
ANALISIS DEL VOLUMEN DE AIRE EN UN PUNTO ALTO PARA UN SISTEMA DE CONDUCCION DE AGUA PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA

Juan Pablo Rodríguez Miranda¹

Fecha de recepción: Junio 7 de 2006

Fecha de aceptación: Septiembre 6 de 2006

RESUMEN

Este artículo expone una propuesta teórica para el cálculo del volumen de aire en un punto alto de un sistema de conducción de agua, a través de la operación de llenado en condición de flujo ascendente de agua para tuberías de aducción dentro del componente de abastecimiento de agua.

Palabras Clave: Volumen, Aire, Conducción, Agua.

ABSTRACT

This paper exposes a theoretical proposal for the calculation of the air volume in a high point of a system of water conduction, through the filling operation in condition of ascending water flow for pipes of adduction within the component of water supply.

Key Words: Volume, Air, Pipeline, Water.

INTRODUCCION

Normalmente un sistema de abastecimiento de agua para consumo, presenta un perfil irregular de acuerdo con la topografía propia del lugar, la cual por sus características genera una serie de singularidades que no pueden ser obviadas dado que el líquido a transportar es agua a presión.

Dentro de las singularidades, el aire acumulado en los puntos altos de los sistemas de conducción (ver figura 1), es un inconveniente serio al transporte de

flujo, que dentro de la conceptualización del diseño y la operación del conjunto de aducción y/o conducción, para lo cual se utilizan las válvulas de ventosas (aire) como solución y para evitar inconvenientes tales como la disminución del flujo, reducción de la sección transversal útil de la tubería, cavitación, ruptura del conducto entre otros (RODRIGUEZ, 2005); dichas válvulas de acuerdo al efecto del aire atrapado en la tubería, estas pueden utilizarse para la expulsión del aire, para la relación aire-vacío y acción combinada. (VAL MATIC, 1999)

¹ Ingeniero Sanitario y Ambiental, Corporación Universitaria de la Coste. Msc. Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia. Docente Investigador. Ingeniería Ambiental. Universidad Manuela Beltrán

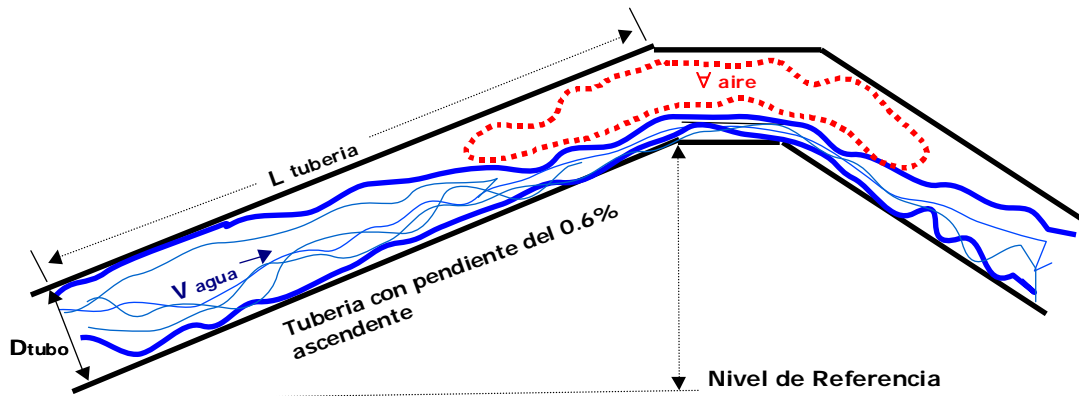
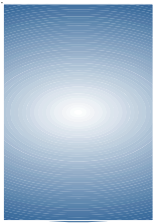


Figura 1. Volumen de aire y agua en un punto alto de tubería

Fuente: Autor

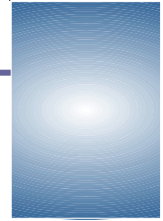
Dada esta consideración, el aire acumulado en los puntos altos en la tubería presenta presiones relativamente bajas correspondiente a la diferencia de cotas en el sistema y contenido cerca del 2% al 4% (equivalente a decir que por cada 1000 m de longitud de tubería, se presenta 20 m de longitud de aire) del volumen total basado en la solubilidad normal del aire en agua, razón por la cual se establece la siguiente metodología de cálculo para el volumen de aire, como fundamento esencial para el análisis y expulsión de este fluido, en condición de llenado de agua en la tubería, como de los efectos que esta cantidad de aire puede generar en el sistema. (PRESCOTT, 1994).

