



Sexto
Congreso Nacional de
Riego, Drenaje y Biosistemas
COMER- 2021 / Hermosillo, Sonora



Artículo: COMER-21013

Hermosillo, Son., del 9 al 11 de junio de 2021

PÉRDIDA DE ENERGÍA Y REMOCIÓN DE AIRE ATRAPADO POR MEDIOS HIDRÁULICOS EN CONDUCCIONES POR GRAVEDAD CON PENDIENTES DESCENDENTES

Emilio Quintana Molina^{1*}; Jorge Víctor Prado Hernández²; Joaquín Monserrat Viscarri³

¹Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México- Texcoco Km 38.5, C.P. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

emilioquintanam@gmail.com - +52 (595) 1219919 (*Autor de correspondencia)

²Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México- Texcoco Km 38.5, C.P. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

³Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Universidad de Lleida. Av. Alcalde Rovira Roure 191, E 25198, Lleida, Cataluña, España.

Resumen

Los sistemas de conducción de agua por gravedad son frecuentes alrededor del mundo para transportar el agua de un lugar a otro sin el uso de energía externa adicional, diámetros de tubería menores a 50 mm son comunes en zonas rurales. De manera general, las tuberías siguen el perfil del terreno, atravesando zonas accidentadas que generan perfiles irregulares con secciones altas y bajas, en las cuales, tienden a formarse cuerpos de aire que generan grandes pérdidas de energía en el sistema, alterando la operación del diseño original. Es por ello que, el llenado de dichos sistemas representa una etapa crítica, dado que el propio flujo de agua por medio del caudal de remoción debe generar una fuerza de arrastre mediante un empuje hidrodinámico con la capacidad de vencer la fuerza de flotación del aire atrapado y así evacuarlo del sistema en el caso que dicha zona no cuente con válvulas de expulsión-admisión de aire o por falla de las mismas. En la presente investigación, se estudió la remoción de aire atrapado en conducciones de 12.7, 15.875 y 19.05 mm resaltando en ésta última la importancia del estudio conjunto de la remoción incipiente de burbujas de aire por la acción de la turbulencia de un salto hidráulico presente aguas abajo de un cuerpo de aire y la consecuente remoción hidrodinámica del aire atrapado remanente en la tubería por medio de la velocidad de remoción; se encontró una relación lineal entre el parámetro adimensional de remoción de aire y el ángulo de inclinación del conducto que integra los tres diámetros mencionados.

Palabras claves: pérdida de energía, empuje hidrodinámico, velocidad de remoción.



Introducción

Cuando se diseña un sistema entubado de abastecimiento de agua accionado por gravedad, se asume que la tubería estará completamente llena de agua, sin embargo, si la instalación se llena de agua por primera vez y no hay remoción completa del aire, la relación entre la carga disponible y el caudal será diferente. Cuando el caudal que circula en el sistema es bajo, puede suceder que parte de la tubería funcione como un canal y con ello contenga aire en dicha sección, generando pérdidas de carga locales considerables, por lo que es necesario que la tubería se diseñe de tal forma que, el aire que se encuentra en la misma pueda ser evacuado por el propio flujo de agua desde su llenado. La formación del aire atrapado en las mismas se debe fundamentalmente al diseño y operación inadecuada de los sistemas de tuberías a presión (Corcos, 2003).

Dada la inexistencia de un modelo matemático genérico que abarque todo tipo de diámetros de conducto, inclinaciones del mismo, volumen de aire a desalojar, entre otros parámetros, es de suma importancia el estudio de la remoción de aire en condiciones específicas. De manera general, los modelos matemáticos reportados en literatura especializada presentan discrepancias entre sí, debido a que fueron estudiados en condiciones distintas, siendo no aplicables en conducciones de diámetros pequeños, mismos que son comunes en zonas rurales, en las cuales al existir limitado acceso a dispositivos de evacuación de aire, es imperativo definir y aplicar modelos matemáticos de remoción de aire desde el diseño que aseguren la remoción hidráulica del mismo desde el llenado de la conducción (May *et al.*, 2018).

En la presente investigación se analizó y midió el efecto que provoca el aire atrapado en conducciones abastecidas por gravedad de diámetros pequeños (12.7, 15.875 y 19.05 mm), se estudió el efecto conjunto de la remoción incipiente de burbujas de aire debido a la turbulencia generada por un salto hidráulico aguas abajo de un cuerpo de aire y la remoción de aire atrapado debido al efecto de un empuje hidrodinámico sobre el mismo, dichos fenómenos fueron representados con modelos matemáticos simples. Con ello, se fomenta el uso racional de dispositivos de evacuación de aire, considerando así un punto de importancia en el diseño de dichas conducciones.

Materiales y Métodos

Para la toma de datos, se empleó un módulo experimental en el cual se provocaron inclinaciones descendentes en el perfil de la conducción, generando zonas de acumulación de aire durante el proceso de llenado de la misma. Principalmente, se utilizaron piezómetros, válvulas, un medidor de agua ultrasónico (exactitud $\pm 2\%$ FS, resolución 0.001 l/s), una bomba sumergible de 1/2 HP, así como manguera transparente de 12.7, 15.875 y 19.05 mm (Figura 1).

