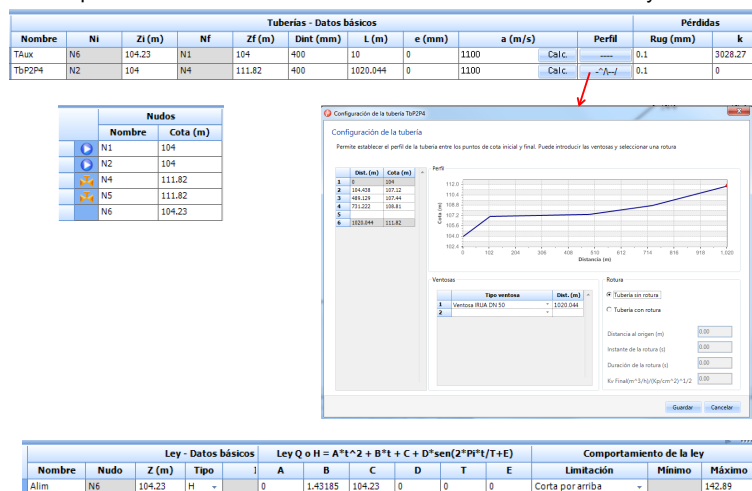


Figura 13 | Datos del sistema para simular el llenado de la tubería entre las secciones P2 y P4.

Para esta simulación los resultados se resumen en las Figuras 14 y 15. El caudal máximo por la tubería de ensayo es de unos 63 l/s, terminándose la operación de llenado a los 2160 s. En el nudo N4, conexión de la ventosa, la presión máxima alcanzada es de 61.5 mca, la cual tiende posteriormente a la presión estática de 31.07 mca.

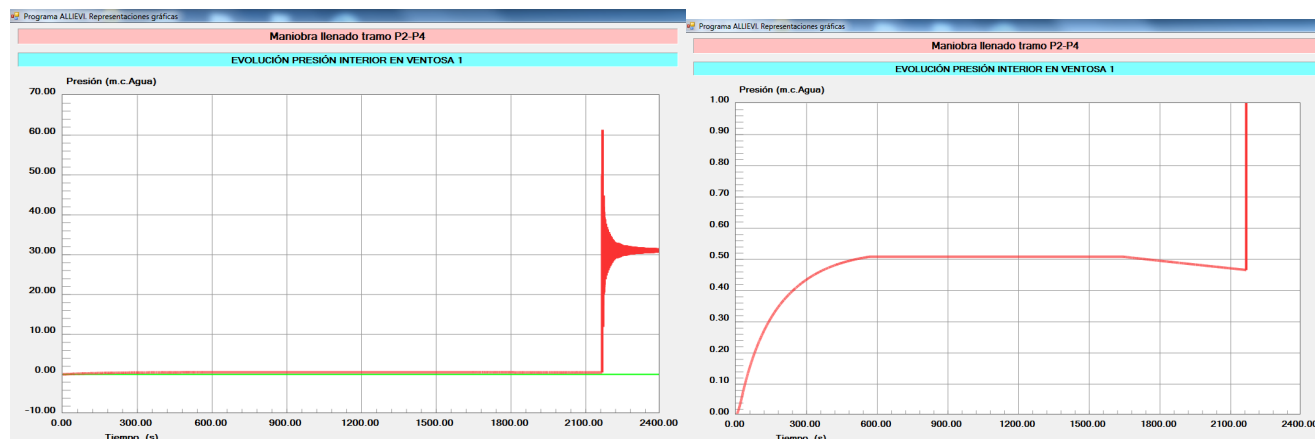


Figura 14 | Llenado de la tubería entre las secciones P2 y P4. Evolución de la presión en la ventosa (sección P4, nodo N4).



Figura 15 | Llenado de la tubería entre las secciones P2 y P4. Evolución del caudal de aire expulsado por la ventosa (condiciones atmosféricas). Y evolución de la longitud de la columna de aire en el interior de la tubería de ensayo.

Comparativa del estudio experimental y los resultados del programa Allievi.

Como se puede observar en la Tabla 8, los resultados de las simulaciones son semejantes a las mediciones obtenidas en campo para los tres casos procesados, especialmente en lo que respecta al tiempo y al caudal medio de llenado. Respecto del caudal de aire atmosférico expulsado los valores son semejantes en los dos modelos de simulación, careciéndose de mediciones de campo respecto de este parámetro.

Las diferencias principales se encuentran en la presión de expulsión de aire, con valores mayores en las mediciones de campo que en las obtenidas mediante las simulaciones. Esta diferencia cabe atribuirla a la dificultad de registrar presiones relativamente bajas, que pueda tener el transductor de presión utilizado. De cualquier modo, esta presión no es determinante en los resultados obtenidos. A su vez, se aprecian diferencias importantes en la presión máxima producida en el punto de conexión de la ventosa al cerrar ésta, si se comparan las mediciones de campo con los resultados de la simulación con Allievi. Los mayores valores obtenidos mediante dicha simulación, son debidos a que este programa admite cierre instantáneo de la ventosa, en el momento en que se termina de expulsar el aire de la tubería, mientras que en realidad el cierre de la ventosa es progresivo a partir de un determinado volumen final de aire. Ello amortigua en cierta manera el golpe de ariete producido al cerrar la ventosa, que no se tiene en cuenta en la simulación.