METODOLOGIA

El análisis para la deducción del volumen total del sector en donde se acumula el aire en un punto alto de la tubería en el sistema de conducción, se presume que existen ciertos conjuntos de áreas en el espacio de tres dimensiones que sumados entre sí, establecen el volumen total del sistema, que están regulados bajo las siguientes hipótesis:

- Se supone que existe una clase de área (A) que es transversal al espacio físico de la tubería y desde luego al paso del fluido y es una función del conjunto total del volumen del sistema crítico de análisis.
- Se asume que en el sistema no existe transferencia de calor entre la conducción (tubería) y su entorno es decir, un proceso adiabático (RODRIGUEZ, 2005).
- De acuerdo con lo anterior, aplica las propiedades de aditividad, de la diferencia, el principio de Cavalieri y la elección de escala.

Dado lo anterior, en términos generales, el volumen se puede calcular, si existe una función (f) no negativa e integrable entre límites físicos, con un conjunto de coordenadas de esa misma función que puede girar alrededor del eje (x) o eje de giro, el cual engendra el volumen en el eje mencionado pero de manera perpendicular, siendo este un disco o cilindro circular recto (LARSON, 1999) en la tubería de la forma $\int_a^b \pi \cdot f^2 \cdot (X) \cdot dX$, en donde la integral existe de la siguiente forma:



$$\begin{aligned} \forall &= \int_{-r}^r \pi \cdot f^2 \cdot (X) \cdot dX \\ &= 2 \cdot \pi \int_0^r (R^2 - X^2) \cdot dX \end{aligned} \quad (1)$$

Donde π es una constante, « f » es la función, X es la variable relativa a la altura del volumen.

Pero también (LARSON, 1999), se puede expresar así:

$$\Delta \forall = \pi \cdot R^2 \cdot \Delta X = \pi \cdot \int_0^R (R(x))^2 \cdot dX \quad (2)$$

Donde, \forall es el volumen, R es el radio, X es el valor del intervalo indicado para realizar la revolución.

De otro lado, se establece que la frontera de la figura geométrica (ver figura 2) para el sistema de conducción en donde se encuentra el desplazamiento del agua dentro de la tubería es:

Con más detalle se observa (ver figura 3), el tramo en donde se realiza la instalación del conjunto (Tubería + Accesorios), esencialmente es un cilindro curvo de radio constante (diámetro de la tubería) el cual posee dos codos de 45°, una te y la válvula de ventosa acuerdo con el diámetro seleccionado; dado lo anterior, en los codos de 45° se presenta un volumen compuesto en primer lugar por el área de sector circular (LARSON, 1999) de la siguiente forma:

$$A_{SECTORCIRCULAR} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \alpha}{360} \quad (3)$$

Donde α es el ángulo del sector, R es el radio del sector. En segunda instancia, la longitud (S) del sector circular (LARSON, 1999) es:

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \alpha}{360} \quad (4)$$

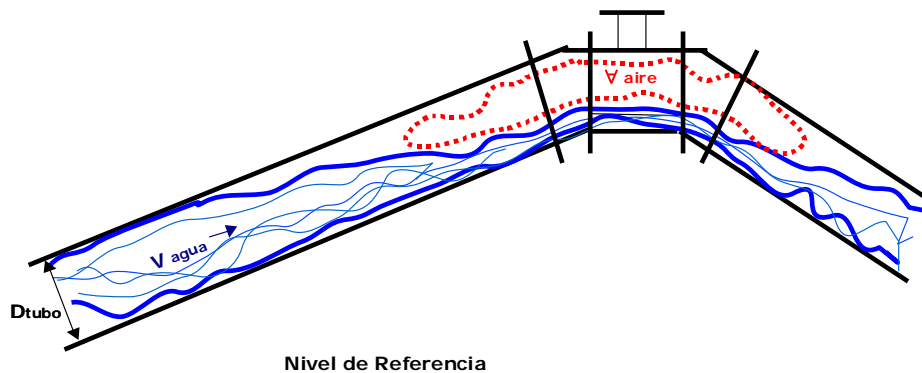
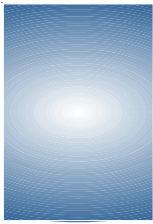


