



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

RECOMENDACIONES PARA REDUCIR FUGAS
DE AGUA EN REDES

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)

PRESENTA:

Roberto Carlos Vargas Raymundo

Director: Dr. Rafael B. Carmona Paredes



Ciudad Universitaria, D. F.

2009

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Gabriel Échavez Aldape

Secretario: Dr. Ramón Domínguez Mora

Vocal: Dr. Rafael Bernardo Carmona Paredes

1^{er}. Suplente: M. I. Víctor Franco

2^{do}. Suplente: Dr. Oscar Fuentes Mariles

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería, UNAM

Tutor de Tesis:

Dr. Rafael Bernardo Carmona Paredes

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Gracias al Dr. Rafael Bernardo Carmona Paredes por su atención, asesoría y dirección en el desarrollo de esta tesis.

A los integrantes del jurado, Dr. Gabriel Échavez Aldape, Dr. Ramón Domínguez Mora, M.I. Víctor Franco y Dr. Oscar Fuentes Mariles, por su revisión, comentarios, y sugerencias que enriquecieron este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a su División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, por la oportunidad que me brindo para una mejor formación profesional.

A mis profesores, amigos y compañeros que de una u otra manera me apoyaron y ayudaron durante mis estudios.

Agradezco al Grupo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería, por permitirme colaborar y aprender con ustedes, además del apoyo económico que me otorgaron, en especial a Alejandro Sánchez Huerta y Eduardo Rodal Canales por sus consejos, enseñanzas, comentarios y apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada, para poder realizar mis estudios de maestría.

A mi familia, por su paciencia, su compañía, motivación y respaldo en la vida.

“Recomendaciones para reducir fugas de agua en redes”

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
II SOBRE EL CONTROL DE PRESIONES EN LA RED	7
II.1 Pruebas de laboratorio	7
II.1.1 Descripción de la instalación experimental	7
II.1.2 Operación de la instalación experimental	10
II.2 Pruebas en tubos con fisuras y ranuras longitudinales	11
II.3 Pruebas en piezas recuperadas y piezas especiales	22
II.4 Sectorización	33
II.5 Ejemplos de la división en sectores	35
II.5.1 Resultados obtenidos en algunos sectores de la Ciudad de México y de Hermosillo, Sonora	35
II.5.2 Fraccionamiento Burgos, Cuernavaca, Morelos	39
II.5.3 Colonia San José del Jaral, Atizapán, Estado de México	40
III MÉTODOS Y EQUIPOS DE DETECCIÓN DE FUGAS EN TUBERÍAS	44
III.1 Técnicas de detección y localización de fugas	44
III.1.1 Métodos físicos	45
III.1.1.1 Equipos no acústicos	45
III.1.1.2 Equipos acústicos	52
III.1.2 Métodos de detección por software	58
III.2 Mediciones experimentales con equipos localizadores en materiales no metálicos	59
III.2.1 Mediciones experimentales de la velocidad de onda	61
III.2.2 Medición de la rapidez de atenuación de la señal producida por una fuga	65
III.2.3 Localización de una fuga con equipo comercial	67
IV CONCLUSIONES	73
REFERENCIAS	75
ANEXO	79

INTRODUCCIÓN

Dada la importancia de reducir al máximo las pérdidas físicas de agua en los sistemas de abastecimiento, tanto de redes de distribución como en acueductos, y detectar con precisión la llamada agua no contabilizada, se han desarrollado técnicas que permiten detectarlas y establecer un control para disminuirlas.

Frecuentemente, los volúmenes de agua (no medida o no facturada) que se pierden principalmente por fugas son de tal magnitud que justifican considerar y llevar a cabo programas y nuevas técnicas para la localización y reparación de las mismas. De acuerdo a estudios realizados en México, desde 1990, los volúmenes promedio estimados de agua perdida por fugas son del 30 al 40 % del agua que se suministra en las ciudades. Y resulta más que importante destacar que no “existe” suficiente agua para extraer de las fuentes.

Una de las operaciones más importantes en el mantenimiento de los sistemas de distribución es la reparación de fugas. Por otro lado, la complejidad de las redes de distribución ha incrementado la necesidad de revisar fallas en las tuberías.

Las fugas de este líquido suelen ocurrir en las uniones de tuberías, las válvulas, los codos y roturas de sus tuberías, y pueden deberse al agrietamiento transversal, aplastamiento o agrietamiento longitudinal de las tuberías, la corrosión, uniones mal hechas en los tubos o la falla de las válvulas.

Si bien en las redes de agua potable no se puede evitar que existan fugas, es necesario llevar a cabo acciones permanentes con el fin de disminuir el número de fugas y su caudal.

La gestión de presiones en las redes de distribución de agua potable es reconocida internacionalmente como una de las actividades clave para reducir pérdidas de agua y la frecuencia de que fallen las conducciones y conexiones domiciliarias. En la actualidad existen avances importantes en el desarrollo de métodos prácticos para comprender y predecir como las fugas, la periodicidad de rotura en los sistemas de distribución y ciertos aspectos de consumo, están influenciadas por la presión en la red.

Los sistemas de distribución de agua potable son diseñados para que aseguren una presión mínima durante su operación las 24 horas del día, la cual incluye variaciones de consumo con periodos de baja demanda durante la noche y parte de la mañana, así como picos también en la mañana y tarde, lo que lleva a que la presión mínima generalmente se alcanza sólo en ciertos puntos críticos de la red que, por su posición altimétrica, su distancia de las fuentes de alimentación, la combinación de ambas o cuando el consumo es alto, generan restricciones hidráulicas al funcionamiento del sistema; por lo tanto gran parte del día y del sistema de distribución, éste está sujeto a presiones excesivas.

Junto con la gestión de presiones, otra de las acciones recomendadas para incrementar la eficiencia consiste en reducir las fugas en las redes de distribución. Sin embargo, muchas de ellas no son visibles, por lo que resulta indispensable contar con equipos y/o métodos detectores de fugas.

Al respecto se han realizado múltiples investigaciones y se ha encontrado que uno de los equipos detectores con mayor potencialidad es uno de tipo acústico, denominado correlador, que localiza la fuga a partir de la comparación de las señales de ruido provocado por la fuga, observado simultáneamente en al menos dos sitios de la red. Existe una gran cantidad de reportes en los que estos aparatos funcionan adecuadamente para tuberías metálicas, en cambio en tuberías de materiales no metálicos, requieren un manejo especial para que puedan operar correctamente.

Con el propósito verificar la efectividad del control de presiones, así como para ensayar y determinar las técnicas para detectar fugas en las tuberías no metálicas, se construyeron en el Laboratorio de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, dos instalaciones experimentales; una para estudiar la relación entre la presión interna de la red y el gasto de fuga, y otra que permite examinar los procedimientos para detectar fugas en tuberías de PVC, Polietileno de Alta Densidad y Asbesto-Cemento (fibrocemento), que son materiales ampliamente usados en México en las redes de distribución de suministro de agua potable.

Se sabe que el mayor problema que se tiene es el registro adecuado de señales en tuberías flexibles, la caracterización de los ruidos generados por una fuga en este tipo de tuberías es complicada. La eficiencia de los métodos acústicos para detectar fugas depende de varios factores, entre ellos: tipo, tamaño y profundidad de la tubería; tipo y tamaño de la fuga; tipo del suelo, sistema de presión, interferencia de ruidos; y sensibilidad y rango de frecuencia de los equipos detectores.

La posición de la fuga en tuberías de distribución de agua enterradas, puede ser determinada por medio de una estimación precisa del retardo en el registrado de dos señales acústicas. Mediante el uso de un modelo para la propagación de ondas en tuberías plásticas, varios estimadores del tiempo de retardo que utilizan la correlación cruzada han sido comparados en lo que respecta a su habilidad de localizar una fuga en tuberías plásticas. Por otra parte, la efectividad de la técnica de correlación (en tuberías plásticas) también depende del tipo de sensores usados y su sensibilidad.

Se ha encontrado que el diámetro y tipo de material de la tubería tienen un efecto significativo en la atenuación de la señal del ruido de la fuga en la tubería. Por ejemplo, en tuberías de metal las señales del ruido que viajan a través de ellas son más perceptibles que las señales que viajan en tuberías plásticas. A mayor diámetro de la tubería, mayor es la atenuación y por tanto más difícil de detectar el ruido de las fugas. Estos aspectos también afectan la frecuencia predominante de la señal del ruido. En tuberías de diámetros grandes y no muy rígidas predominan las señales de baja frecuencia, las cuales son interferidas fácilmente con vibraciones de baja frecuencia de las bombas y del tráfico vehicular.

El objetivo fundamental del presente trabajo es resaltar la importancia de ejercer un control de presiones como una medida para reducir las fugas en redes de distribución de agua potable, con énfasis en redes tan deterioradas como algunas encontradas en México. La relación entre presiones y fugas lleva a que el control de las presiones sea indispensable, pues de otra suerte se vuelven ineficaces, o incluso totalmente inútiles, todas las otras medidas que se tomen para aumentar la eficiencia de las redes de distribución de agua. Eso incluye también la aplicación de cualquiera de las técnicas para detectar y localizar fugas.

Tanto las técnicas de detección de fugas como la regulación de la presión en las redes de agua, son temas que han sido tratados por expertos en campo y laboratorio; producto de esas investigaciones resultaron gran cantidad de artículos. En el primer capítulo de este documento se exponen las ideas obtenidas tras una revisión bibliográfica de la literatura técnica disponible sobre éstos temas.

El capítulo dos presenta una instalación experimental construida para estudiar la relación entre la presión y el caudal perdido a través de las fugas, su diseño y metodología para operarla, se describen las muestras analizadas y los resultados obtenidos. Incluye también algunos ejemplos de casos, en nuestro país, en los que se aplicó la gestión de presiones.

Las técnicas y los equipos habitualmente utilizados para la detección de fugas (características, variantes de ajuste, limitaciones, etc.) son tratados en el tercer capítulo. Además, se presentan análisis y resultados de las pruebas realizadas en la instalación para determinar características de las señales que permiten detectar fugas.

I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Debido a la importancia de reducir las pérdidas en los sistemas de agua potable originadas principalmente por fugas, que son de tal magnitud que explican la necesidad de realizar programas para su control, detección y arreglo de las mismas, se han hecho diversos estudios a nivel internacional para resolver o disminuir ésta problemática.

Como resultado de los estudios realizados, se han identificado cuatro acciones que se consideran fundamentales para reducir las fugas en las redes: control de presiones, velocidad de reparación en fugas visibles, programas de detección y reparación de fugas y reposición de infraestructura (figura I.1).

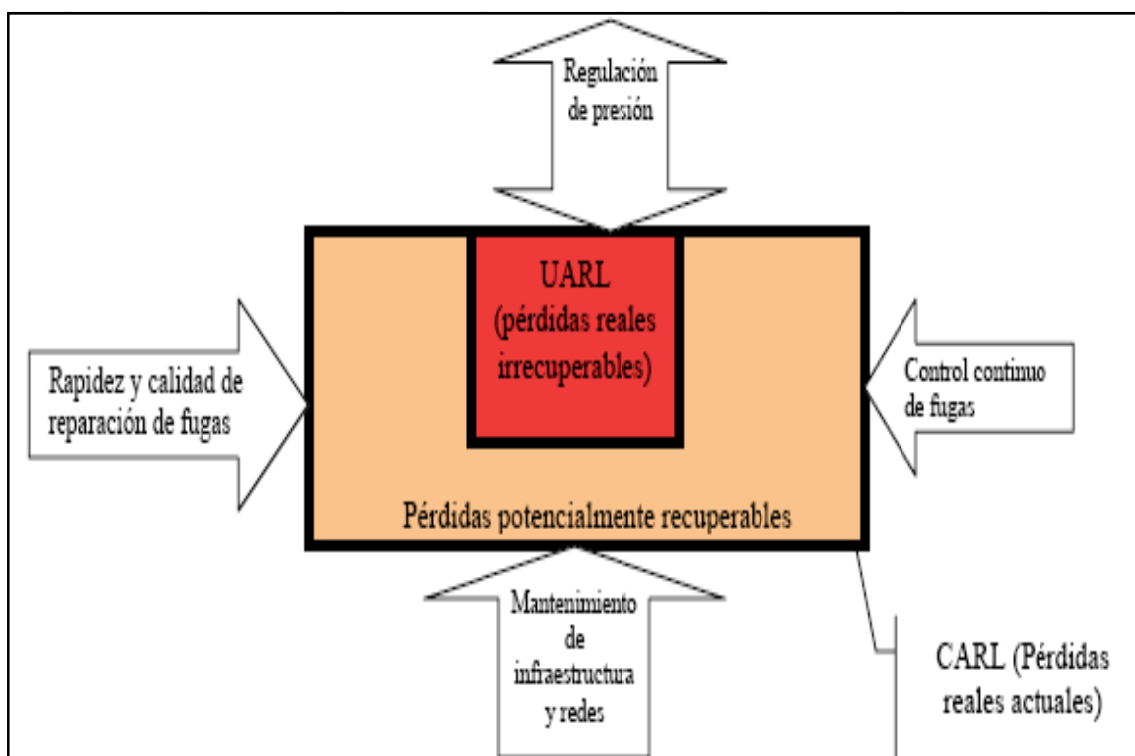


Figura I.1. Actividades básicas para el control de fugas (Lambert, 2000)

Reducir y controlar la presión en las redes de agua obedece a la relación que existe entre el gasto que se pierde en la fuga y la presión de trabajo de la conducción, así como de las condiciones de la red.

Controlar las presiones permite minimizar sus variaciones que, cuando son muy altas, reducen la vida útil de las tuberías y propician la aparición de nuevas fugas en la red; por otro lado, cuando ya existen fisuras, el gasto que sale a través de ellas es función de la presión con la que funciona la conducción, y esto se puede representar de la forma:

$$Q_{\text{fuga}} = C * h^X$$

Normalmente se considera que las fugas, siguiendo la expresión anterior, se comportan como un orificio rígido de pared delgada y varían con la raíz cuadrada de la presión, pero de acuerdo a Lambert (2000) se han encontrado valores de X obtenidos tanto en pruebas de laboratorio, con fugas fabricadas en tuberías, como en piezas dañadas extraídas de redes y en mediciones en sectores de redes en operación; dichos exponentes pueden variar entre 0.5 y 2.5. Tales valores dependen además del material de la tubería y del tipo de orificio de fuga.

En el caso de ciudades inglesas y japonesas –países que más han incursionado en este campo– después de trabajos de detección y reparación de fugas, reportan para X un valor promedio obtenido de 1.13. En redes de nuestro país, después de que algunos organismos no aceptaran la existencia de más fugas que las visibles y permitieran llevar a cabo mediciones, se han encontrado valores de X que coinciden con los reportados por ingleses y japoneses, por ejemplo, en Hermosillo y el Distrito Federal, que oscilan entre 0.9 y 1.8.

Otro factor que interviene para cuantificar el gasto perdido a través de la fuga se le atribuye al coeficiente de descarga, C de la ecuación mencionada, en la cual el número de Reynolds ejerce cierto efecto para cambiar el valor del coeficiente de descarga, pero debe señalarse que este cambio es relevante sólo para fugas de poca magnitud, cuando la velocidad de flujo es muy pequeña.

De acuerdo a las referencias consultadas, la importancia de controlar las presiones es una medida para reducir fugas, pero no sería suficiente si la infraestructura se encuentra muy deteriorada, por ello la necesidad de reparar las fugas visibles, y en su caso, aplicar campañas de detección, porque de otra forma sería como hacer nada. Controlar la presión en las redes, además de reducir el gasto que se pierde en fugas, evita continuar con la política de los “tandeos” o la variación brusca de presiones, lo que provoca el deterioro acelerado de la red (figura I.2), que puede reducir su vida útil hasta diez veces, con los respectivos costos (Yepes, 2001).

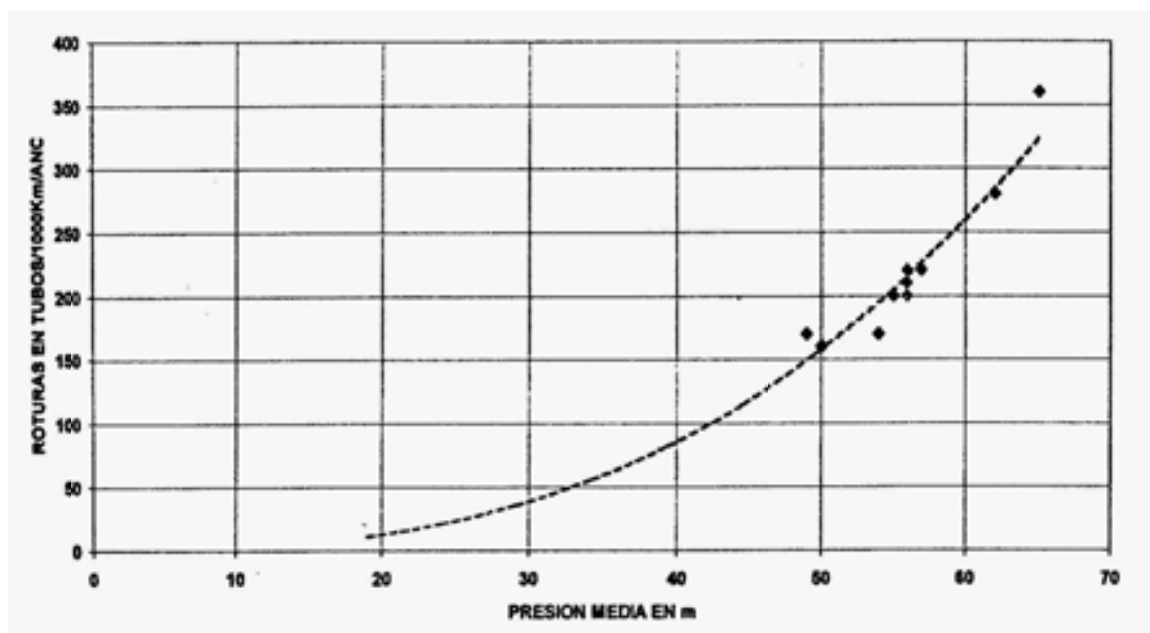


Figura I.2. Relación entre presión y frecuencia de nuevas fugas (Lambert, 2000)

Para medir la eficiencia en el suministro de agua potable y el estado de las redes, la IWA (*International Water Association*) promueve utilizar el índice ILI (*Infrastructure Leakage Index*), por sus siglas en inglés de "Índice de Fugas de la Infraestructura", que es una relación del volumen anual de las fugas reales entre las denominadas "fugas anuales reales inevitables", referidos a una presión común de comparación. Éste parámetro permite hacer un balance del agua que ingresa a la red, y establecer el nivel de los organismos relativo al tema del control de fugas y en particular su nivel real de pérdida.

Tabla I.1. Terminología para el balance de agua, según IWA (Liemberger, 2002)

Volumen suministrado al sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado facturado	Consumo medido facturado	Agua recuperada
			Consumo no medido facturado (cuota fija)	
		Consumo autorizado no facturado	Consumo medido no facturado	Agua no recuperada
			Consumo no medido no facturado	
	Pérdidas de agua	Pérdidas aparentes	Consumo no autorizado	
			Errores de medición y de manejo de información	
		Pérdidas reales	Fugas en conducción y/o distribución	
			Fugas debidas a derrames en tanques de regulación y/o almacenamiento	
Fugas en tomas ocurridas antes de la medición				

En lo relativo a la detección de fugas en la red, existen varios métodos, técnicas y dispositivos para tal efecto, entre los cuales se encuentran: aparatos auditivos, los correladores de señales, la técnica de trazado de gas y la termografía; incluso existen estudios que promueven aplicar técnicas de análisis del flujo transitorio para localizar fugas.

Se ha comprobado la validez de los métodos antes mencionados para localizar fugas en tuberías metálicas, pero dado el auge que presenta el uso de materiales no metálicos en redes actuales y futuras, es necesario verificar su utilidad para éstos casos o en cuáles se pueden aplicar.

II. SOBRE EL CONTROL DE PRESIONES EN LA RED

Como se mencionó en el capítulo anterior, una forma de reducir las fugas en las redes es mediante el control de presiones; en este capítulo se presentarán los resultados de pruebas de laboratorio realizadas para estudiar la relación entre la presión interna y el gasto que se fuga en diversos elementos de las redes de distribución, tanto en tuberías con fisuras hechas artificialmente así como en elementos extraídos de las redes durante los trabajos de sustitución de la infraestructura. De igual forma, se incluyen algunos casos de redes de nuestro país, en las que ya se controlan las presiones.

II.1 Pruebas de laboratorio

Para llevar a cabo las pruebas experimentales se construyó en el laboratorio de Hidromecánica, del Instituto de Ingeniería de la UNAM, una instalación que funcionara con caudales entre 0 a 10 lps y presiones de 0 a 4 kg/cm², intervalos representativos de los valores más frecuentes en las redes de distribución de agua potable en México.

II.1.1 Descripción de la instalación experimental

Ésta instalación consiste en un circuito cerrado de recirculación de agua con presión controlada, con tubería de 3" de diámetro de PVC hidráulico, con especificación de RD-26, alimentado por una bomba de 25 HP y su cárcamo de succión. La presión en el circuito se controla por medio de dos válvulas reguladoras colocadas a la salida de la bomba junto con otra válvula sostenedora de presión (figuras II.1, II.2 y II.3).

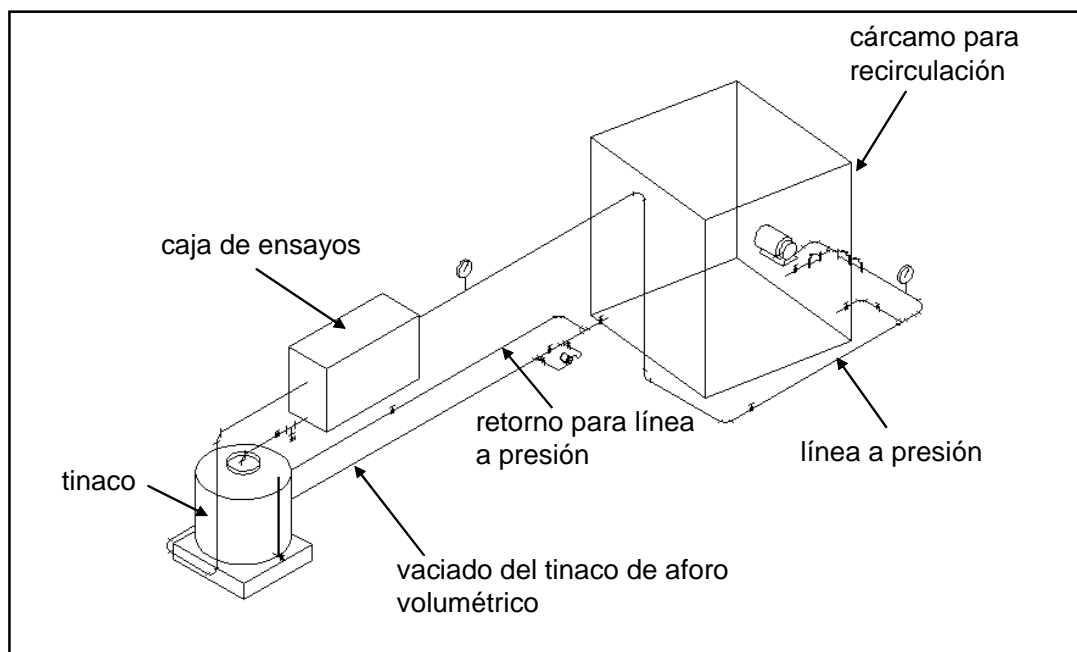


Figura II.1. Esquema isométrico de la instalación experimental

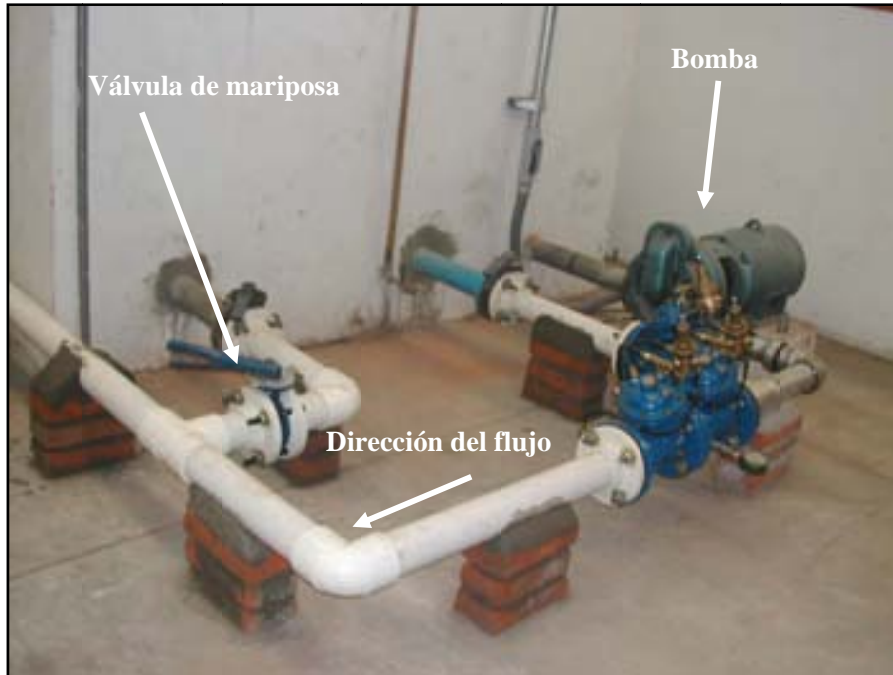


Figura II.2. Vista general de la salida del tanque

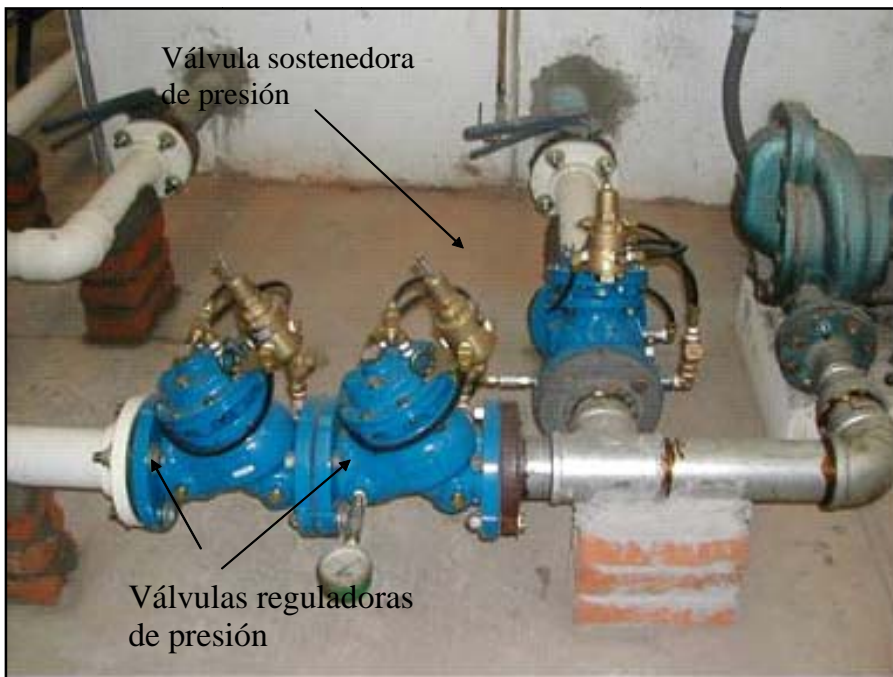


Figura II.3. Válvulas reguladoras de presión (horizontales) y sostenedora (vertical) que se colocaron en el dispositivo experimental

La sección para ensayo se encuentra ubicada entre dos bridas, dentro de una caja de acrílico, para recolectar el gasto de fuga y llevarlo a un tinaco que permita el aforo volumétrico. La presión medida para cada evento es registrada en el manómetro ubicado, sobre la tubería de 3", aguas

arriba de la caja. El nivel de la sección de ensayo se ubica por encima del tanque de aforo para permitir que el gasto de fuga se colecte por gravedad (figura II.4).