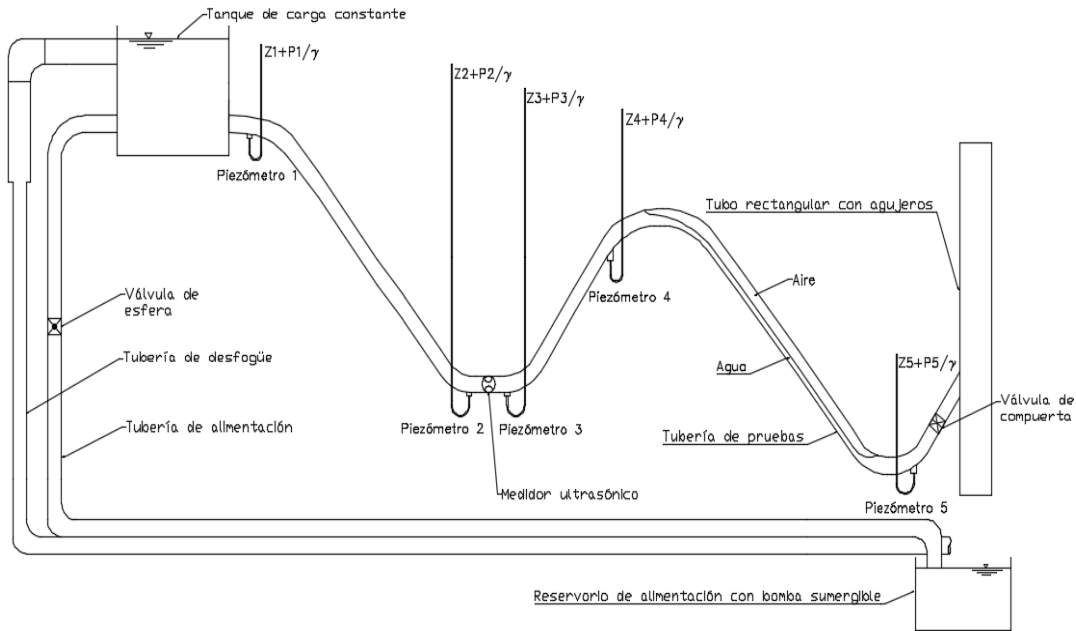


Figura 1. Esquema del módulo experimental (Elaboración propia).

Pérdida de energía generada por aire atrapado

Primeramente, se analizó la pérdida de energía (o carga) generada por cuerpos de aire atrapados en una conducción de diámetro dado. Se contrastó la pérdida de carga calculada aplicando la ecuación general de energía entre los extremos del cuerpo de aire atrapado respecto a la pérdida observada equivalente a la longitud vertical del mismo, a 15°, 30°, 45° y 60° de inclinación descendente del conducto. Se recopilaron lecturas de los piezómetros para caudales aleatorios así como la longitud vertical del cuerpo de aire y en el mismo sentido, se midió la pérdida de energía por fricción en dos secciones entre los piezómetros y el cuerpo de aire, de modo que, entre el piezómetro 1 y 2 se definió la pérdida de energía unitaria para un caudal dado, con ello y la longitud de dichas secciones (1 y 2), fue posible hacer ligeras correcciones al valor calculado de la pérdida de energía por un cuerpo de aire (Ecuación 1 y Figura 2).

$$H_b \approx \left(z_2 + \frac{P_2}{\omega} \right) - \left(z_3 + \frac{P_3}{\omega} \right) - hf_1 + hf_2 \quad (1)$$

H_b → Pérdida de energía generada por cuerpo de aire (m)

$z_2 + \frac{P_2}{\omega}$ → Lectura piezométrica en piezómetro 2 (m)

$z_3 + \frac{P_3}{\omega}$ → Lectura piezométrica en piezómetro 3 (m)

hf_2 → Pérdida de energía por fricción en sección 1 (m)

hf_3 → Pérdida de energía por fricción en sección 2 (m)

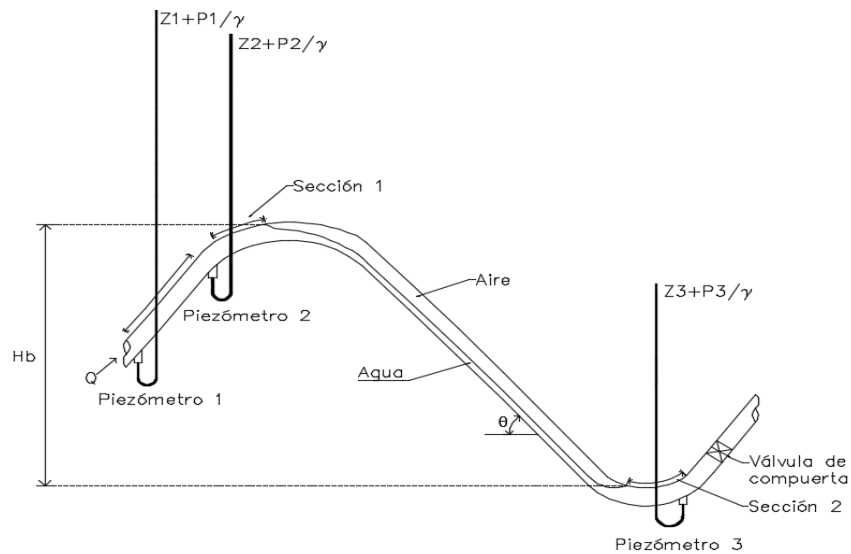


Figura 2. Esquema de pérdida de carga generada por una bolsa de aire atrapada (Elaboración propia).