Figura 2. Esquema de accesorios en el punto alto e instalación de la válvula de ventosa
Fuente: Autor



Por consiguiente conforma los volúmenes (a partir de las ecuaciones 3 y 4) de los tramos críticos de instalación de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \nabla &= A_{SECTORCIRCULAR} \cdot S_i \Rightarrow \nabla_6 \\ &= A_{SECTORCIRCULAR} \cdot S_6 \end{aligned} \quad (5)$$

De otro lado, los volúmenes segmentados del sistema total, obedecen a la configuración geométrica de un cilindro recto (LARSON, 1999), así:

$$\nabla = \pi \cdot R^2 \cdot H \quad (6)$$

Donde H es la longitud del cilindro si estuviese en posición horizontal.

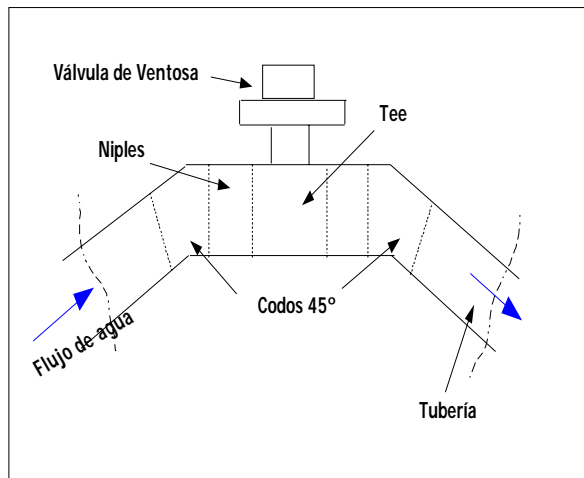


Figura 3. Detalle de accesorios en el punto alto
Fuente: Autor

Según la figura anterior, el $\nabla_6 = \nabla_5 =$ Codos de 45° ; $\nabla_1 = \nabla_2 = \nabla_3 = \nabla_4 =$ Niples, tee y Tramos de Tubería en posición horizontal. Por consiguiente, el

volumen total del sistema es:

$$\begin{aligned} \nabla_{Total} &= \nabla_1 + \nabla_2 + \nabla_3 + \nabla_4 + \nabla_5 + \nabla_6 \\ \nabla_{Total} &= \pi \cdot R^2 \cdot \left(\sum_{i=0}^{i=ni} H_i \right) + \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot R^3 \cdot \alpha^2}{360^2} \end{aligned} \quad (7)$$

Al tener como fundamento para el flujo de agua en dos dimensiones, luego por la ecuación de continuidad:

$$dM = \rho_w \cdot A \cdot dL \quad (8)$$

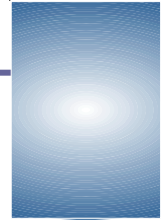
Donde M es la masa del agua, ρ_w es la densidad del agua, A es el área transversal y L es la longitud del segmento (tubería).

Luego si el sistema de la masa del agua, se estima que dentro de la conducción, el flujo está término cuasi estática, que le antecede para llegar al punto alto, posee un movimiento periódico (agua), dado que la lamina de agua, dentro de la tubería resulta todo al transcurrir el tiempo y el desplazamiento de la misma masa de agua con relación al diámetro de la tubería, y con la incidencia de la pendiente hidráulica (positiva) que posee el sistema se tiene:

$$dL = D \cdot \text{sen}(\beta) \cdot e^{(-0.5 \cdot \mu \cdot t)} \quad (9)$$

Donde $\mu = w_d/10$, $t = 2\pi/w_d$, D es el diámetro del conducto y β es el ángulo de inclinación de la pendiente hidráulica.