Figura II.4. Sección para ensayo



Figura II.5. Manómetro utilizado para la medición de presiones

II.1.2 Operación de la instalación experimental

La instalación emplea el tanque prismático como cárcamo para alimentar a la bomba que entrega al circuito una carga aproximada de 120 mca, a 15 lps para su ajuste y monitoreo, cada válvula tiene un manómetro conectado que permite observar las presiones a la cual trabaja. El ajuste utilizado considera una presión de entrada a la primera reguladora de 7 kg/cm^2 y a la segunda de 5.5 kg/cm^2 .

La tubería de ensayo se ubica dentro de una caja de acrílico en donde se colecta el agua fugada del espécimen en estudio, a la entrada de dicha tubería se instaló un manómetro tipo Bourdon de 4" de diámetro, con rango de 0 a 4 kg/cm^2 , donde se realizan las lecturas de presión que alimenta al espécimen en ensayo (figura II.5).

Para derivar el flujo al dispositivo de aforo seleccionado se cuenta con válvulas que seccionan, lo que permiten dirigir el flujo.

Protocolo de las mediciones

- 1) Colocar el espécimen a estudiar dentro de la caja de acrílico.
- 2) Arrancar la bomba.
- 3) Purgar el manómetro a la entrada de la caja de acrílico, que es el que nos indica la presión con la cual se realizan las pruebas.
- 4) Fijar una presión de inicio a la entrada de la zona para ensayo con ayuda de las válvulas reguladoras. Dejar aproximadamente cinco minutos para dar oportunidad a que se estabilice el flujo.
- 5) Tomar tres lecturas de tiempo corrido para igual incremento de volumen determinado en el dispositivo de aforo (se contaba con un tinaco y una cubeta graduadas), la selección del volumen depende de la magnitud del caudal fugado, seleccionando aquel que pueda medirse, es decir, el volumen a aforar se determinó estimando que cada lectura de tiempo no fuera inferior a 30 segundos, para que la incertidumbre del operador del cronómetro no afectara significativamente los resultados del experimento.
- 6) Pasar a otra presión donde las condiciones se mantuvieran constantes. Mientras se llevaba a cabo el cambio de presión se aprovechaba para vaciar la cubeta o el tanque de aforo para la toma de las siguientes lecturas.
- 7) Nuevamente se deja estabilizar el flujo y se toman las lecturas; así sucesivamente hasta terminar con el rango de presiones a estudiar que por lo general en este caso fue de 0 a 4 kg/cm^2 .
- 8) Bajar la presión a 0.5 kg/cm^2 y apagar la bomba.

II.2 Pruebas en tubos con fisuras y ranuras longitudinales

Las pruebas realizadas en la instalación experimental se dividieron en dos grupos, el primero correspondió al estudio de fugas en tubos de materiales plásticos de diferentes características, con fisuras y ranuras longitudinales (tabla II.1 y figura II.6).

Tabla II.1. Relación de pruebas realizadas, primer grupo

Prueba (#)	Descripción	Fuga en
1	Tubo de polietileno de alta densidad negro de 3/4" (diámetro interior)	fisura de 3 cm
2		fisura de 6 cm
3		fisura de 5 cm
4		ranura de 3 cm
5	Tubo azul con alma de aluminio de 3/4" (diámetro interior)	fisura de 3 cm
6		fisura de 6 cm
7	Tubo de plástico negro de 1/2" (diámetro interior), tipo conduit	fisura de 1.2 cm
8		fisura de 3 cm

Cabe aclarar que cuando se refiere a una fisura se debe entender como una grieta longitudinal de área inicial despreciable, mientras que se considera como ranura a una grieta longitudinal de área inicial no nula.

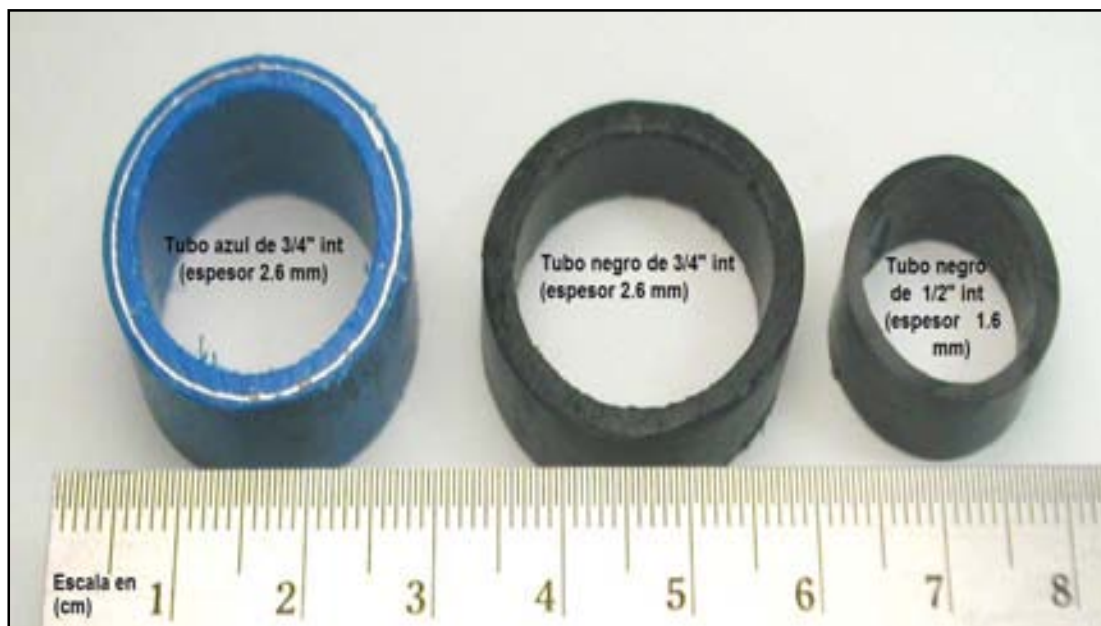


Figura II.6. Aspecto de los tubos ensayados

A continuación se presentan los resultados de estas primeras pruebas. Para cada ensayo, los datos fueron registrados en formatos como el que a continuación se presenta (ver figura II.7).


Estudio de la problemática de las acciones de reducción de fugas en las redes de agua potable y propuesta para mejorar su eficiencia.										Proyecto 5125			
Presión inicial a la descarga de la bomba		Mansómetro 1 $\frac{7.0}{1.0}$ $\frac{\text{kg/cm}^2}{\text{kg/cm}^2}$		Mansómetro 2 $\frac{5.6}{1.0}$ $\frac{\text{kg/cm}^2}{\text{kg/cm}^2}$		Mansómetro 3 $\frac{.9}{1.0}$ $\frac{\text{kg/cm}^2}{\text{kg/cm}^2}$		 Datos del tanque de alforo Perímetro = 3.5 Diámetro = 1.0540846 Área = 0.94013819		Características de la fisura: 3cm hembra con macho $\phi = 1.4$ material = PAD		Fecha 21/02/03 hora de inicio 10:30	
n	Presión (kg/cm ²)	h cm	Volumen l	Tiempo 1		Tiempo 2		Tiempo 3		Promedio (seg)	Q calculado $\frac{1}{1.5}$	Observaciones	
1	0.5		2	1'11"44	71.44	2'22"28	142.28	3'32"50	212.50	70.83	28.735	longitud inicial =	
2	1.0		2	0'38"72	38.72	1'17"66	77.66	1'55"66	115.66	38.55	51.876		
3	1.5	1		1'48"72	108.72	3'36"50	216.50	5'17"69	317.69	65.90	88.117		
4	2.0	2		2'08"03	128.03	4'07"41	247.41	6'09"91	369.91	113.30	151.355		
5	3.0	2		1'19"75	79.75	2'34"50	154.50	3'40"56	220.56	73.52	753.814		
6	3.8	3		1'04"84	64.84	2'08"40	128.40	3'12"21	192.21	64.07	436.978	longitud final =	
7													
8													
9													
10													

Figura II.7. Tabla de lecturas del ensayo # 1

Prueba # 1 (0311). Se trata de una fisura de 3 cm de largo en tubo negro de polietileno de alta densidad, diámetro interior ¾”.

Ensayo del ascenso de presión.

P(mca)	Q(ml/s)	P/P _a Q _{max}	Q/Q _{max}
5.00	28.2	0.13	0.06
10.00	51.9	0.26	0.12
15.00	88.1	0.39	0.20
20.00	151.4	0.53	0.35
30.00	253.8	0.79	0.58
38.00	436.9	1.00	1.00

**Tubo ¾" int (negro), fisura de 3.0 cm largo
(0311) exp = 1.71**

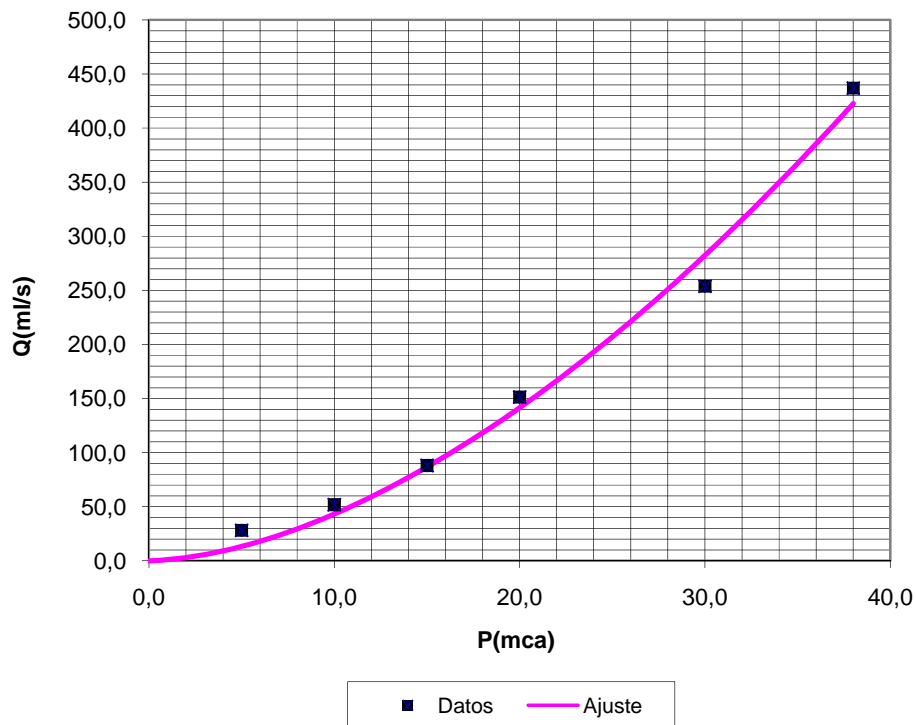


Figura II.8. Ensayo del ascenso de presión

Ajuste $Q = C h^X$
 $C = 0.85482373$
 $X = 1.7054242$

$$Q = 0.8548 \cdot h^{1.71}$$

Se repitió el ensayo y se agregaron dos ciclos consecutivos de ascenso y descenso de presión, se aprecia que existe histéresis en el comportamiento presentado por la fisura (figura II.9).

P(mca)	Q(ml/s)	P/P _{a Qmax}	Q/Q _{max}
10.00	46.0	0.26	0.15
20.00	110.0	0.53	0.35
30.00	216.4	0.79	0.69
38.00	312.6	1.00	1.00
29.50	254.4	0.78	0.81
19.70	173.2	0.52	0.55
9.50	90.0	0.25	0.29
19.00	148.5	0.50	0.48
29.50	247.3	0.78	0.79
38.00	351.9	1.00	1.13
29.50	285.0	0.78	0.91
19.00	188.3	0.50	0.60
9.00	89.0	0.24	0.28

Al realizar un ajuste al total de los nuevos datos se obtiene:

Ajuste $Q=C h^X$
 $C = 6.0175519$
 $X = 1.1006675$

$$Q = 6.0176 \cdot h^{1.10}$$

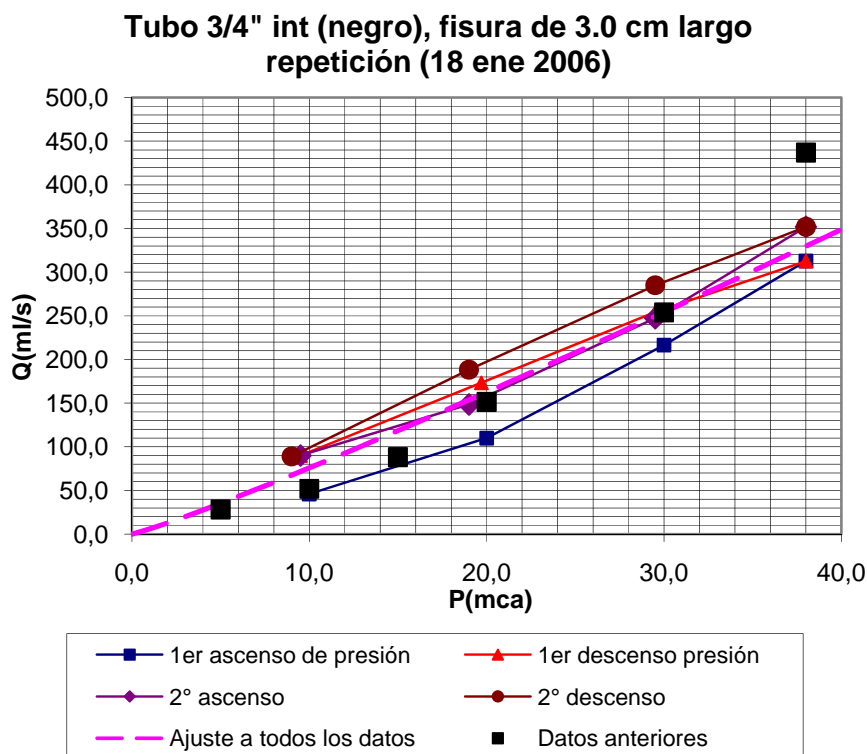


Figura II.9. Ensayo de dos ciclos ascenso-descenso de presión y su comparación con el registro anterior

En la gráfica anterior se observa que no hay un comportamiento totalmente elástico, es decir, la fisura se abre en función al incremento de presión pero al disminuirla no regresa a su estado original, al menos no de forma inmediata.



Figura II.10. Espécimen ensayado a una presión de 38 mca

El procedimiento de análisis fue igual para las demás pruebas de este grupo. Una pequeña descripción de sus características se presenta enseguida, y los resultados obtenidos se muestran más adelante, junto con los de las muestras del otro grupo (piezas especiales).

Prueba # 2 (0411). Se presenta una fisura de 6 cm de largo en tubo negro de polietileno de alta densidad, diámetro interior $\frac{3}{4}$ ".

Prueba # 3 (2001). Se refiere a una fisura de 5 cm de largo en tubo negro de polietileno de alta densidad, diámetro interior $\frac{3}{4}$ ".

Prueba # 4 (2510). Se trata de una ranura de 3 cm de largo x 1 mm de ancho en tubo negro de polietileno de alta densidad, diámetro interior ¾".

P(mca)	Q(ml/s)	P/P _a Q _{max}	Q/Q _{max}
0.00	0.0	0.00	0.00
2.00	129.0	0.13	0.34
3.00	148.0	0.20	0.39
4.00	187.0	0.26	0.49
5.80	218.0	0.38	0.57
7.30	254.0	0.48	0.66
9.00	288.0	0.60	0.75
11.00	323.0	0.73	0.84
13.80	356.0	0.91	0.93
15.10	383.0	1.00	1.00

Al realizar un ajuste a los datos se obtiene:

Ajuste $Q=C h^X$
C = 84.380945
X = 0.55465244

$$Q = 84.38 \cdot h^{0.55}$$

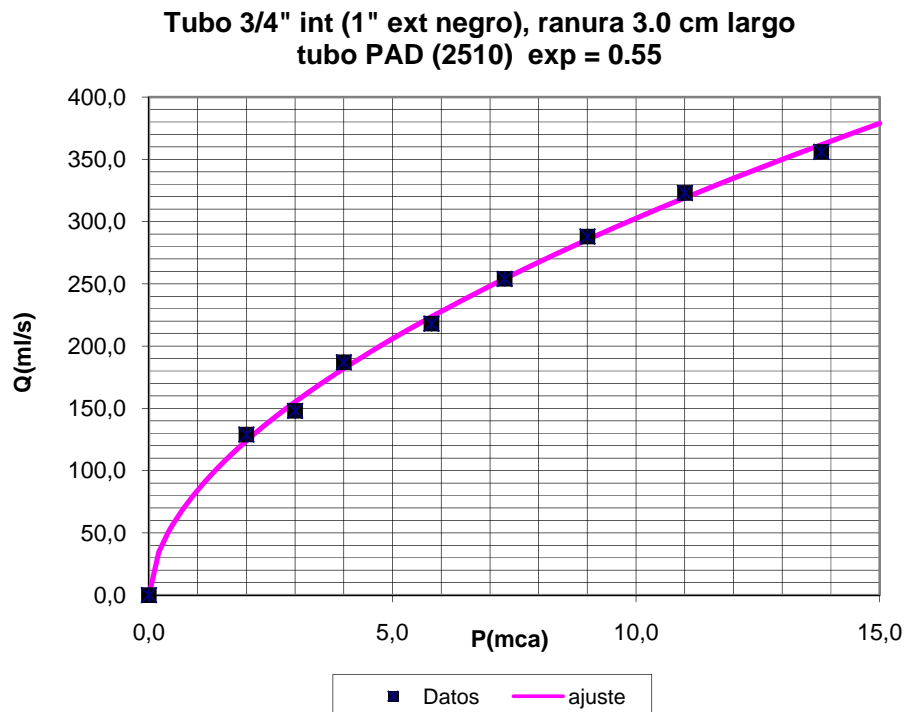


Figura II.11. Ensayo del ascenso de presión, prueba # 4

En este caso el área inicial es de 3 cm x 0.1 cm, mucho mayor al incremento de la misma por efecto de la presión, esto provoca que la ley de descarga se comporte semejante al comportamiento tipo orificio (exponente de 0.5).



Figura II.12. Espécimen ensayado en la prueba # 4 (ranura)

Prueba # 5 (0711). Se refiere a una fisura de 3 cm de largo en tubo azul de polietileno con alma de aluminio (material compuesto), diámetro interior $\frac{3}{4}$ ". El aluminio incrementa su resistencia, pero el material tiende a permanecer deformado después de aplicada cualquier carga.

Prueba # 6 (0711). Se presenta una fisura de 6 cm de largo en tubo azul de polietileno con alma de aluminio, diámetro interior $\frac{3}{4}$ ".

P(mca)	Q(ml/s)	P/P_a Q_{max}	Q/Q_{max}
4.80	52.8	0.16	0.06
10.00	109.7	0.33	0.13
20.00	328.1	0.67	0.38
30.50	816.0	1.02	0.95
19.50	575.6	0.65	0.67
10.00	331.0	0.33	0.39
5.00	191.4	0.17	0.22
10.00	301.9	0.33	0.35
20.00	554.7	0.67	0.65
30.00	859.7	1.00	1.00
19.50	594.9	0.65	0.69
9.50	344.3	0.32	0.40
5.00	198.0	0.17	0.23

La prueba inicial se reprodujo y presenta un comportamiento similar al de la fisura en el tubo de plástico negro (prueba # 4), sin embargo durante el segundo ciclo de ensayo, a diferencia del tubo negro, la curva registrada prácticamente regresa por la misma trayectoria que siguió en el ciclo anterior, esto se puede entender como que este tubo es menos elástico que el de plástico sólo.

Al realizar un ajuste a los datos se obtiene:

Ajuste $Q=C h^X$
C = 27.026091
X = 0.99968101

$$Q = 27.0261 \cdot h^{1.0}$$

**Tubo 3/4" int (azul), fisura de 6.0 cm largo
 repetición (26 ene 2006)**

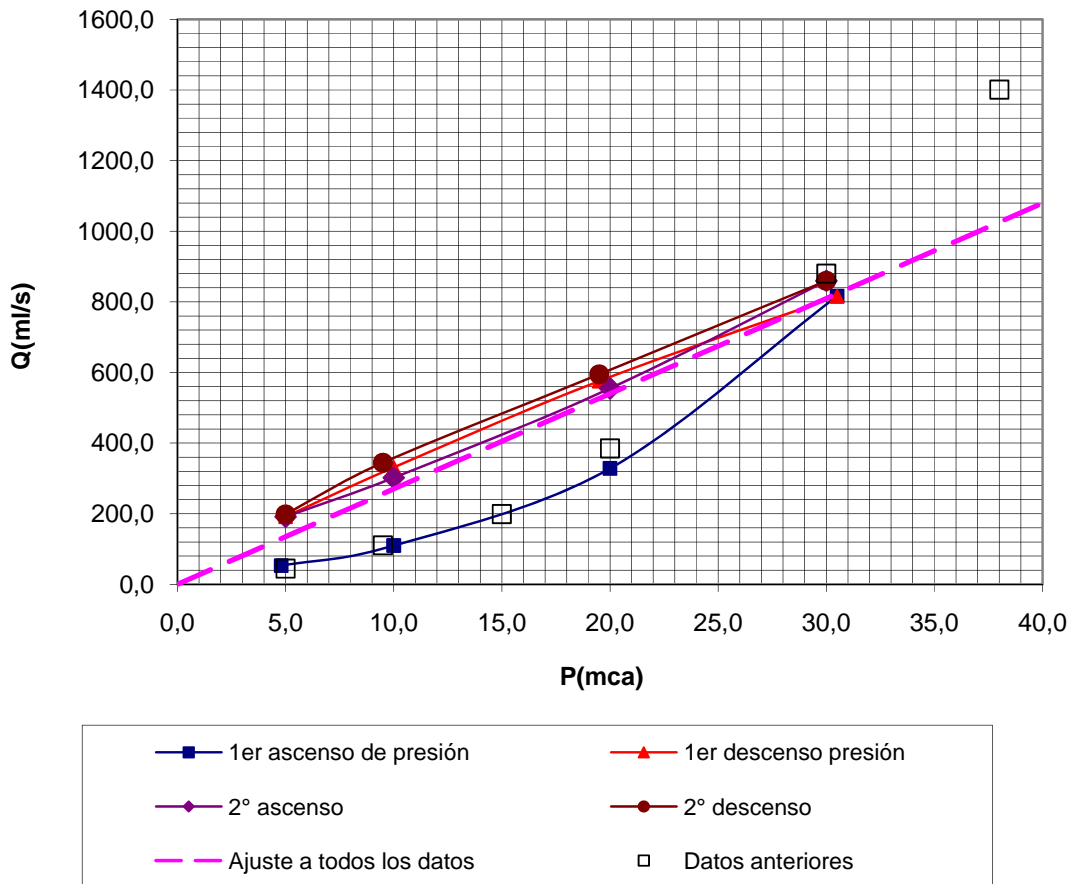


Figura II.13. Ensayo de dos ciclos ascenso-descenso de presión, prueba # 6

Hay que notar que en estas pruebas el caudal fugado es menor que el registrado para la misma longitud de fisura en el tubo negro lo que puede explicarse en función de que existe mayor resistencia a la deformación de las paredes adyacentes a la fisura en este tubo azul.



Figura II.14. La fisura en este material muestra una deformación permanentemente después del ensayo

Prueba # 7 (1910). Se trata de una fisura de 1.2 cm de largo en tubo negro tipo conduit, diámetro interior 1/2”.

Prueba # 8 (0911). Se presenta una fisura de 3 cm de largo en tubo negro tipo conduit, diámetro interior 1/2”. Para este tubo se aprecia una descarga mucho mayor que para el tubo de 3/4”.

Ensayo del ascenso de presión.