Remoción incipiente de burbujas de aire debido a la turbulencia de un salto hidráulico

Seguidamente, se estudió la remoción incipiente de burbujas de aire debido a la turbulencia de un salto hidráulico que se presenta aguas abajo de un cuerpo de aire, para ángulos de inclinación descendente del conducto de 15°, 30°, 45° y 60°. Para calcular el caudal de aire removido por un salto hidráulico en un tubo circular (Q_a), se retomaron las experiencias de Kalinske & Robertson (1943), Kent (1952) y Escarameia *et al.* (2005), mismos que establecen dicho fenómeno depende del caudal de agua (Q_w), la intensidad del salto hidráulico, definido por el número del Froude del conjugado menor del mismo (Fr) y el ángulo de inclinación del conducto (θ), de modo que, se determinó la relación adimensional (β) del caudal de aire respecto al caudal de agua (Ecuación 2).

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = f(Fr, \theta) \quad (2)$$

Remoción hidrodinámica de aire atrapado

Finalmente, se estudió la remoción completa del aire atrapado debido a la acción de un empuje hidrodinámico durante el proceso de llenado de una conducción de agua abastecida por gravedad. La representación matemática del fenómeno se abordó con el apoyo de las experiencias de las investigaciones de Kalinske & Bliss (1943), Kent (1952), Gandenberger (1957), Wisner *et al.* (1975), Corcos (2003), Escarameia *et al.* (2005), Pothof & Clemens (2010), Pozos *et al.* (2010), May *et al.* (2018), entre otros. Se modeló con la escala de Froude, misma que incluye la velocidad crítica o de remoción de aire, el diámetro de la tubería y la aceleración de la gravedad, dicha escala es también llamada parámetro adimensional de velocidad crítica o de remoción de aire; al ser un número



adimensional, comúnmente se relaciona con el ángulo de inclinación descendente del conducto y en algunos casos, con el volumen de aire a remover (Ecuación 3).

$$\frac{V}{\sqrt{gd}} = f(\theta, V_{aire}) \quad (3)$$

De modo que, se recopilaron lecturas del caudal en el cual un cuerpo de aire de longitud dada (formado durante el llenado de la instalación) fue removido, en inclinaciones descendentes de 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 45° y 60° (θ). Se ajustó y validó un modelo matemático envolvente que determina la relación entre el parámetro adimensional de remoción de aire y el grado de inclinación del conducto.

Resultados y Discusión

Pérdida de energía generada por aire atrapado

La pérdida de energía debida al aire atrapado tiene un impacto significativo respecto al óptimo funcionamiento de un sistema de abastecimiento de agua, de modo que, la energía disponible del sistema disminuye, así como la capacidad de transporte de flujo, pudiéndose desencadenar el bloqueo completo del mismo si la pérdida de energía generada por el aire es igual o mayor que la energía disponible del sistema. En el Cuadro 1 se muestran los resultados obtenidos de la comparación de la pérdida de energía calculada contra la observada para los diferentes diámetros estudiados.

Cuadro 1. Pérdida de energía observada y calculada generada por cuerpos de aire.

Diámetro (mm)	Inclinación (°)	Longitud de la bolsa (m)	Pérdida de energía debida a cuerpo de aire (m)		Diferencia porcentual (%)
			Calculada	Observada	
12.7	15	0.830	0.2057	0.2030	-1.35
	30	1.032	0.4878	0.4950	1.46
	45	0.845	0.4895	0.4860	-0.71
	60	0.910	0.7697	0.7860	2.07
15.875	15	0.930	0.2424	0.2500	3.04
	30	1.070	0.5261	0.5250	-0.21
	45	0.825	0.5446	0.5650	3.62
	60	0.920	0.7235	0.7420	2.50
19.05	15	0.86	0.187	0.19	1.73
	30	0.91	0.382	0.397	3.72
	45	0.92	0.612	0.628	2.63
	60	0.95	0.762	0.787	3.18

Los resultados obtenidos del Cuadro 1, para cuatro ángulos de inclinación descendente y tres diferentes diámetros, corroboraron la suposición general que la pérdida de energía ocasionada por una bolsa de aire se aproxima a la altura vertical de la misma, resultando que la pérdida de energía observada respecto a la pérdida de energía calculada posee



una diferencia menor al 4%. En el mismo sentido, May *et al.* (2018) reportaron que la pérdida de energía observada por la altura de la bolsa de aire y la pérdida de energía calculada dada la ecuación general de la energía para ángulos de inclinación descendente de 10°, 15°, 20° y 30° presentaron una diferencia menor al 4%, de modo que, los resultados obtenidos en el presente apartado coinciden con los de la mencionada investigación.

Remoción incipiente de burbujas de aire debido a la turbulencia de un salto hidráulico

En presencia de al menos un cuerpo de aire atrapado posterior al llenado de los sistemas de tuberías, si la energía disponible es suficiente para que el sistema logre dotar agua al final de la conducción, la tubería de inclinación descendente en presencia de aire funciona como un canal, de modo que, debido al flujo de agua, se produce un salto hidráulico aguas abajo del cuerpo de aire, mismo que remueve incipientemente diminutas burbujas de aire por generación y arrastre.

Con ello, Wisner *et al.* (1975) definieron que la generación de burbujas de aire se atribuye al efecto de turbulencia del salto hidráulico, consecuentemente, dependiendo del caudal que circule en la conducción, puede suceder o no el arrastre de las mencionadas burbujas de aire fuera de la zona de acumulación del mismo.