Entonces, arreglando y sustituyendo los términos anteriores en la expresión (9), para que exista un desplazamiento de la masa de agua en la dirección de la pendiente hidráulica (RODRIGUEZ, 2005), de la siguiente forma:



$$dL = D \cdot \text{Sen}(\beta) \cdot e^{(-\pi/10)} \quad (10)$$

Luego se tiene que reemplazando en la ecuación (8), la expresión (10) de la siguiente forma:

$$dM = \rho_w \cdot A \cdot D \cdot \text{Sen}(\beta) \cdot e^{(-\pi/10)} \quad (11)$$

Si el $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ para la sección transversal de la tubería, por consiguiente se reemplaza en la ecuación (11) y se tiene:

$$M_w = \frac{1}{4} \cdot \rho_w \cdot D^3 \cdot \pi \cdot \text{Sen}(\beta) \cdot e^{(-\pi/10)} \quad (12)$$

De acuerdo con lo anterior, si $\nabla = \frac{M_w}{\rho_w}$, entonces el volumen de agua en el punto alto de la tubería es:

$$\nabla_w = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \text{Sen}(\beta) \cdot e^{(-\pi/10)} \quad (13)$$

Para la condición de frontera estacionaria, el volumen total en el punto alto es:

$$\nabla_{\text{TOTAL}} = \nabla_{\text{AIRE}} + \nabla_{\text{AGUA}} \quad (14)$$

Por consiguiente, el volumen de aire es:

$$\begin{aligned} \nabla_{\text{AIRE}} &= \nabla_{\text{TOTAL}} - \nabla_{\text{AGUA}} \\ \nabla_{\text{AIRE}} &= \left\{ (\pi \cdot R^2 \cdot (\sum_{i=0}^i H_i)) + \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot R^3 \cdot \alpha^2}{360^2} \right\} \\ &\quad - \left\{ \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \text{Sen}(\beta) \cdot e^{(-\pi/10)} \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

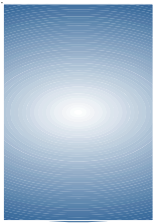
Ejemplo de Cálculo

Básicamente, la consideración de expulsar y/o admitir aire dentro de un sistema de tuberías, establece la forma de encontrar el aire (compresible) y el agua (incompresible) mezclados entre sí, de manera disuelta, en libertad, inmerso y espuma (RODRIGUEZ, 2005). Esencialmente, el análisis realizado anteriormente del volumen de aire en un punto alto, se puede conceptualizar mejor, si se tiene una línea de conducción nueva y al momento de operarla se realiza el llenado, en donde el aire es atrapado durante este proceso en los puntos altos topográficamente o de elevación estática superior al nivel de referencia.

Dado lo anterior, el ejemplo de cálculo expone un sistema de conducción nuevo del agua a gravedad (baja presión), en la cual se realiza la operación de llenado a velocidades adecuadas, pero durante el desplazamiento de la masa de agua se encuentra un punto alto de cotas, para lo cual se necesita determinar el volumen de aire atrapado para evacuar en este punto, y se establecen las siguientes consideraciones de cálculo:

El diámetro interno del conducto es 158 mm, en tubería de hierro dúctil; presión de trabajo del sistema de 0.2 bar. (2.9 PSI); en el punto alto posee dos (2) codos de 45°, una tee en el mismo diámetro del conducto y una válvula de ventosa.

Para la óptima operación de llenado, el aumento de caudales y velocidades debe ser lento y gradual, para evitar dificultades de saltos hidráulicos, turbulencias y vórtices entre otras, para lo cual se establece un rango de velocidades de llenado entre 0.1 m/s a 0.3 m/s, y por consiguiente los caudales también se incrementan progresivamente expuesto en la figura



4, de la siguiente forma:

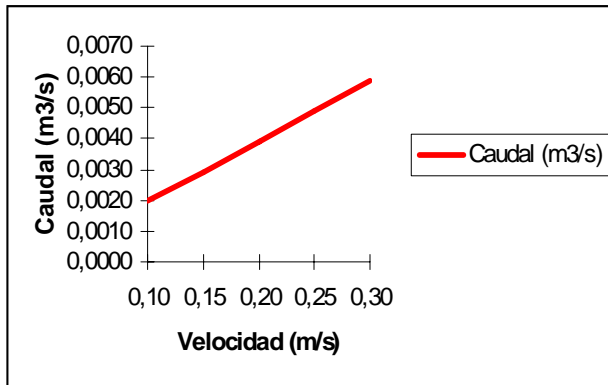


Figura 4. Caudales y velocidades en la operación de llenado
Fuente: Autor

De otro lado, el volumen total en el punto alto se determina aplicando la expresión (7) de la siguiente forma:

$$+ \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{0.158m}{2}\right)^3 \cdot (45^\circ)^2}{360^2} = 0.010m^3$$