Tabla 8 | Comparación de los valores obtenidos en las mediciones de campo con los resultados de las simulaciones.

RESULTADOS	TRAMO P2-P3			TRAMO P3-P4			TRAMO P2-P4		
	Ensayo	Modelo	Allievi	Ensayo	Modelo	Allievi	Ensayo	Modelo	Allievi
Tiempo de llenado (minutos)	25.66	27.19	28.0	12.93	14.47	14.3	34.93	36.14	36.0
Caudal medio de llenado (l/s)	39.28	37.67	36.0	86.34	76.83	75.0	----	59.10	59.0
Velocidad media de llenado (m/s)	0.31	0.30	0.29	0.69	0.61	0.59	----	0.47	0.47
Presión de expulsión de aire (mca)	0.5	0.19	0.18	1.0	0.89	0.84	6.89	0.12/0.47	0.5
Caudal de aire atmosférico expulsado (l/s)	----	37	36	----	81	80	----	57	60
Presión máxima cierre de la ventosa (mca)	28.50	----	42	39.46	----	69	49.37	----	61
Presión final después del cierre de la ventosa (mca)	26,90 (V3)			21.10 (V4)			37.90 (V4)		

CONCLUSIONES

Se ha confeccionado un modelo en Excel para simular el funcionamiento de una tubería simple de pendiente constante durante su llenado. Para ello se han caracterizado previamente con ensayos en laboratorio tanto las ventosas que permiten expulsar el aire (ver otro trabajo en este mismo evento) como las válvulas a través de las cuales produce el llenado (en este trabajo).

El modelo es capaz de predecir muy bien tanto el tiempo de llenado como el valor de la presión y caudal en el interior de la conducción, para una presión de llenado desde la red dada y una secuencia de maniobra de la válvula de llenado predeterminada.

Para comprobar la fiabilidad del modelo se han realizado ensayos de llenado de una tubería de fundición de diámetro nominal DN-400 de 1020.04 m de longitud presentando una desviación máxima entre el tiempo teórico y experimental del 12.50%. El modelo teórico es muy aproximado al comportamiento real. Las posibles causas de la variación de tiempo de llenado entre el modelo teórico y el ensayo experimental son el tiempo de maniobra de apertura de válvula hasta conseguir alcanzar condiciones estables de llenado en el ensayo, las variaciones de la presión en la red que alimenta el sistema, las pequeñas variaciones del perfil de la conducción (se aproxima a una pendiente constante), así como algunos cambios de dirección que afectan a las diferencias entre la volumetría real y la volumetría teórica, así como y el grado de confianza de la modelización de la válvula de mariposa (llenado) y de las ventosas. Tan solo el pico de presión que se genera al final del llenado al cerrar la última ventosa no puede ser predicho por el modelo, si bien para las velocidades de llenado ensayadas, los valores de la sobrepresión sobre el valor de la presión final a la que queda la instalación son pequeños (valores medidos), de entre 1,6 mca y 18,36 mca en los ensayos realizados.

También se han comparado los resultados con los que proporciona el modelo Allievi, que utiliza el modelo pistón por el método de las características y solo permite una ventosa al final de la línea, siendo los resultados obtenidos muy semejantes.

En futuros trabajos es de interés el estudio del modelo aplicado a conducciones con cambio de pendiente y considerando la inercia del fluido, así como la programación mediante Visual Studio. Y por último, programar mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para obtener mayor precisión en los resultados.

AGRADECIMIENTOS

La caracterización de ventosas forma parte de un Contrato de Investigación y Desarrollo entre la empresa Global Omnium y la Universitat Politècnica de València, para elaborar un protocolo de llenado y vaciado de grandes conducciones.

REFERENCIAS

- Abreu, J., Cabrera, E., Espert, V.B., García-Serra, J., Sanz, F. 2012. *Transitorios Hidráulicos. Del régimen estacionario la golpe de ariete*. Editorial UPV. Valencia.
- AENOR. 2001. *UNE-EN 1074- Partes 1 y 2. Válvulas para el suministro de agua. Requisitos de aptitud al uso y ensayos de verificación. Parte 1: Requisitos generales. Parte 2: Válvulas de seccionamiento*.
- AENOR. 2012. *UNE-EN 1267. Válvulas industriales. Ensayo de resistencia al flujo utilizando agua como fluido de ensayo*
- Harrison, L.P. 1965. *Fundamental concepts and definitions relating to and industry 3:3*. A, Wexler and W.A. Wilghack, eds. Reinhold Publishing, New York
- Hyland, R.W. and A. Wexler. 1983b. *Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173.15K to 473.15K*. ASHRAE Transactions 89(2A):500-519.
- International Organization for Standardization, 2008. *ISO 9644 Agricultural irrigation equipment. Pressure losses in irrigation valves. Test method*
- NASA. 1976. U.S. Standard atmosphere, 1976. *National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, and the United States Air Force*. Available from National Geophysical Data Center, Boulder, CO.
- Phu D. Tran, 2017. Pressure Transients Caused by Air-Valve Closure while Filling Pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. Vol 143, Issue 2. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001245.