



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

ANÁLISIS DE FLUJO AGUA – AIRE EN CONDUCTOS A PRESIÓN

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
RODOLFO MARTÍNEZ DIEGO

TUTOR
DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo

Secretario: Dr. Domínguez Mora Ramón

Vocal: Dr. Pozos Estrada Óscar

1^{er.} Suplente: Dr. Pedrozo Acuña Adrián

2^{do.} Suplente: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, CD. MX.

TUTOR DE TESIS:
DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA

NOMBRE

FIRMA

Contenido	Pág.
Capítulo 1 Descripción de un acueducto o línea de conducción	1
1.1 Introducción.....	1
1.1.2 Línea de conducción	1
1.1.3 Conducciones por gravedad	1
1.1.4 Conducción por bombeo.....	2
1.1.5 Conducción por bombeo-gravedad.....	2
1.2 Componentes de un acueducto	3
1.2.1 Tuberías	3
1.2.2 Juntas	8
1.2.3 Carretes.....	14
1.2.4 Extremidades.....	14
1.2.5 Tees	15
1.2.6 Cruces	15
1.2.7 Codos	16
1.2.8 Reducciones	17
1.2.9 Coples.	17
1.2.10 Válvulas.....	18
1.3 Medios para el control de transitorios.....	21
1.3.1 Válvula aliviadora de presión	23
1.3.2 Válvula anticipadora de golpe de ariete	24
1.3.3 Torre de oscilación	25
1.3.4 Tanque unidireccional	26
1.3.5 Cámara de aire	27
Capítulo 2 Problemas del aire atrapado en conductos cerrados.....	29
2.1 Problemas principales	29
2.2 Causas por las que se introduce el aire a las tuberías	29
2.3 Consecuencias debido al aire atrapado en conductos a presión	30
2.3.1 Incremento de la pérdida de carga hidráulica por aire atrapado	30
2.3.2 Retorno de bolsas de aire de gran tamaño debido a la fuerza de flotación (blowback)	33

2.3.3 Golpe de ariete provocado por la evacuación de aire	33
2.3.4 Reducción de la eficiencia en sistemas de bombeo debido a aire atrapado.....	34
2.4 Medios para la remoción de aire	34
2.4.1 Medios hidráulicos	34
2.4.2 Medios mecánicos	40
2.5 Localización y dimensionamiento de válvulas de aire	45
Capítulo 3 Técnicas de visualización cuantitativa	49
3.1 Introducción.....	49
3.2 Visualización cuantitativa con partículas trazadoras: PTV, PIV, LSV y BIV.	53
3.2.1 PTV (Velocimetría por seguimiento de partículas): $N_s \ll 1$, $N_i \ll 1$	53
3.2.2 PIV (Velocimetría de partículas en imagen) $N_i \gg 1$, $N_s \ll 1$	55
3.2.3 LSV (Velocimetría por manchas de láser): $N_s \gg 1$, $N_i \gg 1$	56
3.2.4 BIV (Velocimetría por trazado de burbujas)	57
Capítulo 4 Investigación experimental.....	59
4.1 Introducción.....	59
4.2 Método para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire.....	59
4.3 Investigaciones previas del comportamiento del aire en conductos a presión	63
4.4 Investigación experimental en laboratorio	64
4.4.1 Dispositivo experimental.....	64
4.3 Pruebas en la instalación experimental.....	70
4.3.1 Mediciones del perfil de velocidades	70
4.3.2 Equipo para la implementación de la técnica BIV.....	71
4.3.3 Metodología de la velocimetría por trazado de burbujas (BIV)	74
4.4 Procesamiento de Imágenes	79
4.4.1 Importación de datos	80
4.4.2 Configuración del análisis	80
4.4.3 Vector validación	81
4.4.5 Calibración.....	83
4.5 Resultados.	84
Capítulo 5 Conclusiones	89

5.1 Futuras líneas de investigación	90
Referencias	91

Índice de figuras

Figura 1. 1. Esquema de una conducción por gravedad	2
Figura 1. 2. Esquema de una conducción por bombeo	2
Figura 1. 3. Esquema de una conducción bombeo - gravedad	3
Figura 1. 4. Tuberías de acero	4
Figura 1. 5. Tendido de tubería de fibrocemento con sistemas de conexión espiga - campana	4
Figura 1. 6. Izaje y colocación de una tubería de concreto	5
Figura 1. 7. Patio de almacenamiento de tuberías de concreto	5
Figura 1. 8. Tuberías de PVC con sistemas de espiga - campana	6
Figura 1. 9. Tendido de tubería de PVC	6
Figura 1. 10. Tuberías de PEAD	7
Figura 1. 11. Unión por Termo-fusión en tuberías de PEAD	7
Figura 1. 12. Fabricación de tuberías de PRFV	8
Figura 1. 13. Tendido de tuberías de PRFV	8
Figura 1. 14. Junta bridada	9
Figura 1. 15. Junta de plomo	10
Figura 1. 16. Junta automática	10
Figura 1. 17. Junta Expres	10
Figura 1. 18. Junta por soldadura en tuberías de acero	11
Figura 1. 19. Soldadura en enchufes	11
Figura 1. 20. Juntas Gibault	12
Figura 1. 21. Junta de acero Gibault	12
Figura 1. 22. Enchufe automático	13
Figura 1. 23. Bridas de plástico para tuberías de PVC	13
Figura 1. 24. Junta flexible	14
Figura 1. 25. Carrete de 25 cm de longitud	14
Figura 1. 26. Extremidad de PVC	15
Figura 1. 27. Transporte de tee's de PRFV	15
Figura 1. 28. Cruce de PVC	16
Figura 1. 29. Crucero de tubería de agua potable	16
Figura 1. 30. Codo de 90° de tubería de PEAD	17
Figura 1. 31. Reducción de 6" a 4" en acero	17
Figura 1. 32. Cople de PVC	18
Figura 1. 33. Válvula eliminadora de aire	18
Figura 1. 34. Válvula de admisión y expulsión de aire	19
Figura 1. 35. Válvula de no retorno (Check)	19

Figura 1. 36. Válvula Check	20
Figura 1. 37. Válvula tipo compuerta.....	20
Figura 1. 38. Válvula de mariposa	21
Figura 1. 39. Válvula tipo esfera	21
Figura 1. 40. Válvula aliviadora de presión	24
Figura 1. 41. Válvula anticipadora de golpe de ariete.....	24
Figura 1. 42. Esquema de la Torre de oscilación	25
Figura 1. 43. Torre de oscilación, Acueducto Río Colorado – Tijuana	26
Figura 1. 44. Esquema del Tanque unidireccional	27
Figura 1. 45. Esquema general y ubicación de una Cámara de aire	28

Figura 2. 1. Fuerzas que actúan en una bolsa de aire estacionaria en un tramo de tubería descendente con flujo de agua a tubo lleno	31
Figura 2. 2. Bolsa de aire en una pendiente descendente (Edmunds, 1979)	31
Figura 2. 3. Bolsas de aire en acueductos a gravedad	32
Figura 2. 4. Bolsas de aire en un acueducto a bombeo	32
Figura 2. 5. Retorno de bolsas de aire a contraflujo	33
Figura 2. 6. Golpe de ariete causado por remoción de una bolsa de aire.....	34
Figura 2. 7. Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos (Falvey, 1980)	39
Figura 2. 8. Venteo colocado en un acueducto para expulsar el aire atrapado ..	41
Figura 2. 9. Hidrante	41
Figura 2. 10. Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA)	43
Figura 2. 11. Válvula de expulsión de aire (VEA)	44
Figura 2. 12. VAC de un cuerpo.....	45
Figura 2. 13. VAC de doble cuerpo	45
Figura 2. 14. Localización de las válvulas de aire en un acueducto	48

Figura 3. 1. Esquemas de Leonardo Da Vinci, sobre estructuras de flujo generadas a la salida de agua por un orificio (panel izquierdo), así como estructuras formadas alrededor de obstáculos (panel derecho). (Da Vinci c. 1508).....	49
Figura 3. 2. Esquema gráfico del arreglo experimental de Reynolds para la visualización de la transición de regímenes en fluidos; (Izquierda) Reynolds y su instrumento; (Derecha) Ejemplo de la inyección de colorante en el tubo.....	50
Figura 3. 3. Fotografía del túnel de agua por Ludwig Prandtl (1904) para la visualización de líneas de flujo. (Markus et al., 1998).....	51
Figura 3. 4. Esquema gráfico del instrumento de Prandtl (1904)	51
Figura 3. 5. Ejemplo de imagen obtenida por medio de un sistema PTV	54

Figura 3. 6. (a) Imagen de partículas tomada en un tiempo t_0 ; (b) Imagen de partículas en un tiempo t_1 ; (c) Desplazamiento estimado de las partículas en un intervalo t_1-t_0	54
Figura 3. 7. Ejemplo de imagen obtenida con un sistema PIV	55
Figura 3. 8. 8 Sistema PIV (Salinas 2007)	56
Figura 3. 9. Ejemplo de imagen obtenida con el método LSV	57
Figura 3. 10. Ejemplo de imágenes obtenidas con la técnica BIV (Ryu et al., 2005). En la imagen a) se muestra una ola rompiendo sobre un muro vertical. En la imagen b) se observa el campo de velocidades obtenidas con la técnica del BIV	58
Figura 3. 11. Cronología de trabajos utilizando técnicas de visualización de flujo .58	
Figura 4. 1. Fuerzas que actúan sobre una bolsa de aire estacionaria.....	60
Figura 4. 2. Bolsa de aire acumulada en una sección de control	63
Figura 4. 3. Dispositivo experimental	65
Figura 4. 4. Sistema de bombeo	66
Figura 4. 5. Tubería de conducción	67
Figura 4. 6. Tramo de ampliación en línea de conducción	67
Figura 4. 7. Sección de control y de medición.....	68
Figura 4. 8. Válvulas de purga e inyección de aire	69
Figura 4. 9. Válvulas de purga.....	69
Figura 4. 10. Sección de descarga del sistema.....	70
Figura 4. 11. Cámara Fastec IL4.....	72
Figura 4. 12. Reflector tipo Fresnel (izquierda); Ángulos de desplazamiento de la lámpara interior del reflector (derecha)	73
Figura 4. 13. Medidor de flujo ultrasónico.....	74
Figura 4. 14. Diámetro de apertura en el lente y su relación con el numero f del lente fotográfico	76
Figura 4. 15. Esquema de distancia focal	77
Figura 4. 16. Esquema de iluminación en el modelo experimental	77
Figura 4. 17. Ubicación de instrumentación utilizada para el desarrollo de la técnica del BIV	78
Figura 4. 18. Fotografías naturales de la turbulencia dentro de la tubería.....	79
Figura 4. 19. Área de importación de archivos de PIVLab.....	80
Figura 4. 20. Imagen que muestra los pasos en la zona de interrogación.....	81
Figura 4. 21. Vectores sin marco de validación	82
Figura 4. 22. Diagrama de dispersión.....	83
Figura 4. 23. Vectores con marco de validación.....	83
Figura 4. 24. Parámetros para calibración.....	84
Figura 4. 25. Ejes coordenados y sus vectores correspondientes	84

Figura 4. 26. Vector V.....	85
Figura 4. 27. Vector U.....	85
Figura 4. 28. Perfil de velocidades de las burbujas de aire fotografía 1	86
Figura 4. 29. Perfil de velocidades de las burbujas de aire fotografía 2.....	87
Figura 4. 30. Perfil de velocidades de las burbujas de aire fotografía 3.....	87
Figura 4. 31. Perfil de velocidades de las burbujas de aire fotografía 4.....	88

Índice de Tablas

Tabla 4. 1. Valores de las velocidades de remoción	62
Tabla 4. 2. Parámetros fotográficos.....	78

Capítulo 1 Descripción de un acueducto o línea de conducción

1.1 Introducción

Un acueducto es toda aquella obra destinada al transporte de agua entre dos o más puntos. Esta obra incluye tanto al medio físico a través del cual el fluido será transportado (tuberías, estaciones de bombeo, tanques de almacenamiento o de cambio de régimen y dispositivos de control) como a todas las obras adicionales necesarias para lograr un funcionamiento adecuado de la instalación.

Por lo general, la idea de construir un acueducto surge ante la necesidad de proveer de agua a sitios o poblaciones que no disponen en abundancia de la misma, o en caso de disponer, que su calidad sea deficiente, con todas las consecuencias ingenieriles que esto implica. Por estar transportando un recurso de primera necesidad para el desarrollo humano y por estar involucrada en general una cantidad importante de personas, el diseño correcto de esta obra se hace especialmente importante, sobre todo teniendo en cuenta la trascendencia social de la obra en consideración. Los Acueductos pueden funcionar "A PRESIÓN" (en tuberías cerradas) o bien "A SUPERFICIE LIBRE" (a través de canales o tuberías parcialmente llenas).

1.1.2 Línea de conducción

Dentro de un sistema de abastecimiento de agua potable se llama línea de conducción, al conjunto integrado por tuberías, estaciones de bombeo y dispositivos de control, que permiten el transporte del agua desde una fuente de abastecimiento, hasta un sitio donde será distribuida en condiciones adecuadas de calidad, cantidad y presión.

1.1.3 Conducciones por gravedad

En este sistema la fuente de captación está en un nivel más alto que el punto de entrega. El agua fluye debido a la gravedad, es decir por su propio peso, hasta el tanque de almacenamiento, el transporte del fluido se logra por la diferencia de energías disponibles.

El sistema sólo requiere el uso de válvulas para controlar el agua y garantizar que el servicio llegue adecuadamente al sitio de entrega o todos los puntos de distribución ya sean hogares o fuentes públicas. En la figura 1.1 se muestra un esquema de una conducción por gravedad.

Tabla 1

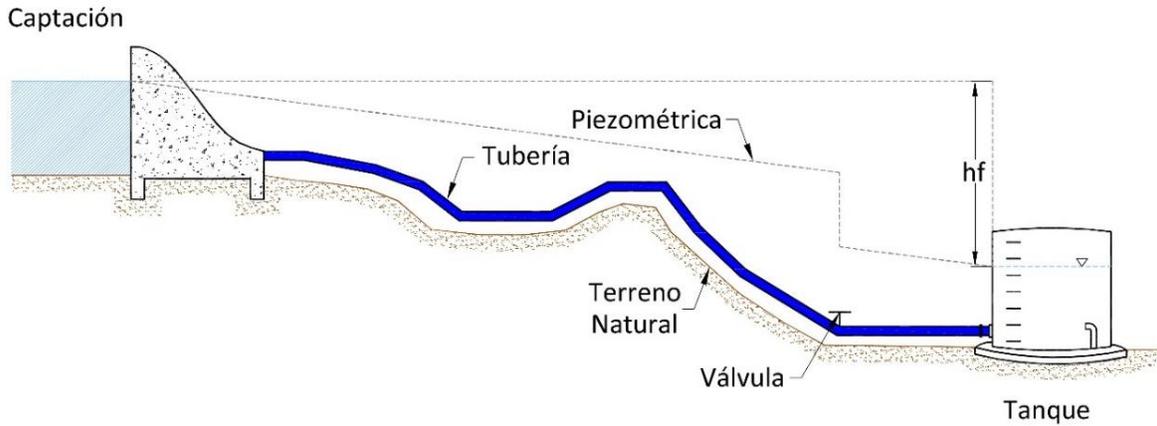


Figura 1. 1. Esquema de una conducción por gravedad

1.1.4 Conducción por bombeo

Cuando el punto de entrega se ubica en un nivel más alto que la fuente es necesario utilizar bombas para elevar el agua. Estas bombas impulsan el agua hacia los tanques de almacenamiento y distribución. Una vez en los tanques el agua baja a otro punto de entrega por gravedad (ver figura 1.2).

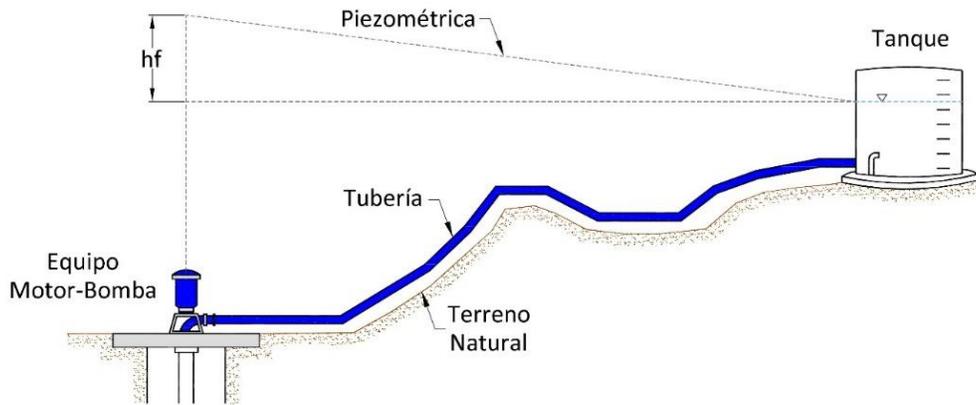


Figura 1. 2. Esquema de una conducción por bombeo

1.1.5 Conducción por bombeo-gravedad

Si la topografía del terreno obliga al trazo de la conducción a cruzar por partes más altas que la elevación de la superficie del agua en el tanque de regulación. Es común la colocación de un tanque intermedio en el punto más alto del trazo del acueducto. La instalación de dicho tanque ocasiona que se forme una conducción por bombeo-gravedad, donde la primera parte es por bombeo y la segunda por gravedad. La figura 1.3 muestra un ejemplo de este tipo de sistemas.

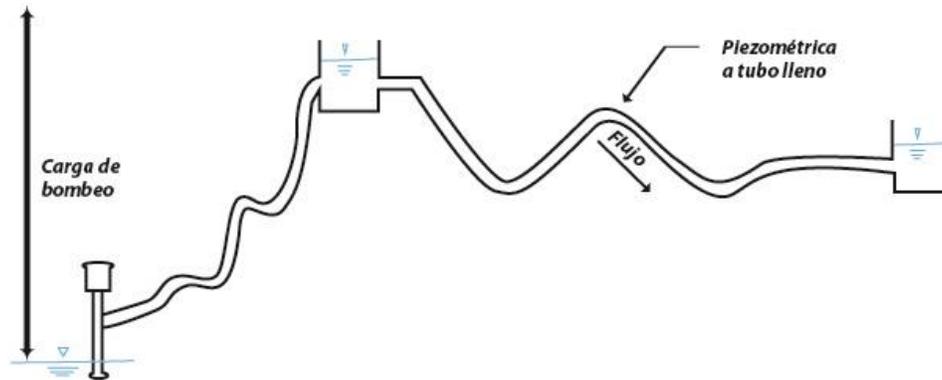


Figura 1. 3. Esquema de una conducción bombeo - gravedad

Otra de las características que debe tener cualquier conducción es que sea de fácil acceso, esta puede ser paralela a algún camino existente o el construido para el mantenimiento del acueducto.

1.2 Componentes de un acueducto

1.2.1 Tuberías

En la fabricación de tuberías utilizadas en los sistemas de conducción de agua, los materiales de mayor uso son: acero, fibrocemento, concreto presforzado, cloruro de polivinilo (PVC), hierro dúctil, polietileno de alta densidad (PAD) y poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

Del diseño hidráulico debe determinarse para todo el sistema o por tramos, la mayor presión estática o dinámica (incluyendo los fenómenos transitorios). De acuerdo con estas presiones, se escoge la clase de tubería que se debe instalar de forma que la presión de trabajo o servicio indicada por el fabricante sea mayor o igual a la máxima presión a la que va a estar sometida la tubería durante su vida útil.

1.2.1.1 Tuberías de acero

Los aceros son aleaciones de hierro-carbono, aptas para ser deformadas en frío y en caliente. Generalmente, el porcentaje de carbono no excede del 1.76%. Las tuberías de acero tienen un gran uso industrial debido a su alta resistencia en la contención de fluidos, presión y dureza. En la figura 1.4, se muestra la forma de montaje para transportar la tubería de acero.



Figura 1. 4. Tuberías de acero

1.2.1.2 Tuberías de fibrocemento

Son elaboradas a partir de una mezcla homogénea de fibras de cemento portland puzolánico, exenta de materia orgánica, con o sin adición de sílice y agua. Las tuberías de fibrocemento tienen alta resistencia a la compresión, a la tracción, estanquidad, no presentan corrosión, normalmente son dieléctricas y no propician el albergue de colonias bacterianas. En la figura 1.5 se muestra una tubería de fibrocemento.



Figura 1. 5. Tendido de tubería de fibrocemento con sistemas de conexión espiga - campana

1.2.1.3 Tuberías de concreto

Son elaboradas de concreto en las clases I, II, III, IV y V, con refuerzo o sin él, en función de las necesidades del proyecto, inclusive pueden tener recubrimientos plásticos de PAD o PVC. Las tuberías de concreto son un sistema rígido, donde el 85% de la resistencia es aportada por la tubería y solo el 15% es aportado por el material de relleno de la zanja, son durables, resistentes al fuego, y el ritmo de

instalación depende más de la fabricación que de la colocación del tubo por lo general. En las figuras 1.6 y 1.7 se muestran las maniobras de izaje y colocación de una tubería de concreto reforzado en la zanja, así como un patio de almacenamiento.



Figura 1. 6. Izaje y colocación de una tubería de concreto



Figura 1. 7. Patio de almacenamiento de tuberías de concreto

1.2.1.4 Tuberías de cloruro de Polivinilo (PVC)

Creada a partir de compuestos vírgenes rígidos de PVC, esta tubería ofrece entre sus ventajas: bajo peso (reduce costos de transportación, manejo e instalación), paredes suaves y sin costuras, altamente elásticos, durables y resistencia al

impacto. Son libres de toxicidad, no proporcionan olores, no presentan corrosión, inmunes al ataque galvánico y electrolítico, son autoextinguibles, con pérdidas mínimas por fricción, baja conductividad térmica, bajo costo y libre de mantenimiento (ver figuras 1.8 y 1.9).



Figura 1. 8. Tuberías de PVC con sistemas de espiga - campana



Figura 1. 9. Tendido de tubería de PVC

1.2.1.5 Tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD)

Fabricada con resina de polietileno de alta densidad, de alto peso molecular y con pared externa e interna lisas, esta tubería se une a través de termo-fusión y electro-fusión garantizando un sistema totalmente hermético. Tiene alta resistencia química, a la abrasión, a la intemperie y con bajo costo. Presenta las mismas características de la tubería de PVC (ver figuras 1.10 y 1.11).



Figura 1. 10. Tuberías de PEAD



Figura 1. 11. Unión por Termo-fusión en tuberías de PEAD

1.2.1.6 Tubería de poliéster reforzado con fibra de vidrio

Esta tubería tiene una larga vida útil, no necesita protección contra la corrosión, es muy ligera (pesa diez veces menos que el concreto) medidas hasta 12 m de longitud, su pared interna es muy lisa lo que deriva en pérdidas de fricción mínimas y evita las incrustaciones, de fácil instalación y múltiples tipos de conexión que se adaptan a las necesidades de la obra. Tiene una celeridad de onda menor a la de otros materiales y redunda en beneficios al momento de presentarse fenómenos transitorios (ver figuras 1.12 y 1.13).



Figura 1. 12. Fabricación de tuberías de PRFV



Figura 1. 13. Tendido de tuberías de PRFV

1.2.2 Juntas

Constituyen el elemento de unión tramo a tramo en las tuberías, es por tanto un elemento fundamental, de nada serviría una buena tubería, si no se dispone de una estanqueidad total en las uniones o empalmes.

Una junta debe ser resistente al envejecimiento, a esfuerzos y gozar de la máxima impermeabilidad. A continuación exponemos en orden las distintas juntas, según

el material constitutivo de las tuberías. Existen distintos tipos de juntas, y también para cada tipo de material de tubería.

1.2.2.1 Juntas para tuberías de fundición

1.2.2.1.1 Juntas de brida

Los terminales de las tuberías disponen de un disco anular provistos de agujeros destinados a recibir tornillos de acoplamiento que atraviesan los discos, lográndose la fijación por medio de tuercas. Entre los discos se coloca una junta plana de goma de 3 a 5 mm. Que presionada por la unión de ambos discos terminales de las tuberías a unir (figura 1.14), origina la estanqueidad.

Es una junta muy rígida, aspecto a tener en cuenta en posibles curvaturas dado la imposibilidad de adaptarse a ellas.

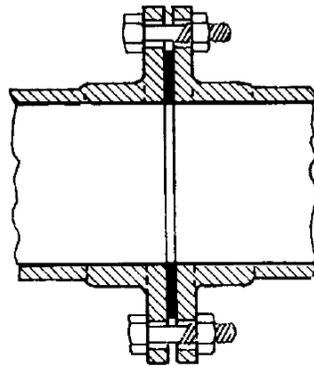


Figura 1. 14. Junta bridada

1.2.2.1.2 Junta de plomo

También se denomina por enchufe, porque cada tubo tiene un extremo terminado en copa y en el otro un resalte que actúa de tope. Se enchufan las dos piezas macho y hembra, se enrolla fuertemente sobre el macho una cuerda de cáñamo alquitranada, se la hunde hasta el final, rellenando todo el anular, se le ataca fuertemente con un estopeador y se reserva un espacio que irá relleno de plomo fundido. No se trata de una junta totalmente rígida y puede admitir pequeñas desviaciones (ver figura 1.15). Prácticamente ya no se utilizan por el tiempo empleado en realizarla.

Actualmente se emplean con mayor profusión las juntas automáticas y la de tipo Expres.

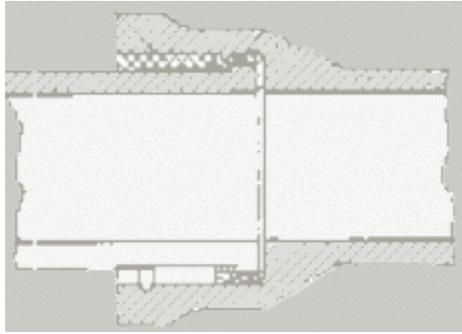


Figura 1. 15. Junta de plomo

1.2.2.1.3 Junta automática o Tyton

Es del tipo enchufe, en la copa va provista de un anillo de goma que va situado en la copa, tal como puede observarse en la figura 1.16, la colocación se realiza mediante presión en el tubo macho mediante un tráctel, originando entre macho y campana una gran estanqueidad.

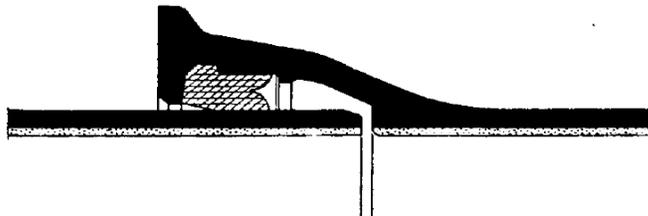


Figura 1. 16. Junta automática

1.2.2.1.4 Junta Expres

Tal como puede comprobarse en la figura 1.17, la campana del terminal de un tubo dispone de una oquedad donde va a alojarse un anillo de goma que va a ser presionada mediante una pieza suplementaria que se ancla en el propio terminal, consiguiéndose la estanqueidad por presión.

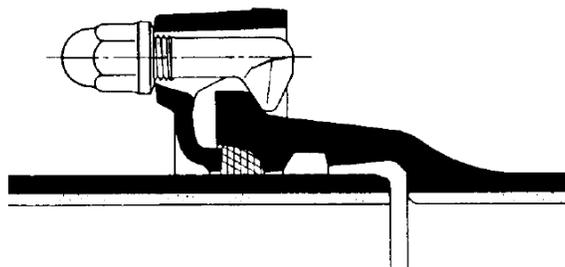


Figura 1. 17. Junta Expres

1.2.2.2 Juntas en tuberías de acero

La unión de los tubos de acero puede efectuarse por soldadura, mediante bridas tal como se ha expuesto en las tuberías de fundición, junta Gibault que se verán con detalle en las uniones de las tuberías de fibrocemento.

1.2.2.2.1 Junta por soldadura

La soldadura suele emplearse en tubos de más de 500 mm de diámetro. En la unión a tope, los extremos de los tubos, cuyas paredes se recortan en bisel, son colocados de manera que sus ejes coincidan y sus extremos queden a tope y se sueldan desde el exterior (figura 1.18).

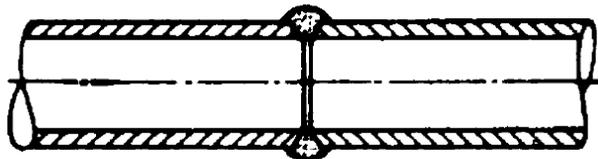


Figura 1. 18. Junta por soldadura en tuberías de acero

En la unión por enchufe, el macho debe ajustar muy bien a la parte abocardada, se suelda el exterior, según el diámetro interior el abocardamiento debe tener una longitud determinada. Se finaliza la unión con un recubrimiento exterior e interior de materia bituminosa (figura 1.19).