En éste caso, solo se recopilaron datos del conducto de 19.05 mm de diámetro interior, debido a que en las conducciones de menor diámetro existieron intervalos de caudales sumamente reducidos (antes del caudal de remoción de aire atrapado) para poder reunir suficientes datos y así generar sus respectivas relaciones matemáticas. De modo que, para el conducto de 19.05 mm e inclinaciones descendentes de 15°, 30°, 45° y 60°, se observó el caudal en el cual comenzó la generación de burbujas de aire sin arrastre de las mismas Q_g , posteriormente al aumentar el caudal bajo las mismas condiciones se observó de manera conjunta la generación y arrastre de burbujas de aire debido al salto hidráulico Q_{g-a} (Cuadro 2).

Cuadro 2. Generación y arrastre de burbujas de aire en conducto de 19.05 mm a diferentes inclinaciones descendentes.

Ángulo de inclinación (°)	Caudal de agua de generación y arrastre de burbujas de aire (m ³ /s) Q_{g-a}	Caudal de agua de generación de burbujas de aire sin arrastre de las mismas (m ³ /s) Q_g
15	1.9x10 ⁻⁵	1.3x10 ⁻⁵
30	1.8x10 ⁻⁵	1.2x10 ⁻⁵
45	1.7x10 ⁻⁵	1.0x10 ⁻⁵
60	1.7x10 ⁻⁵	9.0x10 ⁻⁶

Como se puede observar en el Cuadro 2, a caudales superiores que Q_{g-a} se observó generación y arrastre de burbujas de aire a través del salto hidráulico; por otro lado, entre

Q_g y Q_{g-a} existió una zona de transición donde se visualizó la generación de burbujas de aire sin arrastre de las mismas, por lo que, las burbujas de aire regresaban a la zona de turbulencia del salto hidráulico. De modo que, a caudales inferiores de Q_g no existió generación ni arrastre de burbujas de aire; es decir, la turbulencia generada por el salto hidráulico no fue capaz de originar burbujas de aire.

De modo que, en la Figura 3, se muestran las relaciones adimensionales (β) obtenidas respecto al número de Froude (Fr) para cada ángulo de inclinación descendente.

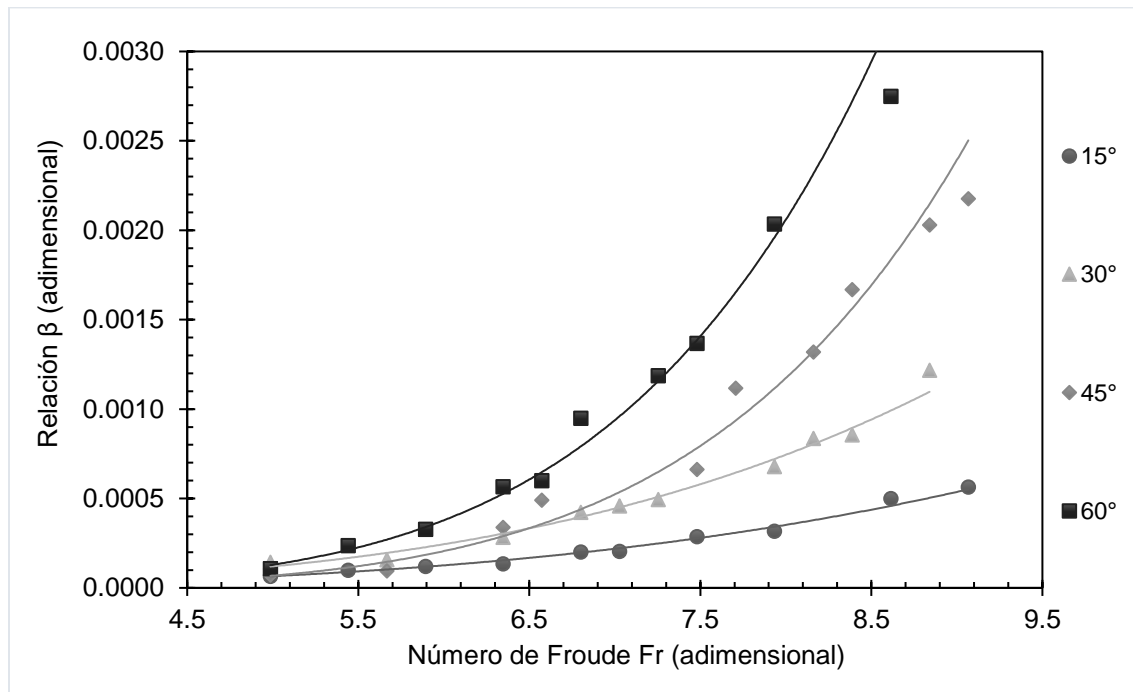


Figura 3. Comparación de relación aire-agua respecto a número de Froude a diferentes ángulos de inclinación descendente en conducto de 19.05 mm.

Las ecuaciones de las regresiones potenciales encontradas de la Figura 3, se resumen a continuación para cada ángulo de inclinación descendente:

$$15^\circ \quad \beta = 2.097 \times 10^{-7} Fr^{3.572} \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9886$$

$$30^\circ \quad \beta = 2.354 \times 10^{-7} Fr^{3.876} \quad (5)$$

$$R^2 = 0.9763$$

$$45^\circ \quad \beta = 4.028 \times 10^{-9} Fr^{6.051} \quad (6)$$

$$R^2 = 0.9703$$

$$60^\circ \quad \beta = 9.846 \times 10^{-9} Fr^{5.891} \quad (7)$$

$$R^2 = 0.9881$$

Con ello, se realizó una gráfica comparativa entre los modelos de remoción de aire debido al efecto de un salto hidráulico propuestos por Kalinske & Robertson (1943), Kent (1952), Escaramela *et al.* (2005) y los resultados obtenidos en la presente sección, para una inclinación descendente de 60° (Figura 4).