P(mca)	Q(ml/s)	P/P_a Q_{max}	Q/Q_{max}
5.00	54.437	0.13	0.03
10.25	200.000	0.27	0.12
15.00	384.638	0.39	0.23
20.00	650.871	0.53	0.39
29.50	1183.977	0.78	0.71
38.00	1669.785	1.00	1.00

Al realizar un ajuste a los datos se obtiene:

Ajuste $Q = C h^X$
 C = 6.3164589
 X = 1.5369954

$$Q = 6.316 \cdot h^{1.54}$$

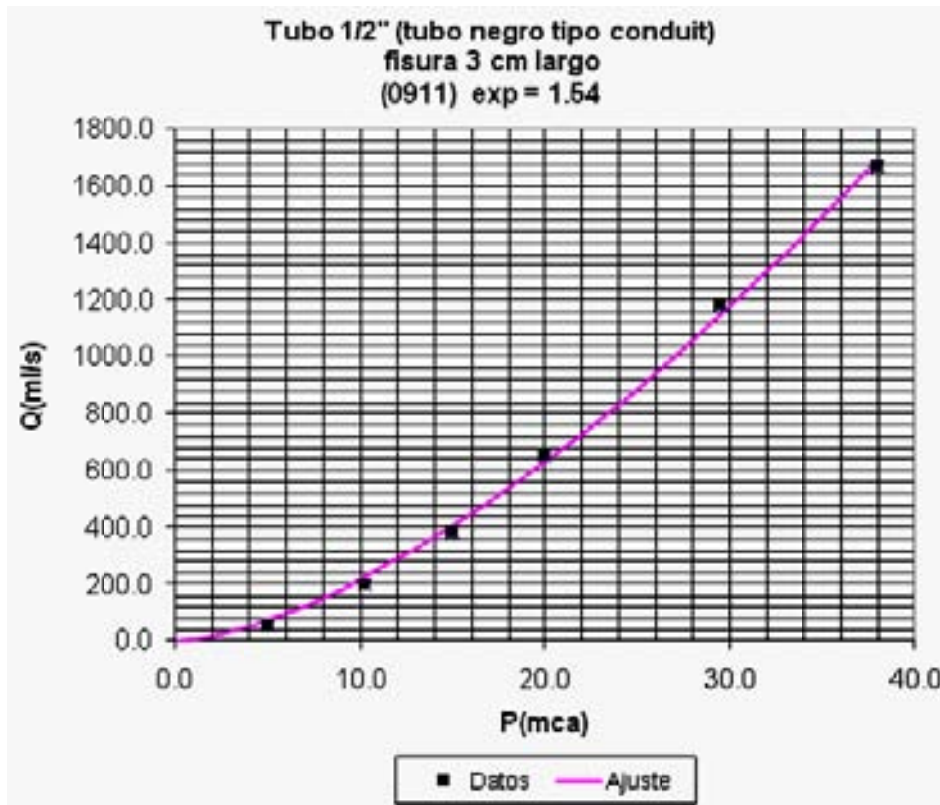


Figura II.15. Ensayo de ascenso de presión

Se repitió el ensayo y se agregaron dos ciclos consecutivos de ascenso y descenso de presión, se observa que existe histéresis en el comportamiento registrado por la fisura. Este tipo de tubo presenta una descarga mucho mayor que para el tubo de $\frac{3}{4}$ ". El grosor de la pared es mucho menor y está más expuesto a deformarse

P(mca)	Q(ml/s)	P/P_a Q_{max}	Q/Q_{max}
5.50	79.1	0.22	0.08
10.00	197.4	0.39	0.19
15.00	394.1	0.59	0.38
20.00	642.2	0.78	0.63
25.00	919.0	0.98	0.90
19.00	751.2	0.75	0.73
14.00	524.7	0.55	0.51
9.00	357.4	0.35	0.35
4.00	158.7	0.16	0.15
10.00	332.9	0.39	0.32
15.50	545.0	0.61	0.53
20.00	740.3	0.78	0.72
25.50	1026.2	1.00	1.00
19.00	793.3	0.75	0.77
14.50	623.1	0.57	0.61
9.50	394.9	0.37	0.38

Al realizar un ajuste al total de los nuevos datos se obtiene:

Ajuste $Q=C h^X$
C = 24.334037
X = 1.1418599

$$Q = 24.334 \cdot h^{1.14}$$

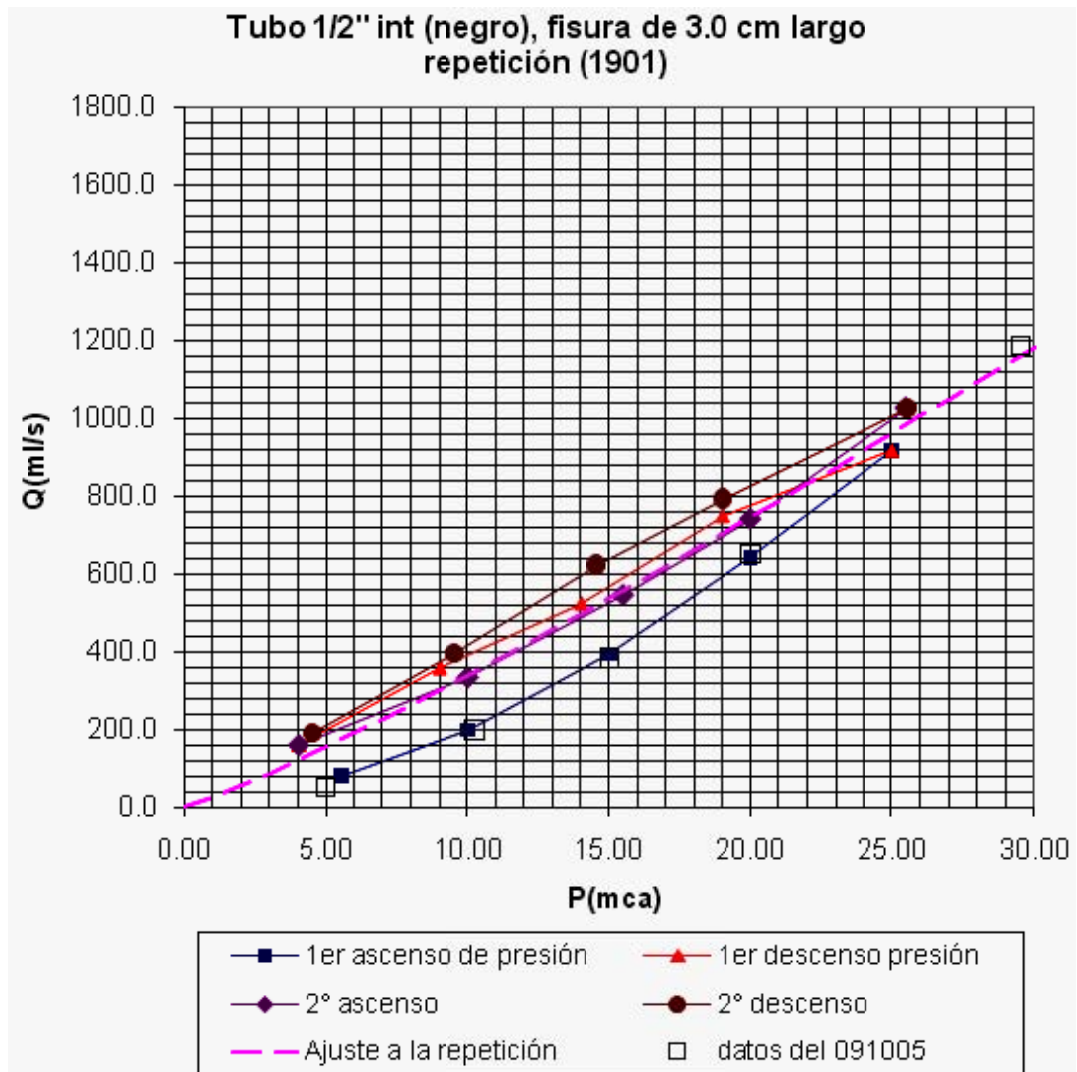


Figura II.16. Ensayo de dos ciclos ascenso-descenso de presión y su comparación con el registro anterior



Figura II.17. Espécimen tipo conduit durante el ensayo a 38 mca

II.3 Pruebas en piezas recuperadas y piezas especiales

El siguiente grupo de pruebas realizadas (pruebas 9 a 19) se clasificaron en dos tipos:

- Piezas recuperadas en redes de distribución (a nivel de tomas domiciliarias, que es donde se presenta el mayor porcentaje de fugas) del Distrito Federal y
- Piezas especiales tales como: abrazaderas, bridas y juntas.

A continuación se presenta la relación de este conjunto de pruebas, así como las fotografías en las cuales se muestran aspectos de cada pieza ensayada y sus resultados.

Tabla II.2. Relación de pruebas realizadas, segundo grupo

Prueba (#)	Descripción	Fuga en
9	Pza Recuperada 1	Tubo ½"
10	Pza Recuperada 2	Tubo ½"
11	Abrazadera floja	Tubo ½"
12	Pza Recuperada 3	Tubo ½"
13	Pza Recuperada 4	Tubo ½"
14	Junta entre bridas flojas	Tubo 3"
15	Junta con corte radial (entre bridas)	Tubo 3"
16	Pza Recuperada 5	Tubo ½"
17	Pza Recuperada 6	Tubo ½"
18	Goma Mordida	Tubo 3" Asbesto
19	Junta Gibault rota	Unión 4" Asbesto-Fe



Figura II.18. Piezas recuperadas y piezas especiales



Figura II.19. Piezas recuperadas y piezas especiales

Prueba # 9 (091105). Se trata de una conexión entre tubos de ½" galvanizados y manguera de polietileno negro tipo conduit; tipo de falla: fisura en la parte de polietileno.

P(mca)	Q(ml/s)	P/P _a Q _{max}	Q/Q _{max}
3.00	284.5	0.25	0.33
6.00	438.2	0.50	0.51
8.00	572.9	0.67	0.67
10.00	707.6	0.83	0.83
12.00	851.7	1.00	1.00

**Descarga pieza recuperada 1
(09/Nov/05) exp = 0.86**

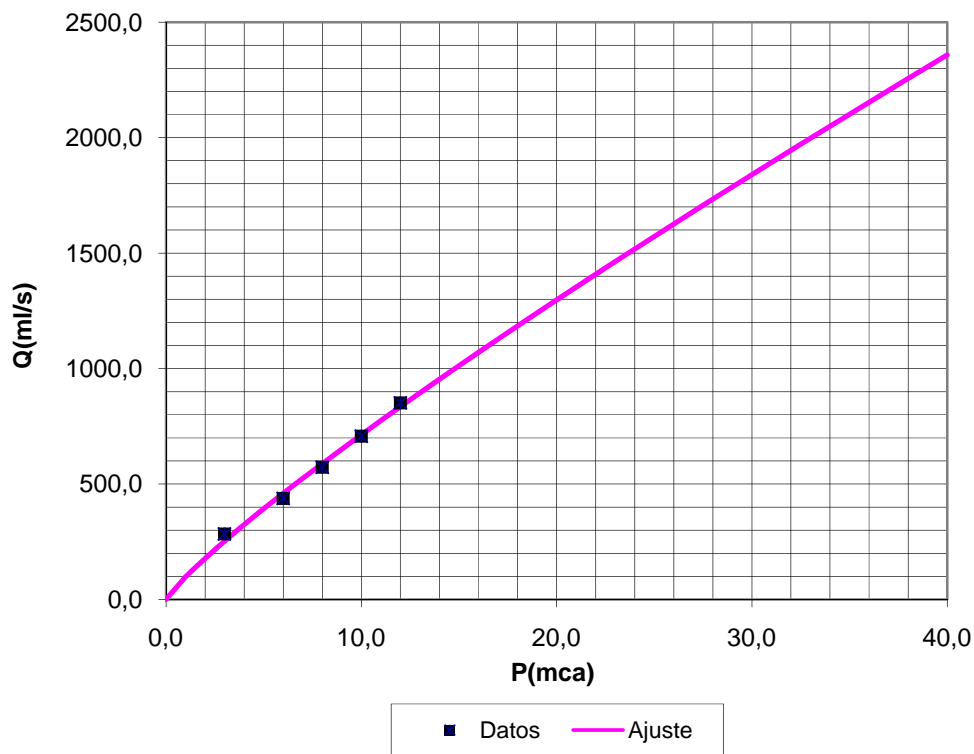


Figura II.20. Ensayo pieza prueba # 9 (pieza recuperada 1)

Ajuste $Q=C h^X$
C = 97.865647
X = 0.8625933

$$Q = 97.8656 \cdot h^{0.86}$$

Prueba # 10 (101105). Se trata de un tramo de tubo de ½” galvanizado con reparación de hule amarrado en forma envolvente; tipo de falla: falta de hermeticidad al moverse las capas de hule de su sitio original al aumentar la presión.

Prueba # 11 (111105). Se presenta en el acoplamiento, con una abrazadera sin apretar, entre una manguera de ¾” de polietileno de alta densidad y una conexión para manguera de latón (con rosca a tubería de ½”, en su extremo opuesto); tipo de falla: falta de hermeticidad al existir un claro entre la manguera y la conexión.

Prueba # 12 (151105). Se trata de un tramo de tubo de ½” galvanizado con reparación de hule amarrado de forma envolvente, similar a la pieza recuperada 2; tipo de falla: falta de hermeticidad al moverse las capas de hule de su sitio original al aumentar la presión.

Prueba # 13 (151105-2). Se trata de un tramo de tubo de ½” galvanizado con una gran cantidad de perforaciones en su pared, algunos orificios fueron tapados con hule (de manera similar a las piezas 1 y 2); tipo de falla: perforaciones, por corrosión, en la pared del tubo.

Prueba # 14 (151105-3). Se trata de la unión de dos bridas de 3” de diámetro con los tornillos flojos; tipo de falla: falta de hermeticidad por descuido al dejar mal apretada una unión.

Prueba # 15 (171105). Se trata de la unión de dos bridas de 3” de diámetro con la junta cortada; tipo de falla: junta rota.

Prueba # 16 (181105). Se trata de dos tramos de tubo galvanizado de ½” unidos con un codo roscado y con dos de perforaciones en la pared, tipo de falla: perforación de la pared del tubo por corrosión.

Prueba # 17 (181105-2). Esta pieza consiste en un tramo de tubo de plomo de ½” perforado; su orificio principal se intentó tapanlo con hule; tipo de falla: perforación de la pared del tubo debido a la corrosión.

Prueba # 18 (28y291105). Se trata del elemento de cierre de la unión en un cople de asbesto de 3” de diámetro; tipo de falla: mordida del sello por mal procedimiento de instalación.

Prueba # 19 (131205). Brida de junta tipo Gibault para un diámetro de 4”; tipo de falla: falta de confinamiento del sello por la rotura de uno de sus elementos.



Figura II.21. Ensayo pieza recuperada 1, prueba # 9



Figura II.22. Ensayo pieza recuperada 2, prueba # 10



Figura II.23. Ensayo pieza recuperada 3, prueba # 12



Figura II.24. Ensayo pieza recuperada 4, prueba # 13



Figura II.25. Ensayo pieza recuperada 5, prueba # 16



Figura II.26. Ensayo pieza recuperada 6, prueba # 17

En la siguiente tabla se muestra, en síntesis, los resultados finales de ambos conjuntos de pruebas. Es pertinente aclarar que los valores de C y X, de la expresión $Q=C h^X$, son tales que Q resulta en ml/s y h en mca, aunque haya utilizado indistintamente p y h como variable para la presión en el interior del tubo en mca.

Tabla II.3. Resumen de resultados de todos los ensayos

Prueba (#)	Código	Descripción	Fuga en	C	X	No. ciclos
1	0311	Tubo negro de polietileno de alta densidad de ¾" (int.)	Fisura 3 cm	0.8548	1.71	½
-	1801		Repetición	6.0176	1.10	2
2	0411		Fisura 6 cm	0.0267	1.23	½
-	1701		Repetición	39.9517	1.13	1
3	2001		Fisura 5 cm	41.54	1.06	1
4	2510		Ranura 3 cm	10.45	0.55	½
5	0711	Tubo azul con alma de aluminio de ¾" (int.)	Fisura 3 cm	10.46	0.70	½
-	2601		Repetición	1.6416	1.08	2
6	0811		Fisura 6 cm	0.0010	2.00	½
-	2601		Repetición	27.0261	1.00	2
7	1910	Tubo negro tipo conduit de ½" (int.)	Fisura 1.2 cm	0.2717	1.45	½
8	0911		Fisura 3 cm	6.316	1.54	½
-	1901		Repetición	24.3340	1.14	2
9	091105(2)	Pza Recuperada 1	Tubo ½"	97.87	0.86	-
10	101105	Pza Recuperada 2	Tubo ½"	0.0023	2.99	-
11	111105	Abrazadera Floja	Tubo ½"	18.44	0.39	-
12	151105	Pza Recuperada 3	Tubo ½"	0.1249	2.26	-
13	151105(2)	Pza Recuperada 4	Tubo ½"	328.90	0.41	-
14	151105(3)	Junta entre bridas flojas	Tubo 3"	4.557	0.53	-
15	171105	Junta con corte radial (entre bridas)	Tubo 3"	4.289	0.53	-
16	181105	Pza Recuperada 5	Tubo ½"	252.42	0.49	-
17	181105(2)	Pza Recuperada 6	Tubo ½"	225.22	0.48	-
18	281105 291105	Goma Mordida	Tubo 3" Asbesto	153.7	0.45	-
19	131205	Pza Rec 7 Junta Gibault	Union 4"	34.02	0.78	-

De acuerdo con las pruebas realizadas y a los resultados obtenidos, se detectan distintos valores para el exponente X, los cuales reflejan desde comportamientos tipo orificio (X aproximadamente igual a 0.5) hasta relaciones con el cuadrado de la presión. Los primeros pueden encontrar correspondencia con los especímenes con fallas de área no nula al inicio de las pruebas, pero para los elementos en los cuales el gasto que se fuga varía con exponentes mayores a 0.5, se considera que se trata de elementos elásticos que inicialmente contienen la fuga y que al momento de elevar la presión el área inicial de su falla se incrementa.

Respecto a los coeficientes de descarga C , éstos fueron muy variados, dependientes del tamaño y longitud de la grieta, así como del propio material de la tubería.

Vale la pena resaltar que al probar los especímenes con al menos un ciclo de incremento-decremento de presión, presentan un fenómeno de histéresis que, al graficar, resultan líneas de tendencia con exponentes X cercanos a la unidad; este fenómeno se da como consecuencia del comportamiento visco-elástico de los tubos probados. Para los elementos con fisuras de área inicial no nula con elementos elásticos, que inicialmente contienen la fuga y que al momento de elevar la presión son removidos de su sitio original, tuvieron un comportamiento con exponentes altos, incluso mayores a 2.0, mientras que el de los que no tenían el recubrimiento de hule fue normal al de un orificio.

También resulta interesante que al analizar la relación que existe entre la presión, expresada en forma adimensional (respecto a la presión máxima) y el gasto de fuga, expresado de la misma manera, se observa que los valores medidos en estas pruebas se ubican entre los rangos limitados por las líneas de tendencia correspondientes a exponentes de tipo orificio ($X = 0.5$) y $X = 1.5$, que se obtiene a partir de un modelo numérico presentado en Sánchez H., 2005 (ver figuras II.27, II.28, II.29 y II.30), en pocas palabras con esto se refuerza la sensibilidad del caudal que se fuga a las variaciones de presión y confirman los reportes bibliográficos sobre ella.

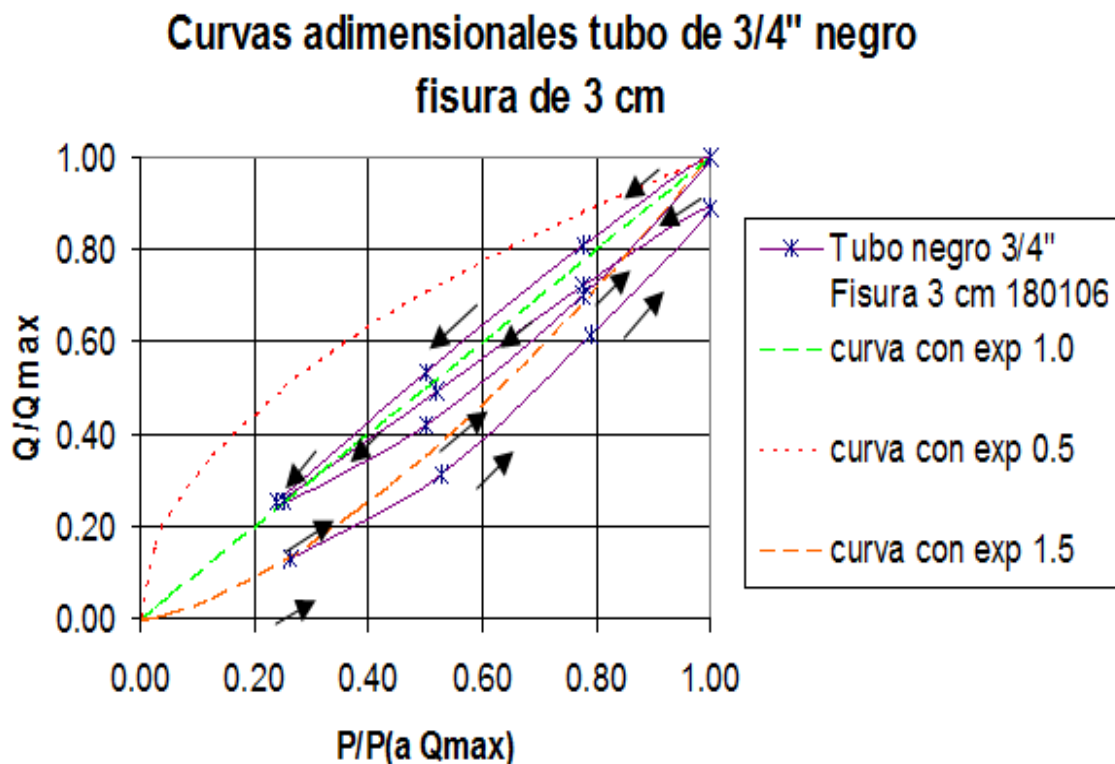


Figura II.27. Tubo de polietileno negro de 3/4", fisura de 3 cm

Curvas adimensionales tubo de 3/4" negro fisura de 5 cm

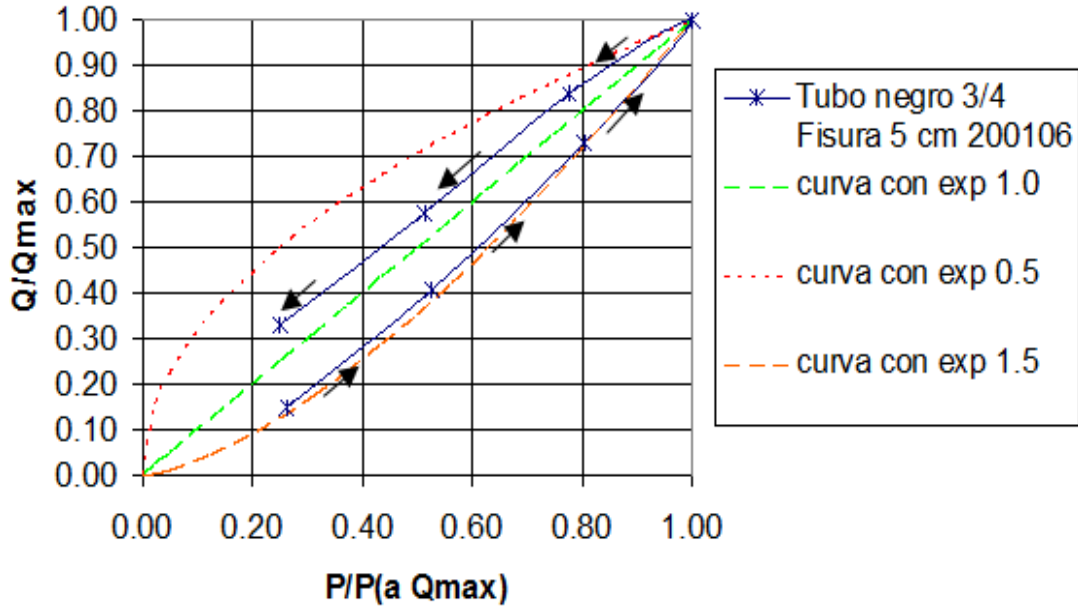


Figura II.28. Tubo de polietileno negro de 3/4", fisura de 5 cm

Curvas adimensionales tubo de 3/4" negro fisura de 6 cm

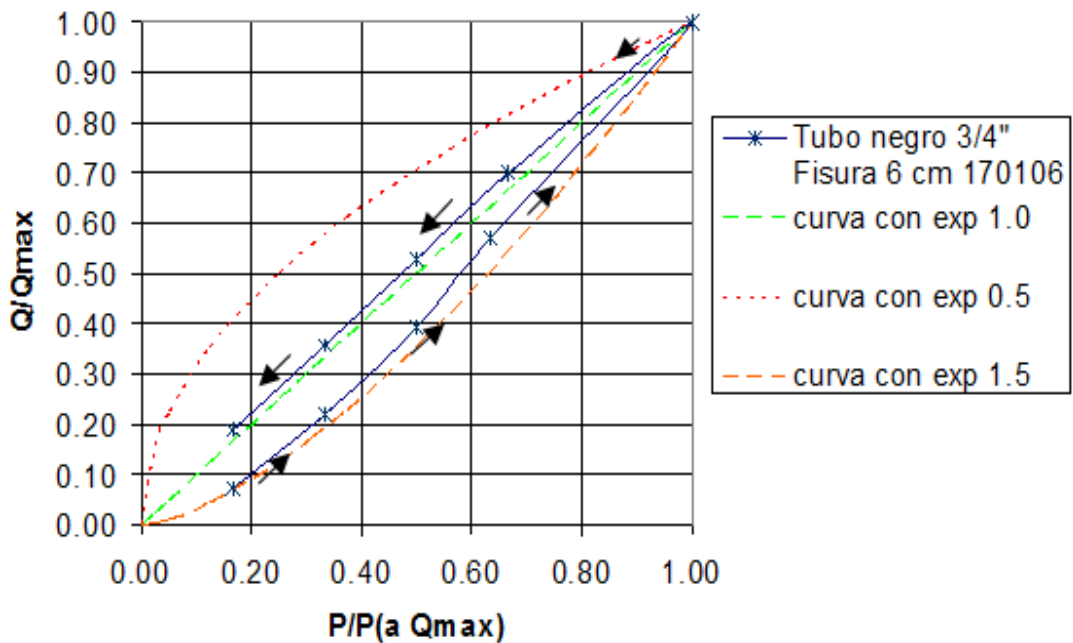


Figura II.29. Tubo de polietileno negro de 3/4", fisura de 6 cm

Curvas adimensionales tubo de 1/2" negro fisura de 3 cm

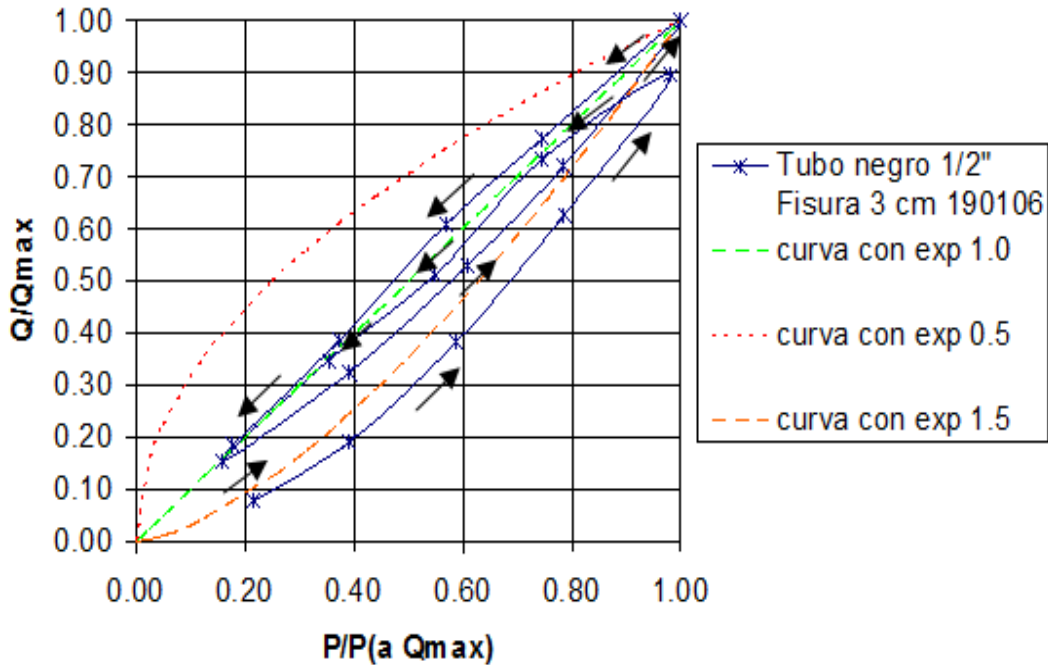


Figura II.30. Tubo de tipo "conduit" negro de 1/2", fisura de 3 cm

II.4 Sectorización

El abasto de agua para el consumo humano es a través de un sistema de válvulas y tuberías (expuestas o enterradas) que forman las redes, principal y secundaria, de distribución; la red secundaria recibe el agua de la primera y es la que se llega hasta cada uno de los usuarios, quienes se conectan por medio de las tomas domiciliarias (figura II.31).