En grandes diámetros la soldadura debe ser sometida a un control de calidad mediante gammagrafía.

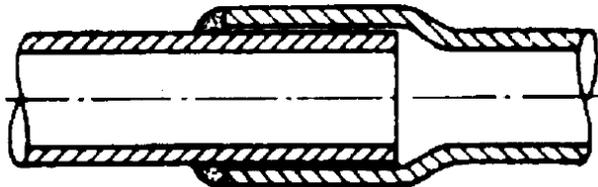


Figura 1. 19. Soldadura en enchufes

1.2.2.3 Juntas en tuberías de fibrocemento

1.2.2.3.1 Junta Gibault

Fue ampliamente utilizada, tanto en tuberías de fundición, como en las de fibrocemento y de PVC. Actualmente se emplea en diámetros pequeños hasta 250 mm. Se compone de: dos anillos de caucho, un manguito troncocónico de hierro fundido, dos bridas de hierro fundido, dos o tres tornillo, según el diámetro del tubo (figura 1.20).

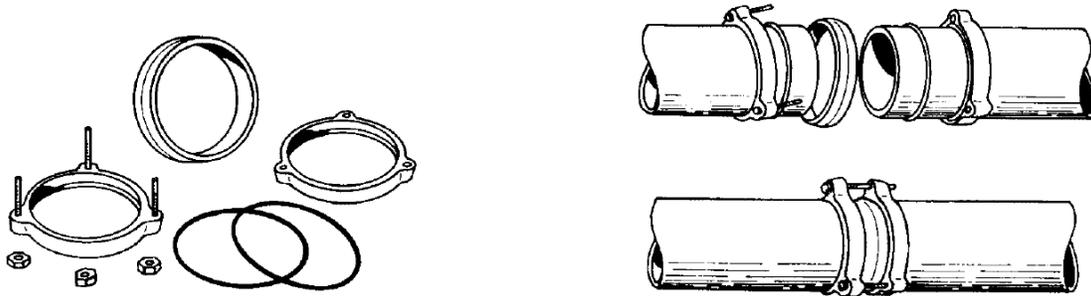


Figura 1. 20. Juntas Gibault

Sobre cada extremo de los tubos se coloca una brida y un anillo de caucho, en el centro se coloca el manguito de forma tal que al introducir y apretar los tornillos mediante tuercas se presionan los anillos de caucho, manguito y bridas, produciéndose la estanqueidad. El resultado puede verse en la figura 1.21.



Figura 1. 21. Junta de acero Gibault

El problema que presenta esta junta es la oxidación de los tornillos que terminan con el tiempo rompiéndose.

1.2.2.4 Juntas para tuberías de policloruro de vinilo (PVC)

1.2.2.4.1 Enchufado

Si uno de los terminales del tubo es de mayor sección que el resto del tubo, se denomina abocardado, en estos tubos la unión se realiza por enchufe, machihembrado, adosando en el macho y en la longitud de hembra pegamento rápido, quedan perfectamente unidos.

1.2.2.4.1.1 Enchufe automático

En el abocardamiento, existe un anillo de goma alojado en una muesca del enchufe, y cuya resistencia inicial hay que vencer, queda presionando el tubo que se enchufa haciéndolo estanco, como se puede ver en la figura 1.22.

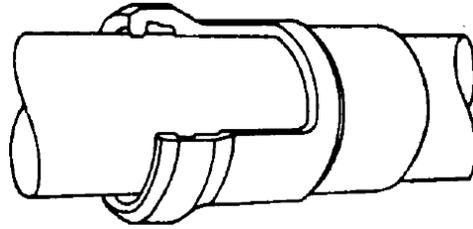


Figura 1. 22. Enchufe automático

1.2.2.4.2 Brida plástico

Con bridas de plástico unidas, separadas por junta de goma.



Figura 1. 23. Bridas de plástico para tuberías de PVC

1.2.2.5 Juntas para Tuberías de Poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV)

1.2.2.5.1 Unión con textil

En los extremos de los tubos a unir se aplica una capa de tejido y 2 capas de fieltro de fibra de vidrio con resina.

1.2.2.5.2 Unión abocardada

Por el extremo de uno de los tubos a unir, se aborda mediante calor, se introduce el macho untado en pegamento rápido, se emplea en diámetros pequeños.

1.2.2.5.3 Abrazadera

Una junta de caucho o del mismo material, se coloca por encima de los tubos a unir se aplica una abrazadera metálica que lleva tornillos tangenciales laterales para presionar cubriendo la junta, hasta conseguir la estanqueidad (ver figura 1.24).



Figura 1. 24. Junta flexible

1.2.3 Carretes

Los carretes son tubos de pequeña longitud provistos de bridas en los extremos para su unión. Se fabrican de hierro fundido con longitudes de 23, 50 y 75 cm (ver figura 1.25).



Figura 1. 25. Carrete de 25 cm de longitud

1.2.4 Extremidades

Son tubos de longitud corta que se colocan sobre alguna descarga por medio de una brida en uno de sus extremos. Se fabrican en longitudes de 40, 50, y 75 cm. Para PVC, las extremidades son usualmente de espiga o campana (figura 1.26).



Figura 1. 26. Extremidad de PVC

1.2.5 Tees

Las tees se utilizan para unir tres conductos en forma de tee, donde las tres uniones pueden ser del mismo diámetro, o dos de igual diámetro y uno menor. En el segundo caso se llama te reducción (figura 1.27).



Figura 1. 27. Transporte de tee's de PRFV

1.2.6 Cruces

Las cruces se utilizan para unir cuatro conductos en forma de cruz, donde las cuatro uniones pueden ser del mismo diámetro, o dos mayores de igual diámetro

y dos menores de igual diámetro. En el segundo caso se llama cruz reducción (ver figuras 1.28 y 1.29).



Figura 1. 28. Cruce de PVC



Figura 1. 29. Cruce de tubería de agua potable

1.2.7 Codos

Los codos tienen la función de unir dos conductos del mismo diámetro en un cambio de dirección ya sea horizontal o vertical. Los codos pueden tener deflexiones de 22.5, 45 y 90 grados. Ejemplo de un codo de 90° se muestra en la figura 1.30.



Figura 1. 30. Codo de 90° de tubería de PEAD

1.2.8 Reducciones

Las reducciones se emplean para unir dos tubos de diferente diámetro. En materiales de PVC, las reducciones pueden ser en forma de espiga o de campana (ver figura 1.31).



Figura 1. 31. Reducción de 6" a 4" en acero

1.2.9 Coples.

Los coples son pequeños tramos de tubo de PVC o de fibrocemento que se utilizan para unir las espigas de dos conductos del mismo diámetro. Los coples pueden ser también de reparación, los cuales se pueden deslizar libremente sobre el tubo para facilitar la unión de los dos tubos en el caso de una reparación (ver figura 1.32).



Figura 1. 32. Cople de PVC

1.2.10 Válvulas

1.2.10.1 Válvula eliminadora de aire (VEA)

La válvula eliminadora de aire cumple la función de expulsar el aire del tubo que continuamente se acumula en las partes altas sobre el trazo de la conducción, cuando ésta se encuentra en operación. Un esquema de una VEA se muestra en la figura 1.33.

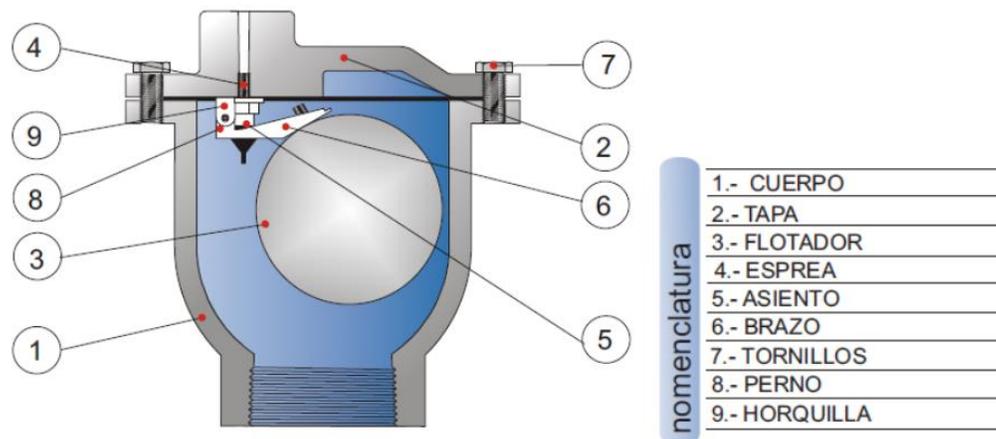


Figura 1. 33. Válvula eliminadora de aire

1.2.10.2 Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA)

La válvula de admisión y expulsión de aire se utiliza para expulsar el aire que contiene la tubería al momento de iniciar el llenado del conducto. Una vez que el agua ejerce presión sobre el flotador de la válvula, ésta se cierra y no se abre mientras exista presión en el conducto.

Otra función de esta válvula es permitir la entrada de aire dentro del tubo al momento de iniciar el vaciado de la tubería, y con ello evitar que se presenten presiones negativas. Un ejemplo de una VAEA se muestra en la figura 1.34.

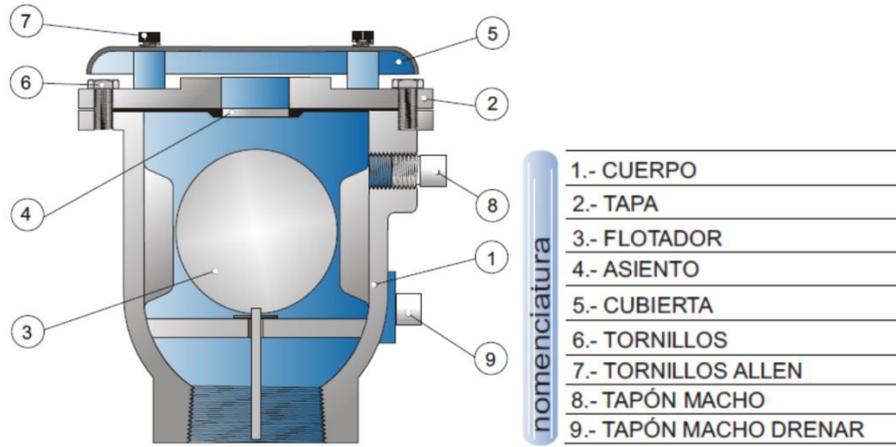


Figura 1. 34. Válvula de admisión y expulsión de aire

1.2.10.3 Válvula de no retorno o válvula check

La válvula de no retorno o check tiene la función de evitar la circulación del flujo en el sentido contrario al definido en el diseño (ver figuras 1.35 y 1.36).

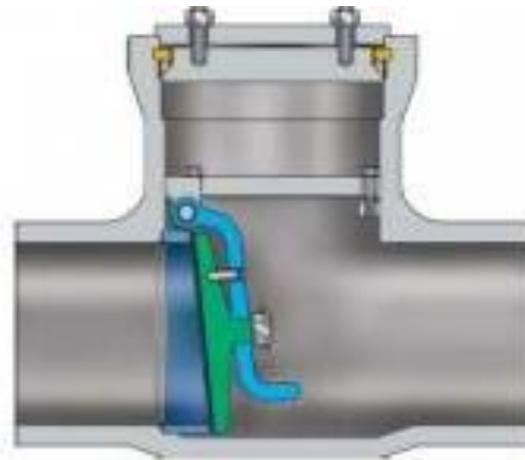


Figura 1. 35. Válvula de no retorno (Check)



Figura 1. 36. Válvula Check

1.2.10.4 Válvula de seccionamiento

La válvula de seccionamiento se utiliza para controlar el flujo dentro del tubo, ya sea para impedir el paso del agua o reducir el gasto a un valor requerido.

Las válvulas de seccionamiento pueden ser, por ejemplo, tipo compuerta, de mariposa, o de esfera. Estos tres tipos de válvulas se muestran en las figuras 1.37 a 1.39.



Figura 1. 37. Válvula tipo compuerta



Figura 1. 38. Válvula de mariposa



Figura 1. 39. Válvula tipo esfera

1.3 Medios para el control de transitorios

Un sistema hidráulico estará protegido cuando la línea de cargas máximas se ubique por debajo de la línea de resistencia de la tubería, al mismo tiempo que la envolvente de cargas mínimas se ubique por encima del perfil de la conducción. En otras palabras, las envolventes de cargas extremas (máximas y mínimas) deberán ubicarse entre el perfil de la conducción y la línea de resistencia de la tubería.

Cuando esto no suceda, será necesario dotar al sistema de uno o más dispositivos de control de los transitorios hidráulicos. Estos dispositivos pueden ser simples accesorios, como una válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA) o una válvula de alivio contra golpe de ariete, o bien estructuras complejas como un sistema de cámaras de aire, compuesta por tanques hidroneumáticos con un sistema de inyección de aire comprimido.

En ocasiones, bastará con un solo dispositivo para el control del transitorio hidráulico, sin embargo en algunos casos es necesario instalar dispositivos

adicionales o secundarios, principalmente en una línea de conducción de mucha longitud o que presentan topografías muy planas.

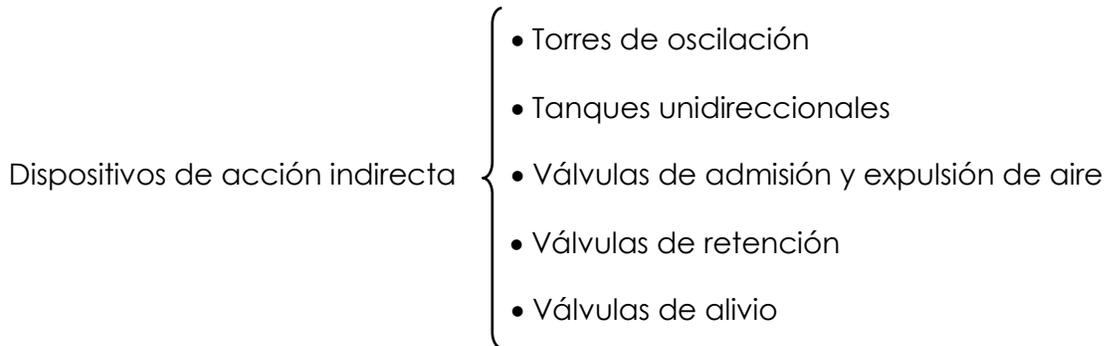
En un sistema de bombeo normalmente se diseñan e instalan dispositivos de control que actúan sobre la onda negativa que se produce luego del paro accidental de los equipos de bombeo. Estos dispositivos evitan que se presente una falla por depresión y tienen la ventaja de que, al actuar sobre la onda negativa e impedir que ésta se propague en forma parcial o total hacia el extremo final de la conducción, reducen también la magnitud de la onda positiva reflejada en este punto, lo que disminuye considerablemente el riesgo de una falla por sobrepresión. Los dispositivos comúnmente usados que actúan sobre la onda negativa son la torre de oscilación (TO), la cámara de aire (CA), el tanque unidireccional (TU) y la VAEA.

Es importante señalar que no hay un dispositivo de control aplicable a todos los casos; cada uno presenta ventajas y desventajas sobre los demás. La elección del dispositivo está fuertemente influida por la topografía del terreno a través del cual se va a tender la conducción, por lo que es necesario analizar cada sistema de bombeo y proponer los dispositivos de control para cada caso en particular.

El propósito principal de instalar los dispositivos de control de los transitorios hidráulicos es evitar el daño que pueden producir sobre las tuberías y bombas la caída de presión y el consecuente golpe de ariete, generado por alguna maniobra en el acueducto como el cierre de una válvula o el paro accidental de la planta de bombeo.

Los dispositivos de protección contra los efectos del transitorio hidráulico se pueden agrupar de la siguiente manera:

- Dispositivos de acción directa
- Volantes de inercia
 - Cámaras de aire
 - Válvulas de cierre programado



Para controlar los efectos del transitorio hidráulico se tienen dispositivos de acción directa y dispositivos de acción indirecta. Los primeros ejercen un efecto inmediato desde el instante en que inicia el transitorio, su objetivo es disminuir la rapidez con la que se reduce la velocidad de la columna líquida, lo que a la postre se manifestará en menores oscilaciones de presión y una menor exigencia en la resistencia de la tubería.

Los dispositivos de acción indirecta trabajan cuando la presión aumenta demasiado o disminuye peligrosamente. En los casos en que no se puede alargar el transitorio existe la posibilidad de minimizar sus consecuencias.

A continuación se presenta una descripción general del funcionamiento de los dispositivos de control de transitorios más comunes.

1.3.1 Válvula aliviadora de presión

La válvula aliviadora de presión se coloca en la tubería para disminuir las sobrepresiones causadas por un fenómeno transitorio.

Es un dispositivo provisto de un resorte calibrado para abrir una compuerta cuando la presión sobrepasa un valor determinado.

Se recomienda colocar este tipo de elemento, en conducciones con diámetros pequeños; sin embargo, no debe olvidarse que las presiones negativas tendrán que resolverse con algún otro dispositivo (ver figura 1.40).



Figura 1. 40. Válvula aliviadora de presión

1.3.2 Válvula anticipadora de golpe de ariete

La válvula anticipadora del golpe de ariete protege al equipo de bombeo de la onda de sobrepresión causada por el paro de la bomba o falla de la energía.

Esta válvula opera con la presión de la línea de conducción, y el nombre de anticipadora se debe a que entra en funcionamiento antes de la llegada de la onda de sobrepresión (ver figura 1.41).



Figura 1. 41. Válvula anticipadora de golpe de ariete

Este tipo de válvula realiza la apertura de la válvula cuando baja la presión hasta un valor preestablecido y evacúa a la atmósfera el exceso de presión que provoca la onda de sobrepresión.

1.3.3 Torre de oscilación

La torre de oscilación es un depósito a menudo de forma circular en contacto con la atmósfera por la parte superior, cuyo diámetro por lo general es relativamente grande con relación al diámetro de la conducción.

Cumple la función de aliviar las sobrepresiones y depresiones causadas por un fenómeno transitorio.

Para evitar los derrames de agua cuando la conducción se encuentra funcionando, la elevación de la corona de la torre de oscilación debe ser mayor al nivel del agua del punto de descarga, y para evitar los derrames cuando el gasto de la conducción es igual a cero, el nivel de la corona debe ser mayor a los niveles del agua de cualquier depósito conectado a la conducción.

La torre de oscilación es de las estructuras más confiables para el control de los transitorios, sin riesgos de funcionamiento al no contener dispositivos de control mecánico. Un esquema de una torre de oscilación se muestra en la figura 1.42 y una fotografía en la figura 1.43.

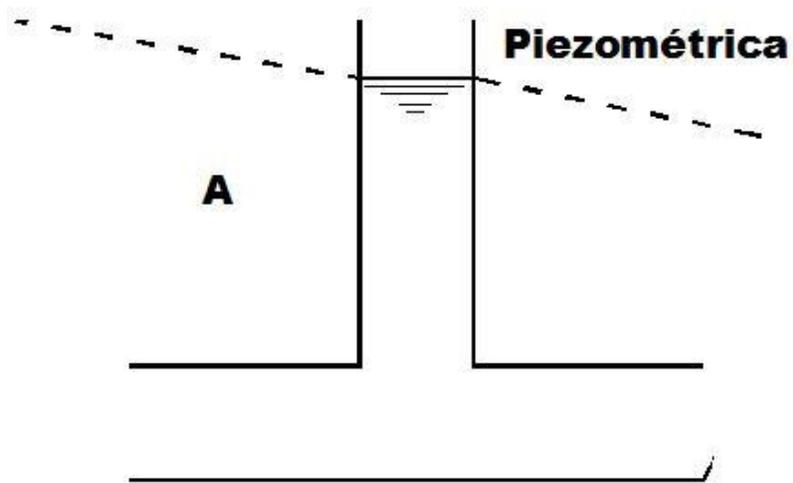


Figura 1. 42. Esquema de la Torre de oscilación



Figura 1. 43. Torre de oscilación, Acueducto Río Colorado – Tijuana

1.3.4 Tanque unidireccional

El tanque unidireccional es un depósito que se coloca generalmente a una elevación superior a la del terreno natural y este por lo general se encuentra en contacto con la atmósfera por la parte superior.

La elevación de la corona es menor a la carga piezométrica del punto de conexión del tanque con la conducción.

La función de un tanque unidireccional es aliviar fundamentalmente las depresiones causadas por un fenómeno transitorio, provocado por un paro repentino de la bomba.

Se recomienda colocar un tanque unidireccional cuando las cargas piezométricas en flujo establecido de los posibles lugares de colocación del dispositivo de control, son muy grandes y resulta inadecuado colocar una torre de oscilación demasiado alta.

Para evitar el vaciado del tanque cuando el gasto de la conducción es igual a cero, la elevación de la corona debe ser menor al nivel mínimo del agua en los depósitos conectados a la conducción.

Debe contener un conducto de vaciado y otro de llenado. En el de vaciado se instala una válvula de no retorno para permitir el flujo únicamente del tanque

hacia la conducción. En el conducto de llenado debe existir una válvula para cortar automáticamente el flujo cuando se alcance el nivel máximo del agua.

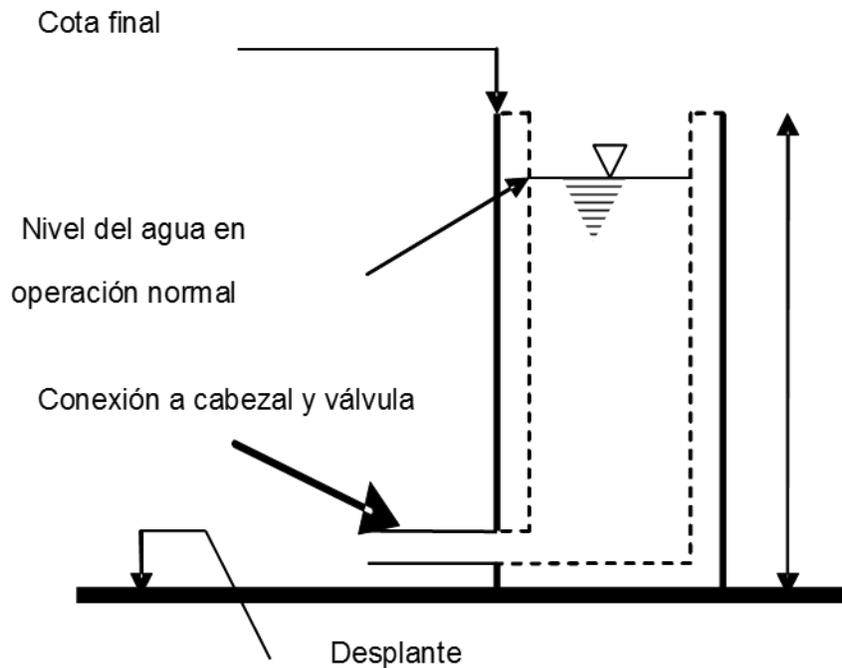


Figura 1. 44. Esquema del Tanque unidireccional

1.3.5 Cámara de aire

La cámara de aire es un depósito por lo general metálico cerrado en cuyo interior una parte contiene un volumen de agua y el resto un volumen de aire con el cual se proporciona la presión de una forma adecuada a la conducción. Se colocan normalmente al nivel del terreno natural.

La función de una cámara de aire es aliviar las sobrepresiones y depresiones causadas por un fenómeno transitorio.

Se recomiendan colocar cuando, para flujo establecido, son muy grandes las cargas piezométricas de los posibles lugares de colocación del dispositivo de control, evitando así la colocación de una torre de oscilación demasiado alta o un tanque unidireccional muy elevado.

Una cámara de aire contiene normalmente dos conductos, uno de vaciado y otro de llenado, el primero contiene una válvula de no retorno para permitir la circulación del flujo únicamente del tanque hacia la conducción. El segundo conducto contiene un dispositivo disipador de energía el cual puede ser, por ejemplo, un orificio, cuya función es evitar un incremento de presión cuando la cámara se está llenando. En la figura 1.45 se muestra un esquema de una cámara de aire.

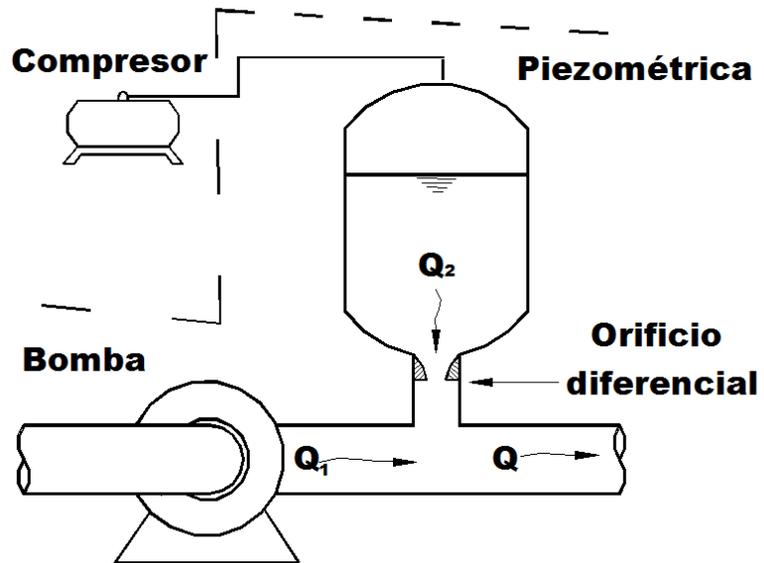


Figura 1. 45. Esquema general y ubicación de una Cámara de aire

Capítulo 2 Problemas del aire atrapado en conductos cerrados

2.1 Problemas principales

La presencia de aire atrapado en conductos cerrados puede reducir de forma importante el transporte de agua en las líneas. En sistemas a gravedad, bolsas de aire estacionarias pueden reducir la sección transversal del paso del agua. En acueductos a bombeo la presencia de aire se puede reflejar en un incremento en el consumo de energía eléctrica y la reducción del gasto. Estos problemas siguen ocurriendo en la actualidad en acueductos construidos recientemente, debido a la falta de criterios de diseño que hagan que los sistemas a gravedad y a bombeo funcionen más eficientemente.

Frecuentemente, los proyectistas que trabajan en el diseño de acueductos no toman en cuenta o no conocen las causas que generan la entrada de aire a este tipo de sistemas, además de los efectos potenciales que puede producir el aire atrapado.

La mayoría de las veces, los acueductos contienen aire atrapado en bolsas que generalmente se acumulan en los puntos altos de los acueductos. Este fenómeno ocurre debido a que el aire tiene una densidad mucho menor que el agua y por lo tanto va a migrar hacia las cimas del sistema.

Si bien el aire atrapado puede ser benéfico para prevenir la cavitación o para reducir los efectos perjudiciales causados por transitorios hidráulicos, en cantidades no controladas también puede ser perjudicial. Por ejemplo, existen rangos de volúmenes de aire, los cuales pueden producir un incremento indeseable de las presiones durante el arranque o el paro de las bombas en un acueducto a bombeo. El efecto del aire en ambas situaciones dependerá de las causas que genera el transitorio, de la cantidad de aire acumulada, de su localización, así como de la configuración del acueducto.

2.2 Causas por las que se introduce el aire a las tuberías

El aire atrapado en los conductos cerrados no puede ser siempre expulsado por completo, pero al entender las formas mediante las cuales se puede introducir, ayuda a reducir la cantidad que entra. Entre las posibles causas de la entrada de aire a los acueductos, se encuentran las siguientes:

- a) Antes de la puesta en marcha del sistema la línea se encuentra llena de aire, para llenar por completo el acueducto con agua es necesario eliminar todo el aire. Al tiempo que se inicia el llenado de la línea, la mayor parte del aire es arrastrado hacia aguas abajo para ser expulsado por las válvulas y demás mecanismos colocados para este fin. Sin embargo, una

parte del aire puede quedar atrapado en los puntos altos de los acueductos.

- b) El agua contiene aproximadamente un 2% de aire disuelto, éste puede ser expulsado cuando la presión se reduce o la temperatura aumenta, formando burbujas y/o bolsas de aire.
- c) El equipo mecánico puede introducir aire a los acueductos. Por ejemplo las bombas pueden succionar entre un 5% y 10% de aire, debido a la acción de los vórtices en su succión. Asimismo, cuando la presión de vacío se presenta en un acueducto, el aire puede introducirse a través de juntas defectuosas o mediante válvulas de admisión de aire.