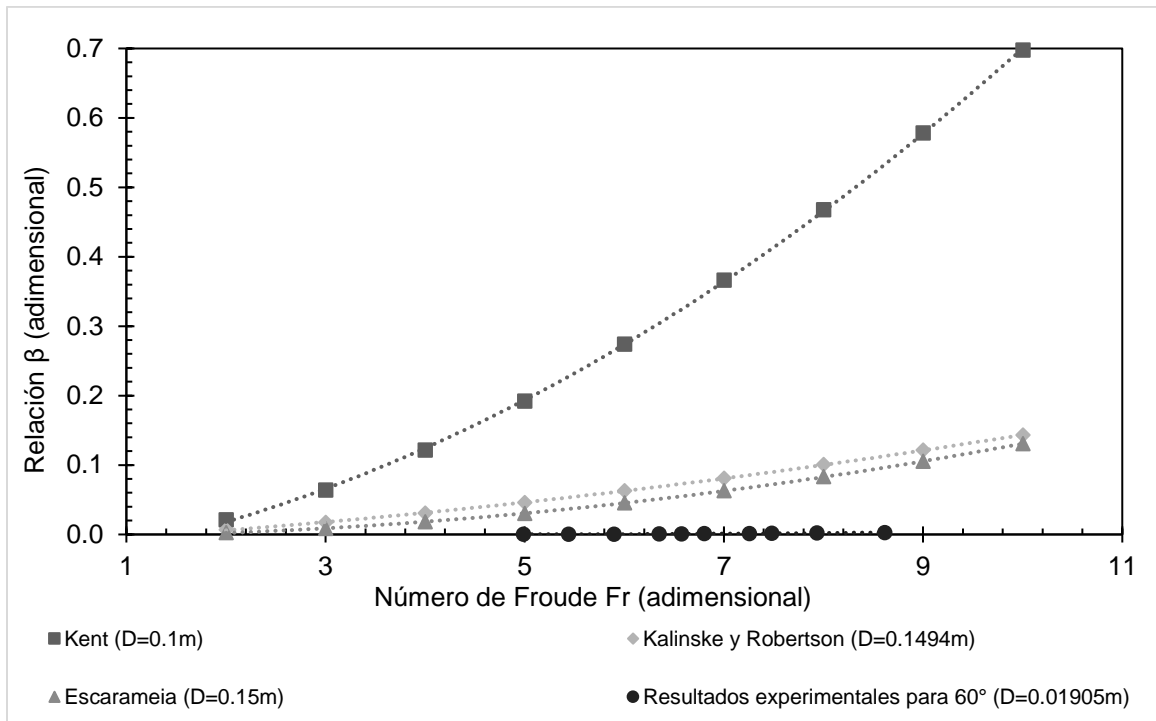


Figura 4. Comparación de modelos de remoción de aire debido al efecto del salto hidráulico obtenidos por diversos autores.

De igual manera, como se puede apreciar en la Figura 3, la relación de caudales aire-agua (β) respecto al número de Froude guardó relación potencial; esto es consistente respecto a Kalinske & Robertson (1943), Kent (1952) y Escaraméia *et al.* (2005), pero, por cuestiones de escala, al estudiar un diámetro considerablemente pequeño respecto a los mencionados autores, las funciones encontradas se localizaron muy por debajo de dichos modelos (Figura 4).

Con esto, los autores anteriormente mencionados señalan que, la pendiente de la tubería es un factor que influye en menor grado a la generación y arrastre de burbujas de aire por la turbulencia de un salto hidráulico, de modo que es un factor que no consideran en sus modelos; en éste caso y dadas las condiciones en las que se estudió dicho fenómeno, se observó que, al incrementar el grado de inclinación de la tubería en cuestión, la relación de caudales aire-agua (β) aumentó, es decir, bajo el mismo caudal de agua se removió incipientemente mayor volumen aire mediante pequeñas burbujas, es por ello que, de esta forma se comprobó la importancia del ángulo de inclinación en éste tipo de modelos matemáticos, resultando una relación diferente para cada ángulo de inclinación descendente (Figura 3). En el caso de la tubería en posición horizontal, no se observó generación de burbujas de aire por la turbulencia del salto hidráulico, de modo que, se reservó únicamente a conducciones inclinadas descendentes.

De manera general, para todos los ángulos de inclinación descendente, el ajuste de la función potencial disminuyó para caudales superiores a $3.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (0.038 l/s), debido a que, a medida que evacuaron las burbujas de aire, la pérdida de carga generada por la



bolsa de aire disminuyó (dado que la longitud de la bolsa se reduce paulatinamente); en otras palabras, aumentó la carga disponible en el sistema y con ello el caudal del mismo, por lo que a partir de dicho caudal se recomienda no seguir las relaciones antes presentadas, dado que hay cambios de caudal de manera brusca sobre la línea de conducción.

Es importante mencionar que, en el caso de la existencia de alguna otra bolsa de aire de la misma naturaleza aguas abajo de la bolsa de aire en cuestión, el aire removido debido al salto hidráulico se unirá al mencionado cuerpo de aire; de lo contrario, evacuaría la instalación solo si en el perfil aguas abajo no existe una sección que propicie la acumulación de dichas burbujas de aire y consecuentemente de lugar a una bolsa de aire, misma que solo será removida en presencia de la velocidad de remoción en el sistema de tuberías.