El buen funcionamiento de una red de abastecimiento implica que el agua debe llegar en forma continua, no sólo en cantidad y presión adecuada, es por ello que el suministro intermitente durante ciertas horas y días de la semana, conocido como tandeo, no se justifica, además que dicha maniobra deteriora más rápidamente la infraestructura hidráulica, aunque se use para "evitar" pérdidas por fugas.

Partiendo del hecho de que exista un porcentaje importante de fugas, uno de los principales problemas de las redes de distribución radica en que el incremento de presión interna, cuando la demanda se reduce (generalmente en las madrugadas), aumenta el caudal de las fugas. De aquí se deriva que el limitar la presión máxima en la red contribuya a disminuir las fugas.

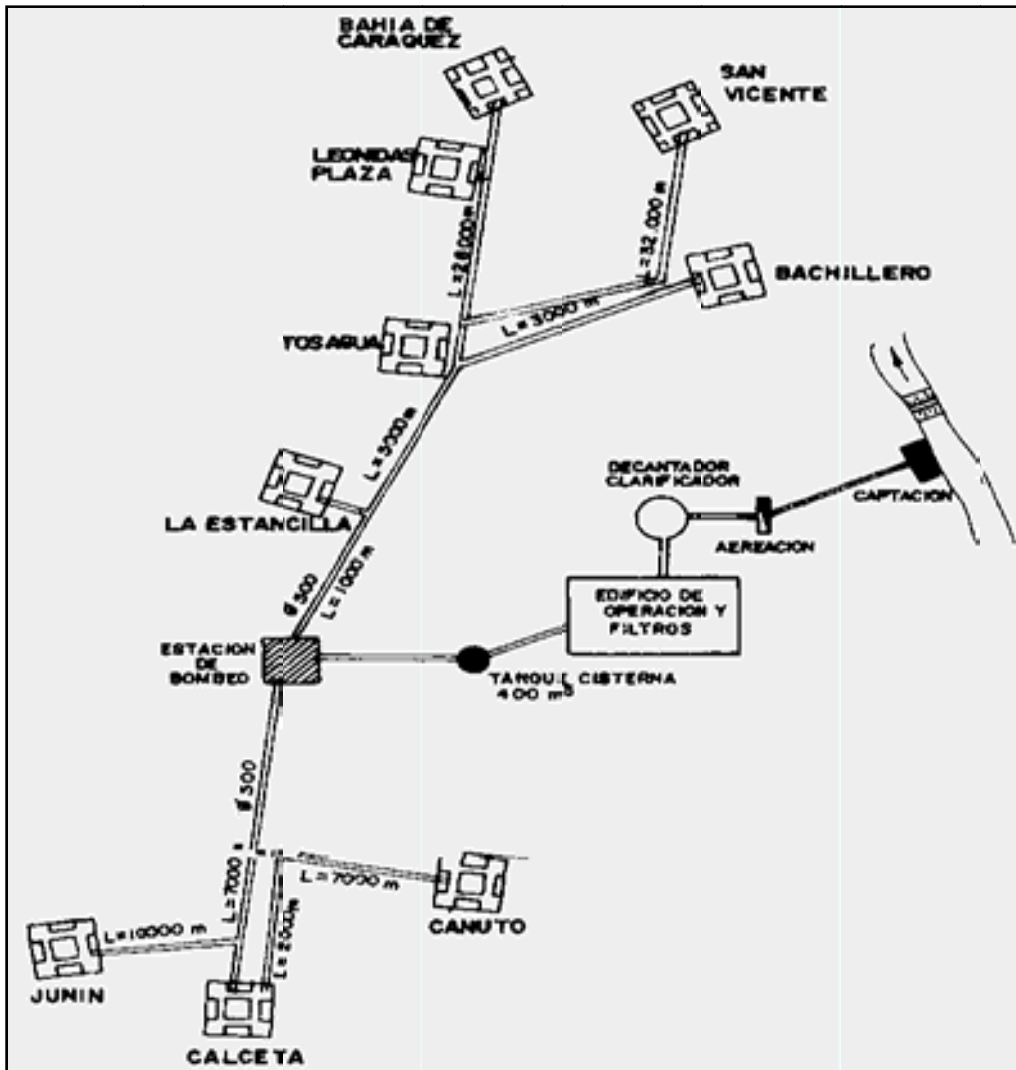


Figura II.31. Esquema de una red de distribución de agua potable

De acuerdo, con lo mencionado en la literatura consultada y con los resultados de las pruebas de laboratorio, existe una relación entre la presión interna en la red y el gasto perdido por fugas, lo que resalta la importancia de controlar la presión en las redes de agua para reducir las fugas. Para llevar a cabo de manera eficiente el control de presiones se forman unidades denominadas sectores. La sectorización de la red de distribución permite suministrar agua a cada sector de tal manera que las acciones que se realicen en uno no afecten la operación en otro.

El concepto de sectorización, se utiliza, entre organismos operadores y proyectistas, como el establecer zonas de abasto autónomas (*Distritos Hidrométricos*), pero no independientes, dentro de la red. De esta forma se tendrá mayor control de la operación del sistema, así como de los volúmenes que ingresan o salen de él. El diseño y construcción de cada sector dependerá de las condiciones locales, de la geometría de la red, de la topografía, de las condiciones del suelo, etc. Lo anterior se aplica para modelar numéricamente la red y así visualizar las opciones para la sectorización.

Una forma de lograrlo es con la construcción de las redes de tal manera que los diversos sectores se alimenten desde tanques de almacenamiento para cada uno de ellos y de este modo se mantiene la presión de alimentación constante.

Otra posibilidad es la de aislar secciones de la red comunicadas a la red primaria por una o varias entradas, dependiendo de la topografía y de las presiones disponibles, así como de las características de la red. Las presiones en cada sector se deben controlar en las entradas mediante válvulas reguladoras de presión.

Resulta conveniente medir el gasto de entrada en cada uno de los sectores.

Con este tipo de arreglos se tienen varias ventajas fundamentales:

- Se puede conocer el nivel de fugas en cada uno de los sectores al conocer el gasto que demandan y el consumo registrado con los medidores de los usuarios, con lo que se puede ponderar las diversas zonas de la localidad para hacer las labores de detección y reparación de fugas o de reemplazo de la red, de esta forma las acciones serían más directas y por tanto, más productivas.
- El ahorro de agua en un sector, ya sea por corrección de fugas o por disminución de consumo, se reflejará en la red primaria, con lo que se dispondrá de mayor caudal para abastecer zonas que lo requieran o para ahorrar en el abastecimiento a la población.
- La red primaria podrá ser operada a presiones más altas sin que aumenten las fugas en la red secundaria por elevar la presión. Así, habrá una mayor capacidad de conducción por esa red primaria para llevar el agua de una zona a otra.
- Por otro lado, las válvulas reguladoras de presión evitarán que aumenten las variaciones de presión, en especial las presiones nocturnas -por lo tanto las fugas- lo que representa menos pérdidas. Esto es particularmente importante en zonas con topografía poco plana, por tener desniveles grandes o por ser alimentadas desde tanques muy elevados.
- Al tener un mejor control de la operación y registros de cada sector, será más fácil detectar usuarios no registrados (clandestinos) o usos no autorizados con lo que la recaudación por el servicio podrá incrementarse.

II.5 Ejemplos de la división en sectores

II.5.1 *Resultados obtenidos en algunos sectores de la Ciudad de México y de Hermosillo, Sonora.*

Las figuras siguientes muestran la presión media y el gasto demandado en el sector Santa Lucía, D. F., a lo largo del día antes y después de controlar las presiones. El sector tiene un desnivel de 150 m, tubería de asbesto-cemento, 31 km de longitud de red y 30,000 habitantes.

PRESIONES MEDIAS CON Y SIN CONTROL DE PRESIONES

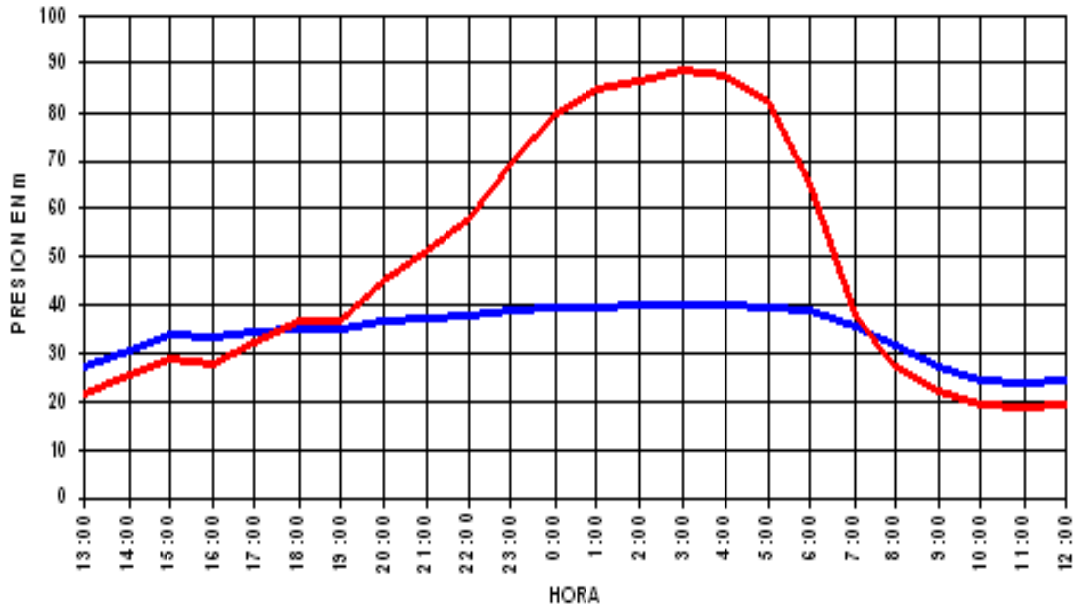


Figura II.32. Comparación de presiones

GASTOS MEDIDOS EN STA LUCIA 1 ANTES Y DESPUES DEL CONTROL DE PRESIONES

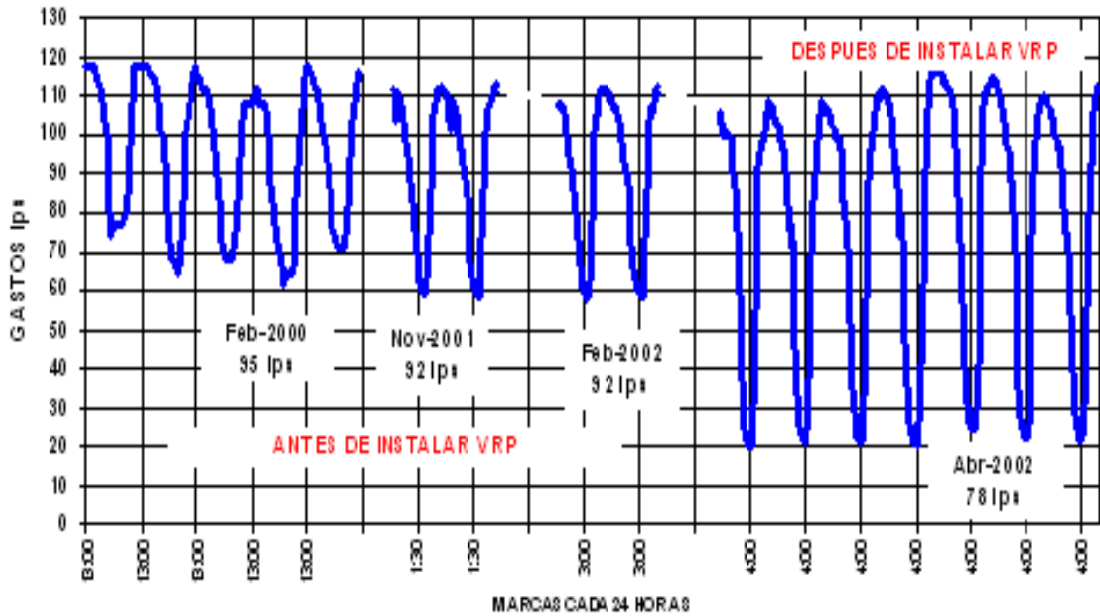


Figura II.33. Comparación de caudal

En este caso, el gasto medio se redujo de 92 a 78 lps (un 15% del suministro), que se debe a la reducción de fugas, como se aprecia en la disminución del gasto nocturno de 59 a casi 20 lps, mientras que los gastos diurnos se mantienen ya que las presiones son prácticamente iguales antes y después de controlarlas, debido a que los operadores tenían cerradas parcialmente una serie de válvulas para ese control de presiones diurnas.

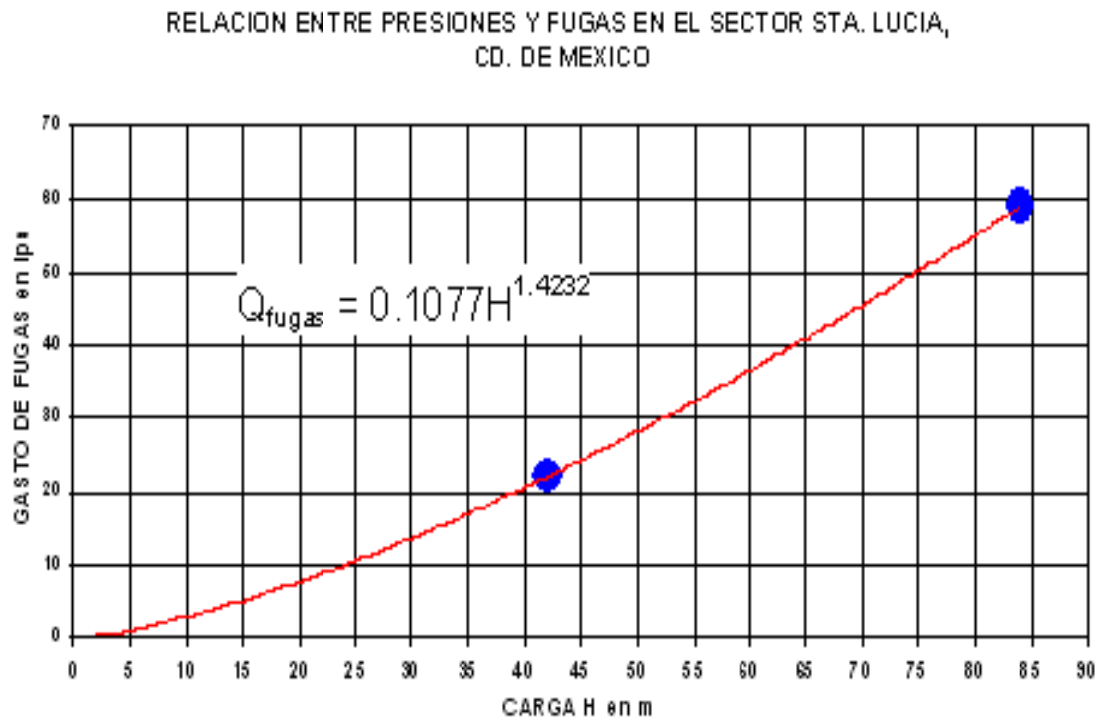


Figura II.34. Caudal que se fuga en sector Santa Lucía

Otros casos son los de los sectores Renacimiento y Nuevo Hermosillo, en Hermosillo, en zonas prácticamente planas, ambos con características similares, 11 km de red con tuberías de PVC. Al reducir las presiones de entrada de 47 a 22 m, los gastos se redujeron en un tercio, lo que significó una reducción de fugas de 25% a 50%, como lo muestran las figuras II.35 a la II.37.

GASTOS EN EL SECTOR RENACIMIENTO DE HERMOSILLO ANTES Y DESPUÉS DE CONTROLAR LAS PRESIONES

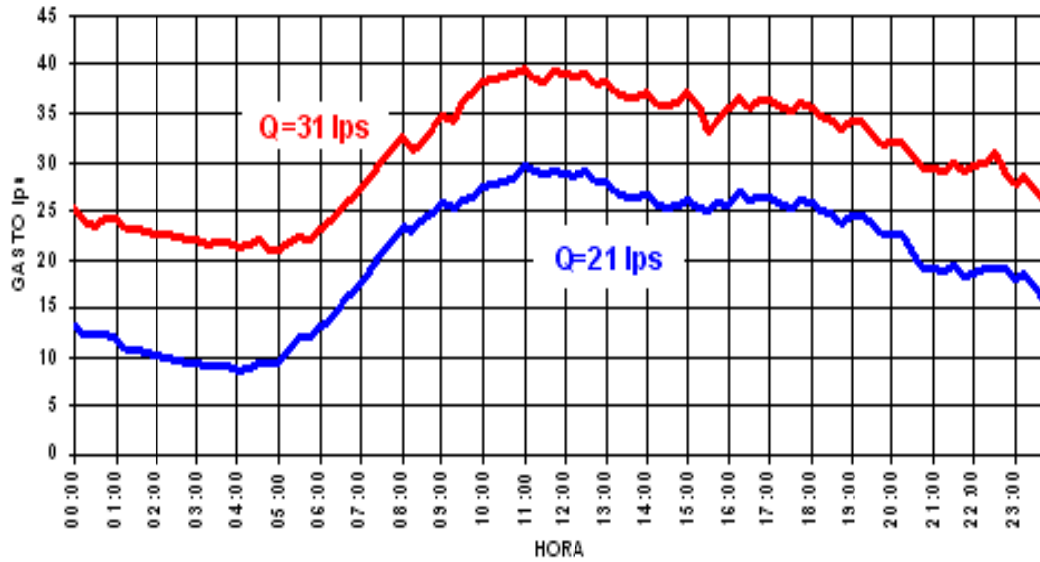


Figura II.35. Comparación de caudal

RELACION H-Q_{fugas} EN SEC RENACIMIENTO HERMOSILLO

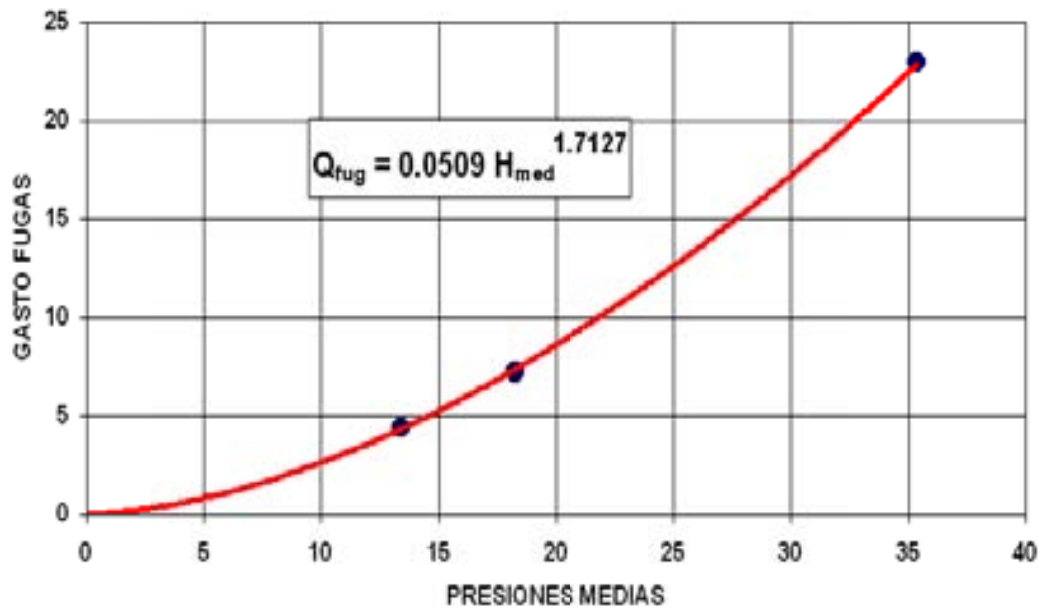


Figura II.36. Caudal que se fuga en sector Renacimiento

**SECTOR 78 IVO HERMOSILLO.
RELACION ENTRE PRESION Y FUGAS**

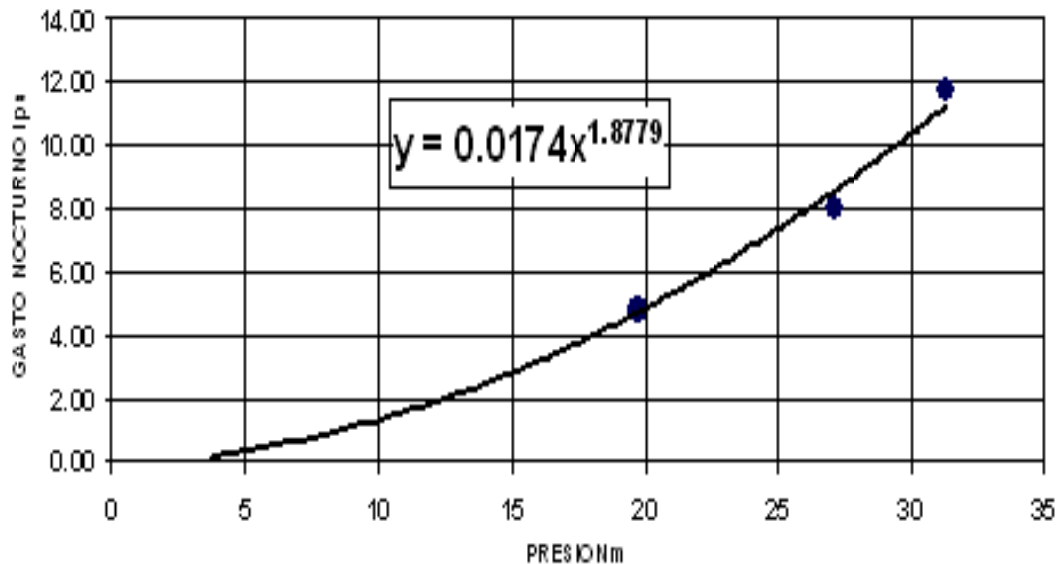


Figura II.37. Caudal que se fuga en sector Nuevo Hermosillo

En estos casos se han medido valores de X entre 1.4 y 1.9 (figuras II.34, II.36 y II.37). Los puntos de las gráficas corresponden a las presiones medias nocturnas en ambos sectores, a las 4:00 a.m., antes de que empiecen los consumos y de controlar las presiones del sector; los gastos pueden atribuirse totalmente a fugas en la red.

Al comparar los valores de los exponentes obtenidos en las pruebas de laboratorio con los que se presentan medidos en sectores de redes en campo, se aprecia entre ellos una buena aproximación, además, si se revisa la tendencia de todo el conjunto de puntos, para cada tubo probado con al menos un ciclo de incremento-decremento de presión, los exponentes varían entre 1.00 y 1.14, que reflejan valores mucho más cercanos a los reportados en la literatura técnica para redes del Japón y del Reino Unido.

II.5.2 Fraccionamiento Burgos, Cuernavaca, Morelos

En el Fraccionamiento Burgos de Cuernavaca, formado por 15 secciones u ocho zonas de servicio, ha sido necesario realizar nuevas obras para mejorar tanto la operación como el servicio de agua potable para cubrir apropiadamente las demandas de su población actual y futura.

Debido a las condiciones del sitio (desniveles de hasta 60 m y variaciones de presión de 4.0 a 5.5 kg/cm²) y de su infraestructura se daba el servicio por tandeo en un promedio dos horas/día por sección. Bajo estas condiciones el horario de tandeo o suministro de agua en la red resultaba sumamente deficiente.

En el fraccionamiento se registra un consumo total anual superior a 25,000 m³, que equivale a una dotación de 247 l/hab/día; la incidencia de fugas indica que el 96% ocurre en tomas domiciliarias y el resto en la línea principal. Se estima que en la red de distribución las pérdidas por fugas son aproximadamente del 45.2%, y que se puede lograr un ahorro de agua del 25.2% con equipos detectores y regulación de presiones mediante válvulas automáticas para reducir las cargas piezométricas a valores aceptables, además con esta solución, se obtendrá el servicio continuo a todos los usuarios, se reducirán los tiempos de bombeo a 16 horas diarias y se logrará incrementar la dotación a 300 l/hab/día.

II.5.3 Colonia San José del Jaral, Estado de México

Se realizó un proyecto de sectorización para regular las presiones y reducir las pérdidas de agua no contabilizada con base en la metodología de trabajo que se adapta a las problemáticas comúnmente encontradas en los Organismos Operadores del país.

Las condiciones de ésta zona son las siguientes:

- Colonia popular, se formó en sus inicios como asentamiento irregular.
- Red de agua potable no sectorizada.
- Desnivel aproximado de 95 m entre la zona alta y la baja.
- Número de habitantes 19,040.
- Abastecimiento de agua directamente del Sistema Cutzamala a la red de distribución.
- Rango de presiones entre 0.5 y 13.1 kg/cm².
- Alta incidencia de fugas.
- Existencia de dos tanques superficiales de 350 m³, uno de ellos sin operar.

Para generar el modelo hidráulico de la red de distribución fue necesario revisar y actualizar el catastro de la misma y verificar la conectividad de los elementos (nodos, válvulas, tanques, etc.). Al evaluar el estado inicial se pudo apreciar que se opera con excesiva presión en la parte baja de la colonia, debido a la topografía, que presenta presiones superiores a los 13 kg/cm².

La solución se conforma de dos sectores o distritos hidrométricos, cuyas acciones implican:

- a) Cierre total de 13 válvulas existentes para seccionar y/o independizar la parte alta de la parte baja de la red de distribución.
- b) Instalación de cinco Válvulas Reductoras de Presión (VRP).
- c) Cierre total de cinco válvulas existentes para el correcto funcionamiento de las VRP.
- d) Puesta en operación del tanque ubicado en la Av. Tecoloapan para abastecer a la parte baja de la colonia.
- e) Construcción de una línea de alimentación (PEAD) de 8" de diámetro y 265 m de longitud, desde el tanque hasta la interconexión con la línea de 10" ubicada en la intersección de las calles Azalea y Pingüica.