2.3 Consecuencias debido al aire atrapado en conductos a presión

El aire atrapado en acueductos puede conllevar una gran variedad de problemas. Por ejemplo, el aire acumulado en los puntos altos de las conducciones puede reducir la sección efectiva del paso del agua, dando como resultado un incremento de la pérdida de carga. Asimismo, el aire puede acelerar el proceso de corrosión en las tuberías de fierro al aumentar la cantidad de oxígeno disponible. Por otra parte, el aire atrapado puede producir lecturas incorrectas en dispositivos de medición. La transición de tubo parcialmente lleno a tubo lleno causado por la presencia de una bolsa de aire, puede generar vibraciones en la tubería. Bolsas de aire de gran tamaño pueden regresar a contraflujo debido a su fuerza de flotación y dañar de forma importante algunas estructuras, tales como sifones o cajas rompedoras de presión.

2.3.1 Incremento de la pérdida de carga hidráulica por aire atrapado

El aire que se introduce a los acueductos es arrastrado por el flujo de agua y puede acumularse en puntos altos, formando bolsas de aire que pueden incrementar su tamaño si más bolsas o burbujas se unen a éstas. Cuando una bolsa de aire se encuentra en un tramo de tubería con pendiente descendente y si es lo suficientemente grande, posiblemente la fuerza de flotación de la bolsa iguale la fuerza de arrastre del agua, entonces la bolsa de aire puede permanecer estacionaria en la tubería, de esta manera la fuerza de fricción tiende a cero. Las fuerzas actuantes en una bolsa de aire se muestran en la figura 2.1.

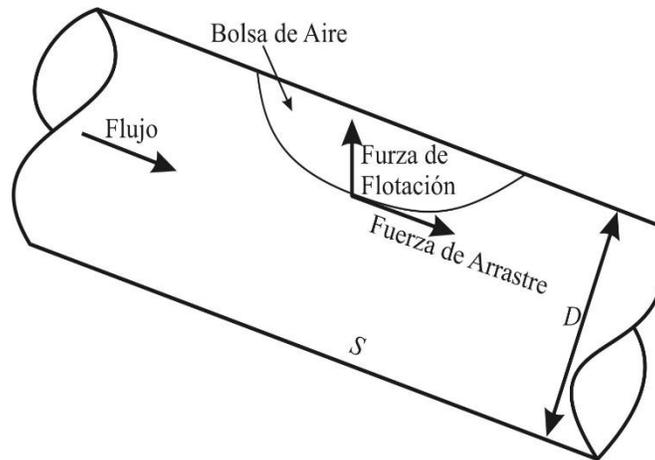


Figura 2. 1. Fuerzas que actúan en una bolsa de aire estacionaria en un tramo de tubería descendente con flujo de agua a tubo lleno

El aire atrapado reduce la sección transversal del conducto, por lo que se presenta un flujo como canal debajo de la bolsa de aire, lo cual provoca que la línea piezométrica sea paralela a la pendiente de la tubería, como puede verse en la figura 2.2.

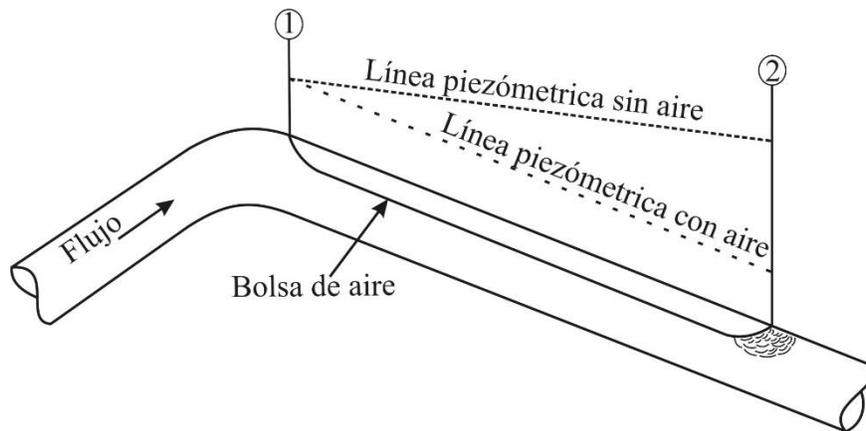


Figura 2. 2. Bolsa de aire en una pendiente descendente (Edmunds, 1979)

El aire atrapado produce una pérdida de carga que reduce la capacidad del sistema. Aplicando la ecuación de la energía entre los extremos de una bolsa de aire, se puede comprobar que la pérdida de carga es casi igual a la longitud de la componente vertical de la bolsa (Edmunds 1979, Corcos 2003 y 2005). Tal como se muestra en las figuras 2.3 y 2.4.

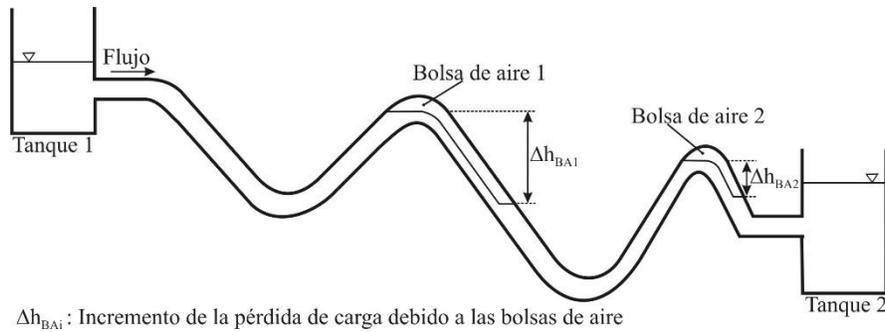


Figura 2. 3. Bolsas de aire en acueductos a gravedad

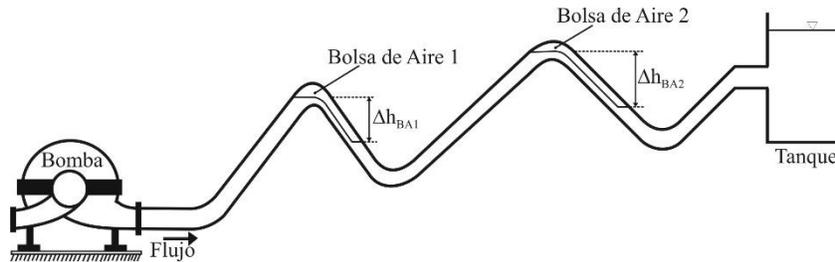


Figura 2. 4. Bolsas de aire en un acueducto a bombeo

Los acueductos con pendientes descendentes en la dirección del flujo pueden acumular aire. En acueductos a bombeo el aire atrapado resulta en un incremento del consumo de energía eléctrica, y en una reducción del gasto si las bolsas de aire localizadas en los puntos altos del acueducto no pueden ser removidas hacia aguas abajo. Puede ocurrir que el flujo a través de la línea se detenga por completo, debido a la pérdida de carga acumulada producida por varias bolsas de aire atrapadas. Esta pérdida puede ser mayor que la carga de la bomba.

En acueductos a gravedad la reducción de la capacidad de conducción debido al aire atrapado, puede provocar derrames a través de venteos, tanques, cajas rompedoras de presión y torres de oscilación (Pozos et al. 2012). Esto se debe a que la carga estática disponible no es suficiente para remover las bolsas de aire.

Los problemas causados por la reducción de la sección trasversal del paso del agua en la tubería debido al aire atrapado, puede que ocurran con mayor frecuencia que lo que muestran los registros. Si las pérdidas de carga fuesen un poco menores, los derrames no ocurrirían y el flujo no se detendría por completo, haciendo que estos problemas pasaran desapercibidos (Richards, 1962).

Mientras las bolsas de aire se acumulen en los puntos altos de los acueductos, mayor será la pérdida de carga. Por lo tanto, la pérdida de carga total debe evaluarse como la suma de pérdidas producidas por cada bolsa de aire.

2.3.2 Retorno de bolsas de aire de gran tamaño debido a la fuerza de flotación (blowback)

El aire que se acumula en los puntos altos de los acueductos puede formar grandes bolsas de aire, la longitud de las bolsas puede ser de varias veces el diámetro de la tubería. Si en algún tramo del acueducto existe un tubo con una pendiente descendente pronunciada, puede suceder que la bolsa de aire se estabilice alrededor de ésta y al mismo tiempo se presente un salto hidráulico en el extremo aguas debajo de la bolsa (Figura 2.5). La acción turbulenta del salto hidráulico causa que el aire entre y se mezcle con el agua que fluye en la tubería. Aguas abajo del salto hidráulico, el aire introducido puede formar burbujas de mayor tamaño y/o bolsas de aire y, si éstas son lo suficiente grandes, la fuerza de arrastre del agua no podrá superar la fuerza de flotación. Entonces, las burbujas y/o bolsas permanecerán estacionarias en la tubería, incrementando su tamaño, al tiempo que más burbujas de aire llegan a unírseles. Las bolsas de aire incrementarán su tamaño al mismo tiempo que se reducirá su velocidad como resultado del aumento de la fuerza de flotación. Las bolsas de aire pueden regresar con una enorme fuerza a través del salto hidráulico (fenómeno conocido como blowbak). Esta fuerza puede ser capaz de destruir parcial o completamente la base de estructuras hidráulicas, como tanques y cajas rompedoras de presión.

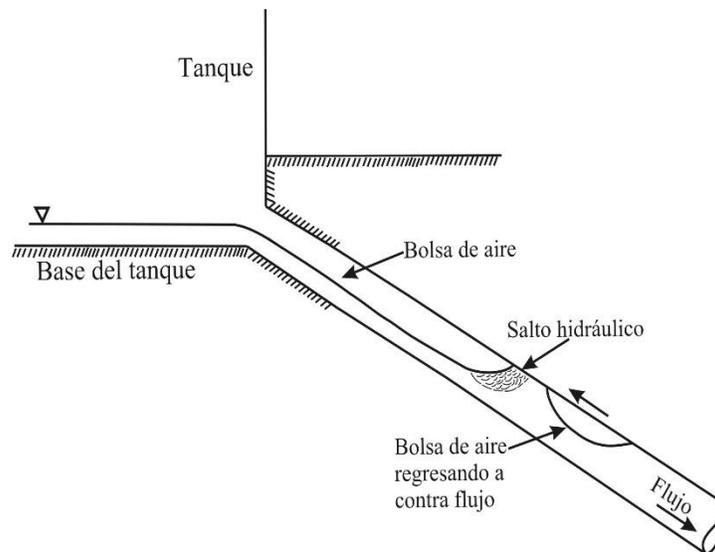


Figura 2. 5. Retorno de bolsas de aire a contraflujo

2.3.3 Golpe de ariete provocado por la evacuación de aire

El incremento de velocidad debajo de la bolsa de aire puede provocar el desprendimiento de una porción de la bolsa o bien su completa remoción (Figura 2.6). El cambio abrupto de la velocidad del fluido, cuando la bolsa es removida y se instala en otro punto alto puede generar un golpe de ariete, el cual puede

causar un daño considerable a accesorios, uniones e incluso puede provocar la ruptura de la tubería.

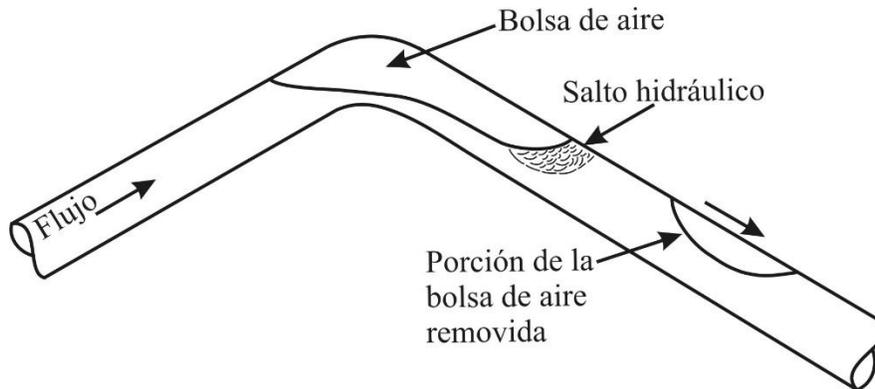


Figura 2. 6. Golpe de ariete causado por remoción de una bolsa de aire

2.3.4 Reducción de la eficiencia en sistemas de bombeo debido a aire atrapado

Thomas (2003) presenta una útil comparación entre la eficiencia de algunos acueductos a bombeo y el costo por remover el aire atrapado de la línea. Se estima que el 75% del costo de operación de un acueducto es el costo por bombeo. La revisión de una variedad de acueductos para la distribución de agua potable, realizada alrededor del mundo revela que el aire atrapado puede reducir la eficiencia de estos sistemas hasta en un 30%. La mayoría de los acueductos operan con aire atrapado, lo cual genera una disminución de entre el 15% al 20% del gasto proporcionado por el sistema. Las bolsas de aire comprimido presentan un enorme obstáculo para cualquier intento de bombear agua. El aire atrapado incrementa en un 20% la carga de presión, lo que provoca que las bombas trabajen más forzadas y, por tanto, demanden mayor consumo de energía eléctrica.

2.4 Medios para la remoción de aire

Las causas por las cuales el aire entra en los acueductos ya fueron descritas, así como la variedad de problemas que pueden ocurrir por tener aire atrapado en ellos. Ahora se presentarán los dos medios para expulsar el aire de las tuberías. El primer medio es hidráulico, es decir, usa la inercia de agua para remover el aire de la línea. El segundo medio utiliza dispositivos mecánicos, tales como válvulas expulsoras de aire, venteos y bombas de vacío.

2.4.1 Medios hidráulicos

En la actualidad no existe un método universalmente aceptado para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire en acueductos. Por tanto, el diseño de estos sistemas se realiza usando fórmulas semi-empíricas. La desventaja es que las recomendaciones de los autores varían ampliamente y quizá no sean adecuadas

para el diseño de algunos acueductos. Las posibles causas de esta discrepancia son que las condiciones adoptadas por diferentes investigadores no son generales; además muchas de sus mediciones han sido realizadas en dispositivos experimentales con diámetros pequeños (50 mm) en comparación con los prototipos.

Hay gran variedad en los valores de velocidad de remoción obtenidos por varios autores. La velocidad de remoción se define como la velocidad mínima del agua necesaria para remover burbujas o bolsas de aire de un acueducto. Si alguno de estos valores es utilizado para diseñar un determinado acueducto, la velocidad del agua podría no remover el aire del prototipo, lo cual generaría alguno de los problemas descritos anteriormente.

Wisner et al. (1975) describieron los siguientes términos que se presentan a continuación:

- 1) **Velocidad de barrido.** Denota la velocidad mínima del agua V_b , para transportar una bolsa y/o burbuja de aire en un acueducto.
- 2) **Generación de burbujas.** Es la acción turbulenta del salto hidráulico que se presenta en el extremo aguas abajo de una bolsa de aire, la cual genera las burbujas de aire.
- 3) **Arrastre.** Término usado para describir el movimiento en dirección del flujo de las burbujas de aire introducidas por el salto hidráulico.
- 4) **Velocidad de remoción.** Es la velocidad mínima del agua, v_r , para remover las burbujas o bolsas de aire fuera de la línea de conducción. Para ciertos acueductos la v_r va a ser igual que v_b , pero para otras configuraciones de líneas de conducción v_r tendrá que ser mayor que v_b .

Los investigadores relacionados con el tema han adoptado diferentes consideraciones para obtener el valor de la velocidad de remoción. Algunos utilizan como criterio bolsas de aire estacionarias en tuberías con flujo de agua a tubo lleno; otros autores usan la velocidad de ascensión de las bolsas de aire en tubos con agua estacionaria. Las aportaciones de los principales investigadores se resumen a continuación:

Veronese (1937) y Lara (1955) encontraron una velocidad mínima para mantener estacionaria una burbuja de aire. Observaron que hay velocidades mayores a la mínima, las cuales reducen el tamaño de las burbujas de aire por medio de generación y arrastre, hasta llegar a un tamaño estable conocido como burbuja límite. Cualquier incremento en la velocidad del agua no reduce más el tamaño de la burbuja límite sino que la remueve de la conducción. La velocidad para mantener la burbuja límite es llamada velocidad límite, cuyo valor, según Veronese y Lara, es de 0.59 m/s. Los autores sugieren que esta velocidad es

suficiente para remover las burbujas de aire de cualquier conducción con un diámetro mayor de 100 mm.

Kalinske y Robertson (1943) para estudiar la cantidad de aire que introduce o drena un salto hidráulico debido a los vórtices que se generan en el mismo, llevaron a cabo experimentos en un dispositivo con tubos de acrílico de 152.4 mm de diámetro y con casi 11 metros de longitud. En el dispositivo se midieron los gastos de aire Q_{aire} y agua Q_{agua} , tirantes, así como las presiones antes y después del salto hidráulico. Estas mediciones fueron hechas para diversas pendientes (de 0° a 16.7°). Aguas arriba del salto el flujo se mantuvo a presión atmosférica. Posteriormente se realizaron en la conducción más ensayos con presiones mayores que la atmosférica, las cuales demostraron que esto no causa efecto alguno en los resultados obtenidos.

Durante los experimentos se advirtió que el aire al ser drenado por el salto hidráulico tiende a formar una gran bolsa de aire que puede extenderse hasta el extremo aguas abajo de la tubería, permanecer estable o remontar al flujo a través del salto. También puede verse que para gastos pequeños y pendientes suaves, no se forma una bolsa de aire de tamaño importante, sino una serie de bolsas relativamente largas, las cuales avanzan hacia aguas abajo.

Estos análisis indicaron que para condiciones geométricas similares, el gasto de aire drenado por un salto hidráulico Q_{aire} en un tubo circular depende del gasto de agua Q_{agua} y de la intensidad de la turbulencia del salto, la cual depende a su vez del número de Froude, F_1 , al inicio del salto hidráulico. La pendiente S de la tubería es otro de los parámetros que influye, aunque en menor grado. La relación adimensional entre los parámetros antes mencionados se puede escribir como:

$$\frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} = f\left(F_1, \frac{y_1}{D}, S\right) \text{ --- (2.1)}$$

No obstante, resultados posteriores revelaron que el cociente Q_{aire}/Q_{agua} no varía con respecto a y_1/D o S , en cambio de manera importante con respecto a F_1 .

Haciendo un análisis de regresión lineal con la información obtenida en laboratorio, Kalinske y Robertson obtuvieron la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \text{ --- (2.2)}$$

Kalinske y Bliss (1943) presentan datos experimentales, que indican el gasto de agua necesario para mantener la remoción o el barrido de aire de cualquier tubería con cualquier pendiente. La investigación experimental se realizó en

tuberías de acrílico con diámetros de 201 mm y 152 mm. La pendiente de la tubería del dispositivo experimental fue variada de 0° a 17.5°.

Para todas las pendientes de tubería, excepto las descendentes suaves, las bolsas de aire terminaban en un salto hidráulico que sellaba el conducto. En algunos casos, cuando los gastos eran pequeños y las pendientes suaves el salto no llega hasta el techo del tubo, en tal caso el tirante aguas abajo del salto hidráulico se incrementaba gradualmente hasta llenar la tubería. Bajo estas condiciones el fenómeno de la remoción de aire es considerablemente diferente, comparado con el caso en el cual el salto hidráulico sella el tubo.

La velocidad a la cual el salto hidráulico introduce aire al tubo que fluye lleno de agua, no corresponde necesariamente a la velocidad a la cual el aire es removido de la bolsa de aire. Aguas abajo del salto el tubo fluye totalmente lleno de agua, excepto por las burbujas de aire, la velocidad a la cual el aire es removido de la conducción depende de la habilidad del flujo de agua. Para gastos de agua grandes, el salto hidráulico genera e introduce aire a velocidades mayores a las que el flujo aguas abajo del salto puede evacuar. El exceso de aire regresaba periódicamente a través del salto hasta la bolsa. Kalinske y Bliss encontraron que para cualquier diámetro de tubería y cualquier pendiente hay un determinado gasto que es capaz de evacuar de la conducción todo el aire que introduce el salto hidráulico. Para un gasto pequeño, la remoción de aire dependerá de la velocidad del flujo aguas abajo del salto, y para un gasto grande la velocidad del agua aguas abajo del salto será suficiente para remover todo el aire introducido por el salto.

Kalinske y Bliss, encontraron que para pendientes suaves las bolsas de aire serán rápidamente removidas por completo de la tubería. Sin embargo, alguna protuberancia cerca de las cimas del acueducto puede provocar que la parte final de la bolsa quede fija a ésta. Los autores consideran que en prototipo pueden existir varias protuberancias, particularmente en las juntas de la tubería.

El análisis hecho por los autores indica que la relación del gasto de aire removido y el gasto de agua Q_{aire}/Q_{agua} está en función de la pendiente de la tubería S , y con el término denominado gasto adimensional, definido como Q_{agua}^2 / gD^5 , donde g es la aceleración de la gravedad y D el diámetro de la tubería. La tendencia de los datos experimentales puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$Q_{agua}^2 / gD^5 = 0.707S \text{ --- (2.3)}$$

La ecuación anterior también puede presentarse en términos de la velocidad del agua v , como:

$$v^2/gD = 1.146S \text{ --- (2.4)}$$

La peculiar desviación de los datos obtenidos para pendientes suaves es totalmente diferente a lo esperado. Se encontró que para pendientes menores al 2.5% los datos experimentales se desvían de la línea recta que representa la ecuación (2.3). Esto ocurre cuando el salto hidráulico no sella el conducto. Así el proceso de entrada de aire es totalmente diferente, que cuando el tirante aguas abajo del salto es mayor que el diámetro del tubo. Es aparente que para pendientes menores a 2.5% gastos de agua mayores son requeridos para iniciar la remoción de aire.

Kent (1952) encontró que la velocidad de remoción del aire mediante un salto hidráulico al final de una bolsa de aire está relacionada con la fuerza de arrastre del agua que actúa sobre la bolsa. Según el autor una velocidad de remoción efectiva existe cuando la velocidad media del agua es igual o mayor que la velocidad mínima v_{min} . Kent desarrolló una relación semiempírica para obtener el valor de v_{min} , la cual es función de la pendiente de la tubería, S , y de su diámetro, D .

$$v_{min} = C_0^{1/2} \sqrt{gDS} \text{ --- (2.5)}$$

$C_0^{1/2}$ es una función de la forma de la bolsa de aire, y de datos experimentales se encontró que su valor se vuelve constante, cuando la longitud de la bolsa es mayor que $1.5D$. En la práctica ingenieril la fórmula de Kent es usada comúnmente debido a su simplicidad.

Falvey (1980) elaboró una gráfica que muestra los límites de movimiento de burbujas y bolsa de aire en conductos cerrados, basado en datos presentados por Kalinske y Bliss (1943); Runge y Wallis (1965); Colgate (1966) y Martin (1976). El autor comenta que la dirección de movimiento de las burbujas y bolsas de aire puede ser analizada tomando en cuenta las magnitudes de las fuerzas de arrastre y flotación actuando sobre una burbuja estacionaria en el flujo. Por ejemplo, las burbujas de aire se mueven perpendicularmente al eje del tubo, cuando la componente vectorial de la fuerza de flotación en la dirección aguas arriba es igual a la componente vectorial de la fuerza de arrastre. Asimismo, Falvey incluye en su gráfica los resultados obtenidos por Sailer (1955) en prototipos, en los cuales se presentan problemas con grandes bolsas de aire que se movieron en contra flujo, destruyendo por completo las bases de concreto reforzado de algunos tanques del acueducto San Diego. En la figura 2.7 se muestra la gráfica propuesta por Falvey.

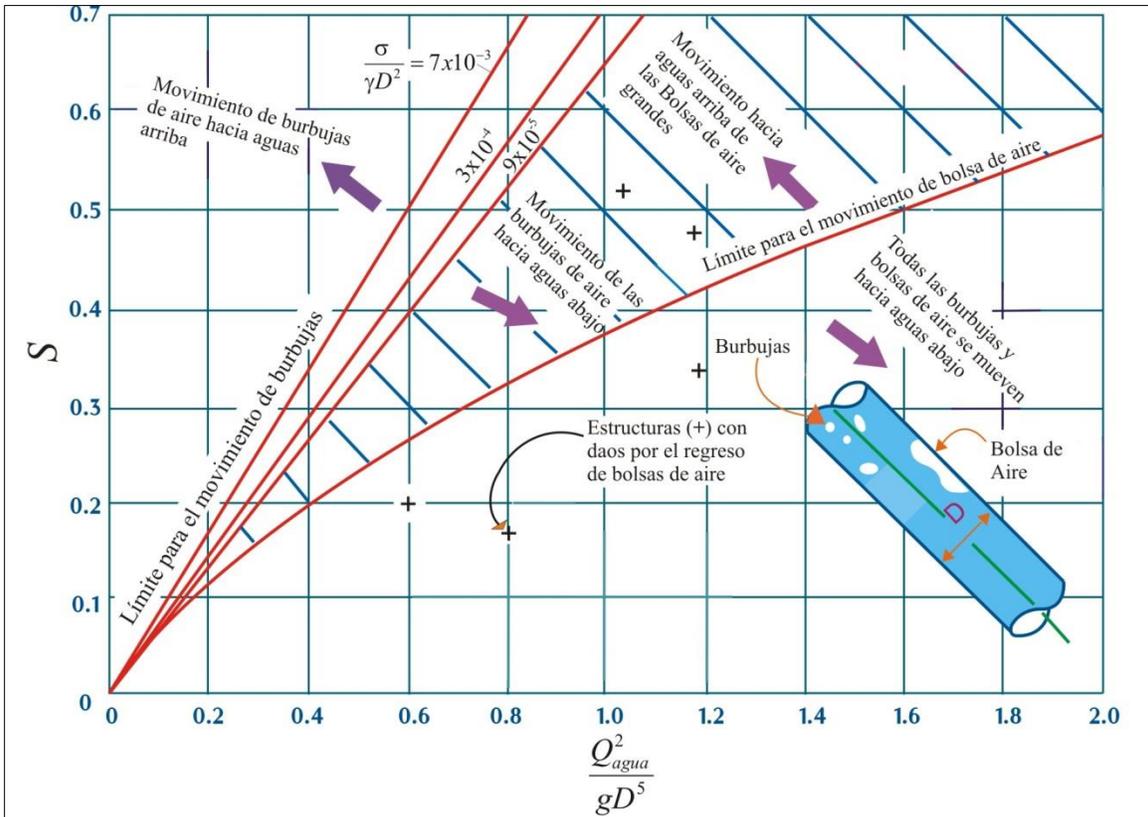


Figura 2. 7. Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos (Falvey, 1980)

González y Pozos (2000) propusieron una ecuación para estudiar el comportamiento de burbujas y bolsas de aire aguas abajo de un salto hidráulico localizado al final de una gran bolsa de aire. Una investigación teórica y experimental se realizó para validar el uso de dicha ecuación. La relación propuesta se desarrolló con base en la investigación llevada a cabo por Kalinske y Bliss (1943), así como en investigaciones posteriores. La ecuación propuesta es:

$$\frac{Q_{agua}^2}{gD^5} = S \quad \text{--- (2.6)}$$

El término del lado izquierdo de la ecuación es el parámetro de gasto adimensional.

Para analizar el comportamiento de las burbujas y bolsas de aire, el $\frac{Q_{agua}^2}{gD^5}$ se debe comparar con todas las pendientes descendentes del perfil del acueducto. Cuando $\frac{Q_{agua}^2}{gD^5}$ es mayor que la pendiente de la tubería, las burbujas y bolsas de aire van a ser removidas de las pendientes descendentes. Por otra parte, si el parámetro de gasto adimensional es menor a la pendiente descendente, las burbujas y bolsas de aire se moverán hacia aguas arriba. Mediciones y observaciones hechas en un dispositivo experimental permitieron

corroborar que el aire se comporta tal y como predice la ecuación 2.6. La investigación experimental fue realizada en un dispositivo experimental con tubos de acrílico de 76.2 mm de diámetro interior.

Escarameia et al. (2005) describen estudios experimentales y numéricos, llevados a cabo para desarrollar una guía de diseño para minimizar los efectos negativos de la presencia de bolsas de aire en tuberías, particularmente para pendientes suaves.