Remoción hidrodinámica de aire atrapado

Durante el llenado de un sistema de tuberías que inicialmente contienen aire en su interior, se desea que el caudal que circula en la instalación tenga la capacidad de remover el aire en su totalidad, cuando esto no sucede y quedan fracciones de aire confinadas en la conducción, el sistema no opera como fue diseñado en un principio; es por ello que, mínimamente debe ser capaz de dotar suficiente agua para lograr una remoción completa de los cuerpos aire confinados.

Se encontró que parámetro adimensional de remoción de aire (V/\sqrt{gd}), está íntimamente ligado a la inclinación descendente del conducto, de modo que, a mayor ángulo de inclinación descendente en el mismo, se requirió mayor velocidad del agua para que ocurriera la remoción de los cuerpos de aire atrapados por acción del empuje hidrodinámico durante el llenado de la instalación, esto mismo es consistente en los 3 diferentes diámetros de conducto estudiados (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resultados experimentales de remoción hidrodinámica de aire atrapado en conducciones de 12.7, 15.875 y 19.05 mm de diámetro con inclinaciones descendentes.

Diámetro (mm)	Inclinación θ (°)	$\sqrt{\text{sen}\theta}$ (adim.)	Caudal de remoción promedio (m ³ /s)	Velocidad de remoción promedio (m/s)	Longitud de bolsa al llenado promedio (m)	V/\sqrt{gd} promedio (adim.)
12.7	0	0.000	0.0000172	0.1358	0.622	0.3847
	5	0.295	0.0000206	0.1626	0.757	0.4607
	10	0.417	0.0000224	0.1768	0.944	0.5010
	15	0.509	0.0000234	0.1847	0.661	0.5233
	20	0.585	0.0000240	0.1895	0.788	0.5368
	30	0.707	0.0000256	0.2021	0.792	0.5725
	45	0.841	0.0000273	0.2155	0.899	0.6106
60	0.931	0.0000282	0.2226	0.775	0.6307	



15.875	0	0.000	0.0000299	0.1511	0.719	0.3828
	5	0.295	0.0000365	0.1844	0.854	0.4673
	10	0.417	0.0000383	0.1935	0.867	0.4903
	15	0.509	0.0000405	0.2046	0.917	0.5185
	20	0.585	0.0000420	0.2127	0.945	0.5390
	30	0.707	0.0000452	0.2284	1.017	0.5787
	45	0.841	0.0000471	0.2380	0.861	0.6030
	60	0.931	0.0000495	0.2501	0.882	0.6337
19.05	0	0.000	0.0000480	0.1684	0.81	0.3896
	5	0.295	0.0000565	0.1982	1.17	0.4585
	10	0.417	0.0000610	0.2140	1.16	0.4951
	15	0.509	0.0000630	0.2210	0.93	0.5113
	20	0.585	0.0000670	0.2333	1.17	0.5397
	30	0.707	0.0000701	0.2459	1.08	0.5689
	45	0.841	0.0000748	0.2624	1.17	0.6071
	60	0.931	0.0000792	0.2779	1.21	0.6428

En el mismo sentido, Gandenberger (1957) y Escarameia *et al.* (2005) incluyen el volumen de aire a desalojar como un parámetro a considerar para determinar el caudal de remoción y con ello el parámetro adimensional de remoción de aire, mientras que autores como May *et al.* (2018) señalan que la velocidad de remoción es independiente del largo de la bolsa de aire, de modo que no integra el volumen del aire a sus modelos; en este caso, para las condiciones en las que fue estudiado el presente fenómeno, se observó que, presentando escasa variación del largo de las bolsas de aire removidas en cada experimento aunado a la poca discrepancia del caudal de remoción registrado, el volumen de aire no fue una variable relevante, por lo que no se integró al modelo matemático.

Durante el proceso de remoción de aire en las pruebas experimentales, se observó que, de manera general, al iniciar el llenado del conducto, fue posible observar un patrón de flujo dominado por aire de tipo estratificado, en el cual el agua se mueve en la parte inferior del conducto mientras que el aire en la parte superior. Cuando el caudal era bajo (aproximadamente a Q_g), se observó un patrón de flujo tipo estratificado liso, mientras que, al aumentar dicho caudal, la interfaz tendió a ser ondulada, y se presentó un patrón de flujo tipo estratificado ondulado. Posteriormente, debido al salto hidráulico aguas debajo del cuerpo de aire estudiado, apareció un patrón de flujo tipo burbuja dispersa, donde las burbujas que se generaban consecuentemente fueron arrastradas por el flujo del agua (correspondiente a Q_{g-a}), encontrándose en la parte superior del conducto, midiendo aproximadamente 1.5 mm y presentándose normalmente por debajo de 4×10^{-5} m³/s. Al incrementarse el caudal circulante, se fueron liberando burbujas de mayor tamaño, presentándose un patrón de flujo intermitente de tipo burbuja alargada que, nuevamente, a medida que el caudal aumentaba se transformaba a un patrón de flujo tipo burbuja alargada con burbujas dispersas, hasta que finalmente circuló aquel caudal que desencadenó la liberación total del aire en la zona de estudio, el caudal de remoción (Kokal & Stanislav, 1989).

Cabe resaltar que, el fenómeno de remoción de aire debido la acción del empuje hidrodinámico recae en condiciones de flujo transitorio, de modo que, el caudal de remoción se presenta en el momento en que es evacuado el aire de la zona estudiada, siendo un intervalo de tiempo de cuestión de segundos. Por otra parte, se encontró que a medida que el conducto se encuentra más inclinado, la evacuación del aire en cuestión fue más turbulenta, generando sobrepresiones y con ello vibraciones sobre la línea de conducción, mismas que pueden causar daño a las instalaciones y sus accesorios; las mencionadas sobrepresiones no fueron medidas debido a la falta de equipos para dicho propósito.