Lo que se refiere a la detección y/o el reporte de fugas (visibles o no) se tiene lo siguiente:

Resumen de Consumo por tipo de Uso (2004)				
Periodo	Tipo de Uso			Total (m³)
	Doméstico	Comercial	Industrial	
1er Bimestre	35,067	2,783	-	37,850
2º Bimestre	31,784	1,938	-	33,722
3er Bimestre	35,244	2,525	-	37,769
4º Bimestre	30,534	1,602	-	32,136
5º Bimestre	31,761	1,875	-	33,636
6º Bimestre	30,926	1,601	-	32,527
Total	195,316	12,324	-	207,640

Fugas reportadas en el año 2004		
No. Fugas	Ubicación	%
183	Toma	88.83
23	Redes	11.17
206	Total	100.00

Resumen de Fugas detectadas y reparadas en el Distrito Hidrométrico "El Jaral"				
Localización de Fugas	No. Fugas Detectadas y reparadas	% de Incidencia	Gasto de Fugas recuperado (lps)	% de Gasto (lps)
Tomas	19	95.0	0.8550	99.13
Cajas de Válvulas	1	5.0	0.0075	0.87
Total	20	100.00	0.8625	100.00

Figura II.38. Datos recopilados del sector

Regulación de las Presiones mediante Válvulas Reductoras de Presión (VRP)

Recordando que el intervalo de presión oscilaba entre 0.5 y 13.5 kg/cm², la sectorización, consistió en la instalación de tres VRP, las cuales se instalaron en el distrito de la parte baja de la colonia, con lo que se reducirá la presión a rangos no mayores de 5.5 kg/cm². Debido a la topografía, fue necesario reducir todavía más las presiones registradas en la zona baja, para restringir el agua suministrada a los usuarios, mediante la instalación de dos válvulas adicionales, con piloto para regulación mínima nocturna de 1 kg/cm².

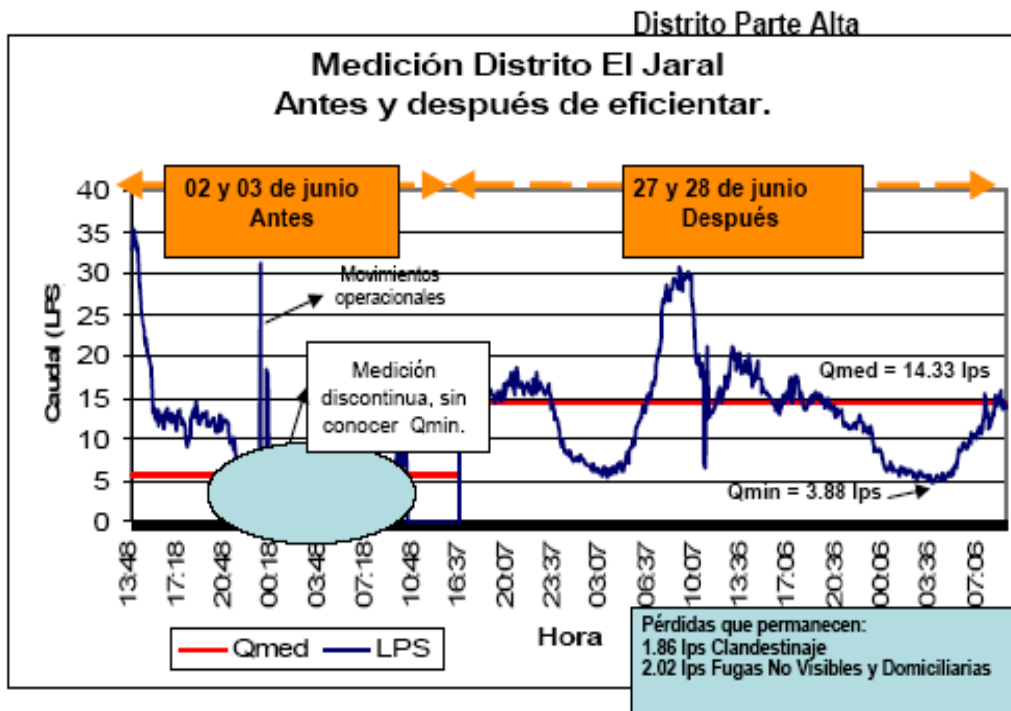


Figura II.39. Comparación de caudal

Estos últimos ejemplos muestran, entre otros aspectos, los beneficios que se obtuvieron al pasar de la operación convencional de sus redes, a un funcionamiento con la red sectorizada.

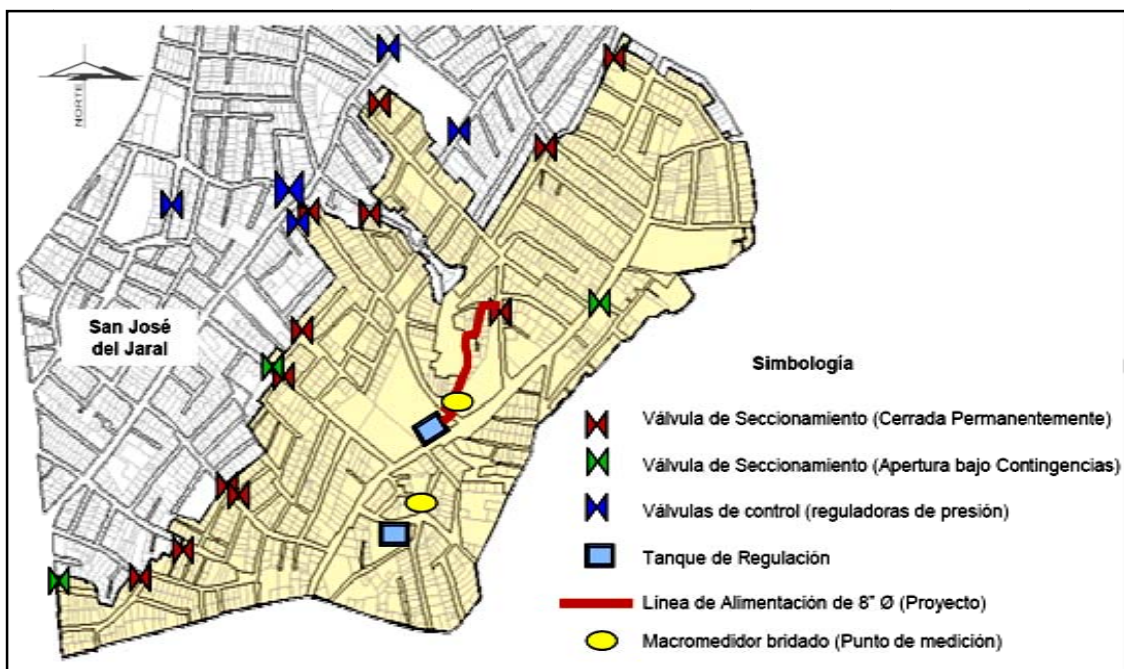


Figura II.40. Resumen del proyecto ejecutivo de sectorización

Resultados y beneficios técnicos y económicos			
Antes de sectorizar (eficientar)		Después de sectorizar (eficientar)	
Operación del Sistema:	Sistema Cutzamala y Gravedad	Operación del Sistema:	Gravedad
No. De Tomas Clandestinas:	No hay identificadas	No. De Tomas Clandestinas:	527
Rango de Presión:	0.5 - 13.5 kg/cm ²	Rango de Presión:	0.5 - 5.5 kg/cm ²
Pérdidas Diagnosticadas:	52.10%	a) Pérdidas Diagnosticadas Distrito PA:	27.00%
Fugas no visibles en tomas	22.80%	Fugas no visibles en tomas	12.20%
Fugas no visibles en red y válvulas	13.90%	Fugas no visibles en red y válvulas	1.70%
Consumos no autorizados	15.40%	Consumos no autorizados	13.10%
		b) Pérdidas Diagnosticadas Distrito PB:	53.30%
		Sector A	6.50%
		Sector B	16.50%
		Sector C	17.50%
		Sector D	12.80%
Instalación de dos válvulas reguladoras de presión con piloto de control nocturno			
Nuevas fugas registradas mensualmente		Nuevas fugas registradas mensualmente	
En tomas	15	En tomas	4
En red	2	En red	0
Total de fugas nuevas mensuales	17	Total de fugas nuevas mensuales	4
Disminución de fugas 76.5%			

Figura II.41. Resultados obtenidos

III. MÉTODOS Y EQUIPOS DE DETECCIÓN DE FUGAS EN TUBERÍAS

Es muy sabido que las pérdidas de agua en las redes ocurren tanto por fugas visibles como por otras no expuestas; las primeras son reportadas y, en su caso, reparadas rápidamente, pero las que no se encuentran a la vista, continuarán hasta que sus efectos en su entorno las delaten.

Por otro lado, algunas de las recomendaciones que hacen los expertos en el tema se refieren al control de fugas, su localización, rapidez y calidad en su reparación con el fin de recuperar esos caudales.

Lo anterior implica establecer dentro de las políticas de mantenimiento de la infraestructura campañas para detección y reparación de fugas, lo cual también permitirá tomar decisiones sobre la conveniencia de reparar o cambiar la tubería.

III.1 Técnicas de detección y localización de fugas

La problemática relacionada con la presencia de fugas en las redes de agua no es nueva, se han propuesto diferentes metodologías desde hace ya bastante tiempo, como lo muestra la figura III.1.

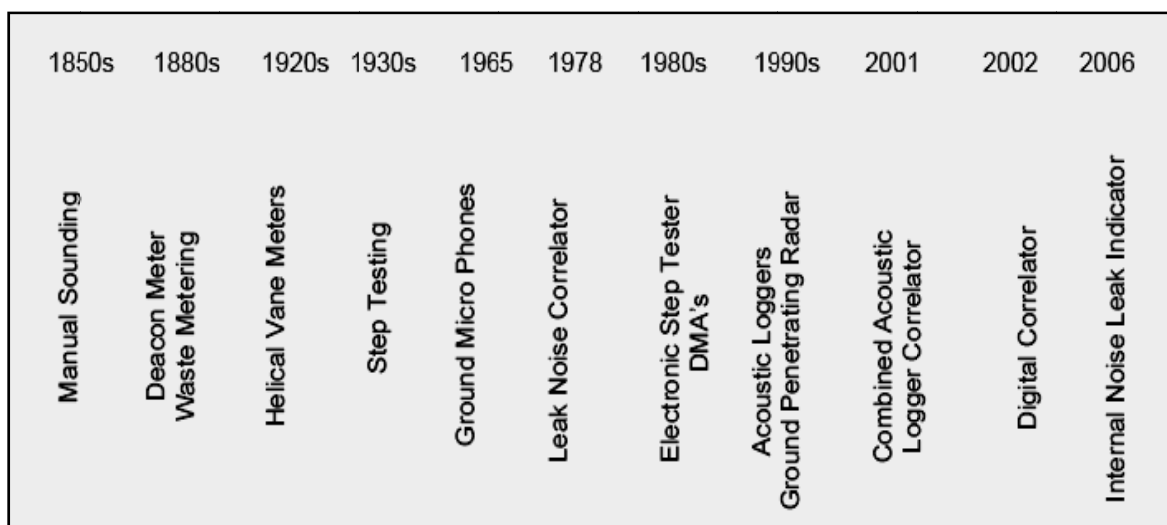


Figura III.1. Evolución de tecnologías de detección de fugas

El problema de detección de fugas puede ser clasificado, según los métodos existentes, los cuales se pueden agrupar en dos o tres grandes grupos (figura III.2).

- Físicos. Este sistema fundamentalmente consiste en detectar, por medio de sensores, la variación de uno o más parámetros físicos propios de la conducción o de sus alrededores.
- Por Software. Un programa de cómputo predice la posición de la fuga con base en un modelo numérico basado en la información disponible de temperatura, presión y gasto.
- Híbridos. Son la combinación de los dos anteriores, se utilizan sensores y sistemas de cómputo que con base en la información disponible y las lecturas de los sensores determinan la existencia de una fuga.

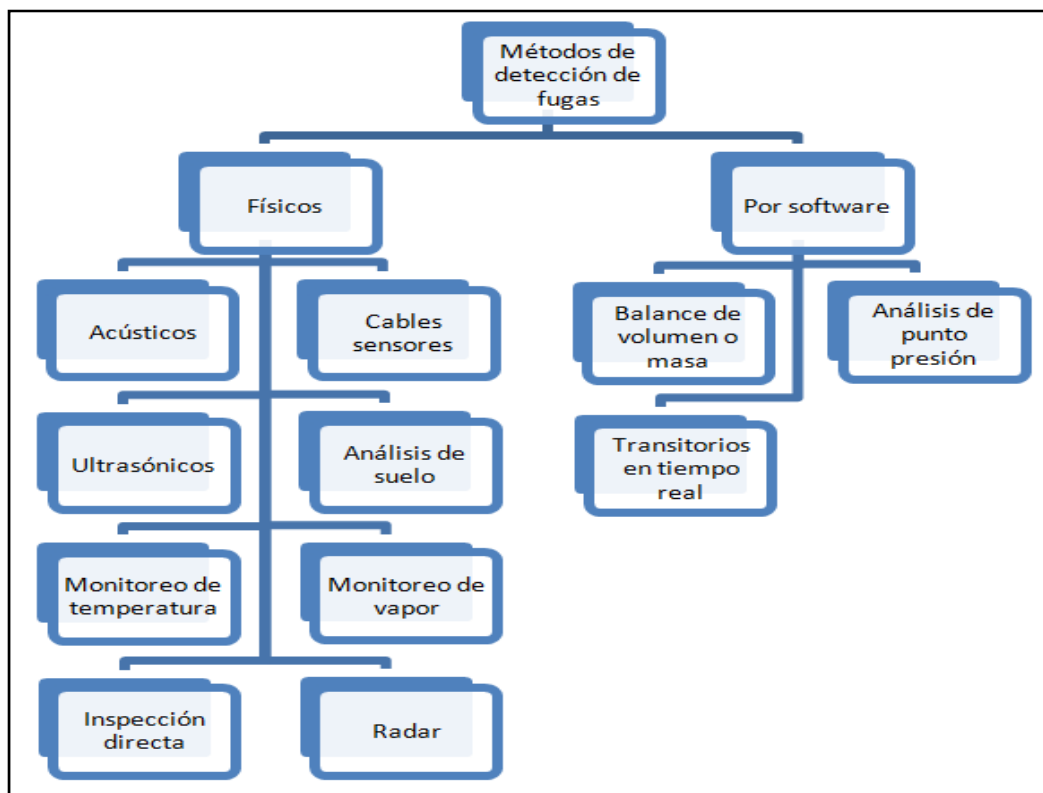


Figura III.2. Clasificación de los métodos de detección de fugas

III.1.1 Métodos físicos

Los métodos físicos de detección y localización de fugas buscan identificar un evento con base en las variaciones que una fuga produce sobre el entorno (onda acústica o ruido, temperatura, presión, gasto, etc.), que se modifica debido al cambio de operación original y que señalan la presencia de la fuga. Estas variaciones pueden ser identificadas a simple vista o determinadas por métodos indirectos con base en el análisis de las variables mencionadas. A continuación se presenta una descripción general de los métodos más comunes. Cabe aclarar que el proceso de detección se refiere a determinar la presencia o no de fugas, mientras que la localización indica la ubicación exacta de éstas.

III.1.1 Equipos no acústicos

Entre las técnicas no acústicas utilizadas para la detección y localización de fugas en tuberías se encuentran:

Prueba de paso. Para llevar a cabo estas pruebas es necesario que la red se encuentre sectorizada o conocer el catastro para operar válvulas que aislarán el tramo en estudio. A partir de la medición del gasto que ingresa y sale de la zona se establece la existencia de fugas; el procedimiento se repite hasta cubrir toda el área de interés. Como no se saben los consumos exactos, los estudios generalmente se realizan durante la noche y sirven también para hallar tomas clandestinas (ver figura III.3).

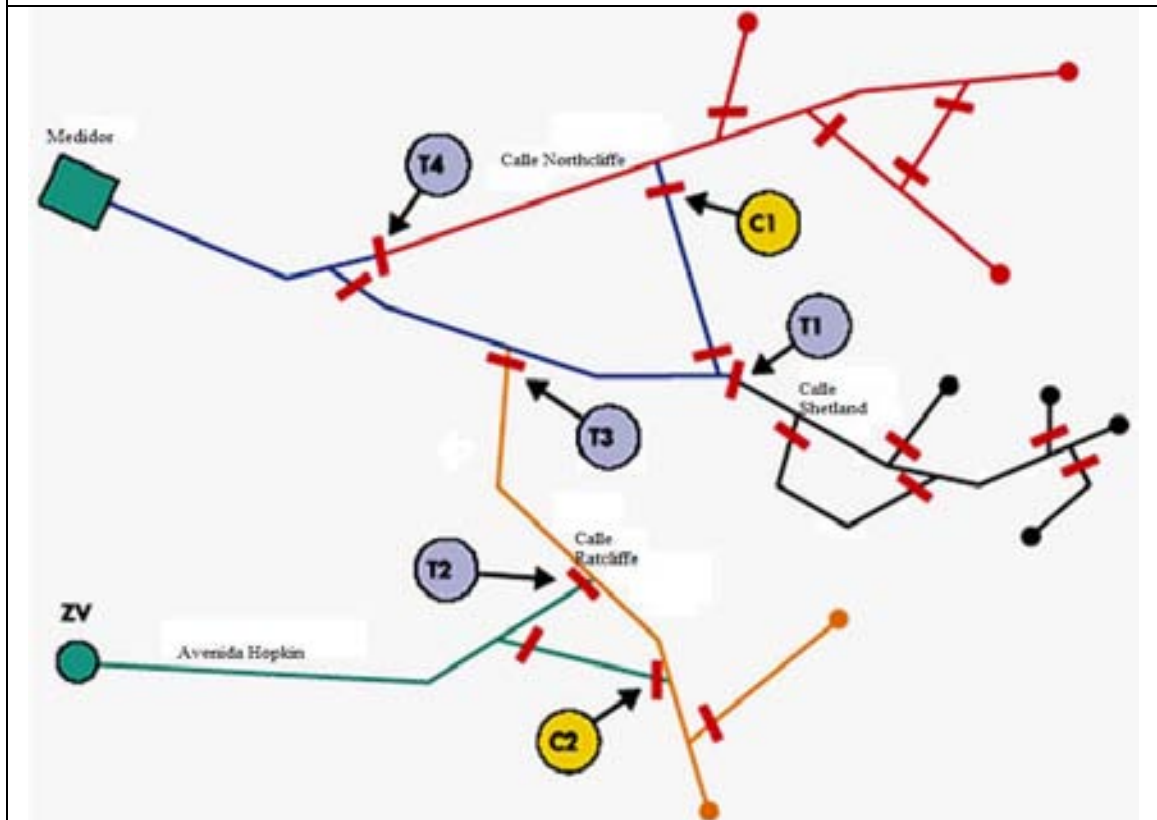
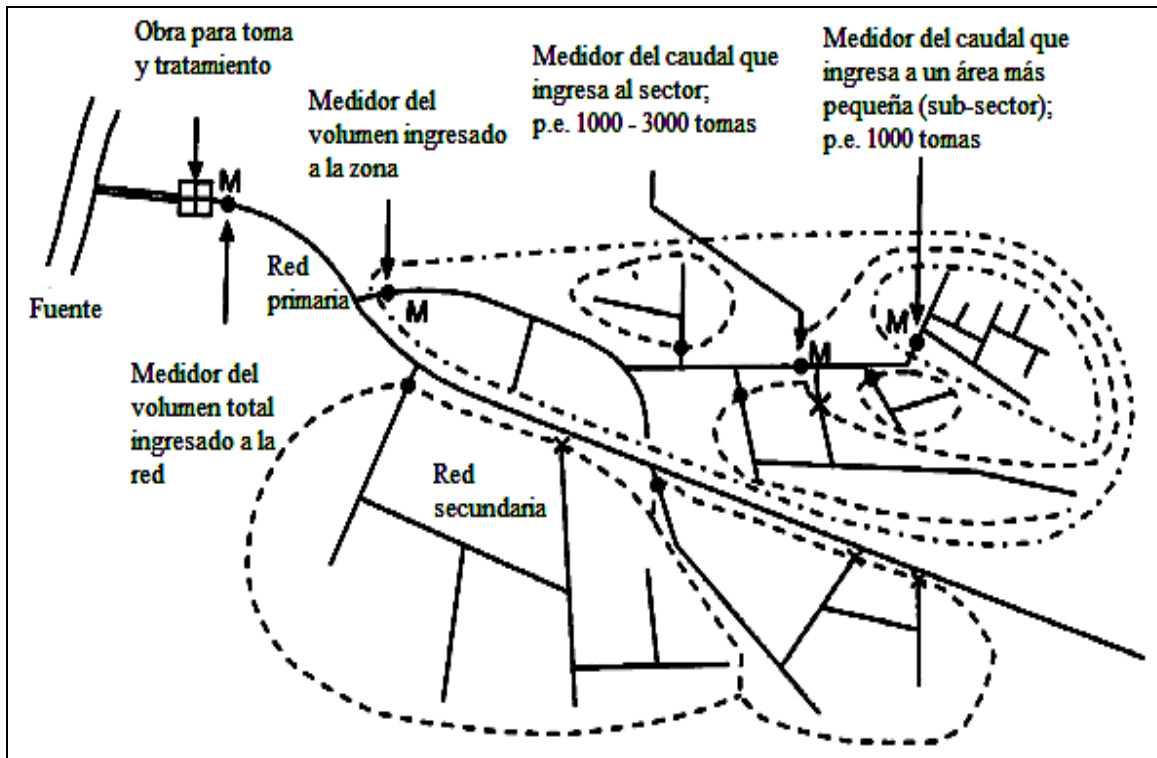


Figura III.3. Ejemplo de división e identificación de Sectores y Sub-sectores (IWA, 2007)

Radar de penetración de suelo o Georadar (GPR). El georadar consiste en dos unidades, una emisora y una receptora de ondas electromagnética, así como de un sistema de registro digital. Su principio de funcionamiento es a partir de los tiempos de retardo de las ondas reflejadas y de la velocidad de propagación de las ondas en el material (suelo) con los que se crea una imagen para ubicar al cuerpo reflector. El *radar de penetración* puede usarse para localizar fugas en tuberías enterradas ya sea detectando el hueco que la fuga de agua crea en el suelo alrededor de ella o detectando secciones de la tubería que aparentan estar más profundas que lo que realmente están debido a que la constante dieléctrica del suelo alrededor de la fuga se incrementa porque se satura de agua. La técnica de Georadar es un método de alta resolución, no destructivo ni intrusivo, aunque es costoso (figuras III.4 y III.5.).

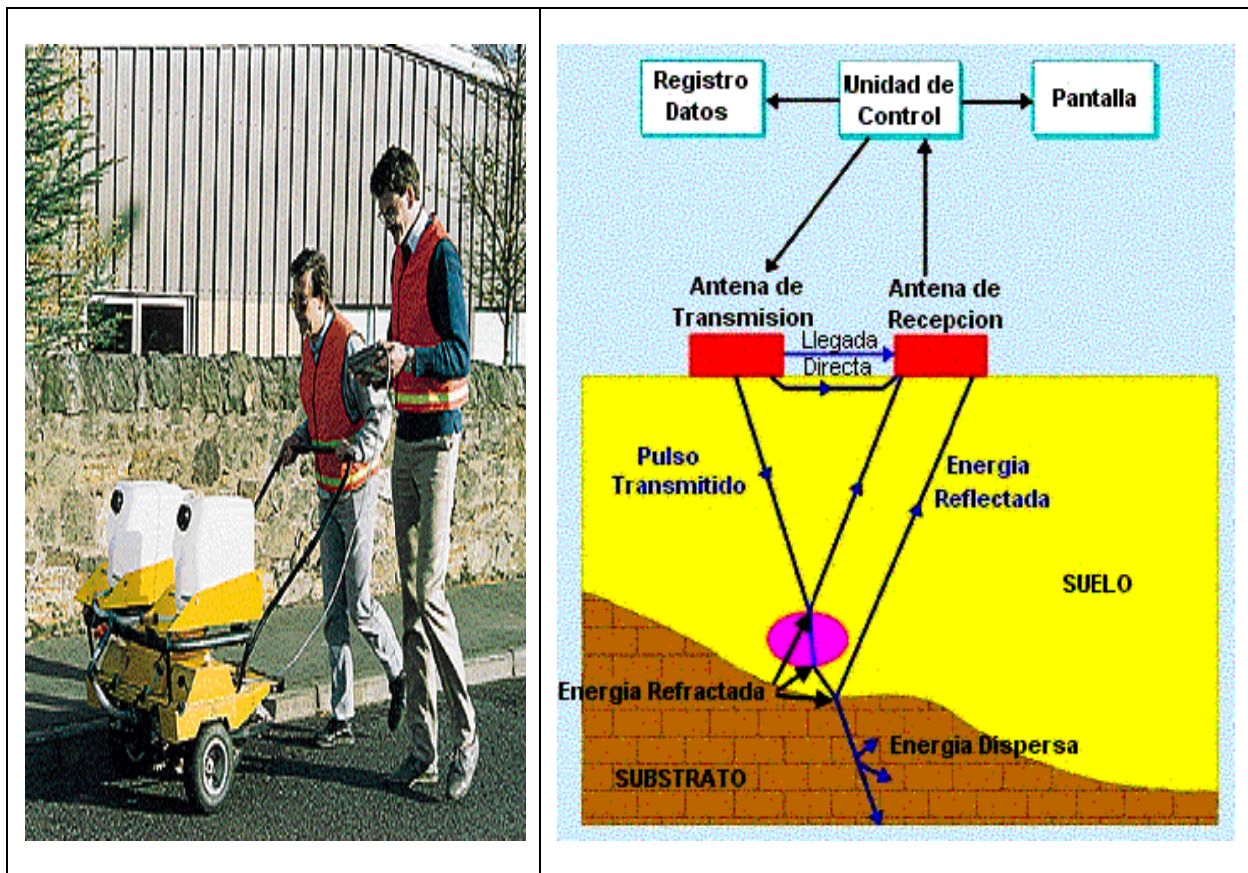


Figura III.4. Imagen y esquema del funcionamiento del GPR

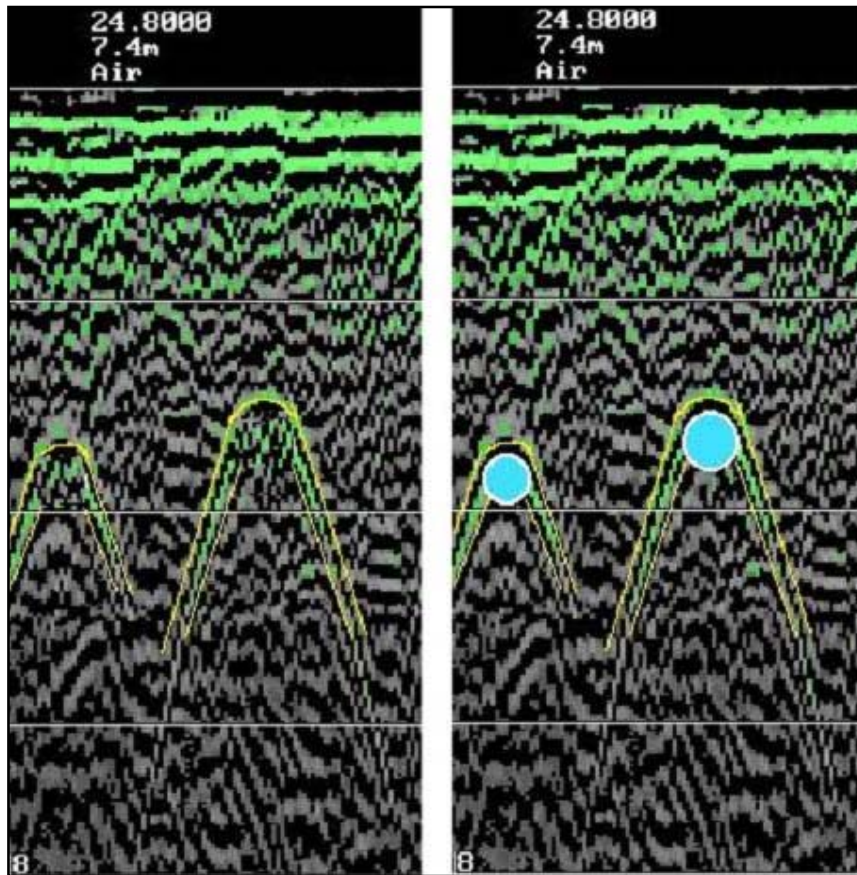


Figura III.5. Corte sobre dos tuberías (sin fuga), la forma parabólica a partir de la parte superior de cada tubería es característica al cortar las tuberías perpendicularmente.