La investigación experimental fue desarrollada en un dispositivo compuesto por tubos de 150 mm de diámetro interno, las pendientes podían ser variadas en un rango de 0° a 22.5°. Basados en sus resultados, los autores proponen una ecuación para analizar el comportamiento del aire en acueductos. Escarameia et al. (2005) consideran que la ecuación 2.7 es válida para tuberías con una inclinación máxima de 40° y puede ser utilizada en tubos con diámetros menores a 1.0 metro.

$$v/(gd)^{0.5} = SF[0.56(\text{sen}S)^{(0.5)} + a] \text{ --- (2.7)}$$

Donde a tiene los siguientes valores:

$a = 0.45$ para $BS < 0.06$

$a = 0.50$ para $0.06 \leq BS < 0.12$

$a = 0.57$ para $0.12 \leq BS < 0.30$

$a = 0.61$ para $0.30 \leq BS < 2$

En la ecuación (2.7) v es la velocidad mínima del flujo requerida para mover una bolsa de aire definida por el parámetro $BS = 4V/\pi D^3$ en un tubo con pendiente descendente S y diámetro D . V es el volumen de la bolsa de aire y SF es un factor de seguridad igual a 1.1.

2.4.2 Medios mecánicos

A inicios del siglo XX, no se entendía bien el comportamiento del aire atrapado dentro de conductos a presión. Muchos proponían la colocación de venteos, compuestos de una válvula de control manual y un tubo, creyendo que el aire podía ser evacuado a través de éstos. Sin embargo, el uso de venteos para expulsar aire atrapado sólo se puede considerar cuando la línea piezométrica es cercana al nivel del terreno, entre 6 y 10 metros, según Falvey (1980). La válvula de control manual localizada sobre el perfil del acueducto es usada para colocar un tubo de forma vertical, de tal manera que el aire pueda ser descargado a la atmósfera, tal como se muestra en la figura 2.8.

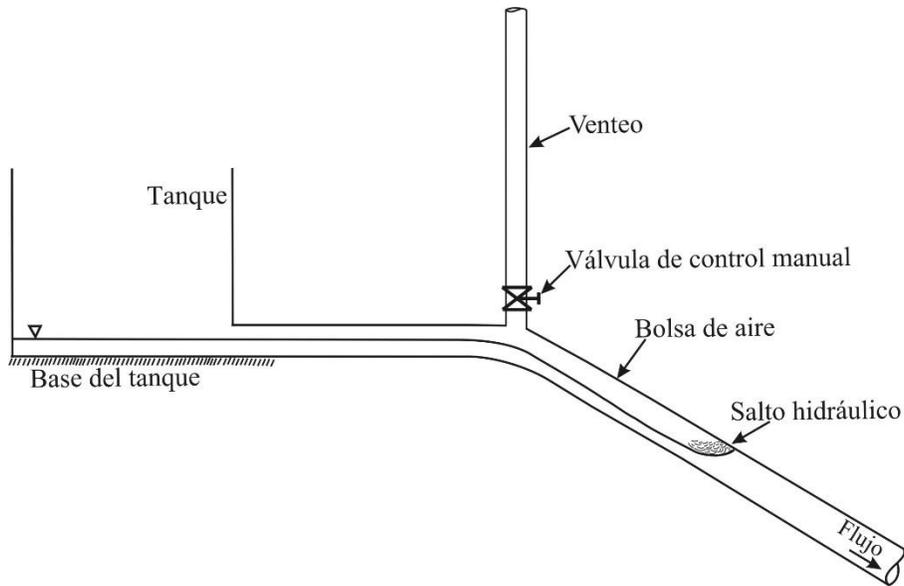


Figura 2. 8. Venteo colocado en un acueducto para expulsar el aire atrapado

Landon (1994) comenta que los hidrantes para incendios son una solución adoptada por algunos ingenieros para expulsar el aire de las tuberías. El hidrante es conectado a un costado de la tubería para remover el aire, pero aun así una cantidad importante de aire queda atrapada en la parte alta de la tubería, ver figura 2.9.

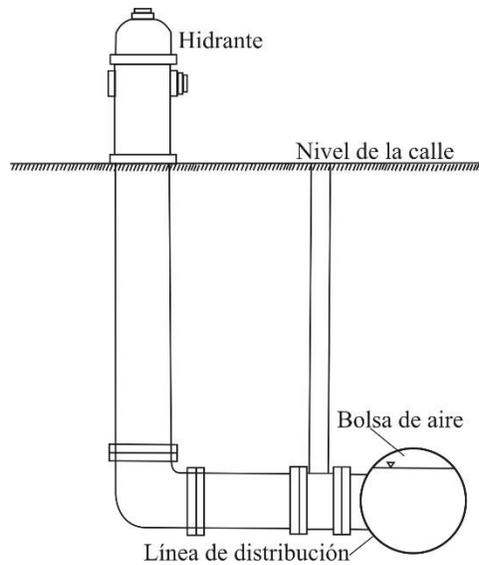


Figura 2. 9. Hidrante

Otra solución es la instalación de válvulas de globo y de compuerta en los puntos altos de los acueductos, para expulsar manualmente el aire del sistema. Sin embargo, en acueductos de grandes dimensiones no es posible predecir, cuando deben ser abiertas las válvulas para remover el aire de la línea. Además este

método no asegura una evacuación continua del aire, ni tampoco una protección contra presiones menores a la atmosférica durante la operación del acueducto.

Válvulas de aire

Las válvulas de aire son los dispositivos más usados para expulsar el aire durante el llenado de una línea de conducción, así como para dejar entrar grandes volúmenes de aire cuando la línea está siendo drenada, y para evacuar el aire acumulado al operar el sistema. Su mal funcionamiento o su falla total pueden llevar a la acumulación de aire, ya que las válvulas no serán capaces de interceptarlo y expulsarlo. Por lo tanto, es muy importante el correcto dimensionamiento y la colocación adecuada de las válvulas a todo lo largo de las líneas. Esto también permitirá que las válvulas funcionen adecuadamente durante la ocurrencia de transitorios, evitando así problemas relacionados con la separación de columna líquida.

Tipos de válvulas de aire

Las válvulas de aire son comúnmente usadas en líneas de conducción alrededor del mundo. El modo de operación es expulsar y/o admitir el aire automáticamente sin asistencia del personal de operación. Existen muchos fabricantes que ofrecen una amplia gama de válvulas para un amplio rango de aplicaciones.

Por lo general las válvulas de aire se dividen en tres tipos:

- Válvula de admisión y expulsión de aire
- Válvula de expulsión de aire
- Válvulas combinadas

Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA)

Estas válvulas se usan para expulsar el aire durante la puesta en marcha de los equipos de bombeo, y al llenar la conducción. La evacuación del aire se debe hacer lentamente para evitar el golpe de ariete o algún otro fenómeno destructivo. Por otra parte las VAEA admiten grandes volúmenes de aire, para evitar posibles daños a las tuberías que pueden ocurrir por separación de columna o al drenar la línea.

Al ser removido el aire de la línea, el agua eleva el flotador de la válvula para sellar el orificio. La velocidad de expulsión del aire está en función de la presión ejercida hacia el centro del orificio de la válvula. El criterio para dimensionar la válvula es muy importante, porque su tamaño definirá la presión diferencial a la cual es evacuado el aire.

Durante el paro de los equipos de bombeo, vaciado de la línea, ruptura de tubos o separación de la columna líquida, el flotador de la VAEA permitirá la entrada de aire a la tubería, para prevenir una presión de vacío y así proteger al acueducto de un colapso. Debido a que el tamaño de la válvula dicta el grado de vacío, su correcto dimensionamiento es muy importante.

Posteriormente a la ocurrencia de las situaciones antes mencionadas, el aire será removido para que el acueducto vuelva a su estado normal de funcionamiento. El flotador va a sellar el orificio de la VAEA. Sin embargo, bajo condiciones normales de operación el aire acumulado en los acueductos no va ser expulsado. Para este propósito se necesitan las válvulas expulsoras de aire (VEA). En la figura 2.10 se muestra el esquema de una válvula de admisión y expulsión de aire.

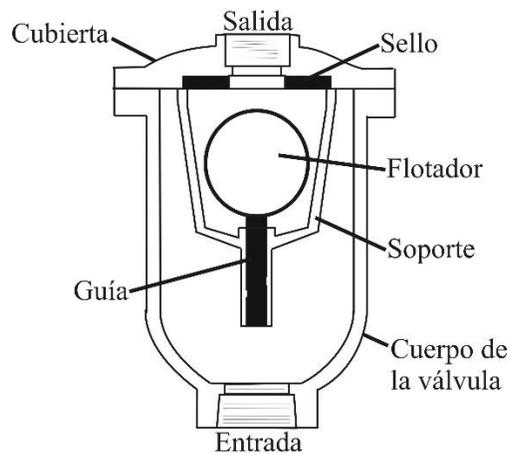


Figura 2. 10. Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA)

Válvula de expulsión de aire (VEA)

Las válvulas de expulsión de aire tienen un pequeño orificio para expulsar a la atmósfera el aire acumulado en los puntos altos de los acueductos, mientras estos operan normalmente. Las VEA tienen un flotador hidromecánico que detecta la presencia del aire en las líneas de conducción, y permite su expulsión cuando estas trabajan a presiones mayores a la atmosférica.

Durante la operación de un acueducto pequeñas cantidades de aire se introducen al cuerpo de la VEA, ver figura 2.11. Este aire va desplazar el mismo volumen de líquido dentro de la válvula, produciendo que el flotador se mueva hacia abajo para permitir la expulsión del aire, cuando éste es removido el flotador regresa a su posición original, moviendo el tapón para que éste selle el orificio de la válvula. Este proceso se repite si una nueva cantidad de aire se concentra en la VEA.

Las VEA tienen una capacidad limitada para expulsar y admitir aire, por lo tanto, este tipo de válvulas no es recomendable para evacuar grandes cantidades de aire durante el llenado de acueductos de grandes diámetros, ni para la protección contra presiones menores a la atmosférica, debido a que su orificio es muy pequeño generalmente menor que 1.27 cm. Para este propósito es necesario utilizar una válvula combinada. Un esquema de una válvula de expulsión de aire se presenta en la figura 2.11.

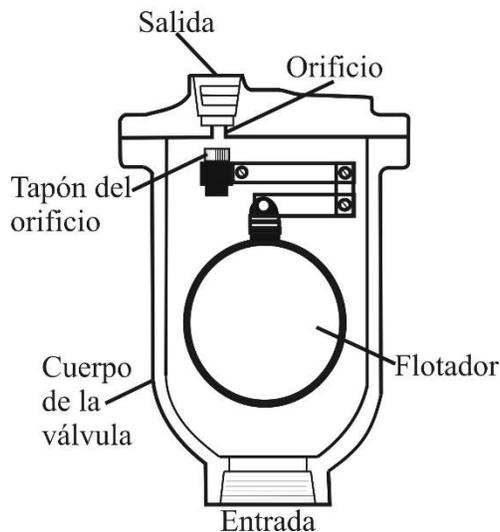


Figura 2. 11. Válvula de expulsión de aire (VEA)

Válvulas de aire combinadas (VAC)

Las válvulas de aire combinadas o de doble orificio cuentan con un orificio grande y uno pequeño ensamblados en el mismo cuerpo de la válvula. Este tipo de dispositivos son instalados en todos los puntos altos a lo largo del acueducto, donde válvulas de expulsión son requeridas para evacuar el aire acumulado, y válvulas admisión y expulsión son necesarias para proteger a la tubería de fallas por aplastamiento. Generalmente, dos tipos de diseños de VAC están disponibles en el mercado: VAC de un cuerpo, y VAC de doble cuerpo. Las válvulas de un cuerpo tienen la ventaja de ser más compactas y son normalmente menos costosas. Las VAC de doble cuerpo tienen la ventaja de que puede utilizar una variedad de válvulas de expulsión de aire con un amplio intervalo de orificios. Además, durante el mantenimiento la VAEA se encuentra en operación mientras la VEA puede ser aislada para reparación. Algunos ingenieros prefieren la utilización de VAC en los acueductos, para no dejarlos desprotegidos por errores de instalación en campo o para protección en caso de que el sistema opere incorrectamente.

Los dos tipos de válvulas de aire combinadas se muestran en las figuras 2.12 y 2.13.

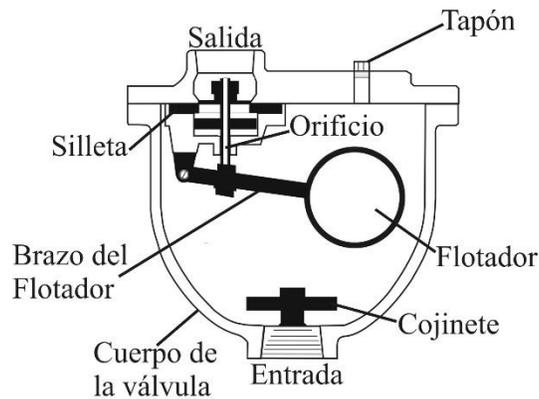


Figura 2. 12. VAC de un cuerpo

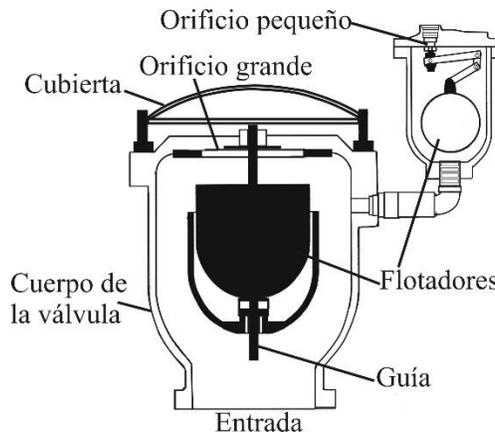


Figura 2. 13. VAC de doble cuerpo

2.5 Localización y dimensionamiento de válvulas de aire

Descarga de la bomba. Una válvula de admisión y expulsión de aire debe ser instalada en el lado de la descarga de la bomba y antes de la válvula check o de retención, para expulsar el aire durante la puesta en marcha y para permitir la entrada del mismo después del paro del equipo de bombeo. Este tipo de dispositivos no son necesarios cuando la sumergencia de la bomba es positiva. El dimensionamiento de la válvula se hace utilizando el gasto de agua que descarga la bomba. Es importante que el diferencial de presión no exceda 0.05 bar durante la operación de llenado del acueducto.

Incremento de la pendiente descendente. Una válvula de aire es comúnmente colocada en cambios abruptos entre pendientes descendentes debido a la posibilidad de que se presenten la presión de vacío y separación de columna

líquida. Generalmente el gasto de diseño es el que se debe utilizar para dimensionar este tipo de válvulas. El diferencial de presión a través del orificio de gran diámetro del dispositivo no debe ser menor a 0.35 bar. Durante la selección de la válvula se debe considerar el efecto venturi.

Efecto venturi

Todas las válvulas de aire con orificios grandes diseñadas con flotadores esféricos huecos tenderán a sellar parcialmente el orificio durante la admisión de aire hacia el acueducto. Esto se debe a la existencia de una zona de baja presión en la parte superior del flotador comparada con la que experimenta la línea.

Este fenómeno ocurre a diferenciales de presión muy bajos (0.15 a 0.20 bar), lo cual restringe de forma importante el funcionamiento de las válvulas, y ha sido causa del colapso de tuberías.

Decremento de la pendiente ascendente. Se deben colocar una válvula de admisión y expulsión de aire o una válvula combinada en los cambios fuertes entre pendientes ascendentes, para evitar serios problemas en caso de que ocurra separación de columna o presión de vacío. Para dimensionar la válvula se debe considerar el gasto de diseño del acueducto. Las consideraciones y precauciones que hay que tomar en cuenta son las mismas que en el punto anterior.

Tramos horizontales largos. Se deben instalar válvulas de aire combinadas al inicio y al final de un tramo de tubería horizontal largo. A lo largo de la sección horizontal se deben colocar válvulas de expulsión de aire (VEA). Investigadores y fabricantes recomiendan colocar las VEA a intervalos de entre 380 y 760 m. Sin embargo, siempre que sea posible se deben evitar tramos horizontales largos en los acueductos. Si esto no es posible, se recomienda colocar válvulas a una distancia máxima de 600 m. El dimensionamiento de ambos dispositivos (VAC y VEA) debe realizarse considerando el gasto de aire que deben expulsar.

Tramos ascendentes largos. Se deben poner válvulas de admisión y expulsión de aire o válvulas combinadas a todo lo largo de tramos largos de tubería con pendiente ascendente, a intervalos de 400 a 800 m. Estos dispositivos son necesarios para la adecuada expulsión del aire durante la operación de llenado y para permitir la entrada de aire durante el vaciado del sistema. Al dimensionar las válvulas, se debe comparar el gasto de aire expulsado por el orificio de gran diámetro con el gasto de aire que se introduce a través del mismo, calculado para la ruptura del tubo y para el fallo de los equipos de bombeo. Si el gasto de aire expulsado es mayor que el introducido, se diseña con base en el primero.

Tramos descendentes largos. Se deben instalar válvulas de expulsión de aire o válvulas combinadas a cada 400 m u 800 m, a lo largo de todas las secciones de acueductos con pendientes descendentes.

Puntos altos. Se deben colocar válvulas de aire combinadas en los puntos altos de los acueductos para evitar la presión de vacío, la separación de columna, y para evacuar el aire de la línea durante la maniobra de llenado, así como para expulsar el aire que se introduce en la conducción durante la operación normal del sistema y para permitir la entrada de aire durante el vaciado del acueducto.

La localización de las válvulas de aire en el acueducto se muestra en la figura 2.14.

Fuljo agua- aire en conductos a presión

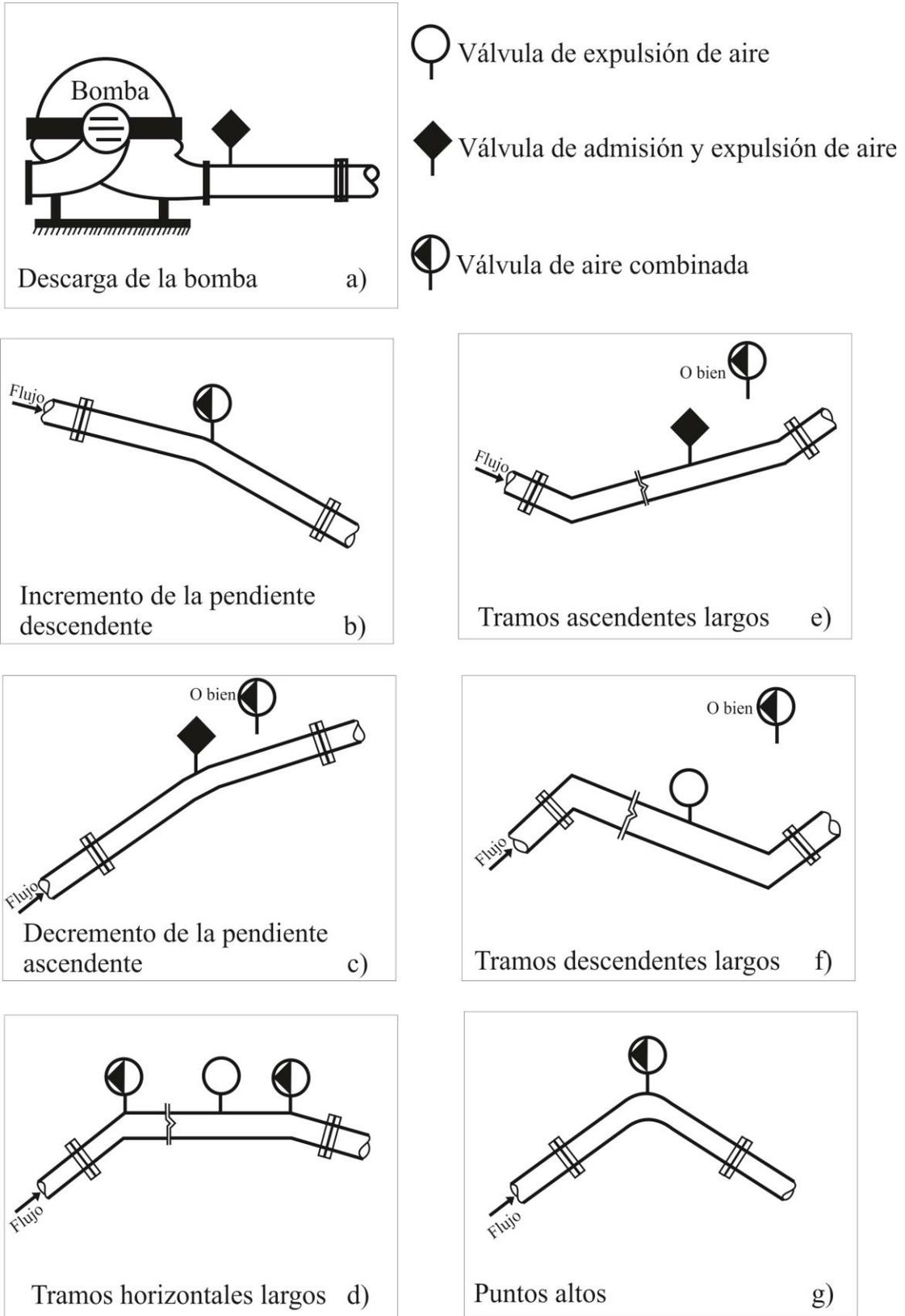


Figura 2. 14. Localización de las válvulas de aire en un acueducto

Capítulo 3 Técnicas de visualización cuantitativa

3.1 Introducción

Con el paso de los años el ser humano se ha preocupado cada vez más por la observación de la naturaleza, ya que por medio de ella ha logrado adaptarse al medio que lo rodea y con ello lograr su supervivencia. Sin embargo, mediante la observación de objetos en movimiento, el ser humano ha despertado el interés por realizar experimentos sencillos, utilizando herramientas disponibles en la naturaleza. Es así como surge el campo de investigación acerca de la visualización de un flujo. Un claro ejemplo primitivo que hoy día parece trivial, es arrojar pequeños trozos de madera a un río y observar su trayectoria, con dirección aguas abajo. Este tipo de arreglo experimental tan sencillo, permite hacer una estimación aproximada de la velocidad de la corriente, así como detectar estructuras en el campo de flujo (ej. Vórtices). Los primeros trabajos sobre visualización de flujo se realizaron en 1508 por Leonardo Da Vinci , los cuales consistieron en realizar dibujos sobre la formación de estructuras del flujo, originadas alrededor de obstáculos y la caída del agua al salir por un orificio (ver figura 3.1).

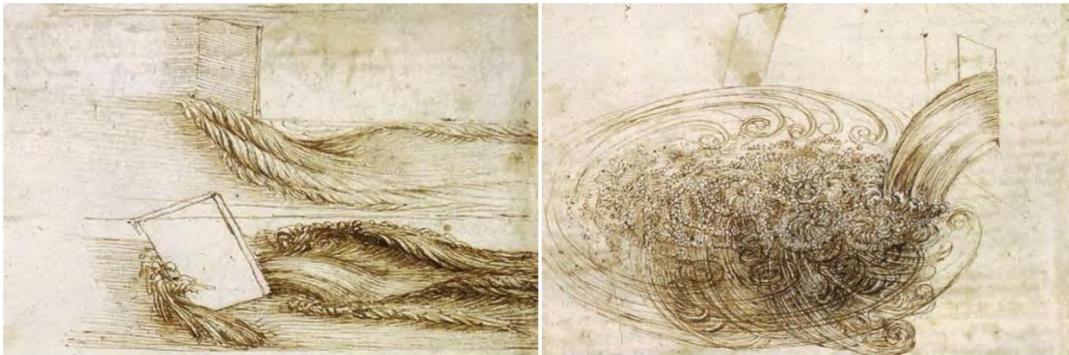


Figura 3. 1. Esquemas de Leonardo Da Vinci, sobre estructuras de flujo generadas a la salida de agua por un orificio (panel izquierdo), así como estructuras formadas alrededor de obstáculos (panel derecho). (Da Vinci c. 1508).

Posteriormente, en la década de los ochenta del siglo XIX, el irlandés Osborne Reynolds, quien es considerado como uno de los pioneros en el desarrollo de trabajos abocados a la visualización de flujo, dio a conocer un estudio experimental y teórico sobre la transición de flujo laminar a turbulento para fluidos al interior de tuberías. En este estudio, Reynolds realizó varios experimentos de flujo en tuberías con sección circular de diferentes diámetros, las cuales fueron sometidas a la misma presión; dentro de la tubería se inyectaba un colorante que permitía identificar la zona de transición y régimen turbulento al interior del conducto. El colorante funcionaba como trazador de líneas de flujo, es decir,

permitía visualizar las líneas de flujo al interior del conducto. En la figura 3.2 se muestra un esquema del dispositivo experimental de Reynolds.

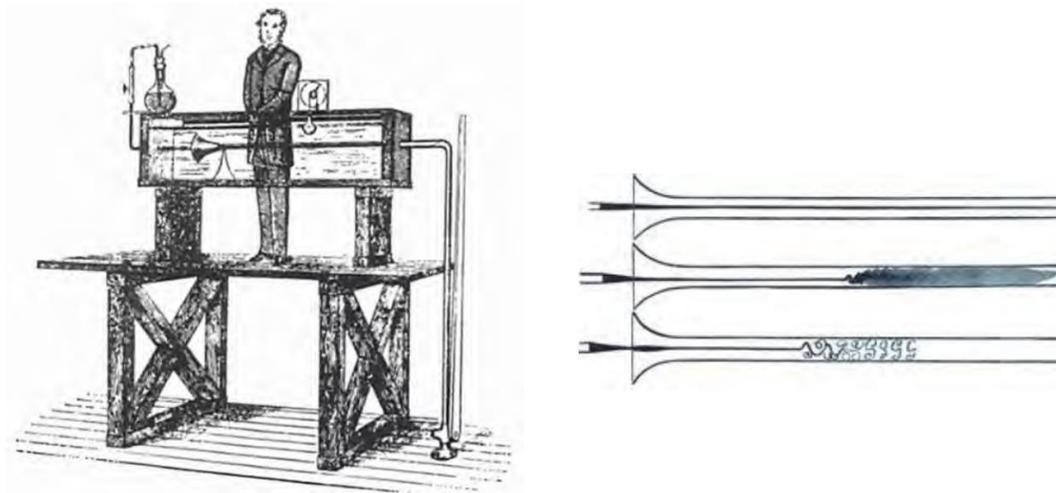


Figura 3. 2. Esquema gráfico del arreglo experimental de Reynolds para la visualización de la transición de regímenes en fluidos; (Izquierda) Reynolds y su instrumento; (Derecha) Ejemplo de la inyección de colorante en el tubo

De acuerdo con los resultados obtenidos en sus experimentos, Reynolds encontró que la velocidad de transición (de flujo laminar a turbulento) en la zona central de la tubería es función del tamaño de la misma. Con lo que llegó a la conclusión de que la generación de turbulencia es función de un número adimensional definido por el producto de la velocidad máxima en el centro, U , por el radio de la tubería, a , entre la viscosidad cinemática del fluido, ν .

Este número, bautizado posteriormente como número de Reynolds ($Re=aU/\nu$) define la transición de flujo laminar a turbulento en función de la relación entre los parámetros que definen al problema ($Re>2000$). La virtud de este parámetro es que la definición del régimen del flujo está determinada por la relación entre los parámetros del problema y no su valor absoluto, es decir, es adimensional.

Otro de los grandes pioneros en el uso de las técnicas de visualización de flujo fue Ludwig Prandtl quien, en el año de 1904, construyó un dispositivo mecánico que permitía controlar la circulación de agua al interior de un tanque por medio de una pala manual (figura 3.3). Dicho instrumento estaba constituido por dos secciones, superior e inferior, de tal manera que se favorecía la recirculación de agua al interior del mismo (figura 3.4). La evolución de las líneas de flujo se capturó por medio de fotografía tradicional a la zona de estudio, la cual era iluminada con un flash.

Tras la invención de este dispositivo inició el estudio del cambio de las líneas de flujo al interactuar con estructuras cilíndricas, colocadas al interior del tanque. Este

instrumento de medición, representa uno de los primeros modelos físicos de laboratorio que permitieron el estudio de la mecánica de fluidos en dos dimensiones. Posteriormente, Prandtl contempló el uso de trazadores de flujo en la forma de partículas de polvo de aluminio añadidas al fluido, de tal manera que se pudiera obtener una mejor caracterización de las líneas de flujo al interior del dispositivo.