De modo que, se ajustó y validó un modelo matemático que integra tres tipos de diámetros (12.7, 15.875, 19.05 mm) empleando el promedio del parámetro adimensional de remoción de aire en función de la raíz del seno del ángulo de inclinación descendente del conducto, el cual determina aquella velocidad de agua que debe presentarse (contemplando la aceleración de la gravedad de 9.81 m/s^2) para remover los cuerpos de aire que se forman durante el llenado de los sistemas de tuberías para ángulos de inclinación entre 0° a 60° (Ecuación 8 y Figura 5). Cabe resaltar que, los efectos de tensión superficial y viscosidad del agua son considerados indirectamente en las componentes experimentales de dicha ecuación.

$$\frac{v}{\sqrt{gd}} = 0.2671\sqrt{\text{sen}\theta} + 0.3839 \quad (8)$$
$$R^2 = 0.9969$$

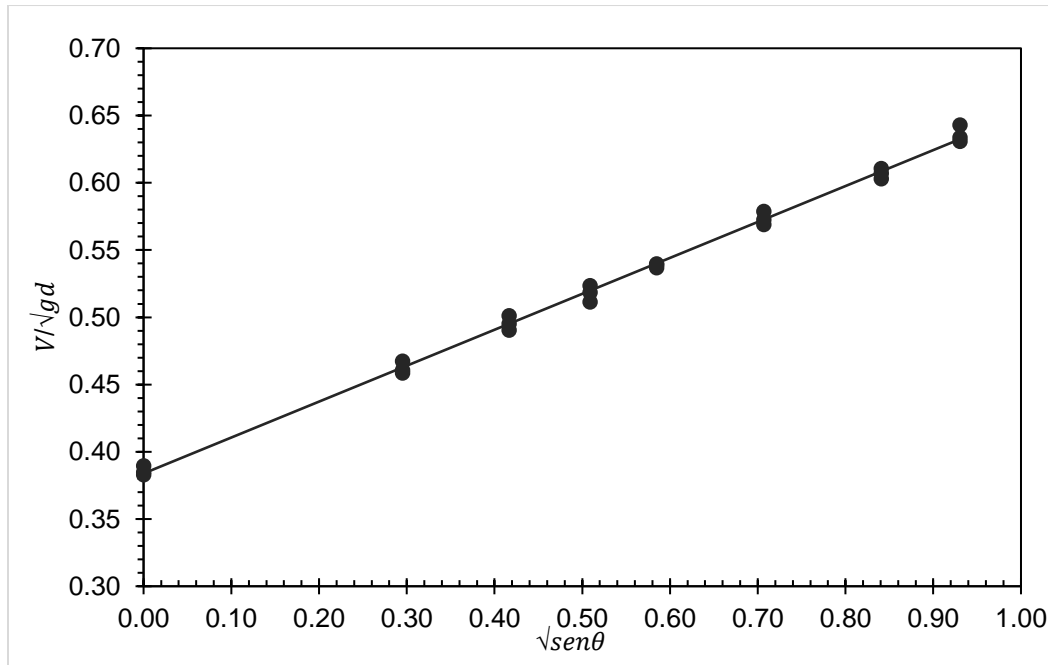


Figura 5. Modelo matemático de remoción hidrodinámica de aire atrapado para conductos de 12.7, 15.875 y 19.05 mm.

Finalmente, en la Figura 6 se presenta una gráfica en la cual se resumen diversos modelos matemáticos propuestos, elaborada por Lauchlan *et al.* (2005) y extraída de la investigación de May *et al.* (2018). La línea color oro representa el comportamiento del modelo matemático desarrollado en la presente investigación (Ecuación 8), es posible observar que se encuentra en rangos concurrentes a modelos previamente desarrollados, teniendo gran similitud con el modelo de A.R.I. (SF), Gandenberger (1957) para $n = 0.05$ y encontrándose por debajo de los modelos de May *et al.* (2018) para diámetros superiores a los estudiados.