Rastreador o monitoreo de gas. Este sistema emplea un gas, generalmente hidrógeno industrial (95% nitrógeno y 5% hidrógeno o helio) el cual se inyecta en una sección de la tubería previamente aislada. El gas escapa por la falla de la tubería y, al ser más ligero que el aire, permea hacia la superficie a través del suelo y del pavimento y es localizado exactamente al revisar en la superficie sobre la tubería con un detector de gas de alta sensibilidad. Algunas características de los gases trazadores son:

- Debe ser químicamente estable, no reaccionar con ningún compuesto presente en el medio ni estar presente en éste, incoloro e inodoro.
- Posibilidad de medirse fácilmente a bajas concentraciones y durante cortos períodos de tiempo con técnicas de medida que no presenten problemas de interferencias.
- No debe condensar fácilmente.
- Producto comercial y de bajo costo.
- Inofensivos para el medio ambiente, no son tóxicos ni corrosivos.

La inyección de gas es usada con mayor frecuencia para localizar fugas en tuberías a baja presión, especialmente no-metálicas, en conexiones de la casa o tuberías de pequeño diámetro. Las ventajas de esta técnica son: la velocidad para ubicar la fuga, evitar abrir zanjas o seccionar el (los) tramo(s) de la red en estudio. Este método es considerado muy especializado y se recomienda que lo realicen expertos (figura III.6).

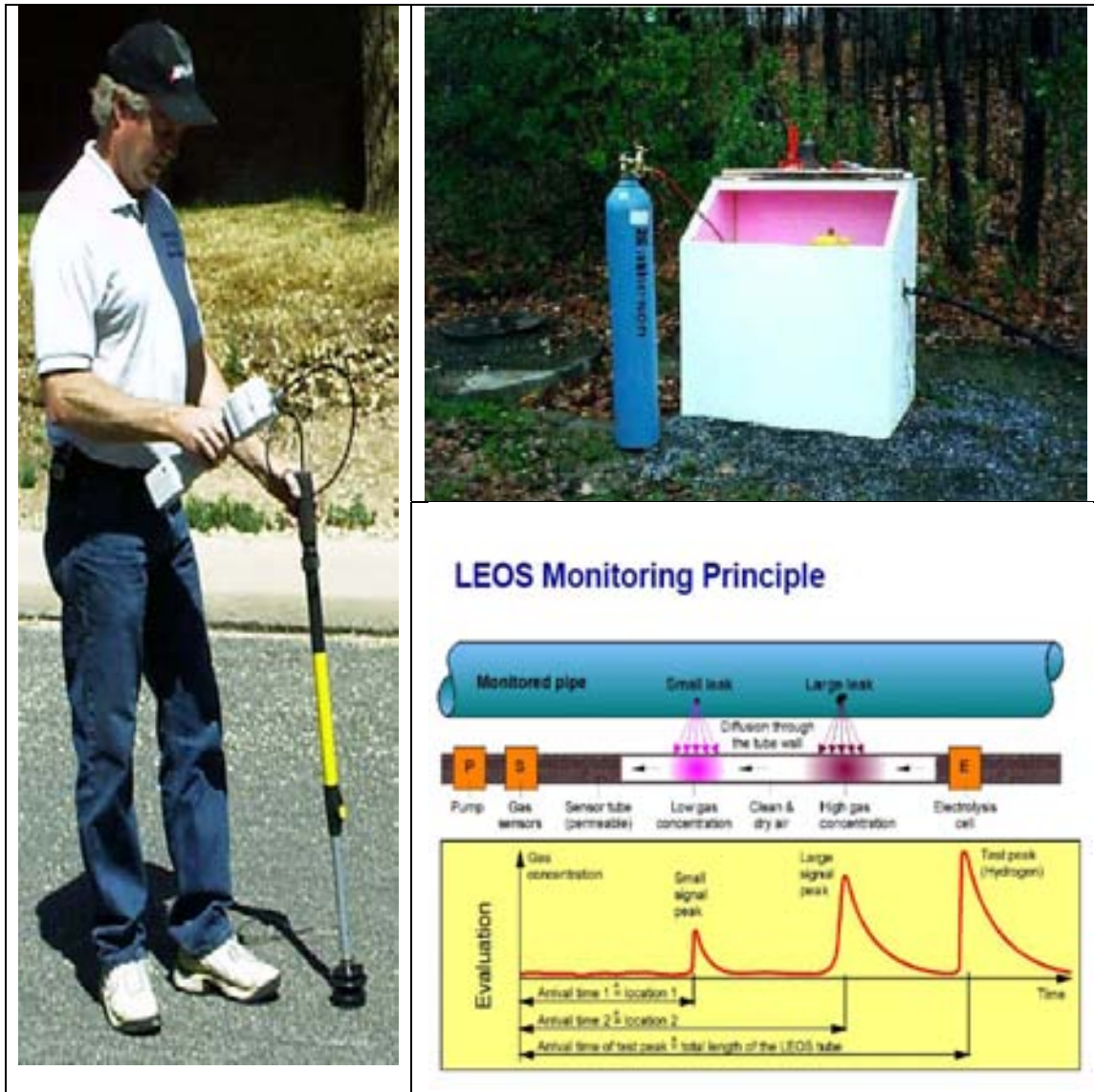


Figura III.6. Detección de fugas por detección de vapores o gases

Monitoreo por temperatura o termografía. Una termografía infrarroja es la técnica de producir una imagen visible de luz infrarroja invisible (para nuestros ojos) emitida por objetos de acuerdo a su condición térmica. Las cámaras termográficas producen una imagen, en vivo (visualizada como fotografía de la temperatura de la radiación), con colores que interpretan el diseño térmico con facilidad. La termografía puede aplicarse en cualquier situación donde un problema o condición pueda ser visualizado por medio de una diferencia de temperatura. Los infrarrojos inciden en el detector como onda electromagnética, la temperatura del detector aumenta por la absorción de la energía de la radiación, la resistencia del detector cambia, y finalmente el cambio de resistencia crea la señal eléctrica. El uso de la termografía para la detección de fugas se basa en el principio de que una fuga de agua modifica la temperatura del suelo alrededor de la tubería enterrada (temperatura más baja alrededor de la fuga que en el suelo seco). Estos cambios se pueden detectar en el suelo arriba de la tubería con la cámara de rayos infrarrojos.

Consideraciones sobre el uso de la termografía:

- Debe existir una clara línea de vista hacia el punto de medición.
- La aplicación es primeramente cualitativa.
- Las pruebas son sin contacto, no son destructivas, incluso pueden ser operadas remotamente.
- No es necesaria la interrupción del servicio y reduce el tiempo para localizar problemas.
- El clima puede afectar el estudio (viento, humedad, polvo, humo, distancia, etc.).
- La emisión de calor afecta los resultados.
- La termografía no puede determinar la causa del problema.

Cables sensores. Este tipo de sensores utilizan un material polimérico que modifica sus propiedades físicas en presencia de una fuga. Normalmente, el cable se localiza por debajo de la tubería de conducción (figura III.7).

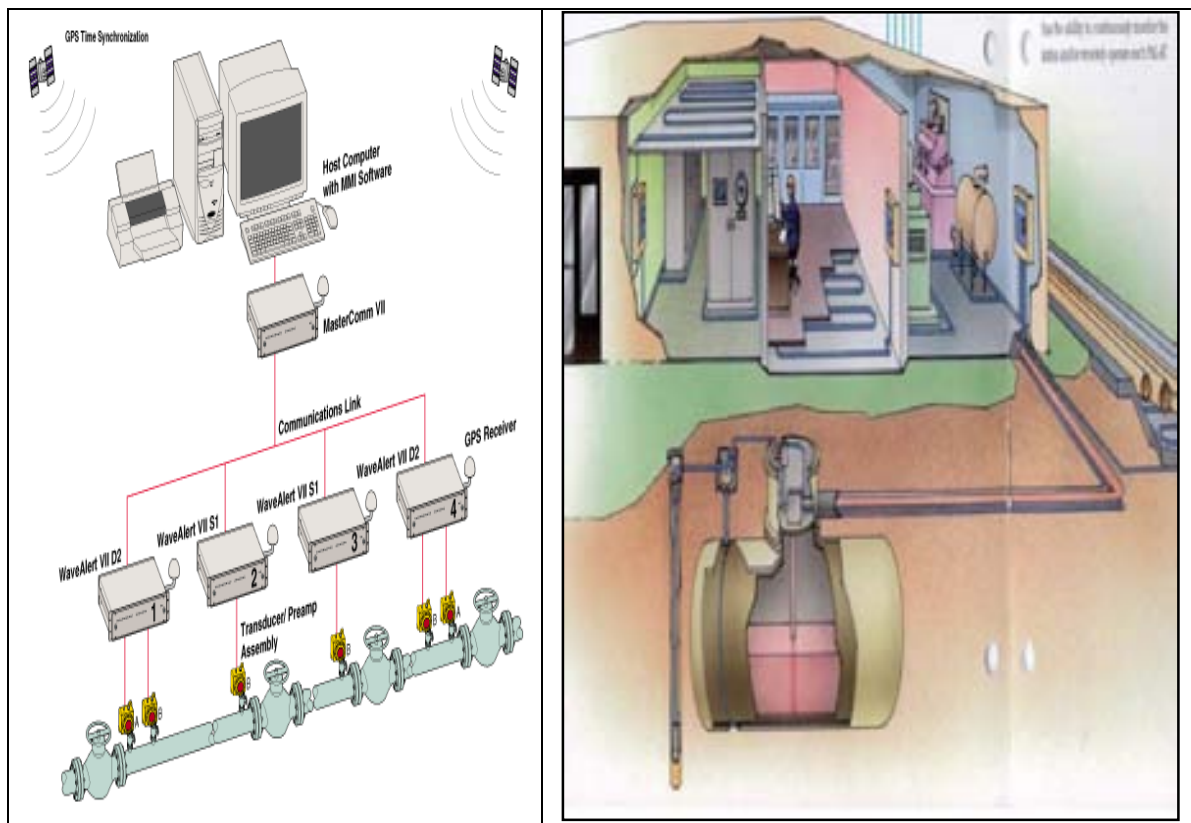


Figura III.7. Detección de fugas por medio de sensores de cable

Entre los inconvenientes de esta tecnología se encuentran: la necesidad de instalar el sensor a lo largo de la línea de conducción (se recomienda instalar en líneas de conducción cortas o separar por tramos las líneas de conducción largas, principalmente aquellos puntos que resultan cruciales), la profundidad máxima a la que puede enterrarse este material es de seis metros, además que en presencia de una fuga, será necesario permitir que el cable sensor seque una vez controlada, lo que implica mayor tiempo en la reparación de la fuga.

Dentro de las posibles variables que pueden monitorearse se mencionan dos:

- Temperatura. En este método el cable es instalado en paralelo a la línea de conducción a fin de determinar un perfil típico de temperaturas. Cuando una fuga ocurre, el medio ambiente sufre una baja abrupta de temperatura, este enfriamiento local puede ser registrado por el cable sensor. Debido a las condiciones bajo las cuales el enfriamiento del medio ambiente es significativo, este tipo de sensores ha sido utilizado en líneas de conducción de gas.
- Micro deformaciones. En presencia de algunas sustancias, estos elementos presentan micro deformaciones que pueden ser medidas mediante un reflectómetro óptico (OTDR por sus siglas en ingles).

Medidores ultrasónicos. Este tipo de mecanismos inducen una onda ultrasónica axial dentro de la tubería y mediante el análisis de los valores registrados en el exterior se determina la existencia de fugas. El sistema opera separando la tubería en segmentos, cada segmento es instrumentado de manera que puede monitorearse el flujo del líquido a través del segmento. La medición del flujo promedio, la temperatura del fluido y del medio ambiente y la velocidad de propagación del sonido en el fluido son utilizadas como indicadores de una fuga de fluido (figura III.8).

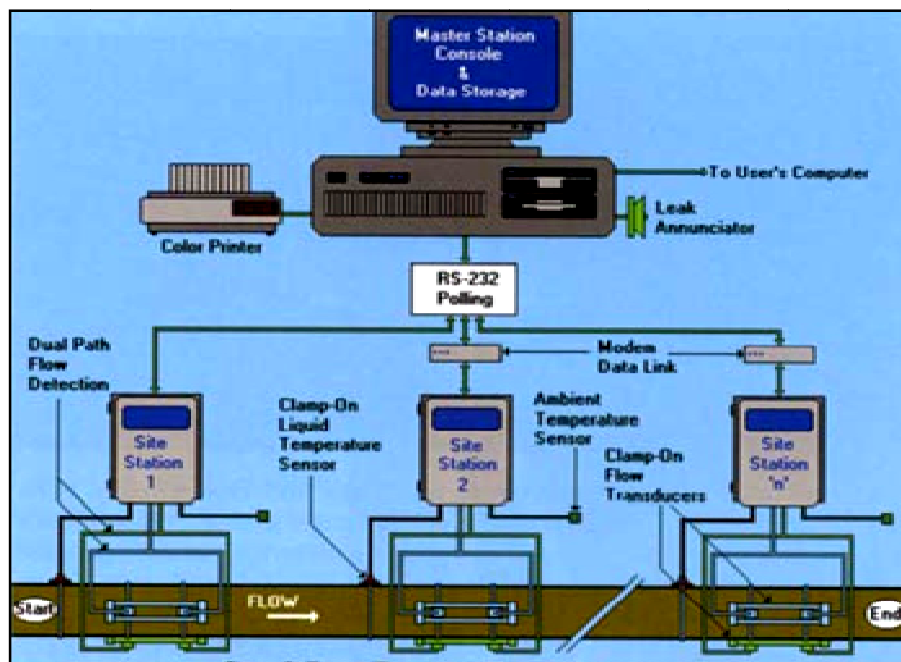


Figura III.8. Detección de fugas por medio de un medidor ultrasónico

Ésta técnica evita detener el sistema para la instalación de los sensores, pero como se dijo antes, resulta costoso y la instrumentación consume mucho tiempo.

Inspección directa. Éste método no requiere de un instrumento en particular, se basa en el recorrido a lo largo de la línea de conducción por personal experimentado buscando patrones inusuales alrededor de la línea, detectando sustancias que pueden haber salido de la línea o escuchando ruidos generados por alguna fuga.

III.1.1.2 Equipos acústicos

La pérdida de agua debido a una fractura en la tubería produce una onda que puede ser registrada como una señal acústica, normalmente de baja frecuencia, la cual se propaga como una onda hacia ambos lados de la tubería a partir del punto de falla por medio de ésta, así como del fluido. El ruido generado es registrado y/o utilizado para localizar la fuga mediante el análisis de las señales detectadas.

Estos dispositivos pueden ser mecánicos o electrónicos, utilizan mecanismos sensibles o materiales tales como elementos piezoeléctricos para censar el sonido y la vibración inducida por una fuga de agua.

Los métodos más frecuentes utilizados para la detección de fugas son los acústicos con escucha directa, los registradores de ruido (Acoustic Loggers) y los correladores (Leak-noise Correlators). Los métodos mencionados detectan sonidos o vibraciones en varios puntos de la tubería y a partir de ellos se localizan las fugas ubicando el origen del ruido que producen.

Dispositivos de escucha directa. Estos equipos incluyen a los “rodillos auditivos”, estetoscopio (bastón de escucha), y “micrófonos de tierra”, también conocidos como geófonos, y pueden ser tanto mecánicos como electrónicos. Usan mecanismos o materiales sensibles a la vibración o al sonido emitido por las fugas. La metodología consiste en escuchar el ruido ocasionado por la fuga, al poner en contacto el equipo con la tubería o sus accesorios, aunque en el caso del geófono puede ser superficial (figura III.9). Es la forma más sencilla y antigua utilizada actualmente. Los dispositivos auditivos más modernos incorporan en sus equipos amplificadores de señal y filtros que con los que se puede hacer resaltar el ruido de la fuga. Con este tipo de equipos es necesario recorrer sistemáticamente la red de tuberías lo que requiere de mucho tiempo y además dependen del operador, que en la medida de su experiencia será la efectividad del equipo.



Figura III.9. Detección de fugas por métodos acústicos directos (estetoscopio y geófonos)

Correladores de ruido. Son equipos portátiles basados en el análisis de dos registros mediante microprocesadores que pueden localizar de manera automática fugas a lo largo de la red de distribución (figura III.10). Están basados en los métodos de correlación cruzada de funciones, lo que implica medir en dos puntos de la conducción, por medio de sensores independientes, pero con la misma referencia temporal, el nivel de vibración o de ruido emitido por la fuga. Las vibraciones o el sonido son transmitidos de manera inalámbrica al correlador (figura III.11). Para determinar el punto de falla el correlador establece el retraso entre señales por medio de una función de correlación cruzada, la cual se establece por medio de relaciones algebraicas simples. Los correladores son los equipos más utilizados actualmente y efectivos pues dependen menos de la experiencia del operador.

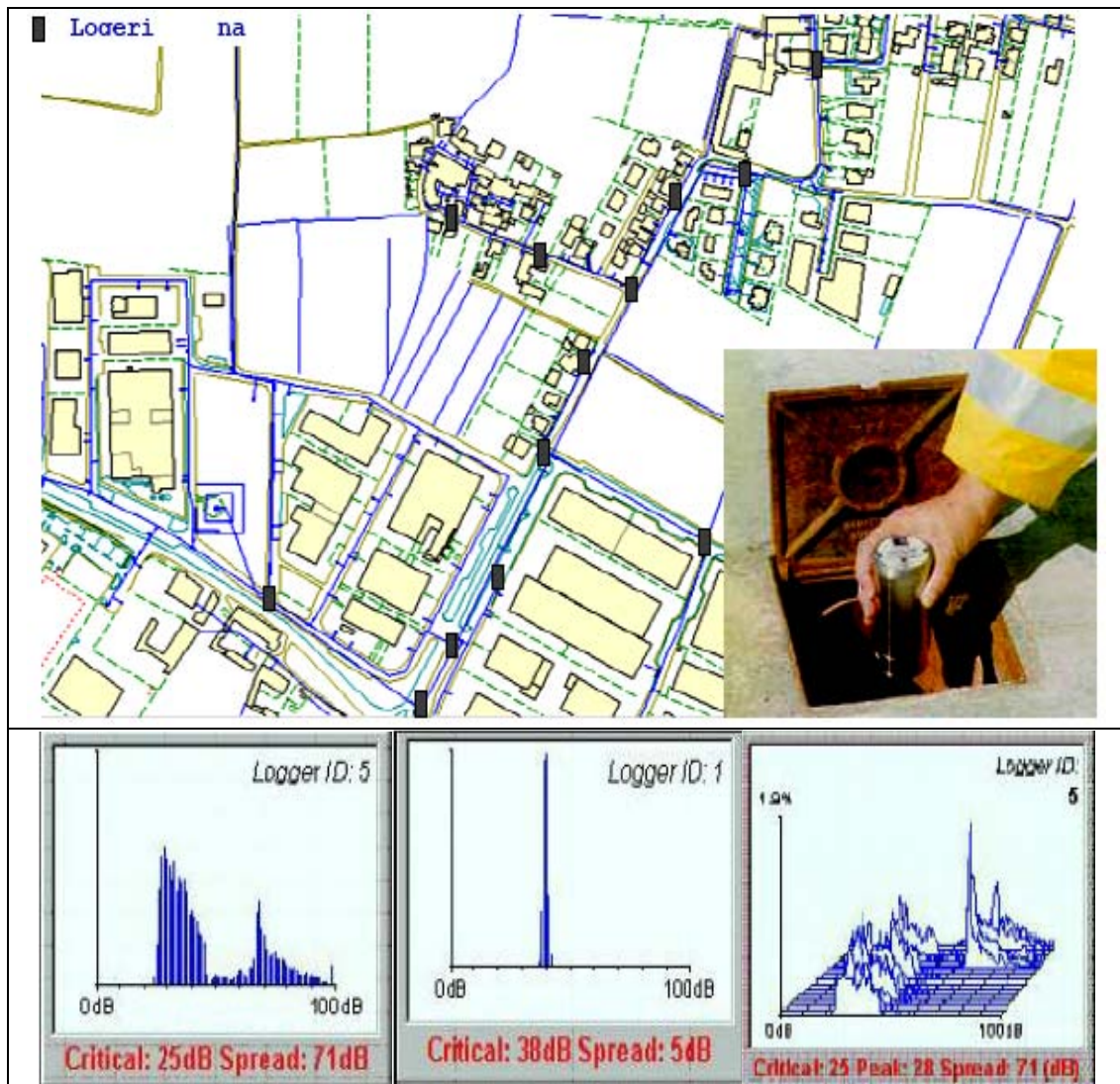


Figura III.10. Ejemplo de colocación, ubicación y lectura de los registradores de ruido (IWA, 2007)

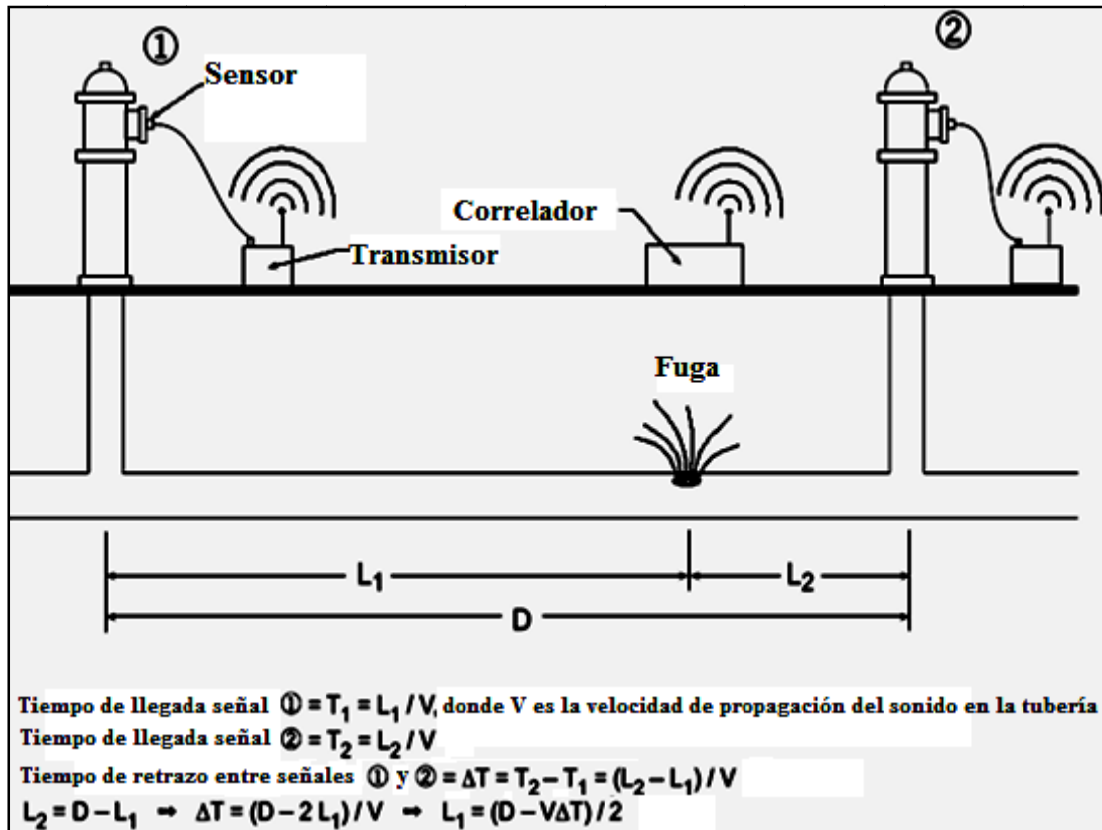


Figura III.11. Método de correlación para la localización de fugas

Los dispositivos con los que trabaja el correlador, pueden ser sensibles a la vibración y se les conoce como acelerómetros, mientras que los sensibles al sonido, son conocidos como hidrófonos (figura III.12). Los acelerómetros convierten la vibración mecánica inducida por la fuga en la pared de la tubería, válvulas o hidrantes, a una señal eléctrica, mientras que los hidrófonos, que son micrófonos sumergibles, detectan el sonido que viaja por el agua en el interior de la tubería en forma de variaciones de presión generadas por la fuga y las convierten a una señal eléctrica. Algunos ejemplos de estos sensores se enuncian a continuación:

- *Acelerómetros piezoeléctricos.* También se les conoce como acelerómetros de carga, ya que se pueden modelar como un sistema de masa-resorte que genera una fuerza equivalente a la amplitud y frecuencia de la vibración con que es excitado, ésta fuerza se aplica sobre un elemento piezoeléctrico que produce una carga eléctrica proporcional al movimiento vibratorio. Tienen muy buena respuesta a altas frecuencias. Se debe tener cuidado de utilizarlos en aplicaciones cuyas frecuencias estén por debajo de su frecuencia de resonancia. Los materiales piezoeléctricos no requieren de una fuente externa de alimentación ya que intrínsecamente generan una variación de carga proporcional a la fuerza que se le aplica, sin embargo tienen muy baja sensibilidad por lo que requieren de un preamplificador especial, conocido como amplificador de carga.
- *Acelerómetro tipo IEPE.* Básicamente son acelerómetros piezoeléctricos con un preamplificador integrado que entrega como señal de salida un voltaje modulado sobre la línea de alimentación. La incorporación del preamplificador aumenta notablemente la

sensibilidad del sensor así como la relación señal-ruido, con un ancho de banda que permite trabajar desde bajas frecuencias para aplicaciones de propósito general hasta aplicaciones que requieren de la medición de vibración de alta frecuencia. Este tipo de acelerómetros requiere del uso de una fuente de corriente constante externa, con la que se logra una impedancia de salida baja, lo que permite el uso de cables coaxiales convencionales. Al igual que los acelerómetros piezoeléctricos, su sistema masa-resorte no cuenta con un amortiguador por lo que se debe considerar en la aplicación la frecuencia de resonancia del sensor.