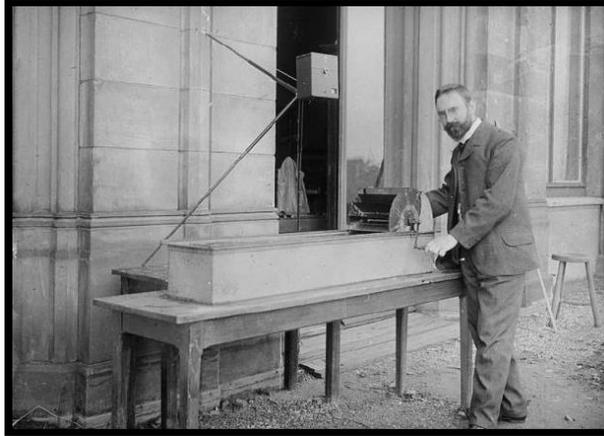


Figura 3. 3. Fotografía del túnel de agua por Ludwig Prandtl (1904) para la visualización de líneas de flujo. (Markus et al., 1998)

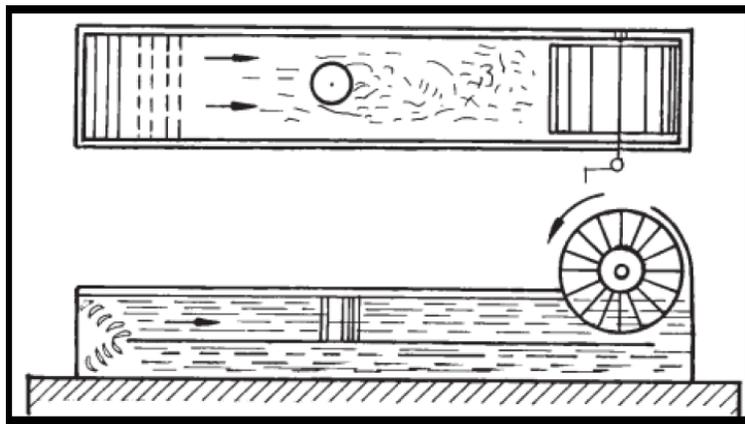


Figura 3. 4. Esquema gráfico del instrumento de Prandtl (1904)

De este modo y por medio del uso de la fotografía, Prandtl logró profundizar sus estudios sobre estructuras (estables e inestables) de flujo.

A pesar de los avances obtenidos por Reynolds y Prandtl, sus experimentos únicamente lograron obtener resultados de manera cualitativa. Sin embargo, estos grandes aportes a la ciencia representaron la base para la creación de nuevas técnicas de visualización de flujo que permiten obtener mediciones cuantitativas en diversas áreas de estudio.

Después de la creación de los primeros trabajos de visualización de flujo, a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, surge la implementación de nuevas técnicas cuantitativas, capaces de visualizar procesos físicos generados por el movimiento de un fluido que, a simple vista, el ojo humano no podría detectar (Merzkirh, 1974). Por tal motivo, este tipo de técnicas desempeñaron un papel importante en la comprensión de problemas en la mecánica de fluidos.

Con el desarrollo de la tecnología registrado en el siglo XX, se generaron un gran número de técnicas de visualización cuantitativa de los fluidos, las cuales tienen su base en la utilización de cámaras fotográficas de alta velocidad, mismas que permiten dar seguimiento a los patrones del flujo entre dos imágenes consecutivas. Entre las técnicas más conocidas se encuentran: la velocimetría por partículas en imagen (PIV, por sus siglas en Inglés), la velocimetría por seguimiento de partículas (PTV, por sus siglas en inglés), la velocimetría por rayo láser (LSV, por sus sigla en Inglés) y la velocimetría por trazado de burbujas (BIV, por sus siglas en inglés). Todas estas técnicas permiten, bajo diferentes condiciones de flujo, la determinación numérica de los vectores de velocidad en un fluido en movimiento. Este tipo de métodos representan las técnicas más avanzadas para la determinación del campo de velocidades de un fluido, dado que a través de ellas se determinan las características espacio-temporales del campo de velocidades. De esta forma se ha logrado sustituir técnicas de medición más tradicionales como la anemometría por hilo caliente, en la que se mide la velocidad de los fluidos a través de los cambios de temperatura detectados por el paso del fluido sobre un pequeño sensor calentado eléctricamente.

El desarrollo de la fotografía hacia imágenes digitales permitió la implementación de las técnicas de visión cuantitativa por medio del procesamiento de los patrones registrados en imágenes consecutivas (Westerweel *et al.*, 1993). La ventaja de estas técnicas radica en la posibilidad de automatización de las mismas de una forma rápida y precisa, lo que las hace muy atractivas para su empleo en el estudio de fluidos en movimiento (Hesselink *et al.*, 1998). Sin embargo, cabe resaltar que todos los métodos modernos utilizan el mismo principio básico de observación del flujo, el cual se remonta al desarrollo de la técnica de seguimiento de sombras en imagen propuesta por Dvorak (1880) (*shadowgraphy* en inglés), la cual ha sido ampliamente documentada en el trabajo presentado por Brown y Roshko (1974).

A continuación y a manera de resumen, se presentan las técnicas de visualización cuantitativa de flujos más utilizadas en la actualidad.

3.2 Visualización cuantitativa con partículas trazadoras: PTV, PIV, LSV y BIV.

El principio de medición de velocidad con este tipo de técnicas tiene su base en el seguimiento del desplazamiento de las partículas trazadoras en dos imágenes consecutivas, las cuales están separadas temporalmente por un pequeño intervalo de tiempo. El método consiste en registrar el desplazamiento de las partículas añadidas de forma artificial al flujo de tal suerte que su movimiento quede registrado en imágenes consecutivas. Debido a su tamaño forma y material, las partículas trazadoras siguen el movimiento del fluido. Además, para hacer más notoria su presencia dentro del fluido, al igual que en los experimentos de Prandtl, se utiliza una fuente de luz de tal manera que la iluminación extra haga resaltar las partículas tomadas en la imagen.

La información de imágenes obtenidas por medio de técnicas ópticas está dada por dos números adimensionales llamados densidad de la fuente (N_s) y densidad de la imagen (N_i), los cuales fueron propuestos por Adrian y Yao (1984). La densidad de la fuente indica si la imagen contiene partículas individuales (por ejemplo $N_s \ll 1$), o si las imágenes de partículas se superponen y la interferencia de la luz entra en juego (por ejemplo $N_s \gg 1$).

El otro número adimensional es la densidad de imagen (N_i) que representa el número de partículas en una región específica alrededor de un punto, con la que se puede determinar la velocidad de flujo. A dicha región se le denomina área de interrogación.

3.2.1 PTV (Velocimetría por seguimiento de partículas): $N_s \ll 1$, $N_i \ll 1$

Para la evaluación de imágenes con baja densidad de partículas se requieren métodos de seguimiento a fin de determinar el desplazamiento individual de cada una, tal es el caso del PTV. Este método es capaz de detectar partículas de forma individual con lo que el desplazamiento de una partícula dividido por el intervalo de tiempo entre imágenes determina la velocidad del fluido en ese punto (*Hering et al., 1997*). Sin embargo, dada la baja densidad de partículas, la información de velocidad sólo se puede obtener cuando alguna partícula está presente. En consecuencia, el PTV tiene un porcentaje de error en imágenes con ruido (como son los flujos turbulentos). Este problema se debe a que la técnica interpreta al ruido presente en las imágenes como partículas. En la figura 3.5 se ilustra una imagen con partículas individuales ($N_s \ll 1$). En este caso la distancia promedio entre las partículas que aparecen en la imagen es mucho mayor que el desplazamiento promedio de las mismas, de modo que el número esperado de imágenes de partículas en el área de interrogación es bajo ($N_i \ll 1$). Debido a la gran distancia entre las distintas partículas con respecto al desplazamiento promedio, es fácil identificar en pares de imágenes a las partículas

correspondientes de forma que se obtiene la velocidad de flujo local. Sin embargo, ya que la densidad de imagen es baja, no es posible determinar la velocidad en cualquier posición, si no solamente en posiciones donde una partícula trazadora está presente. El resultado es un muestreo aleatorio del campo de flujo.

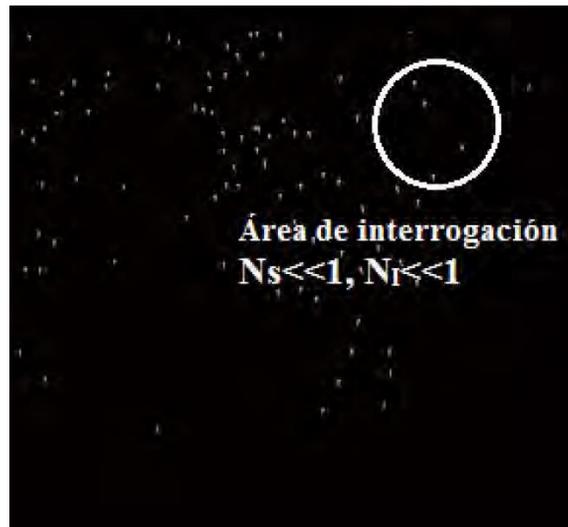


Figura 3. 5. Ejemplo de imagen obtenida por medio de un sistema PTV

Los paneles a) y b) de la figura 3.6, presentan un ejemplo de dos imágenes consecutivas con baja densidad de partículas. Este tipo de imágenes son procesadas para determinar el desplazamiento individual que tuvieron las partículas entre una imagen y otra.

Adicionalmente en la figura 3.6 c) se muestra el desplazamiento calculado entre ambas imágenes, la primera de ellas tomada en un tiempo t_0 , y la otra en un tiempo t_1 .

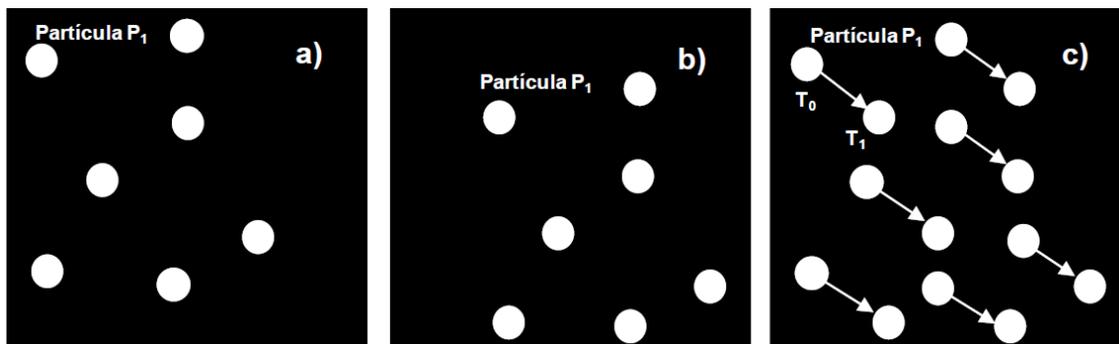


Figura 3. 6. (a) Imagen de partículas tomada en un tiempo t_0 ; (b) Imagen de partículas en un tiempo t_1 ; (c) Desplazamiento estimado de las partículas en un intervalo t_1-t_0

3.2.2 PIV (Velocimetría de partículas en imagen) $N_I \gg 1$, $N_S \ll 1$

La técnica de Velocimetría de partículas en imagen PIV, es utilizada para determinar la velocidad de un fluido en forma indirecta o no intrusiva. Esta consiste en determinar el campo de velocidades en un fluido, ya que la velocidad es calculada del procesamiento de imágenes consecutivas. Esta técnica requiere del empleo de partículas fluorescentes llamadas "trazadoras", las cuales se mueven junto con el fluido. Se acepta, entonces, que la velocidad de una partícula trazadora será la misma que la velocidad del fluido. Esta técnica puede ser definida como una actualización de la técnica PTV, dado que en virtud del avance tecnológico, el método PIV utiliza un rayo láser cuya función consiste en iluminar las partículas fluorescentes al contacto con el haz de luz. En la figura 3.7 se observa un ejemplo de imagen obtenida con la técnica del PIV.

En este sentido, las partículas trazadoras empleadas en esta técnica deben satisfacer dos condiciones: ser capaces de seguir el mismo movimiento del fluido y a su vez, reflejar suficiente luz láser para ser capturada por la cámara. Las partículas y el flujo deben tener aproximadamente la misma densidad, de modo que al insertarse las partículas, estas permanezcan suspendidas en el fluido. Por otra parte, si la densidad de las partículas y el fluido son diferentes, las partículas flotarán o se hundirán, por lo tanto, no seguirán apropiadamente el movimiento del fluido.



Figura 3. 7. Ejemplo de imagen obtenida con un sistema PIV

En la figura 3.8 se muestra la instrumentación requerida para el uso de la técnica PIV. Donde el láser funciona, en principio, como una fuente de luz que ilumina a las partículas trazadoras; la cámara digital es utilizada para capturar imágenes

que por medio de una computadora son procesadas mediante un algoritmo de correlación, obteniendo los desplazamientos promedio de las partículas.

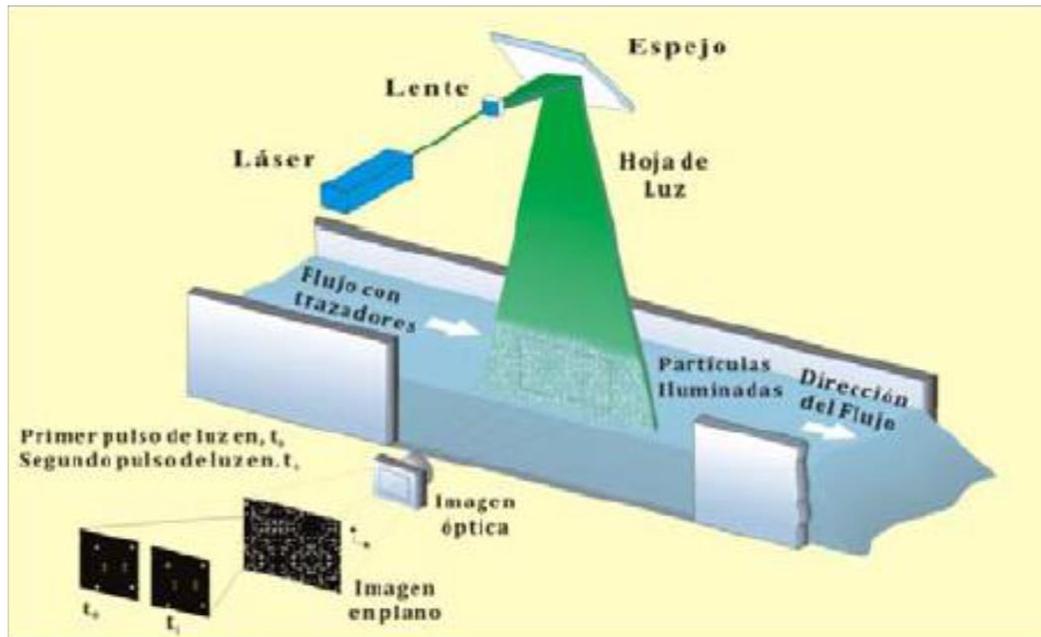


Figura 3. 8. 1 Sistema PIV (Salinas 2007)

Keane y Adrian (1990) realizaron mediciones para determinar los requerimientos de parámetros experimentales para el rendimiento óptimo del análisis de PIV. Como resultado de su investigación, ellos recomendaron los siguientes criterios:

- El número de imágenes de partículas por área de interrogación debe ser por lo menos de 15.
- El desplazamiento en el plano de las imágenes de partículas debe ser igual o inferior a 0.25 del diámetro del área de interrogación.
- El desplazamiento de la imagen de partículas en dirección perpendicular a la lámina de luz (desplazamiento "fuera de plano") debe ser inferior a 0.25.

Una desventaja del PIV consiste en la restricción de su uso para condiciones de flujo altamente caótico o turbulento (Kimmount et al. 2004; Kimmoun y Branger, 2007). Esto se debe a que el haz de luz láser incidente sufre difracción y reflexión al contacto con las burbujas generadas en este tipo de flujos.

3.2.3 LSV (Velocimetría por manchas de láser): $N_s \gg 1$, $N_l \gg 1$

Cuando se tienen imágenes con alta densidad, es decir, que existen demasiadas partículas, es imposible identificar cada una de forma individual, ya que, en una imagen plana, estas se encuentran encimadas unas con otras y debido a la superposición de las partículas en las imágenes, se genera la formación de

manchas. En estos casos, es de gran utilidad la técnica del LSV, la cual es capaz de realizar una aproximación estadística, con la que se identifica el desplazamiento de las manchas formadas por grupos de partículas (imagen 3.9). Sin embargo, esta técnica tiene la desventaja que al tener una alta densidad de partículas, es posible que estas alteren la dinámica original del fluido.

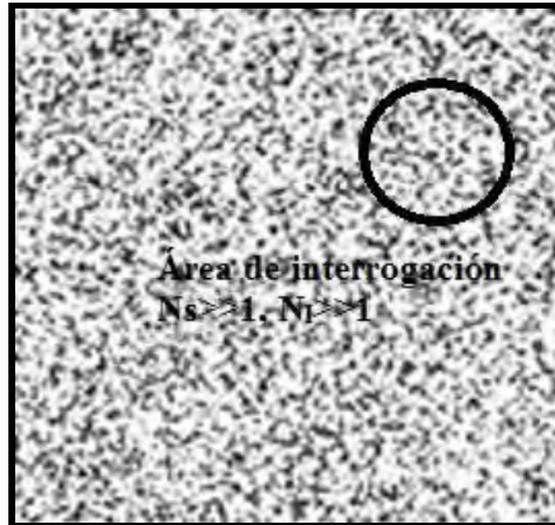


Figura 3. 9. Ejemplo de imagen obtenida con el método LSV

3.2.4 BIV (Velocimetría por trazado de burbujas)

Para mediados de la primera década del siglo XXI, surge la implementación de una nueva técnica de laboratorio conocida como velocimetría por trazado de burbujas (BIV, por sus siglas en inglés). Esta técnica consiste en analizar un conjunto de imágenes tomadas a alta velocidad a través de una modificación del color de la imagen, con lo que se obtiene información sobre el campo de velocidades a partir del seguimiento de burbujas en movimiento en una serie de fotografías (Ryu et al., 2005). Así por medio del seguimiento de las burbujas entre dos imágenes consecutivas, y si se conoce el intervalo de tiempo entre fotografías, es posible estimar la velocidad del flujo. De esta forma, es posible determinar las velocidades en una región con alto contenido de aire donde otros instrumentos de medición han resultado poco efectivos.

En la figura 3.10 se muestran ejemplos de la obtención de campos de velocidades mediante la técnica del BIV.

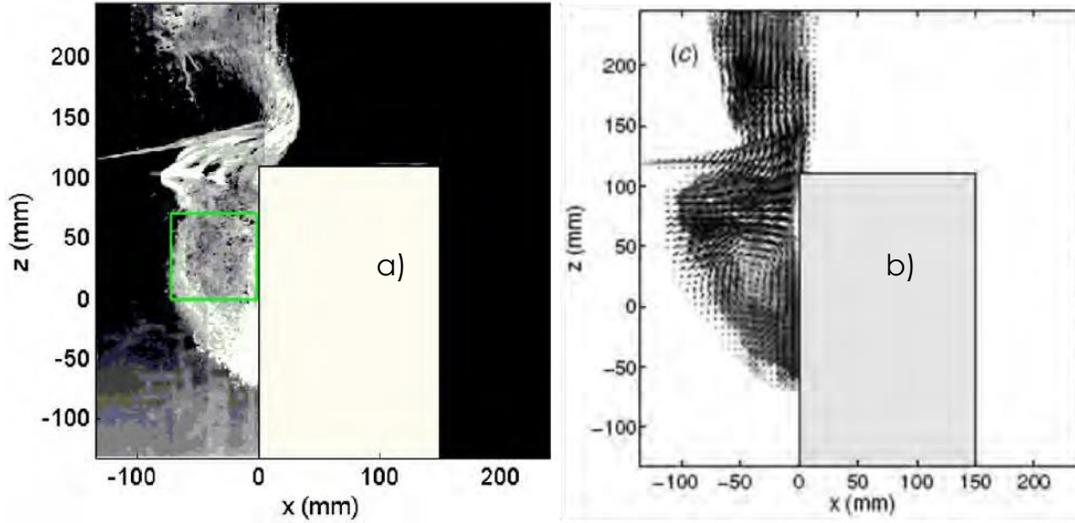


Figura 3. 10. Ejemplo de imágenes obtenidas con la técnica BIV (Ryu et al., 2005). En la imagen a) se muestra una ola rompiendo sobre un muro vertical. En la imagen b) se observa el campo de velocidades obtenidas con la técnica del BIV

A continuación, en la figura 3.11 se presenta, en orden cronológico los diferentes trabajos y autores que han utilizado técnicas de visualización de flujo.

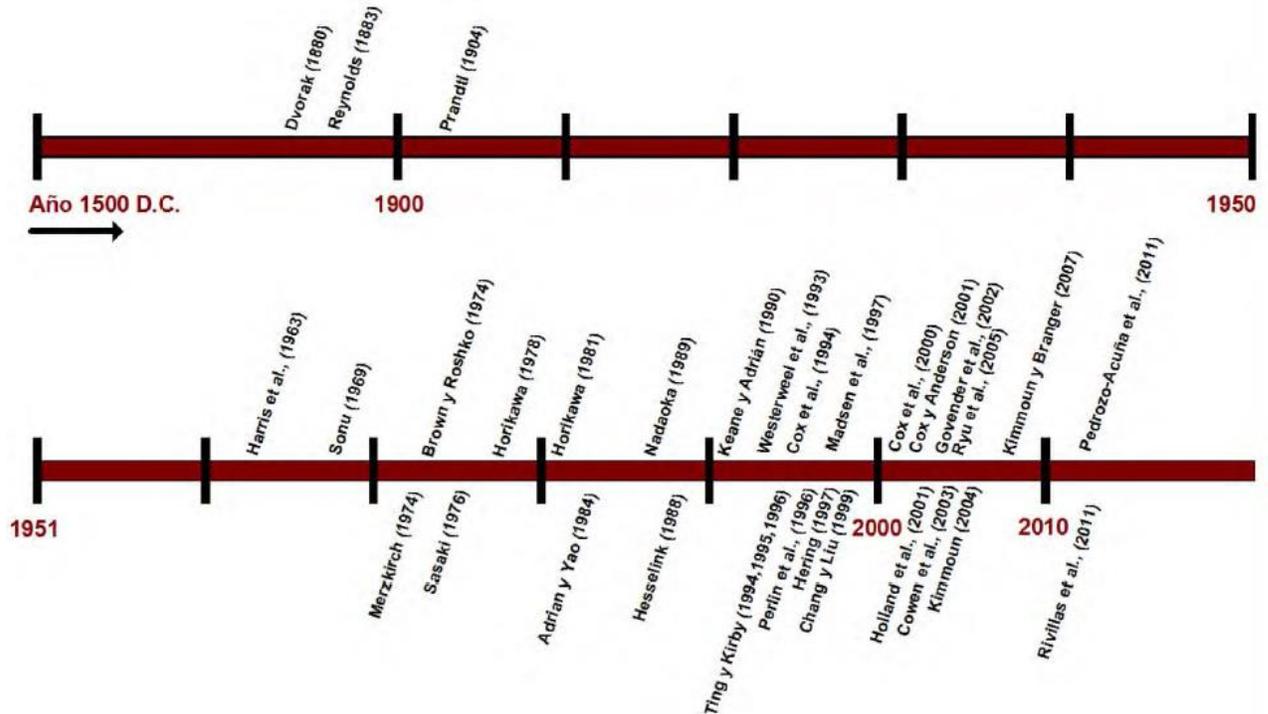


Figura 3. 11. Cronología de trabajos utilizando técnicas de visualización de flujo

Capítulo 4 Investigación experimental

4.1 Introducción

Como ya se mencionó, las bolsas de aire atrapadas en acueductos reducen la sección efectiva del paso del agua, causando un incremento en la pérdida de carga, e incluso pueden llegar a bloquear por completo el flujo. Aunque varios investigadores han estudiado el fenómeno del aire atrapado en acueductos, no existe una expresión analítica universalmente aceptada para analizar el comportamiento del aire en los acueductos.

La presencia de aire atrapado en conductos a presión es muy común y afecta considerablemente su capacidad de conducción. Esto continúa ocurriendo hoy en día, incluso en acueductos construidos recientemente, debido a la falta de un criterio adecuado para mejorar el funcionamiento de los mismos, cuando hay aire atrapado dentro de ellos. Desafortunadamente, es una práctica común diseñar los acueductos sin considerar que el aire puede quedar atrapado en algunos puntos altos del sistema.

4.2 Método para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire

Hoy en día no existe un método analítico completamente aceptado para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire en acueductos, el diseño de líneas de conducción de agua potable continua haciéndose con fórmulas semi-empíricas. La desventaja es que las recomendaciones hechas por varios investigadores varían ampliamente y pueden no ser adecuadas para el análisis o diseño de algunas líneas de conducción. Las causas posibles de estas discrepancias quizá se deban a que las condiciones adoptadas por diferentes autores no son generales, además de que sus investigaciones fueron realizadas en modelos con tuberías de diámetros pequeños comparados con prototipos.

González y Pozos (2002) propusieron una relación analítica para estudiar el comportamiento de burbujas y bolsas de aire aguas abajo de un salto hidráulico localizado al final de una gran bolsa de aire instalada en el cambio de una pendiente adversa, horizontal o descendente suave a una pendiente descendente pronunciada. Se desarrolló una investigación teórico-experimental para validar el uso práctico de dicha ecuación. Los autores analizaron el movimiento de una bolsa de aire en una tubería fluyendo a tubo lleno, al balancear la fuerza de arrastre del flujo de agua y la componente de la fuerza de flotación en dirección contraria al flujo (figura 4.1).

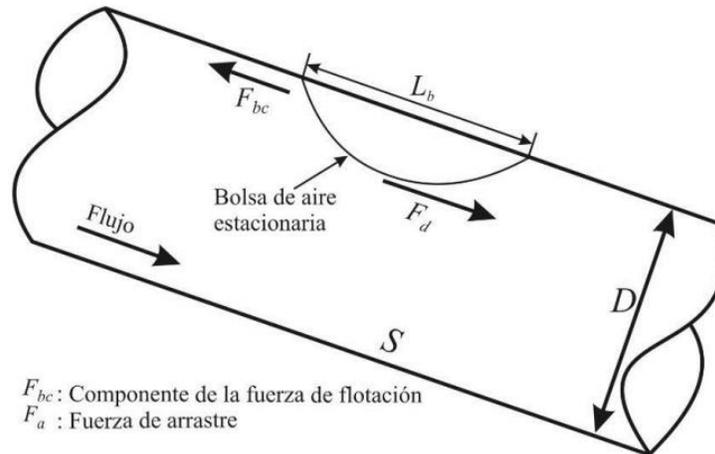


Figura 4. 1. Fuerzas que actúan sobre una bolsa de aire estacionaria

El balance de las fuerzas se puede escribir como:

$$C_a L_b^2 \rho \frac{v^2}{2} = L_b^3 \rho g S \quad \text{--- (4.1)}$$

Donde:

C_a = Coeficiente de arrastre

L_b = dimensión lineal de la bolsa de aire

ρ = densidad del agua

v = velocidad media del agua que actúa sobre la bolsa de aire estacionaria

g = aceleración de la gravedad

S = pendiente del tubo

La densidad del aire no se toma en cuenta, debido a que su valor es muy pequeño comparado con la del agua.

Reacomodando términos, la ecuación (4.1) se puede presentar como:

$$\frac{v^2}{2g L_b} = \left(\frac{S}{C_a} \right) \quad \text{--- (4.2)}$$

Nada se puede obtener de este análisis a menos que se haga una consideración con respecto a la dimensión lineal de la burbuja, si L_b depende del diámetro de la tubería, D , entonces L_b/D se vuelve constante. Por tanto L_b se puede reemplazar por D en la ecuación (4.2).

$$\frac{v^2}{2gD} = \left(\frac{S}{C_a}\right) \text{ --- (4.3)}$$

Se sabe que en conductos circulares $Q = v(\pi D^2/4)$, entonces la ecuación (4.3) también se puede escribir como:

$$\frac{Q^2}{gD^5} = \frac{\pi^2}{8} (S/C_a) \text{ --- (4.4)}$$

El término del lado izquierdo de la ecuación (4.4) se conoce como parámetro de gasto adimensional (PGA).

La ecuación (4.4) es muy similar a la expresión obtenida por Kalinske y Bliss (1943). Sin embargo, ellos no especifican el valor del coeficiente de arrastre C_a . También, Walski *et al.* (1994) realizaron experimentos en un modelo físico para determinar el valor de C_a para bolsas de gas, pero los resultados no fueron satisfactorios, debido a que los valores del número de Reynolds (Re) obtenidos estaban dentro del orden 1×10^3 , valor para el cual el coeficiente de arrastre es independiente de Re . Por otra parte, Kent (1952) propone una ecuación para obtener el valor del coeficiente de arrastre, C_a , que puede plantearse como:

$$C_a = 0.76 \left(\frac{L_b}{D}\right)^{1.11} \text{ --- (4.5)}$$

De la ecuación (4.5) se puede deducir que el C_a es únicamente función de la relación L_b/D ; además Kent encontró un valor límite ($L_b/D = 1.5$) para el cual el coeficiente de arrastre permanece constante y las burbujas y bolsas de aire se mantienen estacionarias en una tubería con pendiente descendente. Este valor límite es el que se utiliza para calcular el coeficiente de arrastre, que es $C_a = 1.2$.