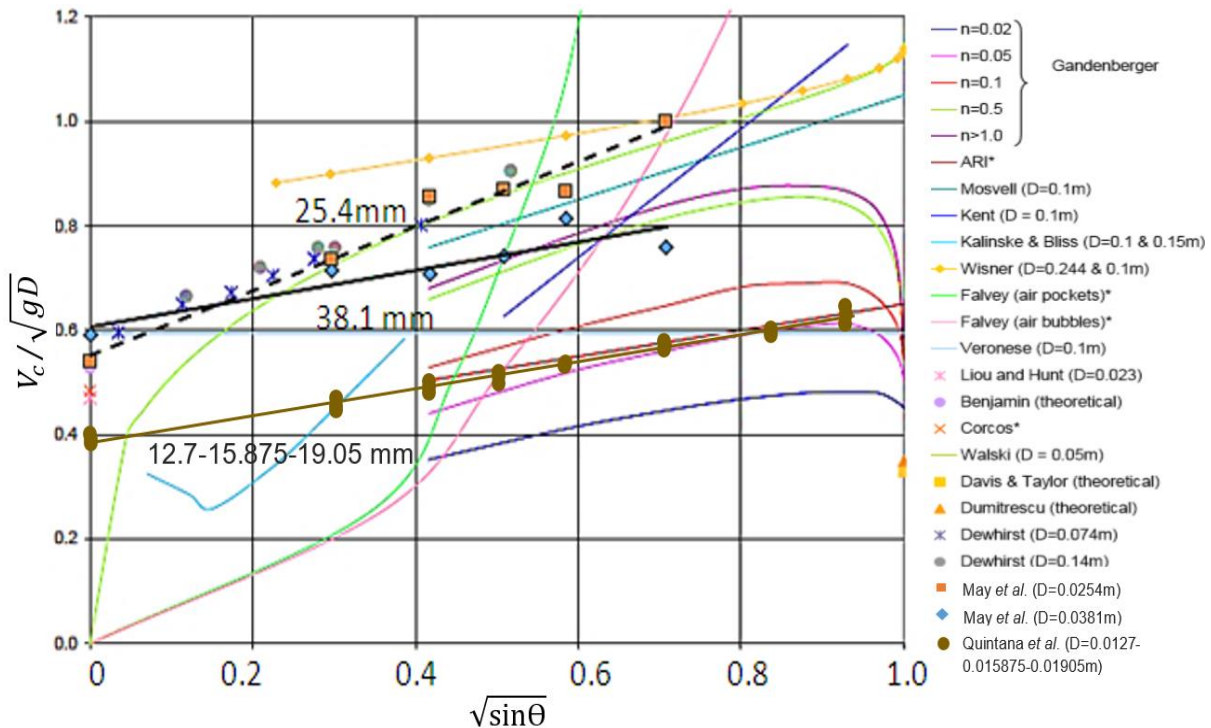


Figura 6. Comparación del modelo obtenido respecto a modelos propuestos por diversos autores.

Conclusiones

Se encontró que existe una velocidad del agua crítica a partir de la cual los cuerpos de aire son removidos, misma que quedó integrada en un modelo matemático que envuelve tres diferentes diámetros, 12.7, 15.875 y 19.05 mm.

El modelo matemático obtenido resultó simple, dado que presenta una relación lineal, mismo que asocia el parámetro adimensional de remoción de aire en función de la inclinación descendente del conducto en presencia de aire para diámetros dados.

De igual manera, el modelo matemático extiende los rangos previamente reportados en literatura, debido a que, el diámetro más pequeño reportado corresponde a 25.4 mm. En el mismo sentido, el modelo propuesto se encuentra en rangos concurrentes con modelos previamente reportados y por debajo de modelos asociados a diámetros mayores que los estudiados en la presente investigación; el modelo es capaz de representar adecuadamente el fenómeno de remoción de aire en ángulos de 0° hasta 60° .



Se encontró que la remoción incipiente de burbujas de aire debido a la turbulencia del salto hidráulico es muy sensible al ángulo de inclinación del conducto, de modo que, se determinaron modelos para cada ángulo (conducto de 19.05 mm); debido a cuestiones de escala, los modelos definidos se encontraron por debajo de los modelos reportados en literatura. De igual manera, se encontraron caudales de generación y caudales de generación y arrastre de burbujas de aire para cada ángulo de inclinación.

Se corroboró que, la pérdida de carga ocasionada por un cuerpo de aire es aproximadamente equivalente a la altura del mismo, esto mediante la aplicación de la ecuación general de la energía entre los extremos del cuerpo de aire, presentando diferencias inferiores al 4%.

Referencias Bibliográficas

- A.R.I. (SF). Recuperado de www.arivalves.com
- Corcos, G. (2003). *Air in water pipes: A manual for designers of spring supplied gravity-driven drinking water rural delivery systems* (Segunda ed.). California, Estados Unidos: Agua para la vida.
- Escarameia, M., Dabrowski, C., Gahan, C., Lauchlan, C. (2005). *Experimental and numerical studies on movement of air in water pipelines* (Report SR661). Oxfordshire, Reino Unido: HR Wallingford.
- Gandenberger, W. (1957). *Design of overland water supply pipelines for economy and operational reliability* (En alemán). Munich, Germany: R. Oldenbourg.
- Kalinske, A. A. & Bliss, P. H. (1943). Removal of air from pipelines by flowing water. *American Society of Civil Engineering*, 13(10), 480-482.
- Kalinske, A. A. & Robertson, J. M. (1943). Closed Conduit Flow. *American Society of Civil Engineering*, 108(1), 1435-1447.
- Kent, J. C. (1952). *The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes* (tesis doctoral). University of California, Berkeley, USA.
- Kokal, S. L. & Stanislav, J. F. (1989). An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes. Flow patterns. *Chemical Engineering Science*, 44(3), 665-679.
- Lauchlan, C. S., Escarameia, M., May, R. W. P., Burrows, R., Gahan, C. (2005). *Air in pipelines; a literature review* (Report 649). Oxfordshire, Reino Unido: HR Wallingford.
- May, D., Allen, J., Nelson, D. (2018). Hydraulic investigation of air in small diameter pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 7(3), 51-57.
- Pothof, I. W. M. & Clemens F. H. L. R. (2010). On elongated air pockets in downward sloping pipes. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 499-503.
- Pozos, O., González, C.A., Giesecke, J., Marx, W., Rodal, E.A. (2010). Air entrapped in gravity pipeline systems. *Journal of Hydraulic Research*, 48(3), 338-347.
- Quintana, E. (2020). *Modelo matemático para la evacuación del aire durante el llenado de tuberías abastecidas por gravedad* (tesis de grado). Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Wisner, P.E., Mohsen, F.N., Kouwen, N. (1975). Removal of air from water lines by hydraulic means. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, 101(2), 243-257.