- *Acelerómetros piezoresistivos.* Utilizan elementos resistivos sensibles a la tensión mecánica aplicada, “strain gauges” o calibradores de tensión. Estos sensores tienen una excelente relación señal-ruido y son ideales para aplicarlos en la medición de movimiento, vibraciones de baja frecuencia e impacto y están diseñados para pruebas de colisión, de rugosidad de pavimentos, entre otras. Su respuesta en frecuencia se extiende desde la aceleración en estado estable (DC o cero hertz) lo que los hace ideales para medir transitorios mecánicos de larga duración. Para la mayoría de las aplicaciones su sensibilidad es lo suficientemente alta por lo que no es necesario preamplificar su señal de salida. Sin embargo este tipo de acelerómetros tiene problemas inherentes a las mediciones de baja frecuencia, como corrimiento en la señal de corriente directa y su ancho de banda es relativamente limitado.
- *Acelerómetros de capacitancia variable.* Requieren un microsensor de capacitancia variable formado por placas paralelas. Tienen una respuesta en frecuencia que permite su utilización para la medición de aceleraciones de estado estable, movimiento y vibración de baja frecuencia y se han usado en aplicaciones para el monitoreo de trayectorias, evaluación de estructuras de aviones y automóviles, pruebas de elementos sometidos a turbulencia, pruebas de los sistemas de suspensión y frenos de automóviles, aplicaciones que generalmente son de aceleraciones de baja amplitud.
- *Hidrófonos.* Son transductores piezoeléctricos que utilizan elementos cerámicos piezoeléctricos como elementos sensibles. Estos elementos tienen una estructura interna de soporte que lo mantiene unido a una membrana polimérica que permite el paso del sonido. La estructura interna además está mecánica y eléctricamente aislado del cuerpo del sensor para garantizar que se capte únicamente la vibración que la variación de presión del agua genera en la membrana polimérica. Estos sensores tienen respuestas en frecuencia que van desde muy bajas frecuencias como 0.1 Hz, hasta frecuencias arriba de los 100 kHz. Requieren accesorios especiales para su colocación en la tubería, lo que lleva a consumir más tiempo en su instalación. Sin embargo, este tipo de sensores permiten la medición de las señales emitidas por fugas pequeñas, o fugas en sitios con niveles altos de vibración en el suelo, así como cuando únicamente es posible colocar los sensores a grandes distancias. Son más sensibles que los acelerómetros para señales de baja frecuencia y al igual que los acelerómetros piezoeléctricos, requieren preamplificadores de carga para acondicionar la señal que entregan.



Figura III.12. Correlador, sensores (acelerómetros e hidrófonos), transmisores inalámbricos y computadora

Los métodos acústicos son los más usados y efectivos, especialmente los que emplean al método de correlación cruzada (correladores), su principal ventaja radica en la posibilidad de instalar el sensor de manera externa a la tubería, por lo que no se requiere suspender la operación del sistema.

La eficiencia de estos equipos está comprobada cuando se emplean para detectar y localizar fugas en tuberías. Entre los aspectos que más influyen para el éxito de los dispositivos acústicos se encuentran:

- Material de la tubería.- Si la tubería es rígida (metálica) la velocidad de propagación es alta y se aproxima a la velocidad de transmisión del sonido en un medio líquido, las señales acústicas viajan grandes distancias y la pérdida de la señal es pequeña; si la tubería es flexible la pérdida de la señal es mayor que en las tuberías metálicas por lo que la intensidad de la señal disminuye rápidamente a medida que se aleja de la fuente de ruido. Las señales que logran detectarse a mayor distancia tienen las componentes del ruido de bajas frecuencias.

- Diámetro de la tubería.- También tiene un efecto significativo sobre la atenuación de las señales acústicas generadas por la fuga, entre más grande es el diámetro de la tubería mayor es la atenuación, predominan las bajas frecuencias y por lo tanto más difícil es detectarla (Hunaidi, 2000a).
- Ruido ambiente.- Para identificar adecuadamente el ruido que produce la fuga, es necesario que el ruido externo sea minimizado, pues puede causar interferencia, además se requiere diferenciar el sonido debido a la operación normal de la tubería. El ruido ambiente puede provenir de zonas de alto tránsito vehicular o maquinaria (vibraciones de baja frecuencia).
- Tamaño de la fractura.- Las características acústicas de los sonidos y señales varían con el tipo y el tamaño de la fuga, fallas por ranuras y corrosión en las paredes de la tubería generan señales más intensas y de mayor frecuencia que las que generan las fugas en juntas y válvulas. Generalmente, mientras más grande sea la fuga, mayores serán el ruido y la señal emitida. Para fugas excesivamente grandes el ruido podría disminuir.
- Experiencia del operador, sensibilidad y rango del equipo.- En muchas ocasiones seleccionar y operar estos dispositivos requiere de una ardua experiencia y capacitación para distinguir las señales. Algunos de los sistemas de medición funcionan adecuadamente en cambios de material en la tubería. Se sabe que los acelerómetros son efectivos únicamente para fugas grandes (mayores que 20 lt/min) y para localizar fugas pequeñas (del orden de 6 lt/min) es necesario utilizar hidrófonos. La probabilidad de éxito se incrementa si se hace un apropiado uso de amplificadores de señales y filtros de ruido (analógico o digital) a fin de realzar la señal de fuga.
- Presión interna en la conducción.- A mayor presión, mayor es el ruido. Es difícil detectar fugas en tuberías con presiones menores que 1.05 kg/cm². Los métodos acústicos funcionan más adecuadamente en tuberías donde la presión es alta y el gasto es relativamente bajo, ya que esta condición aumenta significativamente la señal acústica debida a la fuga.
- Tipo de suelo y profundidad de localización de la tubería.- Algunos experimentos sugieren que las señales son más audibles en suelos arenosos que en suelos arcillosos, más audibles en asfalto o concreto que en suelos cubiertos de hierba o pasto. La señal de una fuga es amortiguada si la tubería está instalada por debajo del nivel freático.

Indicador interno de ruido. Es un pequeño dispositivo que viaja dentro de la tubería que registra y transmite el ruido a los sensores colocados estratégicamente a lo largo de la conducción para recibir los datos. Se presenta como lo más preciso para localizar hasta fugas muy pequeñas. El sistema de Sahara es ejemplo este método de localización, utilizado desde los años 90's. Se desarrollan otros equipos que utilizan el proceso de un registrador del ruido dentro de la conducción usando la velocidad del agua para desplazarlos, deben ser insertados en la tubería y recuperados por un método adecuado y seguro. Estos dispositivos también se utilizan para comprobar la calidad del agua y su constitución química (figura III.13).

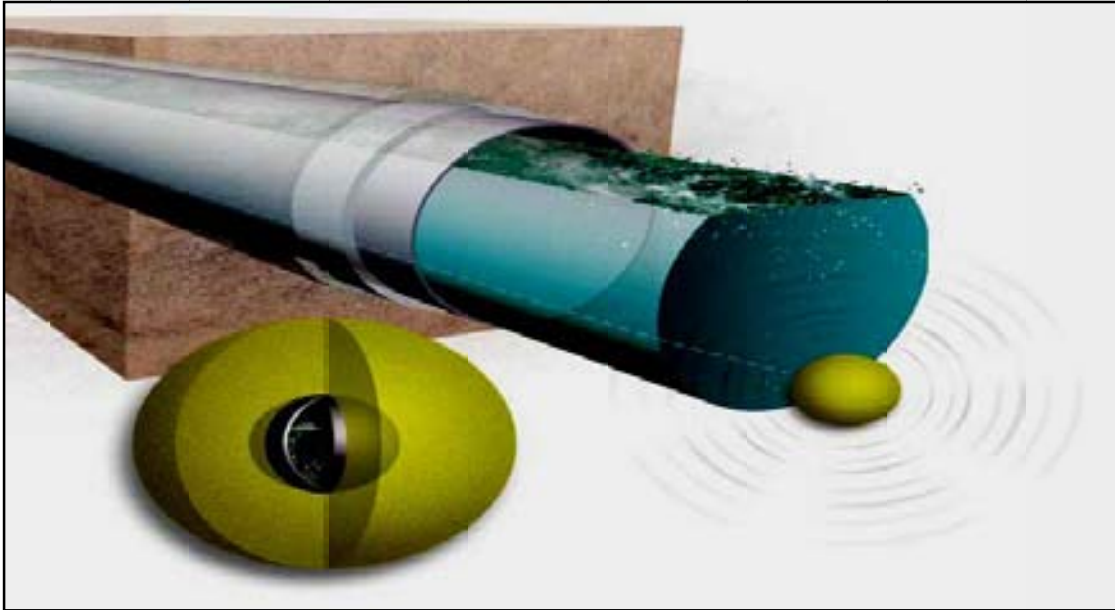


Figura III.13. Indicador interno de ruido

III.1.2 Métodos de detección por software

En los sistemas de agua potable se promueven actividades para detección y localización de fugas con equipos tradicionales que se ofrecen en el mercado, usando técnicas como las antes descritas, y como se mencionó, tienen sus desventajas a la hora de aplicarlos. Esto originó que se desarrollaran métodos de programación de modelos matemáticos que ayuden a detectar fugas en las redes mediante el uso de valores de variables medidas durante la operación de la red (presión y/o caudal). A continuación se mencionan algunos de los métodos que se han estudiado para reducir las pérdidas de agua en las redes:

- ✦ En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se analizó este problema mediante un método iterativo similar al que se usa para calcular las redes de tuberías (flujo permanente) en el cual las fugas son consideradas como extracciones y se localizan en los tubos más vulnerables (Sánchez B., 1997).
- ✦ Liggett (1994a) propone otro método basado en flujo transitorio inverso, debido a que, según sus experimentaciones, el análisis en flujo permanente depende de el(los) factor(es) de fricción. Un problema inverso es aquel en que a partir de las mediciones obtenidas para cierto estado, se quieren encontrar las características del sistema que producen dicho estado. Generalmente, este tipo de problemas no son bien planteados matemáticamente pues su solución puede no ser única, puede no ser continua o incluso puede no existir. Para localizar fugas, el cálculo transitorio tiene dos grandes ventajas sobre el cálculo en régimen estacionario: (a) Las ondas de presión se ven menos afectadas por la fricción que el flujo permanente y de este modo la precisión de los factores de fricción se vuelve menos importante para el cálculo (es menos sensible a la fricción); y (b) la mayoría de las redes operan la mayor parte del tiempo bajo condiciones no estacionarias por lo que el control no necesita tener definidos periodos estacionarios concretos.

- ✦ También se han estudiado los efectos que producen las fugas en la medición y registro de la presión durante los transitorios hidráulicos; por un lado, se presenta la atenuación de las ondas de presión después de cerrar válvulas, y por otro lado, una fuga genera que la onda de presión reflejada sea mayor que en condiciones normales, después del paro de una bomba y antes del cierre de la válvula.

Los métodos arriba mencionados tienen en común diversas particularidades como: la aplicación del “Método de las Características” para el cálculo de régimen transitorio, las fugas se representan en el cálculo como orificios – aunque como ya se mencionó, los coeficientes de descarga y potencias de la carga (presión) tienen distintos valores – y en contra, el mismo inconveniente que representa el hecho de que se necesitan calibrar las variables utilizadas y verificar los resultados calculados con los medidos, ya sea en alguna instalación experimental o en campo. Respecto a los métodos de optimización, actualmente emplean el “Método de Algoritmos Genéticos” para obtener la solución de la función objetivo que se plantea al comparar las cargas medida y calculada.

Existen otros métodos de diagnóstico (localización de fugas) basados en redundancia analítica que utilizan información de las mediciones y un modelo matemático para representar el comportamiento de la presión y del gasto a través de la tubería. La idea de redundancia analítica utilizada, en general, radica en utilizar el modelo del sistema estudiado para estimar los valores de los parámetros de referencia. Los estimados son comparados con la situación actual de la señal correspondiente (medida). La localización se realiza por análisis posterior de estas señales (Castañeda, 2006).

III.2 Mediciones experimentales con equipos localizadores en materiales no metálicos

Las campañas para detectar y localizar fugas han sido aplicadas en México desde hace ya tiempo con resultados variables. Es muy probable que los fracasos o la poca eficacia obtenida en éstos programas se deban al empleo de equipos no adecuados o a no ajustarlos de forma adecuada, principalmente cuando se trata de tuberías no metálicas.

Actualmente las nuevas redes de agua potable son construidas con tuberías plásticas: PVC y de polietileno de alta densidad (PEAD), aunque aún existen las hechas de asbesto-cemento y las más antiguas de hierro fundido. Se ha observado que la mayor proporción de pérdidas se presentan en las tomas, incluyendo la conexión de la toma domiciliaria a la línea de distribución pues en muchos casos, se han construido con tubos plásticos de baja calidad. Los operadores pueden desconocer el arreglo real de su red y cometer errores al interpretar la información entregada por los detectores, con lo que concluyen que los equipos no sirven, reforzando la idea de que no hay tantas fugas como en verdad existen.

Lo anterior ha promovido que se estudie la bondad de las técnicas para detectar fugas en las tuberías no metálicas, por lo que se construyó en el Laboratorio de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, una instalación experimental donde se podrá experimentar con tuberías de PVC, PEAD y asbesto-cemento (A-C) (figura III.14).



Figura III.14. Secciones de la instalación experimental

III.2.1 Mediciones experimentales de la velocidad de onda

Uno de los parámetros más importantes y difíciles de medir en la localización de una fuga, es la velocidad de onda “ c ” (celeridad), pues se ha visto en la práctica que su valor no es constante. Aunque, se generan muchas ondas en una tubería enterrada y llena de fluido, existe una onda que generalmente juega un papel predominante en la propagación del ruido de la fuga y es la que permite su localización.

La influencia de la celeridad se interpreta de la siguiente manera: si se sospecha la existencia de alguna fuga, los sensores acústicos son colocados a cada lado del punto donde se supone la fuga; las señales de los sensores se muestrean en intervalos iguales y simultáneamente, si se halla alguna fuga entre la posición de los dos sensores, a partir de estas mediciones se podrá observar en la función de correlación un pico distinto (figura III.15).

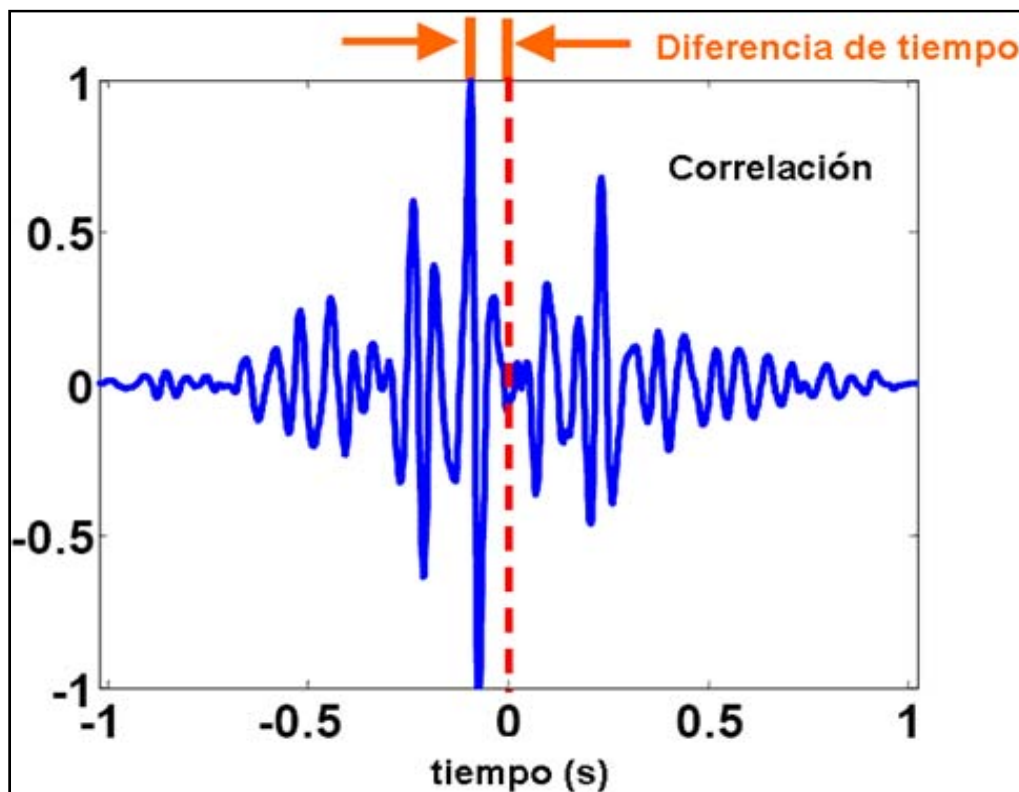


Figura III.15. Función de correlación de dos señales y determinación de su diferencia de tiempo

Esto determina el tiempo de retardo t_{\max} que corresponde a la diferencia de tiempos de llegada de la señal a cada uno de los sensores y con base en la celeridad de la tubería se calcula la distancia d_1 medida a partir del sensor 1 como se muestra en seguida (figura III.16).

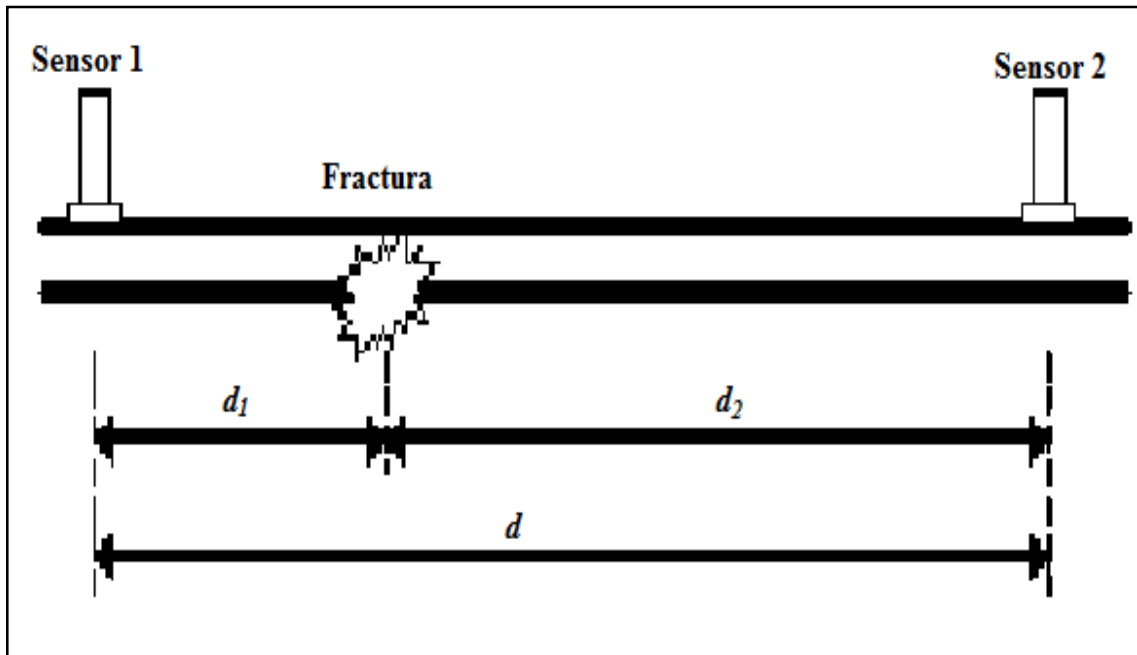


Figura III.16. Esquema de una tubería con una fuga entre dos sensores

Con base en la figura anterior se puede establecer la relación:

$$t_{\max} = \frac{d_2 - d_1}{c}$$

Sustituyendo $d_2 = d - d_1$ la posición de la fuga relativa al sensor 1 está dada por

$$d_1 = \frac{d - ct_{\max}}{2}$$

donde d distancia entre los dos sensores,
 c velocidad a la cual el ruido de la fuga se propaga a través de la tubería,
 t_{\max} diferencia de tiempo en la llegada del ruido desde la fuga a los dos sensores.

Parte de los experimentos consistió en provocar un pequeño golpe de ariete para medir la celeridad en cada una de las tuberías. A continuación se presentan los resultados obtenidos. Para realizar estas mediciones se mantuvo cerrada la válvula localizada en el extremo final de la tubería (V2). El arreglo utilizado se muestra en la figura III.17.

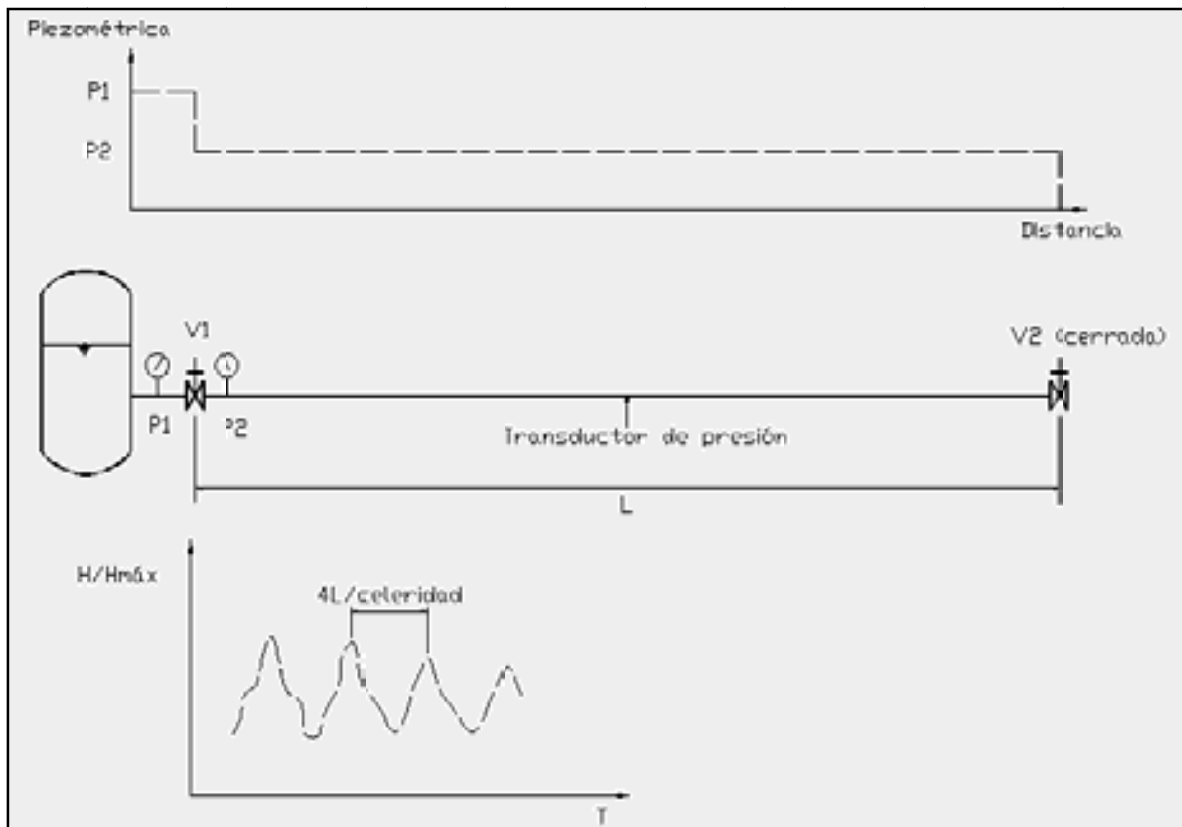


Figura III.17. Esquema de las pruebas para determinación de la celeridad

Tabla III.1. Resumen de las mediciones de celeridad

PVC		A-C		PEAD	
<i>T</i> (s)	<i>c</i> (m/s)	<i>T</i> (s)	<i>c</i> (m/s)	<i>T</i> (s)	<i>c</i> (m/s)
1.118	372.1	0.747	556.9	1.416	293.8
1.138	365.6	0.736	565.2	1.471	282.8
1.139	365.2	0.725	573.8	1.461	284.7
1.150	361.7	0.724	574.6	1.471	282.8
1.138	365.6	0.714	582.6	1.472	282.6
1.150	361.7	0.713	583.5	1.471	282.8
1.149	362.1	---	---	---	---
Promedio	364.8	Promedio	572.6	Promedio	285.3

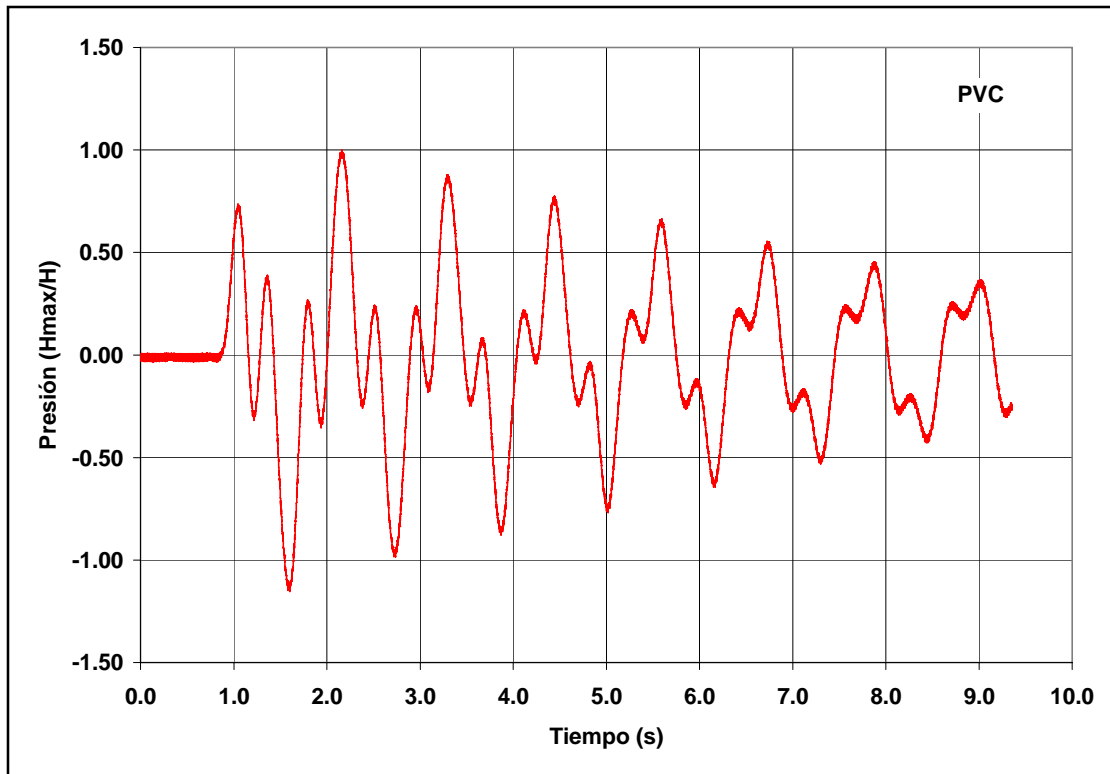


Figura III.18. Registro de presión transitoria para determinación de la celeridad en PVC

En el caso de tuberías comerciales, la velocidad de transmisión de las perturbaciones, conocida como celeridad, depende de las características, dimensiones y material de las tuberías. Su valor está dado por:

$$c = \left\{ \rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{Ee} \phi \right) \right\}^{-\frac{1}{2}}$$

donde

- ρ densidad del líquido = 1,000 kg/m,
- K módulo de compresibilidad del líquido = 2.2×10^9 N/m²,
- E módulo de elasticidad del material de la tubería en N/m² (3.3×10^9 N/m² para el PVC, 2.4×10^{10} N/m² para A-C y 9×10^8 N/m² para el PEAD),
- ϕ factor valor asociado al gado de restricción que tiene la tubería contra el movimiento longitudinal,
- D diámetro interior de la tubería y
- e espesor de la misma.