El resultado del cociente $\pi^2/8C_a$ se puede redondear a la unidad, de lo cual se obtiene:

$$\frac{Q^2}{gD^5} = S \text{ --- (4.6)}$$

Es importante mencionar que la ecuación (4.6) ha sido utilizada para estudiar problemas de aire atrapado en acueductos de México, y las soluciones propuestas han permitido mejorar su funcionamiento (González y Pozos, 2000; Pozos, 2002; Pozos, 2007).

Rescribiendo la ecuación (4.6) en términos de la velocidad media del agua, resulta:

$$\frac{v}{\sqrt{gD}} = \frac{4\sqrt{S}}{\pi} \text{ --- (4.7)}$$

Las ecuaciones de Kalinske y Bliss (1943), y Kent (1952) son las más usadas para calcular la velocidad de remoción en acueductos. Kalinske y Bliss (ecuación 4.8) encontraron una buena correlación entre el movimiento inicial de las burbujas de aire, utilizando la pendiente de la tubería y el número Eotvos $\gamma D^2/\sigma$, el cual relaciona la fuerza de flotación con la tensión superficial. Por otra parte, Zukoski (1966) y Viana *et al.* (2003) plantearon que para condiciones de flujo turbulento, los efectos viscosos y de tensión superficial son mínimos para tubos con diámetros de 175 mm o mayores. Por tanto, el número de Eotvos puede no ser considerado. Asimismo, la relación propuesta por Kent (ecuación 4.9) es comúnmente utilizada en la práctica debido a su simplicidad, aunque muestra una desviación sistemática con respecto a los resultados experimentales.

$$\frac{v_c}{\sqrt{gD}} = 1.07\sqrt{s} \text{ --- (4.8)}$$

Donde v_c es la velocidad crítica del agua que actúa sobre la burbuja de aire.

$$\frac{v_{min}}{\sqrt{gD}} = 1.62\sqrt{\xi s} \text{ --- (4.9)}$$

Siendo v_{min} la velocidad mínima para la cual la burbuja está en equilibrio y $\xi = 0.58$ es un factor de forma obtenido experimentalmente.

Las velocidades de remoción calculadas con las ecuaciones antes presentadas se enlistan en la tabla 4.1. Los resultados son comparados con la velocidad de remoción obtenida por Babb y Johnson (1968) ($v = 3.3$ m/s) en un sifón con diámetro de 3.66 m, un gasto $Q = 34.33$ m³/s, y pendiente descendente $S = 0.42$.

Ecuación	Valor adimensional de la velocidad de remoción	Velocidad de remoción (m/s)
Kalinke y Bliss (1943)	4.16	0.69
Kent (1952)	4.65	0.77
González y Pozos (2000)	4.93	0.82

Tabla 4. 1. Valores de las velocidades de remoción

Analizando los resultados, se puede ver fácilmente que el mayor valor de la velocidad de remoción es el calculado con la ecuación propuesta por González y Pozos (2000). Los valores obtenidos demuestran que la ecuación (4.6) es conservadora y está del lado de la seguridad. Por tanto, se recomienda su uso

para el diseño de nuevos acueductos o bien para analizar el movimiento del aire en acueductos en funcionamiento.

4.3 Investigaciones previas del comportamiento del aire en conductos a presión

Investigaciones llevadas a cabo en dispositivos experimentales indicaron que grandes bolsas de aire pueden acumularse hacia ambos lados de una sección de control que se localice en el cambio de pendiente subcrítica a supercrítica (Mosvell, 1976; Walski *et al.* 1994; Pozos, 2007), tal como se muestra en la figura 4.2.

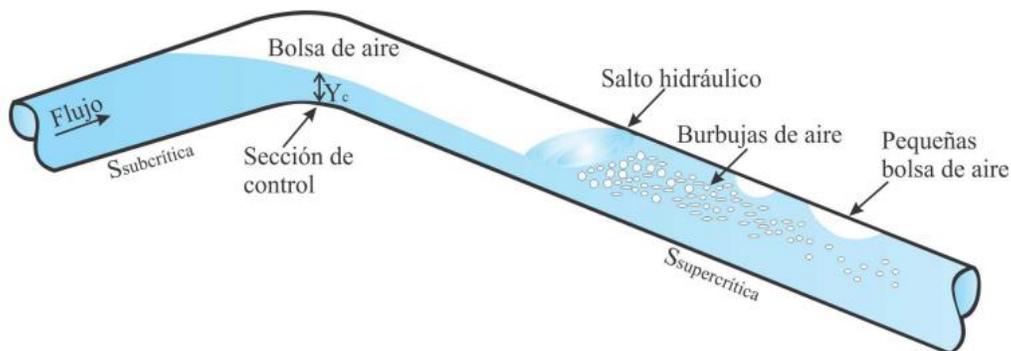


Figura 4. 2. Bolsa de aire acumulada en una sección de control

Rodal *et al.* (2000) encontraron que el tirante crítico, Y_c , necesario para remover una bolsa de aire de una sección de control debe ser igual o mayor que el 90 % del diámetro del tubo. Mediciones realizadas en modelos físicos han permitido concluir que el gasto de diseño puede no ser suficiente para remover la bolsa de aire.

El salto hidráulico al final de una bolsa de aire introduce aire en forma de burbujas. La velocidad a la cual el aire es removido de la línea depende de la habilidad del agua que fluye aguas abajo del salto. La ecuación (4.6) se usa para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire en tubos con pendiente descendente que fluyen completamente llenos. Las burbujas bombeadas por el salto hidráulico se mueven hacia el techo de la tubería formando burbujas de mayor tamaño y bolsas de aire, las cuales pueden regresar a contraflujo, y la misma cantidad de aire permanece en la línea. Este fenómeno depende de la magnitud de la fuerza de flotación, de la pendiente de la tubería, S , del diámetro del tubo, D , y del gasto de agua, Q . Por otra parte, si la pendiente de la tubería es ascendente en la dirección del flujo, el aire se va a mover hacia aguas abajo. De la misma manera, en tubos horizontales la componente vertical de la fuerza de flotación no influye en el movimiento de las burbujas y bolsas de aire, por lo que se espera que estas sean removidas.

Para determinar si las grandes bolsas de aire podrían permanecer en cambios de pendiente en líneas de conducción, el PGA es calculado para el intervalo completo de gastos de agua, y comparado con todas las pendientes que componen el acueducto. Cuando el PGA es mayor que S , las burbujas y bolsas de aire se mueven con el flujo. Sin embargo, si el PGA es menor que S , el aire va a regresar a contraflujo. En este caso los puntos altos e intermedios, son identificados como posibles puntos de acumulación de aire. Por tanto, tiene que considerarse la colocación de válvulas y/o venteos para remover mecánicamente el aire atrapado.

4.4 Investigación experimental en laboratorio

En esta sección se presenta la investigación experimental realizada para analizar el comportamiento del campo de velocidades del flujo agua-aire aguas abajo de un salto hidráulico en conductos circulares. La decisión de efectuar estos experimentos se tomó después de revisar la bibliografía sobre el tema y comprobar que no existe la suficiente información relacionada con el perfil de velocidades de burbujas de aire en acueductos con pendientes descendentes suaves y pronunciadas.

Con la finalidad de conocer más sobre el comportamiento cualitativo y cuantitativo de los perfiles de velocidades de un flujo de agua-aire aguas abajo de un salto hidráulico en tuberías que trabajan a presión, este trabajo expone los estudios realizados en una instalación experimental, construida en el Instituto de Ingeniería (I.I.) de la UNAM.

El propósito de realizar las pruebas es para obtener los perfiles de velocidades de las burbujas de aire que se presentan en la zona turbulenta de un salto hidráulico, mediante una técnica no intrusiva conocida como velocimetría de burbujas basada en imágenes digitales (BIV por sus siglas en inglés).

4.4.1 Dispositivo experimental

La instalación experimental para este estudio forma un circuito cerrado, cuyos componentes se muestran en la figura 4.2.

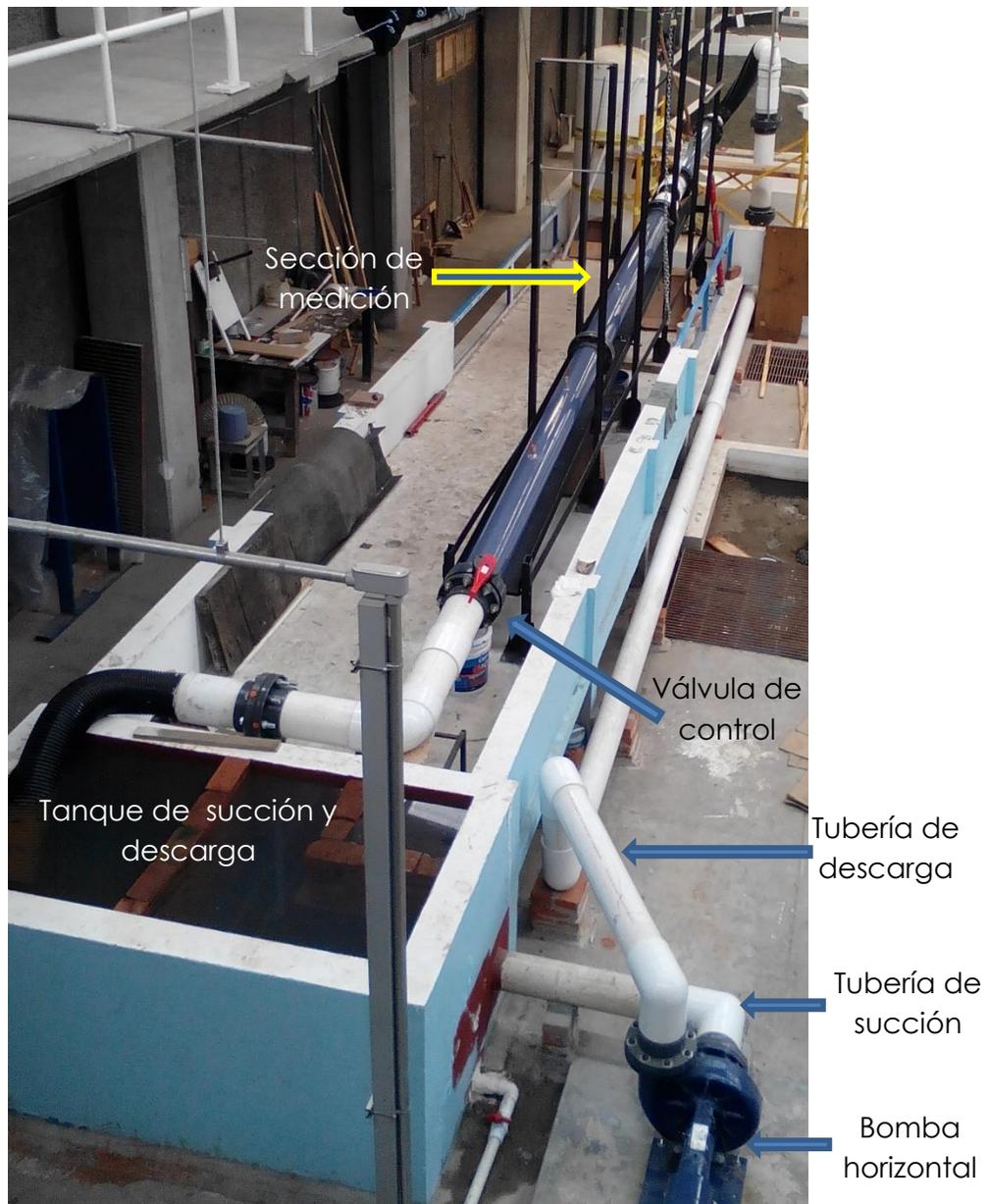


Figura 4. 3. Dispositivo experimental

Los componentes más importantes se describen a continuación:

El dispositivo se compone de un tanque rectangular de recirculación (succión y descarga) de aproximadamente 2 m³ de capacidad, al cual se conecta una bomba horizontal de 20 hp de potencia.

Para la circulación de agua en la tubería del dispositivo se utilizó la bomba, que puede entregar un gasto máximo de 60 l/s. La velocidad de giro fue controlada mediante un variador de frecuencia, lo que permitió realizar variaciones del gasto

mediante el control de frecuencia de la corriente eléctrica. Esto permitió controlar el llenado de la tubería, además de disminuir los efectos de transitorios hidráulicos.

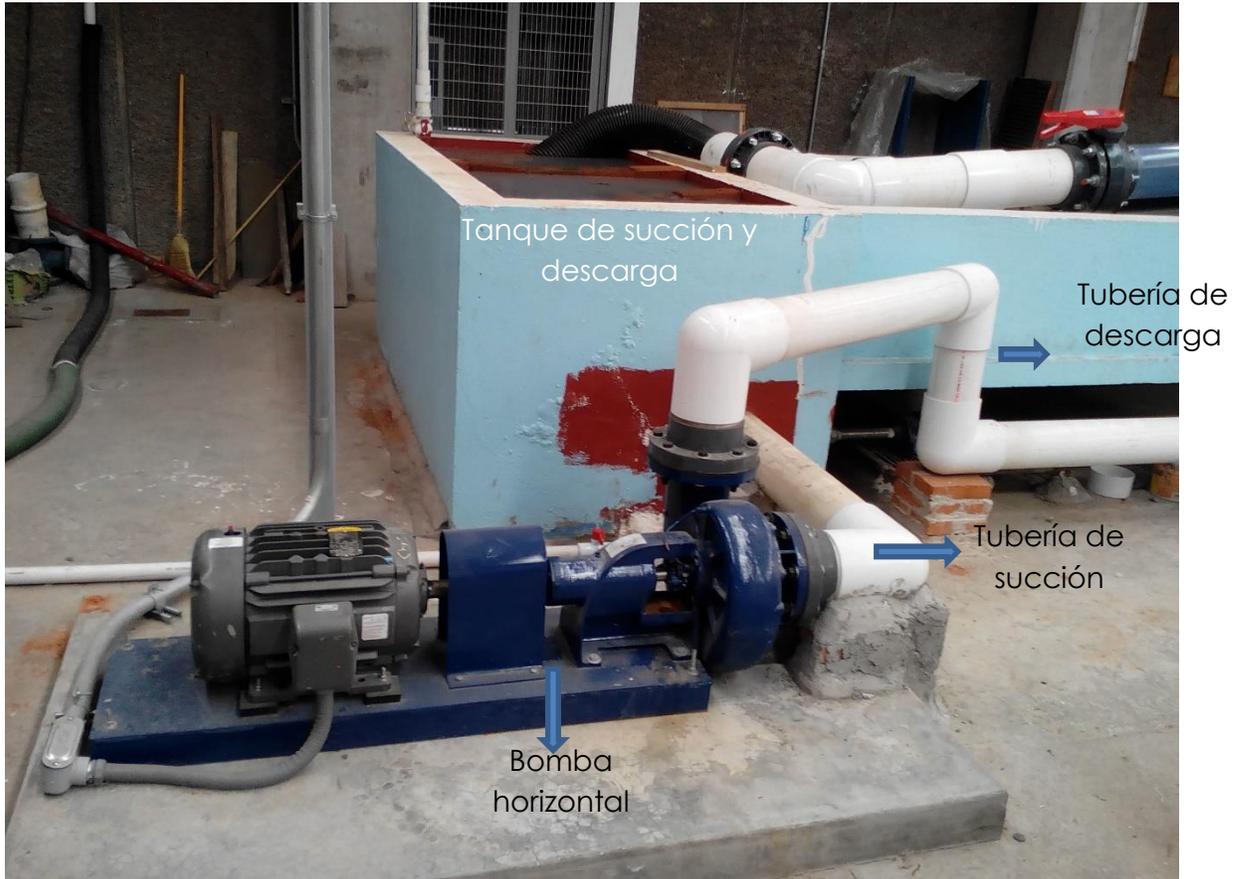


Figura 4. 4. Sistema de bombeo

De la descarga de la bomba, el agua es conducida hacia la sección de medición por una tubería de PVC hidráulico de 15 cm (6") de diámetro con longitud de 11 m, seguida de una ampliación a 20 cm (8") de PVC que se conecta a un tubo flexible de 1.70 de longitud y 20 cm (8") de diámetro, éste a su vez se conecta a una tubería de PVC transparente del mismo diámetro. En el punto más alto de este tramo se colocó un venteo que protegió la tubería de las presiones negativas que se presentaban al apagar la bomba.



Figura 4. 5. Tubería de conducción



Figura 4. 6. Tramo de ampliación en línea de conducción

El primer tramo de tubería transparente se conecta con la sección de control mediante una tubería flexible de 20 cm (8"), y que continúa con la sección de medición de tubería de PVC transparente, que está soportada por una base metálica a lo largo de toda su longitud que puede variar de pendiente de 0° a 45°.



Figura 4. 7. Sección de control y de medición

Sección de medición

Aguas abajo de la sección de control se ubicó la sección de medición. Se trata de una conducción de sección circular de 20 cm (8") de diámetro con una inclinación de 5° ($S= 0.087$). A lo largo de la sección de medición se instalaron varias válvulas de esfera para el purgado e inyección controlada de volúmenes de aire.

Al final de la sección de medición, se acopla una válvula de mariposa que cumple con la función de regular el caudal al poner en marcha el sistema. Finalmente es conectado otro tubo flexible que retorna el agua al tanque rectangular.

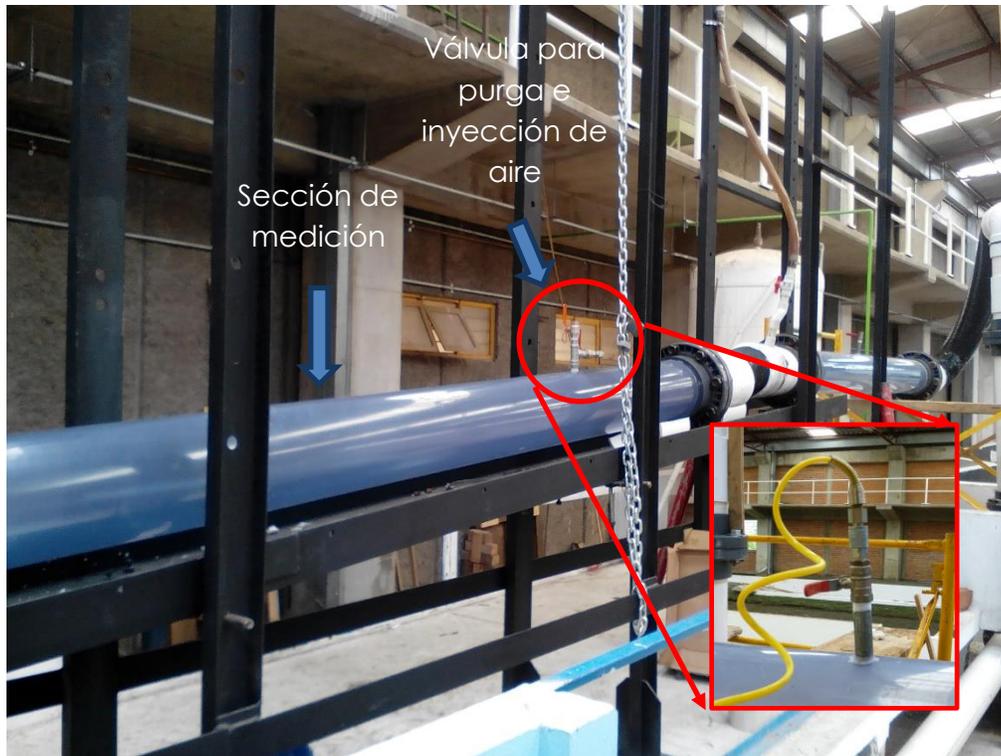


Figura 4. 8. Válvulas de purga e inyección de aire



Figura 4. 9. Válvulas de purga



Figura 4. 10. Sección de descarga del sistema

4.3 Pruebas en la instalación experimental

En esta sección se presenta la descripción de las pruebas realizadas en la instalación experimental. El propósito es medir el perfil de velocidades de las burbujas de aire que se presenta aguas abajo del salto hidráulico ocasionado por una bolsa de aire atrapada en un conducto circular.

Para poder realizar las pruebas, primero es necesario provocar un salto hidráulico en el dispositivo experimental, esto se logró al estabilizar una bolsa de aire en la sección de aguas abajo de la sección de control.

Mientras la conducción fluía completamente llena, el aire era inyectado con un compresor. Una vez en la sección de medición, el aire tendía a acumularse en la sección de control de la sección de medición en forma de grandes bolsas de aire, que terminaban en un salto hidráulico que sellaba el conducto.

El gasto de agua utilizado para realizar las pruebas fue de 21 l/s, para bombear este gasto el variador se operó con una frecuencia de 22 Hz.

4.3.1 Mediciones del perfil de velocidades

Para la medición del campo de velocidades se utilizó la técnica de velocimetría por trazado de burbujas (BIV) que tiene como base el seguimiento del desplazamiento de las burbujas en dos imágenes consecutivas, las cuales están

separadas temporalmente por un pequeño intervalo de tiempo. El BIV aporta las siguientes ventajas: proporciona valores puntuales en una dirección dada; es un método no invasivo, ya que no introduce ningún elemento en el flujo que altere su comportamiento y finalmente, con él se pueden determinar las velocidades en una región con alto contenido de aire. La técnica del BIV es similar al PIV excepto que el primero correlaciona directamente las imágenes de burbujas y no requiere de una lámina de luz láser para la iluminación (Ryu et al., 2005). Debido a que la zona de estudio contiene una alta densidad de burbujas que genera el salto hidráulico debido a su turbulencia, la mejor opción es la aplicación de la técnica del BIV para la caracterización del flujo en el interior de la tubería a presión.

El procesamiento de imágenes se realizó con el programa de acceso libre PIVlab, creado por Thielicke y Stamhuis (2014), que sirve para evaluar los campos de velocidades de partículas (burbujas) en fluidos. Es un programa amigable implementado en Matlab.

4.3.2 Equipo para la implementación de la técnica BIV

Para realizar las pruebas experimentales hay que contar con el equipo necesario para su adecuada realización. A continuación se menciona el equipo utilizado para poder aplicar la técnica de trazado de burbujas (BIV).

4.3.2.1 Cámara de alta velocidad

El BIV se basa en el seguimiento de burbujas, sin embargo, dada la velocidad del proceso que se desea estudiar, es necesario utilizar una cámara de alta velocidad a través de la cual se pueda tener, entre dos imágenes consecutivas información sobre el patrón de flujo de las burbujas que aparecen en la imagen.

La cámara utilizada para los experimentos es de marca Fastec (modelo IL4) las características de la misma son: una sensibilidad ISO 3200 (la cual permite obtener fotografías con una menor cantidad de luz) y resolución temporal de hasta 510 fotogramas por segundo con resolución espacial de 1280 x 1024 pixeles. La velocidad de fotogramas es ajustable hasta 60,000 imágenes reduciendo la resolución.



Figura 4. 11. Cámara Fastec IL4

4.3.2.2 Equipo de iluminación profesional

La técnica de trazado de burbujas requiere una iluminación adecuada que permita una buena calidad en las imágenes y los objetos que se desean capturar en las mismas.

La iluminación utilizada para las pruebas en el dispositivo experimental fue de tipo cinematográfico profesional. La característica principal de los reflectores utilizados (tipo Fresnel)) es que incorporan un sistema para dirigir y centrar el haz de luz mediante el desplazamiento de la lámpara. El control del haz hace que sea un proyector idóneo para la iluminación creativa, utiliza una lámpara incandescente con filamento de cuarzo encerrada en una atmósfera de un gas halógeno, la lámpara está fijada a un reflector de metal esférico y se desplaza mediante un mando exterior. La potencia de los proyectores Fresnel es de 650W. Adicionalmente, se utilizó un reflector tipo open face de 1000 W de potencia el cual se colocó en la parte superior de la tubería de tal forma que la luz iluminara desde arriba el proceso de interés.

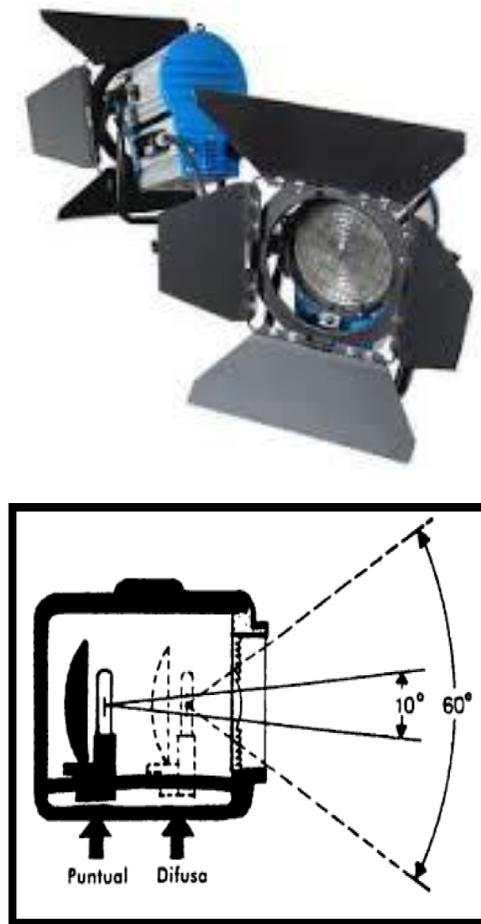


Figura 4. 12. Reflector tipo Fresnel (izquierda); Ángulos de desplazamiento de la lámpara interior del reflector (derecha)

4.3.2.3 Medidor de flujo

Para conocer el gasto que circulaba en el conducto se utilizó un medidor de flujo ultrasónico marca Primayer Modelo PrimeFlo-T. Se usó este tipo de medidor porque es una tecnología no invasiva ya que no se introduce ningún elemento en el flujo para lograr las mediciones. Las principales características del PrimeFlo-T se mencionan a continuación:

- Rango de medición de la velocidad del flujo: 0.01 – 25 m/s
- Resolución: 0.25 mm/s
- Repetibilidad: 0.15% del valor medio \pm 0.015 m/s
- Precisión del caudal volumétrico: \pm 1 – 3 % del valor medio en función de la aplicación, \pm 5 % del valor medio en proceso de calibración.
- Exactitud de la velocidad del flujo: \pm 5 % del valor medio
- 1 canal de flujo
- Intervalo de datos: Valores instantáneos, configuración de parámetros establecidos.

Fuljo agua- aire en conductos a presión

- Registro de datos: hasta diez variables seleccionadas
- Tiempo de respuesta: 1 segundo
- Temperatura de operación: -10 a 60 °C

Sensor

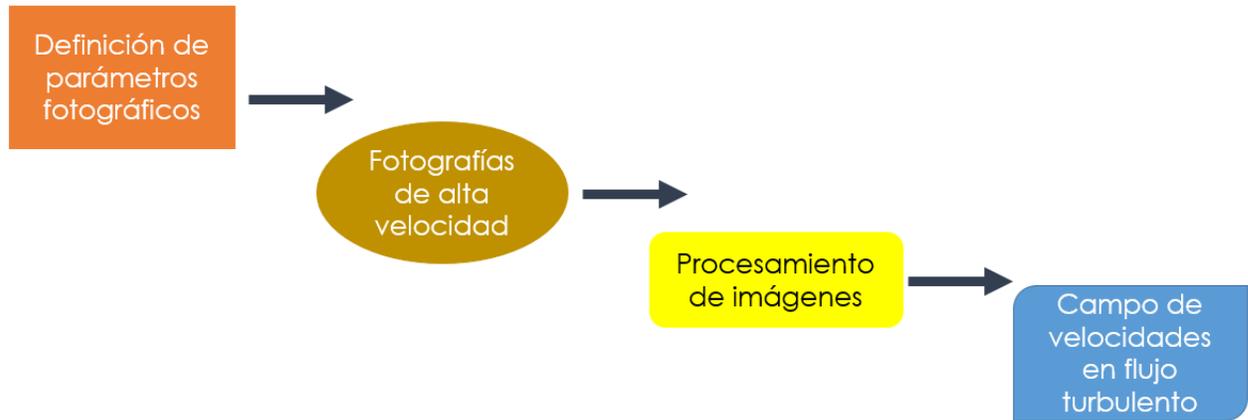
- Rango de diámetro de la tubería: 25 mm (1 pulg) – 3000 mm (3m)
- Longitud del cable: 4 m



Figura 4. 13. Medidor de flujo ultrasónico

4.3.3 Metodología de la velocimetría por trazado de burbujas (BIV)

Para la aplicación de la técnica de trazado de burbujas (BIV), se siguieron cuatro pasos. La siguiente metodología se aplicó para el seguimiento de las burbujas que se presentan después del salto hidráulico en una tubería que trabaja a presión:



Los pasos que se siguieron son:

1. Definición de los parámetros fotográficos de la lente que se utilizará
2. La captura y obtención de las fotografías de alta velocidad de la zona de estudio.
3. El procesamiento de imágenes.
4. La determinación de la velocidad del flujo.