Luego si el tramo ascendente de tubería, puede tener una pendiente hidráulica admisible de 0.2% a 0.3%, lo cual genera un ángulo de inclinación β de 0.11° a 0.17° recomendada en proyectos de ingeniería; con

ello, se puede calcular el volumen de la masa de agua mediante la ecuación (13) de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \nabla_w &= \left(\frac{1}{4}\right) \cdot \pi \cdot (0.158m)^3 \cdot \text{Seno}(0.17) \cdot \\ &\cdot e^{\left(\frac{-\pi}{10}\right)} = 0.0004m^3 \end{aligned}$$

Por consiguiente, el volumen de aire es calculado a través de la expresión (15) así:

$$\nabla_A = 0.010m^3 - 0.0004m^3 = 0.0096m^3$$

De lo anterior, el porcentaje de agua a estas condiciones está de 2.50% a 3.90%, mientras que el porcentaje de aire entre el 97.50% al 96.10% (figura 5).

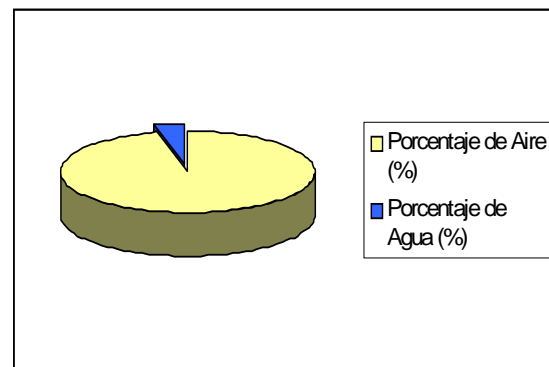


Figura 5. Distribución porcentual de aire y de agua en un punto alto
Fuente: Autor



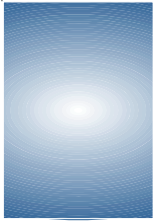
CONCLUSIONES

El abastecimiento de agua a las comunidades, quizás puede ser el único producto (como actividad de servicios) entregado con calidad y continuidad, pero si existen intermitencias ocasionadas por dificultades en la infraestructura de distribución, tales como la presencia de aire en las tuberías demostrado anteriormente, estas constituyen un riesgo a la salud pública y una utilización improductiva de los sistemas de abastecimiento instalados, lo cual puede contribuir al deterioro del servicio de agua y desde luego con la viabilidad económica del sistema.

La presencia de aire dentro de la tubería en el ejemplo anterior, evidencia que el aire inmerso en combinación con el flujo hidráulico está en condición de burbuja de aire dada la proporción del 96%, durante la operación de llenado de agua. Esta situación presentada, es ocasionada en gran manera por la transición de la sección transversal de la tubería

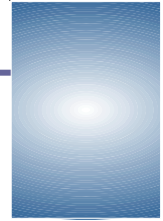
llena de aire sin que esté en funcionamiento al momento del paso del flujo de agua reducido durante la operación del llenado. Dada la consideración de la velocidad de llenado gradual, este volumen de aire no puede ser removido hidráulicamente, sino mecánicamente mediante una válvula de ventosa (aire) al paso del flujo hidráulico, donde el tiempo necesario para que salga el aire por la ventosa y evitar de esta forma las bolsas de aire en posiciones desconocidas de la línea de conducción en tramos posteriores.

Es de esperarse, que cuando el sistema se vuelva dinámico totalmente, las proporciones de aire y agua cambian sustancialmente, debido a que buena parte de la conducción de agua estaría operando continuamente, y en entonces la remoción de aire disuelto, inmerso y libertad sería también mediante una válvula de ventosa en los puntos altos o en otra ubicación dentro del sistema de conducción.



BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Water quality in the distribution system. 2005.
- ANDERSON, Steven D. Getting control of contamination. Journal Hydrauliks & pneumatics. August 2005.
- ARI. Flow control accesories. Catálogo D 050 válvula ventosa combinada. 2002.
- BAINES, Douglas. Air cavities as gravity currentes on slope. Journal of hidraulic engineering. Volume 117. Number 12. December 1991.
- BAYARD. Ventouse automatique. Societe commerciale Bayard. Lyon. France. 1995.
- BOULOS, Paul. Hidraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. Journal AWWA. May 2005.
- BOYD, Glen et al. Intrusion within a simulated water distribution system due to hidraulic transients. I: description of test rig and chemical tracer method. Journal of enviromental engineering. ASCE. July 2004.
- BOYD, Glen et al. Intrusion within a simulated water distribution system due to hidraulic transients. I: volumetric method and comparison of results. Journal of enviromental engineering. ASCE. July 2004.
- CMB INDUSTRIES. K flo. Butterfly valves. Product catalog. 1998.
- GARBARINO John and RAJANI, Raj. Air valve take on a global identity. Journal Hydrauliks & pneumatics. January 2005.
- GRANT, Paul. Mixing valves deliver safe water temperatures proper equipment maintenance is the key to safeguarding against injuries. Journal Reeves. August 2005.
- GULLICK, Richard et al. Occurrence of transient low and negative pressure in distribution systems. . Journal AWWA. Numero 96. November 2004.
- HITE, John. Velocity or air core vortices at hidraulics intakes. Journal of hidraulic engineering. Volume 120. Numero 3. March 1994.
- KIRMEYER, Gregory et al. Practical guidelines for maintaining distribution system water quality. Journal AWWA. Number 93. July 2001.
- LEWIS, Andrew et al. Control valve induced pipeline virbrations in a paper pulp pumping systems. Proceedings of the 14 TH international pump users symposium. 2003.
- NCEES. Fundamentals of engineering. 1993.
- MOLLS, Thomas. Space time conservation method applied to saint venant equations. Journal of hidraulic engineering. Volume 124. Numéro 5. May, 1998.
- OKUN, Daniel. Distributing reclaimed water through dual systems. Journal AWWA. November 1997.
- PRESCOTT, Douglas. No air and no problems. Journal water environment & technology. August



1994.

PURCELL, Patrick. Case study of check valve slam in rising main protected by air vessel. Journal of hydraulic engineering. December 1997.

RAHMEYER, William. Dynamic flow testing of check valves. Nuclear industry check valve group. 1996.

RODRIGUEZ MIRANDA, Juan pablo. Determinación de una expresión para el dimensionamiento de válvulas de ventosas de gran orificio. Revista ACODAL. Revista No. 211. Año 47. Octubre de 2005.

RODRIGUEZ MIRANDA, Juan pablo. Influencia de la presencia del aire en el funcionamiento de conducciones a gravedad e impulsión para el transporte de agua. Revista Sociedad de Ingenieros del Atlántico. Revista Sociedad de Ingenieros del Atlántico. Numero. Año.

RODRIGUEZ MIRANDA, Juan pablo. Válvulas de ventosas: una aproximación a las ecuaciones de diseño. Boletín científico universitario «Entérese». Universidad Manuela Beltrán. Año IX. No. 17. Diciembre de 2004.

SCHNEIDER, Richard. A guide to air valve selection. Journal Hydraulics & pneumatics. February 2002.

STEPHENSON, David et al. Effects of air valves and pipework on water hammer pressures. Journal of transportation engineering. March april 1997.

SUBHASH, Jain. Air transport in vortex flow drop shafts. Journal hidraulic engineering. Volume 114. Number 12. December 1988.

TORINO. Válvulas de aire o ventosas. VHF 2. 1981.

VAL MATIC. Why an air release valve opens during systems operation. Valve and manufacturing Corp.1998.

VAL MATIC. Why an air release valve opens during systems operation. Valve and manufacturing Corp.1998.

VAL MATIC. Air in pipelines. Sources, system impact and removal. 1999.

VAL MATIC. Air release valve sizing. Valve and manufacturing Corp.1998.

VAL MATIC. Air valves. Providing system efficiency and protection. Bulletin 1500. 1999.

VAL MATIC. Catalogo. Application, function, purpose and release. 2005.

VAL MATIC. Theory, application and sizing of air valves. 1997.

WALKI, Thomas et al. Water distribution modelling. Haestad Press. 2001.

WALKER, Roger. Water supply, treatment and distribution. Prentice Hall. 2000.

WOOD, Don et al. Numerical methods for modeling transiente flow in distribution systems. Journal AWWA. Numero 97. July 2005.

YANG, Kai lin. Practical method to prevent liquid column separation. Journal of hydraulic engineering. July 2001