A continuación se describen a detalle, cada uno de los pasos descritos para la aplicación exitosa de la técnica de trazado de burbujas.

4.3.3.1 Definición de parámetros fotográficos.

Debido a que la técnica de trazado de burbujas (BIV) no utiliza una luz para iluminar el plano de interés específico como el PIV, es necesario conocer dónde las burbujas son medidas en la dirección transversal de la tubería. Para resolver el problema es necesario conocer la profundidad de campo (DOF) de las fotografías obtenidas.

La profundidad de campo se define como una distancia dentro de la cual los objetos capturados por la cámara son bien enfocados. La profundidad de campo puede ser considerado (DOF) como el plano de lámina de luz del PIV.

La expresión para poder calcular la profundidad de campo (DOF) está dada por:

$$DOF = S - R \text{ --- (4.10)}$$

Donde S y R a su vez están dadas por:

$$S = Lf^2/(f^2 - NLC) \text{ --- (4.11)}$$

$$R = Lf^2/(f^2 + NLC) \text{ --- (4.12)}$$

Donde:

f= distancia focal

C= Valor del círculo de confesión que depende de la cámara (C=0.01)

N= número f de la apertura de la cámara

A continuación se describen de manera breve cada uno de los parámetros fotográficos utilizados en este proyecto.

Apertura del lente

La apertura del lente determina la cantidad de luz que entra al sensor de la cámara. El tamaño de la apertura se controla mediante un diafragma de hojas solapadas y ajustables similar a las pupilas de los ojos. La apertura afecta así la exposición y la profundidad del campo visual.

Tomando como base los principios ópticos básicos, los tamaños y diámetros de la apertura dependen de la longitud de foco, por ejemplo, un diámetro de apertura de 25 mm en un lente de 100 mm tiene el mismo efecto que un diámetro de 50 mm de apertura en un lente de 200 mm. Si se divide el diámetro de la apertura entre la longitud de foco, el resultado será $\frac{1}{4}$ en ambos casos, independiente de la longitud focal. Expresar las aperturas como fracciones de la longitud de foco es más práctico para los fotógrafos, que utilizar los tamaños absolutos de apertura. Estos valores "relativos" de apertura se llaman números-f o f-stops. En el lente, el valor de $\frac{1}{4}$ se escribe como f/4 o F4 o 1:4. En consecuencia, la siguiente apertura tendrá un diámetro que es 1.41 veces más pequeña, de forma tal que el f-stop después de f/4 será $f/4 \times 1.4$ es decir f/5.6. Al cambiar la apertura del lente de f/4 a f/5.6 se logra una reducción a la mitad de la cantidad de luz que entra al sensor, sin importar la longitud de foco.

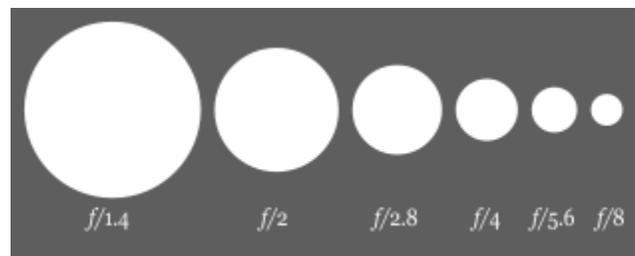


Figura 4. 14. Diámetro de apertura en el lente y su relación con el numero f del lente fotográfico

Distancia focal

La distancia focal de una lente es la distancia entre el centro óptico de la lente y el foco (o punto focal). El foco es el punto donde se concentran los rayos de luz (ver figura 4.15). En un objetivo la distancia focal es la distancia entre el diafragma de éste y el foco.

Los objetivos de las cámaras tienen una distancia focal fija o variable, dependiendo del tipo de objetivo. Al variar la distancia focal se consigue un menor o mayor acercamiento.

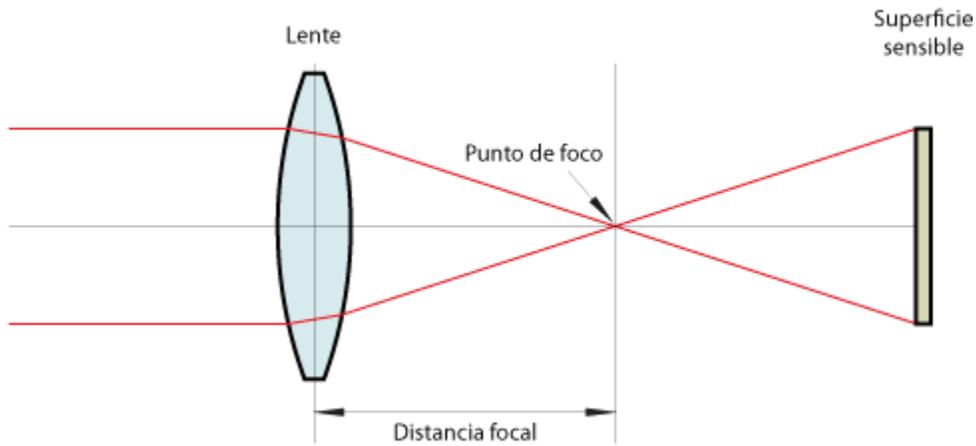


Figura 4. 15. Esquema de distancia focal

Distancia entre la cámara y el sujeto en foco

La distancia entra la cámara y el sujeto en foco (L), también conocida como enfoque, no es otra cosa más que la distancia del foco de la cámara a la escena de la fotografía.

En la tabla 4.2 se presentan los valores seleccionados para los parámetros fotográficos utilizados para las pruebas reportadas en este proyecto.

La figura 4.16 es un esquema con la disposición final de la iluminación, la cámara y la dirección de flujo al interior de la tubería a presión del dispositivo que se encuentra en el edificio 11 del Instituto de Ingeniería UNAM.

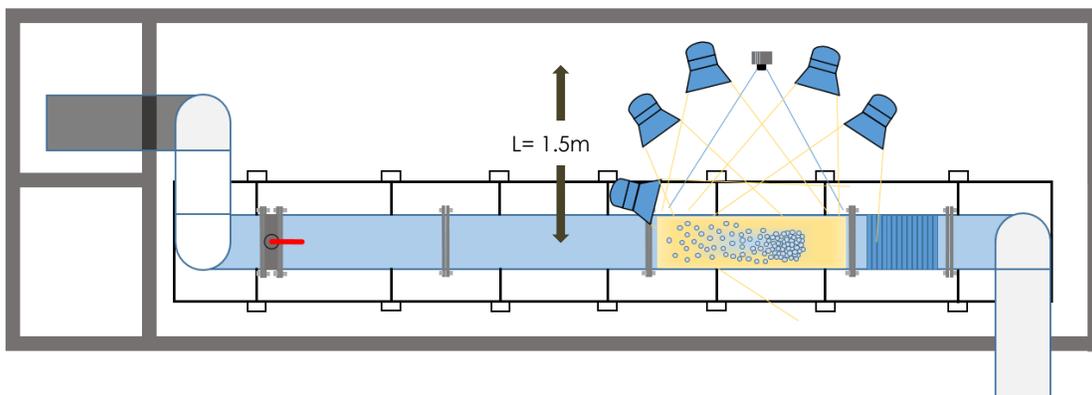


Figura 4. 16. Esquema de iluminación en el modelo experimental

Parámetros	Valor
Numero f	f/3
Apertura de lente (mm)	8.33
Distancia focal (mm)	25
Distancia entre la cámara y el sujeto en foco, L (m)	1.5
DOF (m)	0.21

Tabla 4. 2. Parámetros fotográficos

4.3.3.2 Fotografías de alta velocidad (imágenes naturales)

Una vez definidos los parámetros fotográficos asociados a la escena de estudio, el paso siguiente en la metodología consiste en la adquisición de imágenes fotográficas de alta velocidad. Para ello se definió una posición de monitoreo a lo largo de la conducción (sección de medición) de 42 cm de longitud. La cámara de alta velocidad fue ubicada de forma perpendicular a la dirección del flujo dentro de la tubería (Figura 4.17).

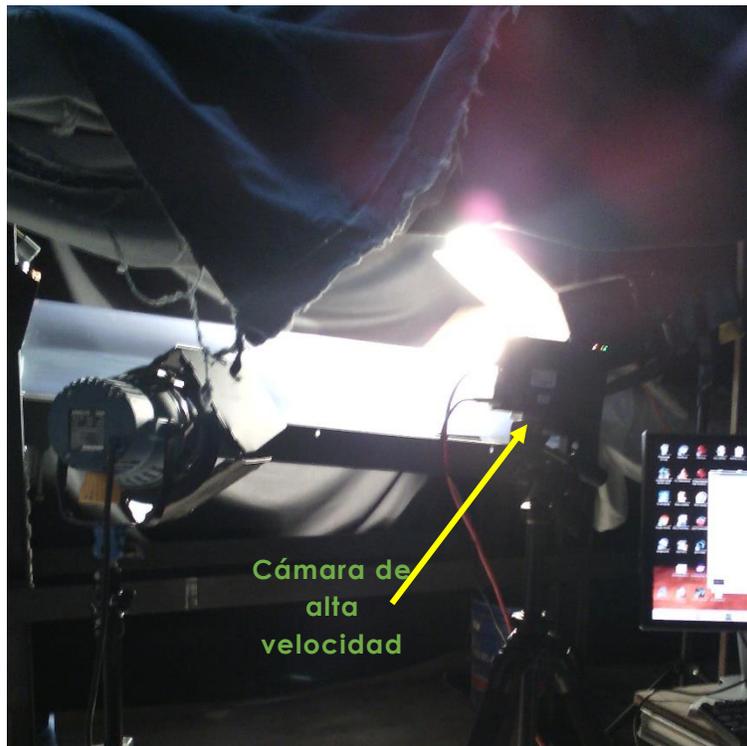


Figura 4. 17. Ubicación de instrumentación utilizada para el desarrollo de la técnica del BIV

Por medio del procesamiento de imágenes, se tendrá la visión completa de la hidrodinámica interna de la tubería en donde se presenta la turbulencia que se genera con el salto hidráulico. La figura 4.18 presenta un ejemplo de las series de fotografías tomadas en el modelo experimental.



Figura 4. 18. Fotografías naturales de la turbulencia dentro de la tubería

4.4 Procesamiento de Imágenes

Ya con las imágenes capturadas el siguiente paso es el procesamiento, esta parte se realizó con el software PIVLab. El PIVLab es una herramienta programada específicamente para MATLAB por Thielicke y Stamhuis (2014). El objetivo del programa es proporcionar una herramienta gratuita y de gran alcance para la realización de investigaciones de PIV (como nuestro caso). PIV se basa en examinar las imágenes en secuencia para determinar el movimiento de las partículas. En particular PIVLab utiliza un método denominado deformación de ventana para realizar un seguimiento de las partículas entre una imagen y la sucesiva con el fin de generar un marco. Para iniciar el proceso del análisis el PIVLab rompe la imagen en regiones de interrogación. Estas son las subsecciones de las imágenes y son de un tamaño específico que se miden en píxeles. El tamaño de la ventana se selecciona generalmente por el usuario en función del tipo de material que está siendo rastreado. Para que el PIV pueda realizar un seguimiento de las partículas de una zona de interrogación a la siguiente es necesario que el programa conozca la intensidad de varios píxeles.

PIVLab es capaz de importar una serie de imágenes, analizarlas y exportarlas en el formato deseado por el usuario. Para la realización de la técnica PIV es necesario tener dos imágenes de base para poder generar un análisis. La principal ventaja

de emplear la técnica de deformación ventana que PIVLab utiliza es que no necesita ninguna información con respecto a la intensidad de la luz o el tiempo entre imágenes sucesivas que algunos otros programas de análisis de PIV necesitan. El programa es capaz de calcular el campo de velocidad de un material o fluido a base solamente de imágenes secuenciales que se cargan en ella, como las burbujas en este caso. Lo que sigue es un breve resumen de algunas de las funcionalidades del software PIVLab que se utilizaron para analizar los datos.

4.4.1 Importación de datos

Para realizar el análisis del BIV o seguimiento de burbujas utilizando PIVLab se comenzó con la importación de las imágenes que se obtuvieron con la cámara de alta velocidad. El procedimiento inicio en la ventana "Nueva sesión", se seleccionaron 1200 imágenes. Aquí también es posible para el usuario poder definir como analizará PIVLab el grupo de imágenes para hacer los marcos. Las opciones para la agrupación son: a) 1-2 2-3 3-4 4-5 o b) 1-2 3-4 5-6. En este proyecto se seleccionó la primera opción.

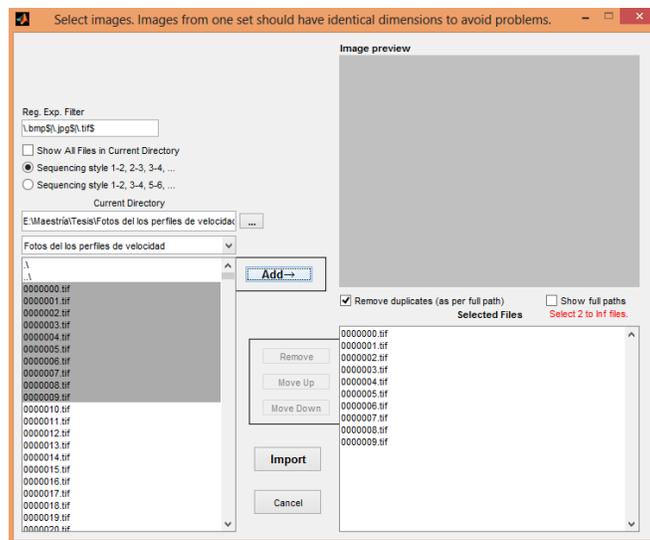


Figura 4. 19. Área de importación de archivos de PIVLab

4.4.2 Configuración del análisis

Después de que las imágenes deseadas fueron seleccionadas para su importación, fue necesario elegir la configuración con la que el programa analizará las imágenes. Esta queda disponible en el menú "Configuración Análisis" situado en la parte superior de la interfaz gráfica del PIVLab. Aquí se pudo configurar la zona de interrogación y el desplazamiento de interrogación que va a determinar la zona del seguimiento de las partículas. También es posible multiples configuraciones para tratar de aumentar la precisión de las mediciones. La única diferencia aquí, es que no se puede elegir el desplazamiento ya que el

valor predeterminado es 50 por ciento de la ventana inicial. Si se aumenta la precisión también se aumenta el tiempo del análisis y esto puede llevar varias horas. En el caso de esta investigación se tomaron los parámetros que tiene por default el programa.

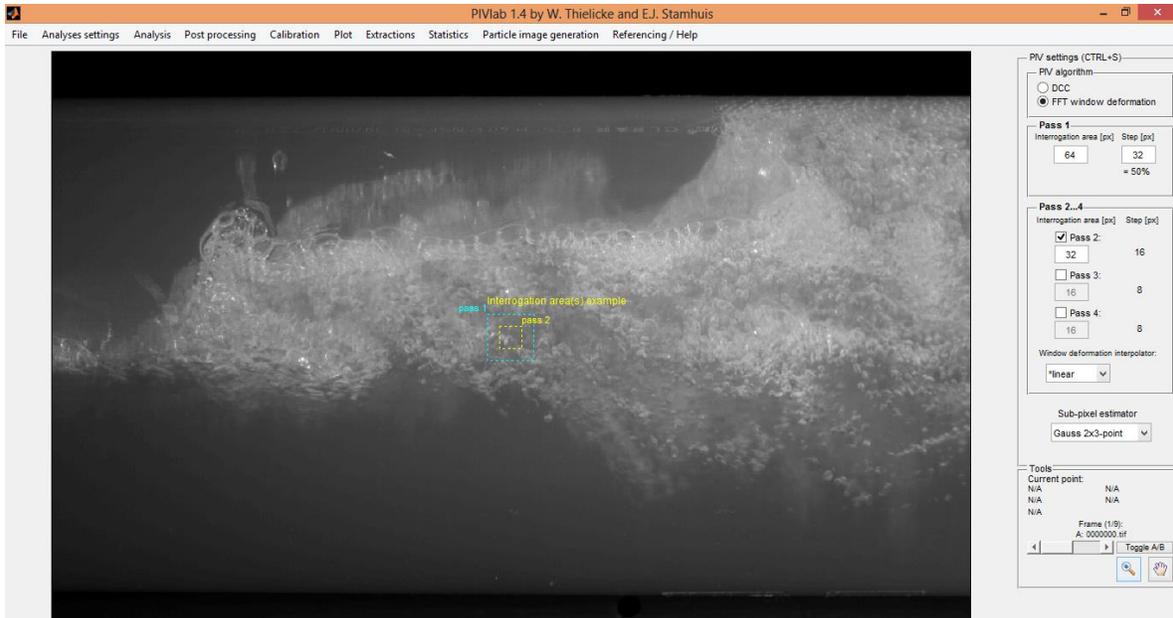


Figura 4. 20. Imagen que muestra los pasos en la zona de interrogación

También en el menú "Configuración Análisis" se encuentra la opción de establecer regiones de interés y poner máscaras de exclusión en las imágenes que serán analizadas. Las regiones de interés permiten al usuario establecer un área específica de las imágenes que se va a analizar. Esto es especialmente conveniente porque el usuario no tiene que utilizar un programa externo para recortar un área que no es importante en las imágenes. El uso de ROI también puede reducir drásticamente el tiempo de cálculo mediante la eliminación de fragmentos de la imagen que no aportan nada al análisis. En resumen en esta parte se elige la zona de la imagen que se desea ignorar.

4.4.3 Vector validación

Después de llevar a cabo el análisis de las imágenes, se tiene la opción de limpiarlas mediante el uso del menú "Post Processing". Este conjunto de opciones permite poner filtros locales sobre la imagen para cambiar la forma en que PIVLab analiza los datos. Estos filtros pueden eliminar vectores basados en el número de desviaciones estándar que están lejos de la media o mediana local.

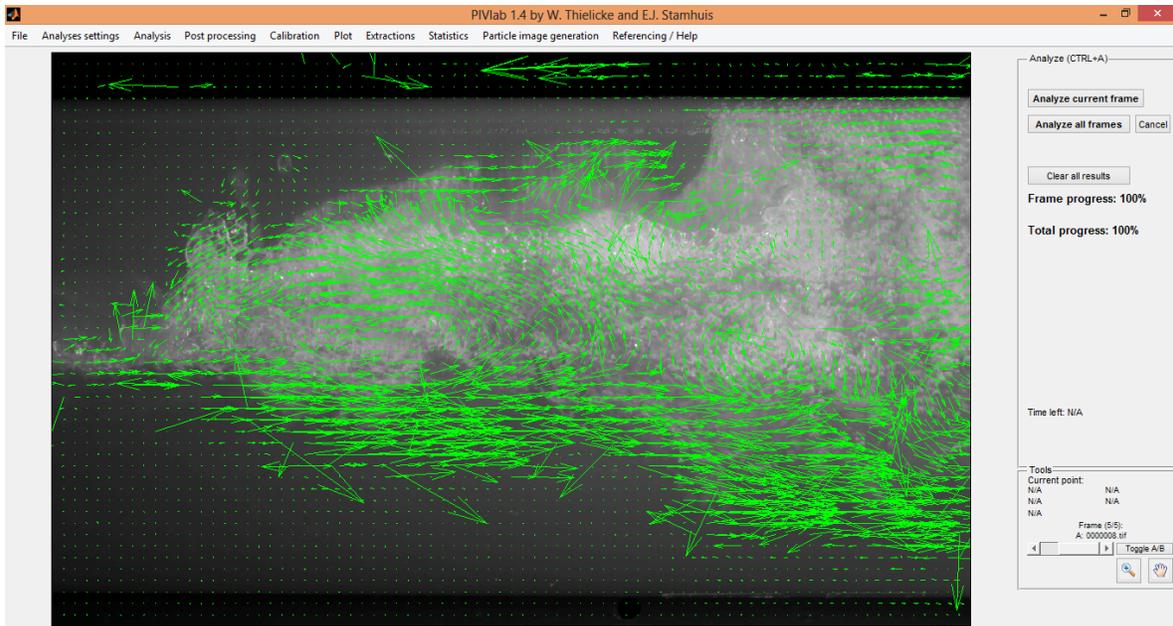


Figura 4. 21. Vectores sin marco de validación

Otra opción muy efectiva en este menú es la capacidad de seleccionar los límites de velocidad. Esto permitió abrir un diagrama de dispersión que muestra las velocidades que están presentes dentro del conjunto de imágenes y luego seleccionar qué parte de estas velocidades se incluirán en el análisis final. El menú de "vector validación" también contiene una casilla de verificación "interpolan los datos que faltan". Esto es útil si el programa no puede encontrar coincidencias dentro del flujo en el campo vectorial. Los datos interpolados se representarán con vectores de color naranja y los demás en verde.

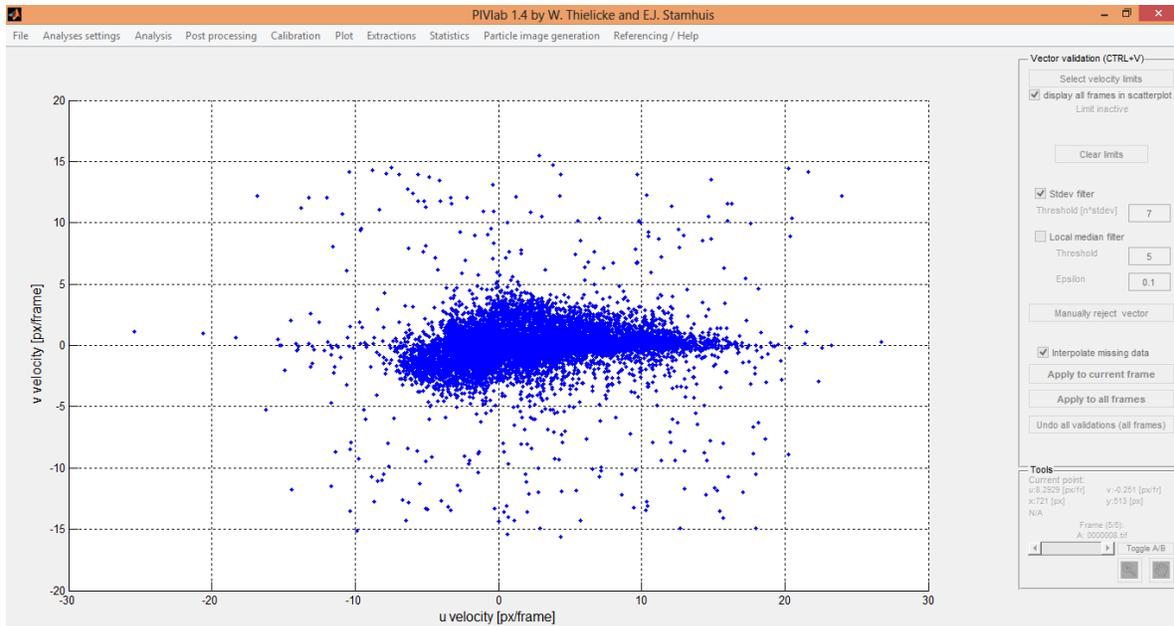


Figura 4. 22. Diagrama de dispersión

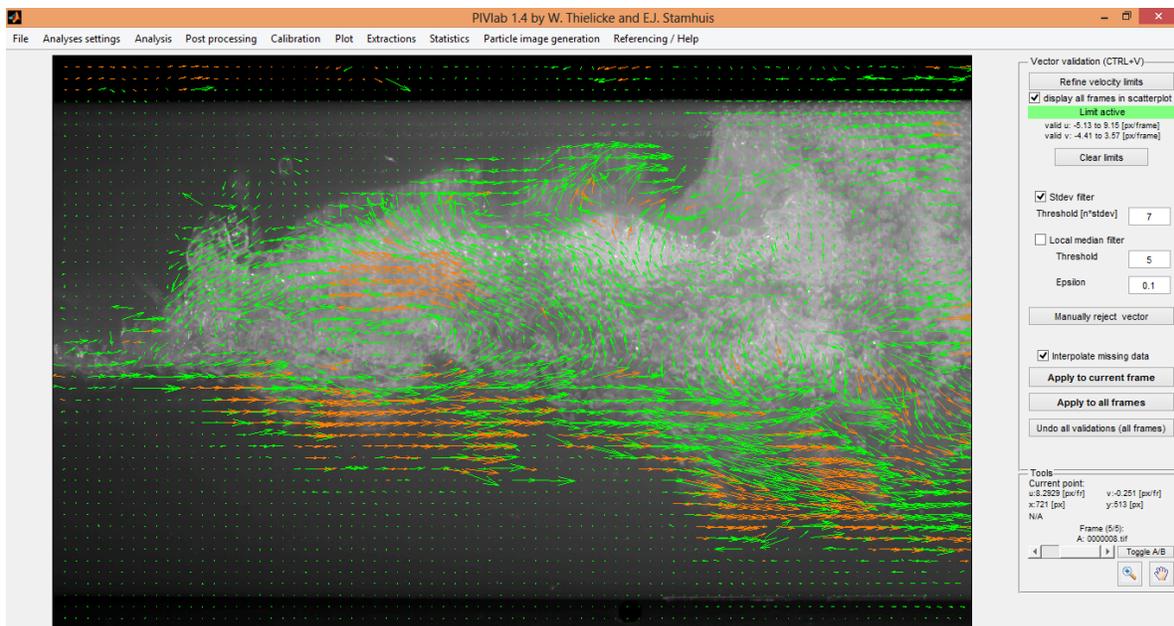


Figura 4. 23. Vectores con marco de validación

4.4.5 Calibración

Para realizar la calibración se necesita indicar los datos del diámetro de la tubería y el tiempo que hay entre cada imagen.

Distancia real: 218 mm (diámetro exterior del tubo)

Tiempo entre imágenes: 2.13 ms (468 fotos por segundo)

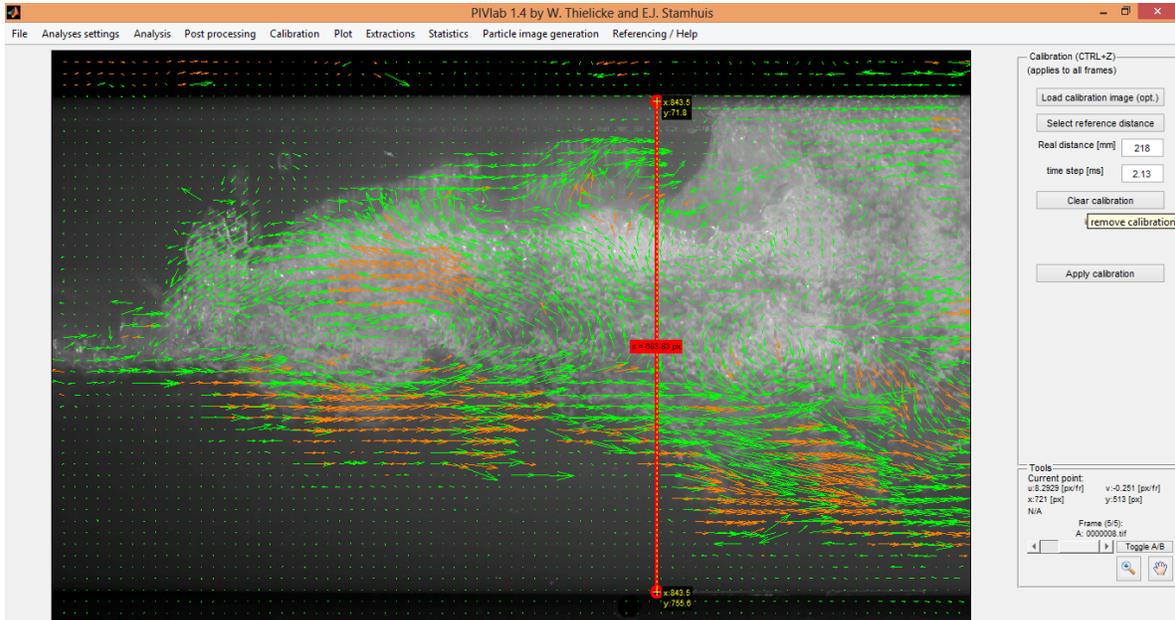


Figura 4. 24. Parámetros para calibración

4.5 Resultados.

Por último, para obtener los resultados del perfil de velocidades en la pestaña de extracciones se selecciona el parámetro de velocidad y en tipo poli-línea que nos da los componentes \vec{U} y \vec{V} de cada uno de los vectores validados en el análisis. El vector \vec{U} corresponde a la dirección x y el \vec{V} a la dirección y, como se muestra en la figura 4.25. Las imágenes utilizadas fueron en dos dimensiones por lo tanto no hay eje z ni vector \vec{W} .

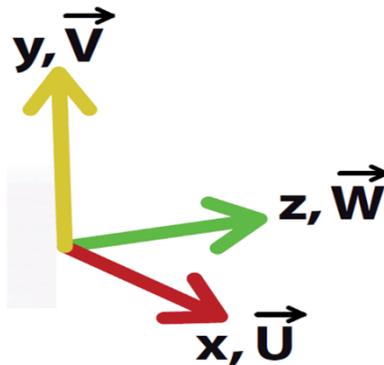


Figura 4. 25. Ejes coordenados y sus vectores correspondientes

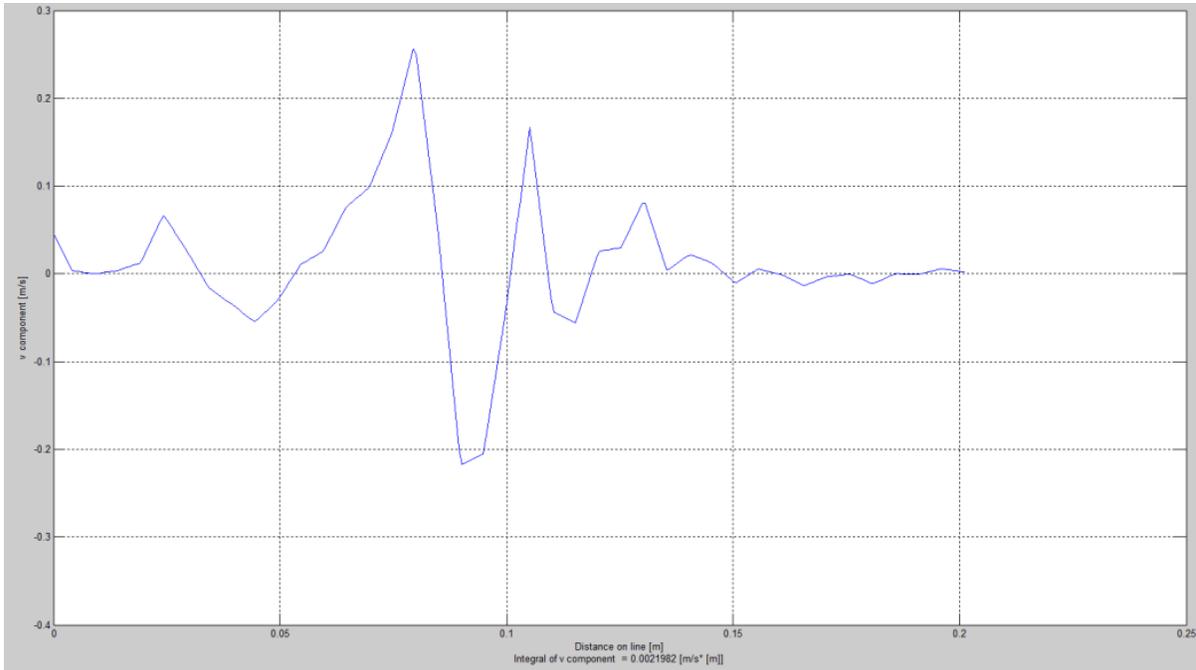


Figura 4. 26. Vector V

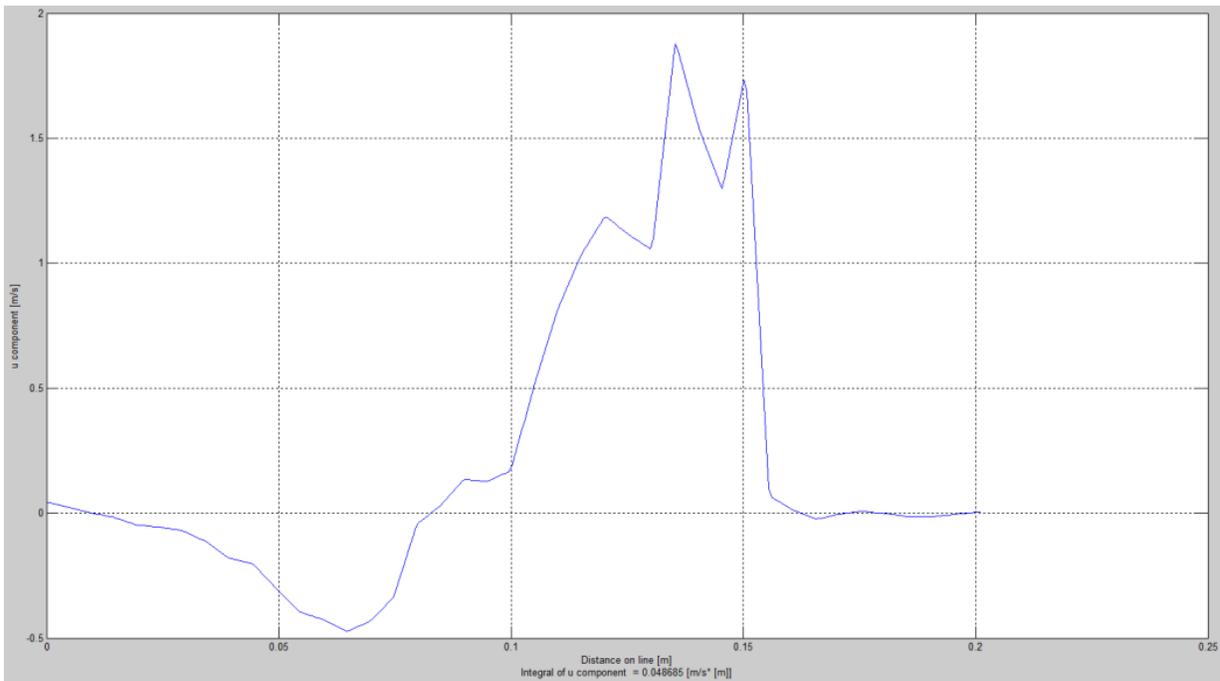


Figura 4. 27. Vector U

Se obtuvieron los promedios de los vectores U y V de todas las imágenes y se sumaron los valores de U y V para obtener el perfil de velocidades.

Los resultados presentados en las figuras 4.28 a 4.31 muestran que las velocidades de las burbujas de aire están fuertemente influenciadas por la acción turbulenta

del salto hidráulico, ya que la distribución de velocidades que se ve observa en cada imagen es caótica e irregular.

Con base a estos resultados se puede concluir que la técnica de velocimetría por trazado de burbujas (BIV) da resultados confiables para la obtención de la de las velocidades del movimiento de las burbujas que se encuentran en flujos turbulentos (salto hidráulico). Es importante mencionar, que estos resultados se validarán en proyectos futuros cuando las velocidades se obtengan con métodos físicos intrusivos, por ejemplo con una sonda de dos puntas.

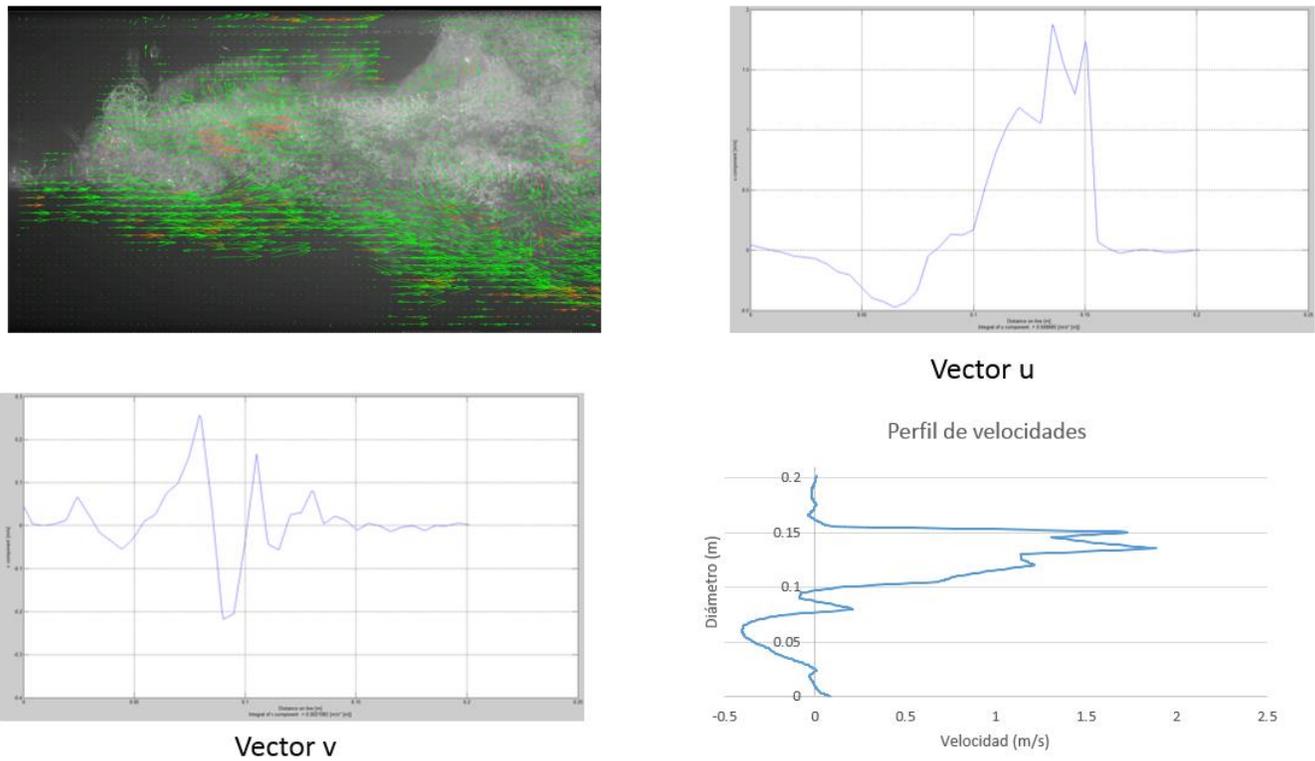
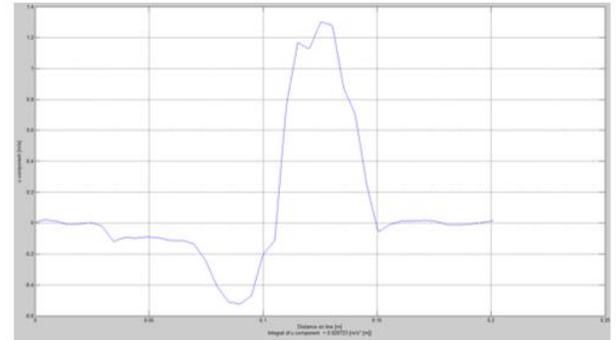
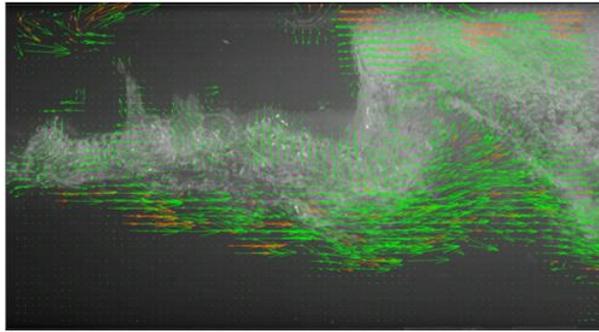
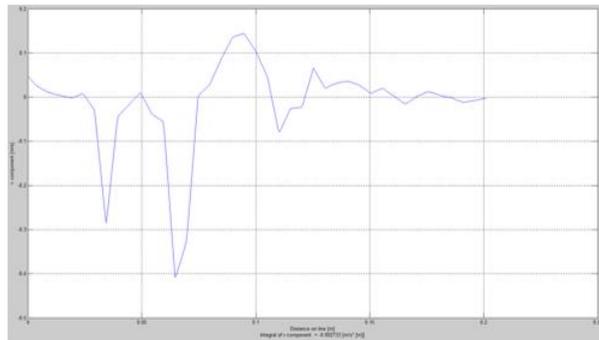


Figura 4. 28. Perfil de velocidades de las burbujas de aire fotografía 1



Vector u

Perfil de velocidades



Vector v

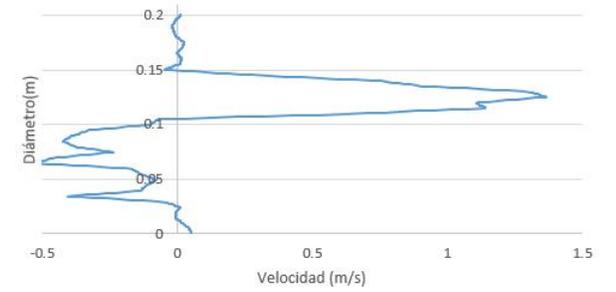
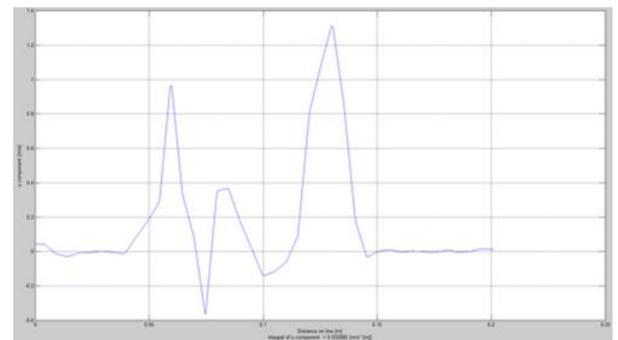
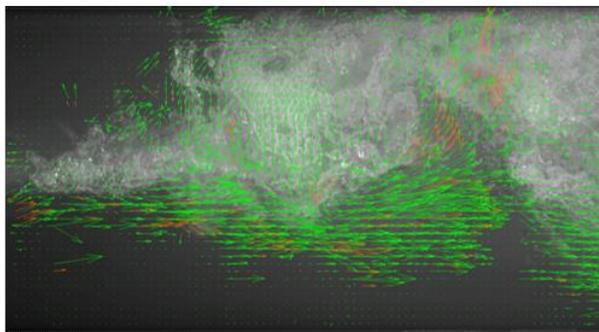
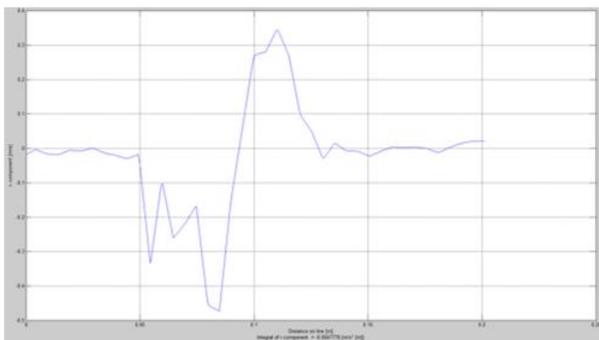


Figura 4. 29. Perfil de velocidades de las burbujas de aire fotografía 2



Vector u

Perfil de velocidades



Vector v

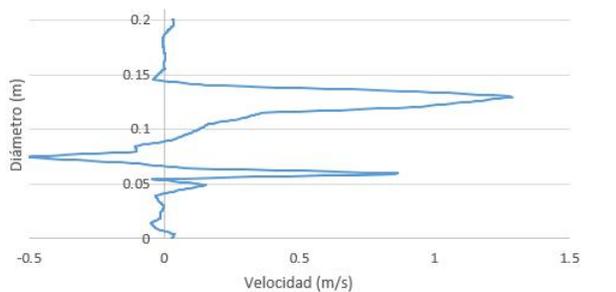
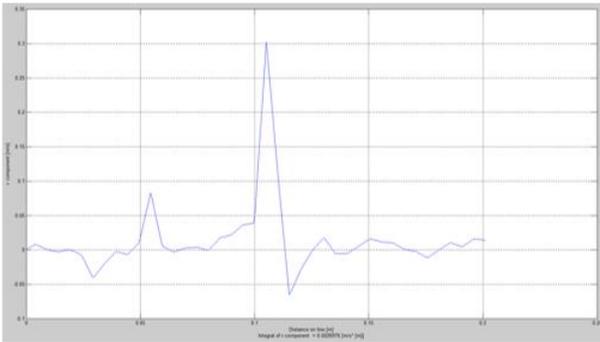
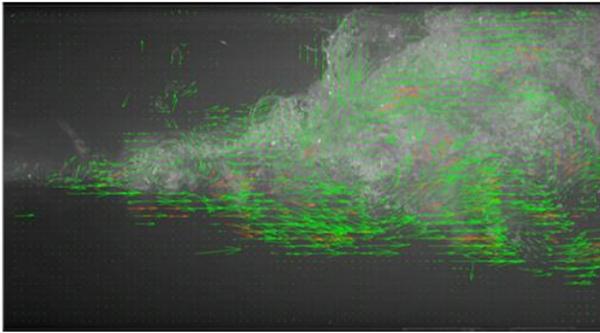
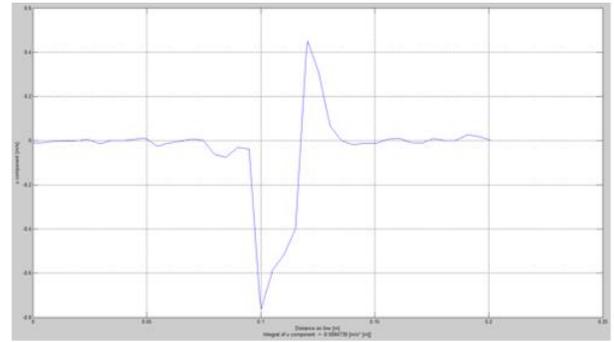


Figura 4. 30. Perfil de velocidades de las burbujas de aire fotografía 3



Vector v



Vector u

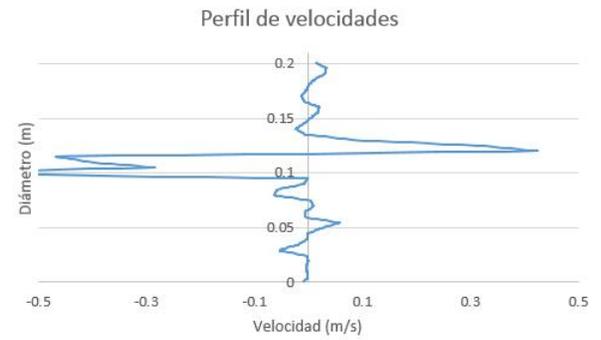


Figura 4. 31. Perfil de velocidades de las burbujas de aire fotografía 4

Capítulo 5 Conclusiones

- En el laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se diseñó y construyó un dispositivo experimental de tubería transparente en la sección de medición, para aplicar la técnica no-intrusiva de velocimetría de burbujas mediante imágenes digitales, con el propósito principal de investigar la hidrodinámica del flujo agua – aire en la zona turbulenta de un salto hidráulico que sella o que llena la tubería, y que ocurre en el extremo de aguas abajo de una bolsa de aire atrapada en un conducto cerrado con pendiente descendente.
- A pesar de que existen varias investigaciones sobre el salto hidráulico en conductos circulares, existe todavía una gran incertidumbre sobre la hidrodinámica que se presenta en la zona turbulenta del salto. Estas limitaciones, se deben a la complejidad del flujo, compuesto por la mezcla de agua y aire que viaja a altas velocidades. La naturaleza caótica del flujo representa un reto crucial para la correcta adquisición de datos confiables, incluso para los equipos más avanzados actualmente.
- En este sentido, esta investigación incorporó la implementación de una técnica de medición no intrusiva, conocida como velocimetría por trazado de burbujas (BIV por sus siglas en inglés). La cual fue desarrollada para su aplicación en un dispositivo experimental construido en el laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los resultados permitieron elucidar la naturaleza del campo de velocidades bajo distintas condiciones de gasto y pendiente en una tubería a presión, permitiendo la caracterización del flujo al interior del conducto. Los resultados obtenidos confirman que bajo condiciones hidrodinámicas con turbulencia y contenido de aire, la técnica de trazado de burbujas es una herramienta muy útil para la estimación de campo de velocidades en modelos de laboratorio.
- Para la medición del campo de velocidades se utilizó la técnica de velocimetría por trazado de burbujas (BIV) que tiene como base el seguimiento del desplazamiento de las burbujas en dos imágenes consecutivas, las cuales están separadas temporalmente por un pequeño intervalo de tiempo. El BIV aporta las ventajas de proporcionar valores puntuales en una dirección dada; es un método no invasivo, ya que no introduce ningún elemento en el flujo que altere su comportamiento y finalmente, con esta técnica se pueden determinar las velocidades en una región con alto contenido de aire.

- El procesamiento de imágenes se realizó con el programa de acceso libre “PIVlab”, que es una herramienta de software para medir velocidades en fluidos. Es un código abierto, fácil de usar.

5.1 Futuras líneas de investigación

Tomando en cuenta los resultados generados en este trabajo, es fundamental continuar con los esfuerzos integrales que combinen resultados de investigaciones experimentales y numéricas. En consecuencia existen muchas líneas de investigación que pueden continuarse a fin de tener un panorama más completo del funcionamiento hidráulico de los conductos que trabajan a presión con aire atrapado, entre ellas están:

- Validar los resultados de las mediciones de perfil de velocidades con el método BIV con respecto a un método intrusivo, como el medidor de sonda de 2 puntas que se utiliza para medir la concentración de aire en el flujo y la velocidad de las burbujas.
- Trabajar con diferentes modelos físicos para comparar la variabilidad del campo de velocidades.
- Incrementar las pruebas en tuberías con pendientes descendentes más pronunciadas para ratificar los resultados.

Referencias

- Ahmed, A A, Ervine, D A, y McKeogh, E J (1984), The process of aeration in closed conduit hydraulic structures, Proceedings of a Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, por H Kobus, Technische Akademie Esslingen, Alemania, 4(13), 1-11.
- Alvarez Celso I.J. (2013), Estudio sobre el comportamiento hidrodinámico de un tanque amortiguador, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Balutto, A (1996), Air valve technology reviewed, Introducing controlled air transferred technology, VENT-O-MAT, <http://internationalvalve.com>
- Balutto, A (1998), The application of controlled air transfer technology to new and existing pipeline systems, <http://www.ventomat.com>
- Brown, R J (1968), Water column separation at two pumping plants, Journal of Basic Engineering, ASME, 90(4), 521-531.
- Carmona, R, Sánchez, A, Carmona G, y Sánchez, J A (1994), Control de presiones transitorias negativas mediante ingreso de aire. Comparación de cálculos numéricos con medidas en campo, XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile.
- Corcos, G (2003), Air in water pipes: A manual for designers of spring-supplied gravitydriven drinking water rural delivery systems. Agua para la vida, 2a ed, www.aplv.org.
- Corcos, G (2005), Aire en tuberías de agua. Agua para la vida, 2a ed, www.aplv.org.
- Edmunds, R C (1979), Air binding in pipes, Journal AWWA, Water Technology /Distribution, 273-277.
- Edmunds, R C (1979), Air binding in pipes, Journal AWWA, Water Technology / Distribution, 273-277.
- Ervine, D A (1998), Air entrainment in hydraulic structures: a review, Proc Instn Civ, Engrs Wat, Marit and Energy, 130, sep, 142-153.

- Ervin, R A, McKeogh, E, y Elsayy, E M (1980), Effect of turbulence intensity on the rate of air entrainment by plunging water jets, *Proc Instn Civ Engrs*, 69(2), 425-445.
- Escarameia, M (2007), Investigating hydraulic removal of air from water pipelines, *Water Management ICE 160(WM1)*, 25-34.
- Escarameia, M, Dabrowski, C, Gahan, C, y Lauchlan, C (2005), Experimental and numerical studies on movement of air in water pipelines, HR Wallingford reporte SR661.
- Falvey, H T (1980), Air-water flow in hydraulic systems, Bureau of Reclamation, Engineering monograph, 41.
- Fok, T K (1987), A contribution to the analysis of energy losses in transient pipe flow, tesis de doctorado, Universidad de Ottawa, Canadá.
- Fuertes, V S (2001), Transitorios hidráulicos con aire atrapado, tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, España.
- Gahan, C M (2004), A review of the problem of air release/collection in water pipelines with in-depth study of the effects of entrapped air on pressure transients, tesis, Department of Civil Engineering, Universidad de Liverpool, Reino Unido.
- González, C A, y Pozos, O (2000), Análisis experimental del ingreso de aire en un acueducto, tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Gutiérrez C (2012), Caracterización hidrodinámica de flujos turbulentos por medio de la técnica de trazado de burbujas. Tesis de Maestría, Posgrado de Ingeniería UNAM.
- Haindl, K (1957), Hydraulic jump in closed conduits, *Proceedings of the 7th International Association for Hydraulic Research Congress*, Lisboa, 2(D32), 1-12.
- Hashimoto, K, Imaeda, M, y Osayama, A (1988), Transients of fluid lines containing and air pocket or liquid column, *Journal of Fluid Control*, 18(4), 38-54.

- Jönsson, L (1985), Maximum transient pressures in a conduit with check valve and air entrainment, proceeding of the International Conference on the Hydraulics of Pumping Stations, British Hydromechanics Research Association, Manchester, 55-76.
- Kalinske, A A, y Bliss, P H (1943), Removal of air from pipelines by flowing water, ASCE, 13(10), 480-482.
- Kalinske, A A, y Robertson, J M (1943), Closed conduit flow, ASCE, 108, 1453-1516.
- Kenn, M J, y Zanker, K J (1967), Aspects of similarity for air-entraining water flows, Nature, 213(5071), 59-60.
- Kent, J C (1952), The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes, tesis doctoral, Universidad de California, Berkley, California, EUA.
- Lane, E W, y Kindsvater, C E (1938), Hydraulic jump in enclosed conduits, Engineering Oews Record, dic 29, 815-817.
- Ochoa, L H (2005), Modelación de aire atrapado en flujo de agua en conductos, tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Pedrozo-Acuña A., (2011=). Introducción a la morfodinámica costera. Serie Docencia, Instituto de Ingeniería, ISBN.
- Pozos, Fairuzov, Sánchez, Rodal (2012), Manual de análisis de la problemática del aire atrapado en acueductos para mejorar su eficiencia., Serie Manuales Publicación Arbitrada SM 13, Instituto de Ingeniería UNAM.
- Pozos, O (2002), Desarrollo de un programa de cómputo para detectar las posibles zonas de acumulación de aire en acueductos, y ejemplos de su aplicación, tesis de maestría, DEPMI, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Pozos, O (2007), Investigation on the effects of entrained air in pipelines, tesis doctoral, Universidad de Stuttgart, Alemania.

- Pozos, O (2008), Location of air pockets likely to accumulate at high points of pipeline systems, 1st International Water Association Mexico National Young Water Professionals Conference, Mexico, abr, 9-11.
- Rodal, E A, Alarcón, F, Guevara, Y, y Guevara M (1983), Velocimetría Laser, tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Rodal, E A, Carmona, R, González, C A, y Pozos, O (2000), Aumento de la pérdida de carga en conducciones debido a aire atrapado, XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Córdoba, Argentina, 583-592.
- Ryu, Y., Chang, K A., and Lim, H.J., (2005). "Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater. "Measurement Science and Technology, 16, 1945-1953.
- Smith, C D, y Chen, W (1989), The hydraulic jump in a steeply sloping square conduit, Journal of Hydraulic Research, 27(3) 385-399.
- Stahl, H, y Hager, W H (1999), Hydraulic jump in circular pipes, Canadian Journal of Civil Engineering, 26, 368-373.
- Thielicke W (2014), The Flapping Flight of Birds, Analysis and Application, Tesis Doctoral, Universidad de Groningen, Países Bajos.
- Thomas, N H (1982), Air demand distortion in hydraulic models: experimental evidence of bi-modal structure in air entraining flows and scaling analysis of detrainment with special application to siphon priming, International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, BHRA, Coventry, Inglaterra.
- Veronese, A (1937), Sul motto delle bolle d'aria nelle condotte d'acqua, Estrato dal fascicolo X, XIV, oct, pp XV.
- Willer CE and Gharid M (1991). Digital Image velocimetry.
- Zukoski, E E (1966), Influence of viscosity, surface tension and inclination on motion of long bubbles in closed tubes, J of Fluid Mechanics, 25(4), 821-837.