Con las mediciones de celeridad presentadas en la tabla III.1 se obtuvieron los valores de ϕ para cada material, como lo resume la siguiente relación.

Tabla III.2. Valores de ϕ para los materiales empleados en la instalación experimental

Material	D (mm)	e (mm)	D/e	ϕ
PVC	105.0	5.0	21	1.11
A-C	100.5	13.4	7.5	8.3
PEAD	105.0	7.0	15	0.71

III.2.2 Medición de la rapidez de atenuación de la señal acústica producida por una fuga

La amplitud de la onda que transmite el ruido de la fuga disminuye respecto a la distancia y frecuencia ya que una tubería plástica actúa como filtro que deja pasar sólo las ondas de baja frecuencia (ondas con mayor energía), la cual decrece conforme aumenta la distancia a la fuga, en otras palabras, la atenuación de la onda a lo largo de la tubería es alta.

Para determinar experimentalmente la atenuación del ruido a lo largo de la tubería, se realizaron pruebas en las que se midió la vibración en la tubería en distintos puntos a lo largo de ella, alejando el punto de observación de la fuga, aguas arriba de la fuga y aguas abajo de ella. A continuación se presentan los datos de los puntos de medición en las tuberías de cada material (tabla III.3), así como algunos registros de las mediciones (III.19).

Tabla III.3. Ubicación de los puntos de medición

MATERIAL	A-C		PEAD		PVC	
	Distancia (m)	L/D	Distancia (m)	L/D	Distancia (m)	L/D
-11	-12.39	-121.9	-12.89	-126.9	-12.67	-124.7
-10	-11.59	-114.1	-11.64	-114.6	-11.49	-113.1
-9	-10.46	-103.0	-10.51	-103.4	-10.36	-102.0
-8	-9.22	-90.7	-9.36	-92.1	-9.18	-90.4
-7	-8.15	-80.2	-8.22	-80.9	-8.06	-79.3
-6	-6.97	-68.6	-7.11	-70.0	-6.92	-68.1
-5	-5.84	-57.5	-5.92	-58.3	-5.78	-56.9
-4	-4.64	-45.7	-4.77	-46.9	-4.58	-45.1
-3	-3.51	-34.5	-3.6	-35.4	-3.46	-34.1
-2	-2.33	-22.9	-2.42	-23.8	-2.28	-22.4
-1	-1.25	-12.3	-1.33	-13.1	-1.17	-11.5
0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
1	1.06	10.4	0.96	9.4	1.12	11.0
2	2.33	22.9	2.28	22.4	2.31	22.7
3	3.35	33.0	3.29	32.4	3.42	33.7
4	4.59	45.2	4.46	43.9	4.61	45.4
5	5.68	55.9	5.58	54.9	5.73	56.4
6	6.87	67.6	6.75	66.4	6.91	68.0
7	7.98	78.5	7.88	77.6	8.02	78.9
8	9.19	90.5	9.06	89.2	9.22	90.7
9	10.27	101.1	10.17	100.1	10.32	101.6
10	11.58	114.0	11.47	112.9	11.6	114.2
11	12.46	122.6	12.76	125.6	12.91	127.1
L total	24.85	244.6	25.65	252.5	25.58	251.8

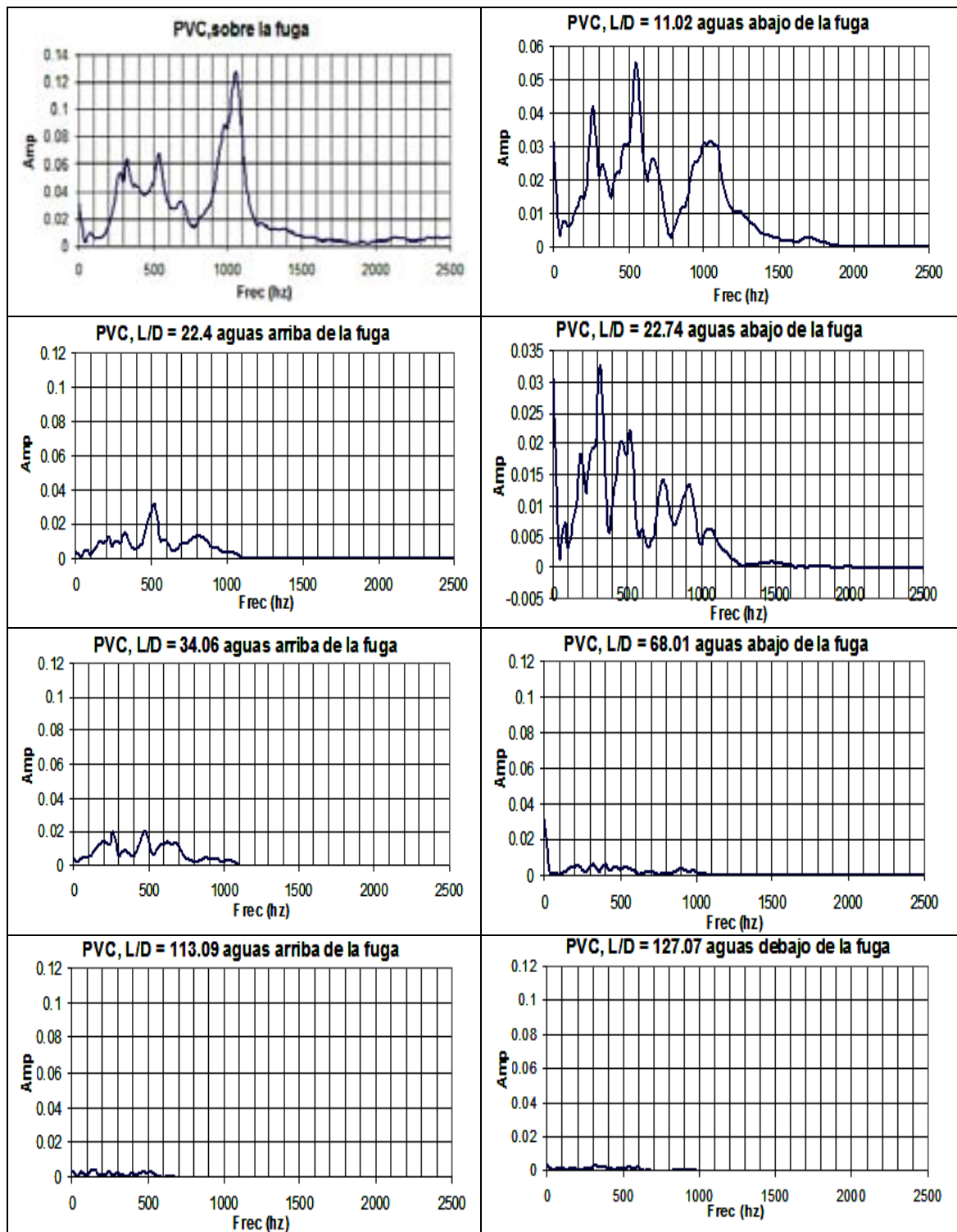


Figura III.19. Espectro en frecuencia (PVC) de la señal de fuga a diferentes distancias de ésta. La distancia a la fuga se presenta como la relación de la distancia respecto al diámetro de la tubería (L/D).

Se midió la atenuación de la señal; la figura III.20 presenta los resultados obtenidos de la pérdida de energía de la señal de ruido emitida por una fuga en cada material probado.

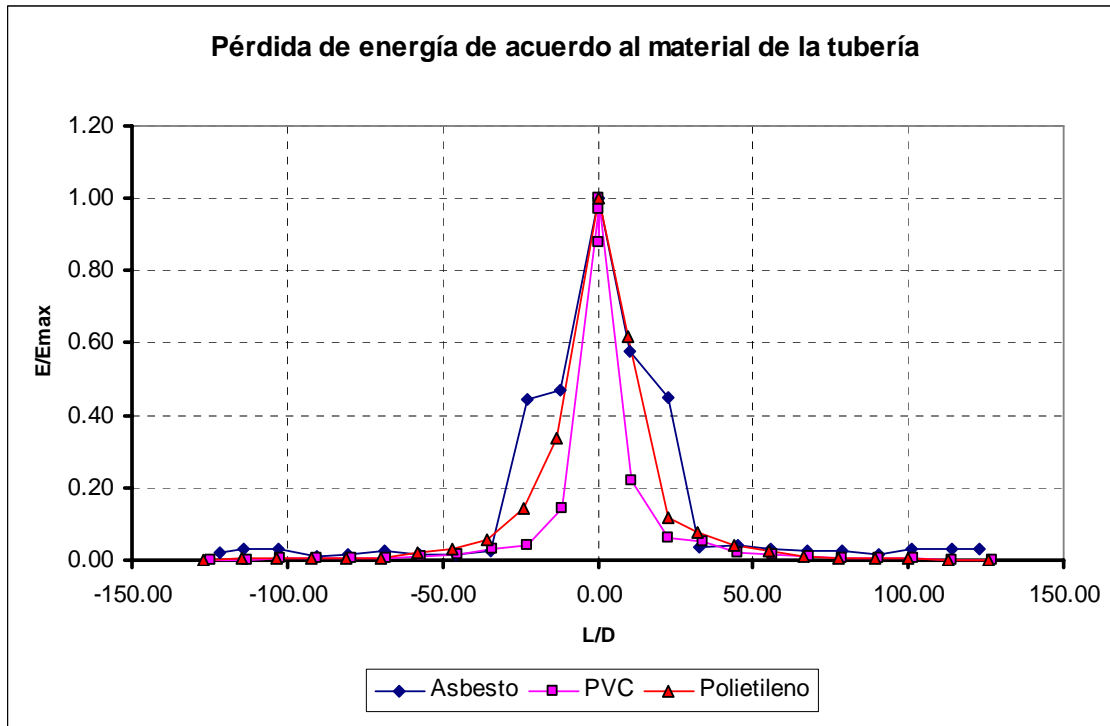


Figura III.20. Comparación de la atenuación de la señal del ruido provocado por la fuga en los materiales estudiados

Como se puede observar, la pérdida de energía es mayor en el PVC y menor en el Asbesto-Cemento, aunque en los tres casos, se trata de una atenuación bastante importante, más del 90% de la energía de la señal de ruido se ha perdido antes de los primeros 50 diámetros de longitud. Esto remarca la dificultad para identificar la fuga a distancias mayores.

III.2.3 Localización de una fuga con equipo comercial

Actualmente los métodos y técnicas más empleados para la localización de fugas han sido los equipos acústicos, es por ello que las mejoras o avances de los sistemas se han dado principalmente en el sistema de análisis de las señales obtenidas. Las características acústicas de las fugas, en su concepción teórica están estrechamente relacionadas con la transformada de Fourier y el análisis de señales, por lo que existen sistemas basados en ella o en análisis de correlación de la señal, aunque su efectividad depende de varios factores propios equipo, de las características de la tubería de la red, de la experiencia de sus operadores y de los sensores utilizados.

Una señal periódica en el tiempo puede expresarse como una suma infinita de términos, expresados como funciones senoidales, entonces se dice que esa suma es la serie de Fourier correspondiente a la señal analizada. La ventaja de ésta representación es que la señal logra aproximarse con un número finito de componentes los cuales representan los contenidos en distintas frecuencias que puede tener la señal original. La señal asociada a la vibración o sonido

emitido por la fuga, puede analizarse en el dominio de la frecuencia bajo esta teoría (figura III.21).

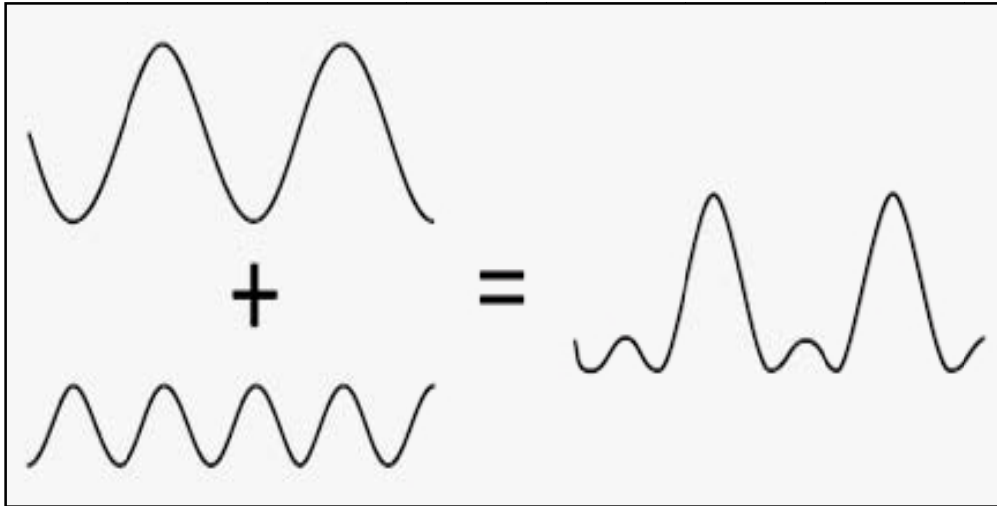


Figura III.21. Descomposición de una señal en sus componentes senoidales

Las pruebas se realizaron con uno de los equipos más modernos disponibles, el correlador Aquascan 610, de Gutermann. Este equipo consta de dos sensores y un correlador que puede ser conectado a una computadora portátil. La figura III.22 es una fotografía de este equipo y de la pantalla de la computadora utilizada durante una de las mediciones. Cabe mencionar que existen otros equipos disponibles en el mercado igualmente eficientes.



Figura III.22. Equipo de correlación Aquascan 610

Se efectuaron un total de 24 pruebas (ver tablas III.4, III.5 y III.6), ocho para cada uno de los materiales; en cada una de ellas se ensayaron cuatro ubicaciones o distancias diferentes de la fuga respecto los sensores (denominados A y B). La siguiente figura muestra el arreglo empleado para la ubicación real y estimada (con el equipo) de la fuga; de acuerdo a ella, se establecen las siguientes variables:

L_A	ubicación de la fuga respecto del sensor A (bandera roja en la foto)
L_B	ubicación de la fuga respecto del sensor B (bandera amarilla)
$L = L_A + L_B$	longitud total entre los sensores A y B
M_A	ubicación estimada de la fuga respecto del sensor A
M_B	ubicación estimada de la fuga respecto del sensor B (bandera amarilla)

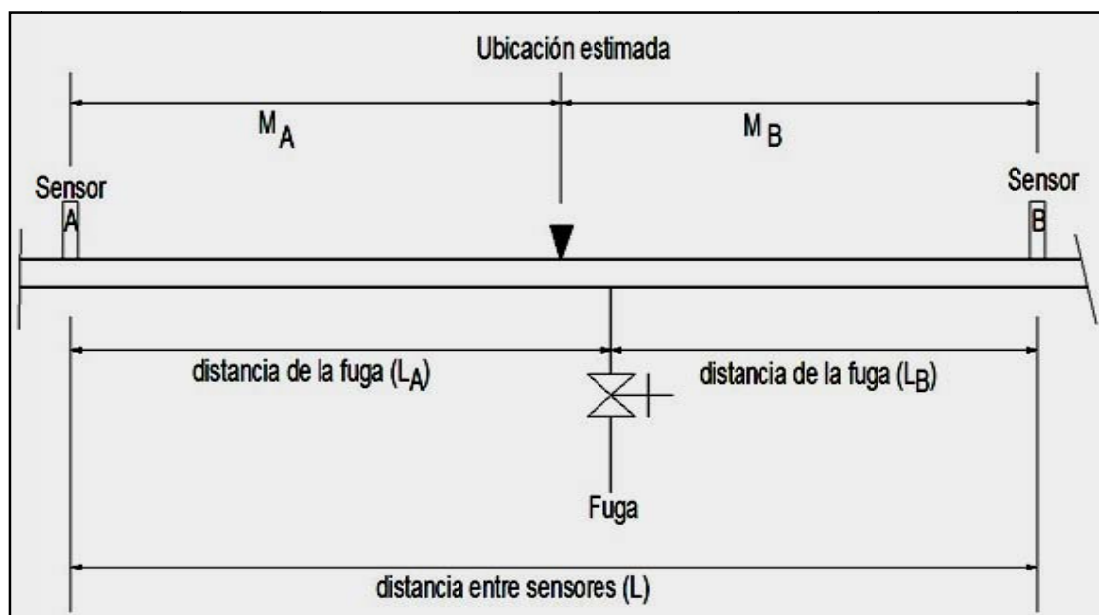


Figura III.23. Distancia real y estimada entre los sensores y la fuga

Este equipo de localización permite seleccionar manualmente algunos parámetros, mientras que otros son establecidos por default. Entre las variables que deben ser proporcionadas por el usuario están:

- ✓ **L:** Longitud entre los dos sensores, en m.
- ✓ **B:** Banda de filtrado (se refiere al intervalo de frecuencias para registro de la señal). Se requiere especificar el límite inferior y el límite superior de la frecuencia, en Hz.
- ✓ **Noise filter:** Se trata de un porcentaje que fue asignado, para todas las pruebas, igual al 90%
- ✓ **Material:** Material de la tubería, para este caso: PVC, Asbesto-Cemento y PEAD.
- ✓ **Diámetro:** Diámetro nominal de la conducción.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas en cada uno de los materiales.

Tabla III.4. Mediciones con el correlador comercial en la tubería de PVC

Sensor	Posición (punto)	Distancia real (m)		Núm. de prueba	Banda de filtrado (Hz)	Noise filter (%)	Distancia estimada (m)	
A	8	L _A	9.18	1	282-538	90	M _A	7.7
B	2	L _B	2.31				M _B	3.8
A - B		L	11.49	2			M _A	7.7
							M _B	3.8
A	8	L _A	9.18	3	282-538	90	M _A	10.2
B	6	L _B	6.91				M _B	5.9
A - B		L	16.09	4			M _A	10.2
							M _B	5.9
A	8	L _A	9.18	5	282-538	90	M _A	9.2
B	8	L _B	9.22				M _B	9.2
A - B		L	18.4	6			M _A	9.2
							M _B	9.2
A	8	L _A	9.18	7	108-255	90	M _A	7.5
B	10	L _B	11.6				M _B	13.3
A - B		L	20.78	8			M _A	7.5
							M _B	13.3

Tabla III.5. Mediciones con el correlador comercial en la tubería de Asbesto-Cemento

Sensor	Posición (punto)	Distancia real (m)		Núm. de prueba	Banda de filtrado (Hz)	Noise filter (%)	Distancia estimada (m)	
A	8	L _A	9.22	9	2500-3400	90	M _A	8.1
B	2	L _B	2.33				M _B	3.4
A - B		L	11.55	10			M _A	8.1
							M _B	3.4
A	8	L _A	9.22	11	2500-3400	90	M _A	9.2
B	6	L _B	6.87				M _B	6.9
A - B		L	16.09	12			M _A	9.2
							M _B	6.9
A	8	L _A	9.22	13	2500-3400	90	M _A	8.9
B	8	L _B	9.19				M _B	9.5
A - B		L	18.41	14			M _A	8.9
							M _B	9.5
A	8	L _A	9.22	15	2500-3400	90	M _A	9.1
B	10	L _B	11.58				M _B	11.7
A - B		L	20.8	16			M _A	9.1
							M _B	11.7

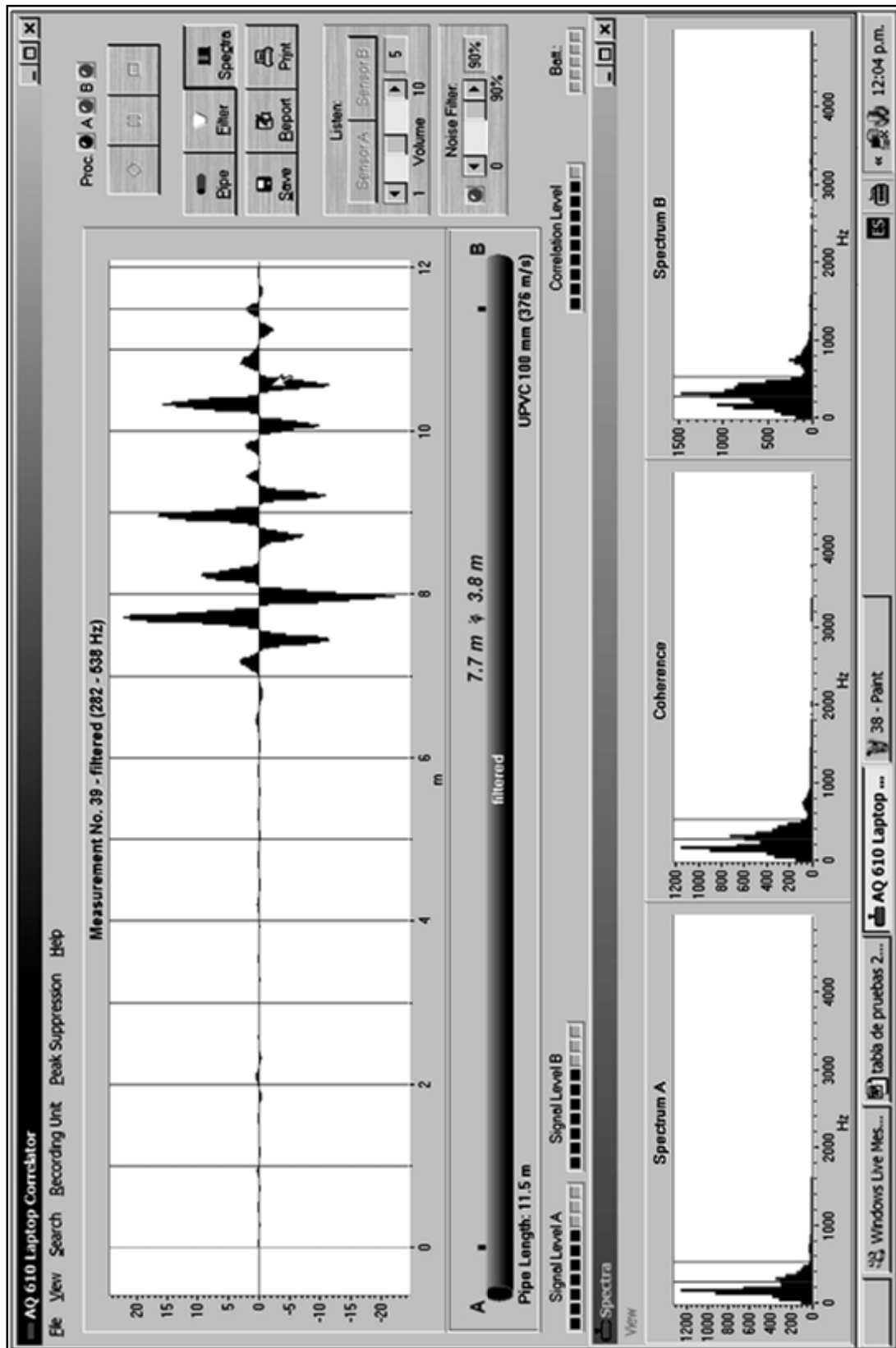


Figura III.24. Imagen de la pantalla correspondiente a la prueba 1 en PVC

Tabla III.6. Mediciones con el correlador comercial en la tubería de PEAD

Sensor	Posición (punto)	Distancia real (m)		Núm. de prueba	Banda de filtrado (Hz)	Noise filter (%)	Distancia estimada (m)	
A	8	L _A	9.38	17	250-370	90	M _A	8
B	2	L _B	2.28				M _B	3.6
A - B		L	11.66	18			M _A	10.2
							M _B	1.4
A	8	L _A	9.38	19	250-370	90	M _A	9.4
B	6	L _B	6.75				M _B	6.7
A - B		L	16.13	20			M _A	9.4
							M _B	6.7
A	8	L _A	9.38	21	250-370	90	M _A	7.9
B	8	L _B	9.06				M _B	10.5
A - B		L	18.44	22			M _A	7.8
							M _B	10.6
A	8	L _A	9.38	23	250-370	90	M _A	8.5
B	10	L _B	11.47				M _B	12.3
A - B		L	20.85	24			M _A	8.5
							M _B	12.3

Entre las experiencias obtenidas de las pruebas realizadas en la instalación experimental se encuentran:

- ❖ La dificultad para identificar las frecuencias asociadas al ruido asociado de una fuga, pues la tubería transmite también el ruido ambiente, el cual, en ocasiones resulta mayor que el emitido por la fuga.
- ❖ En las tuberías plásticas, la vibración transmitida por la tubería se atenúa rápidamente. La disipación del ruido es proporcional a la frecuencia del mismo e inversamente proporcional a la rigidez de las paredes de la conducción. Conforme la señal se aleja de la fuente, se disipan las componentes de mayor frecuencia y sólo quedan las bajas frecuencias. De ahí la importancia y necesidad de filtrar la señal.
- ❖ Como se observó en el estudio con el correlador, se tuvo una precisión variable en la localización de la fuga:
 - PVC, entre 0.02 y 1.69 m;
 - Asbesto-Cemento, entre 0.03 y 1.10 m, y
 - PEAD, entre 0.03 y 1.51 m.
- ❖ Finalmente, cabe señalar que las condiciones de apoyo de la tubería de la instalación experimental no son necesariamente las que se presentan en las redes de agua potable.

CONCLUSIONES

Como resultado de las pruebas realizadas para comprobar la relación de la presión interna de la red con el gasto que se fuga las conclusiones son las siguientes:

- ❖ Los fugas más comunes en las redes de agua potable se presentan en forma de fisuras longitudinales en los tubos. El estudio realizado, junto con los trabajos teórico-experimentales revisados, verifica que una buena aproximación para la relación entre la presión (h) y la fuga (Q) está dada por la expresión $Q = C \times h^X$, en la que generalmente $X \neq 0.5$ (valor que corresponde a un orificio de pared rígida). A partir de esta relación, resalta la importancia de establecer estrategias dedicadas a la reducción de fugas. Se demuestra que la manera más eficiente para reducir los gastos de fuga se obtiene al controlar las presiones de la red por sectores, ya que bajo esta condición de trabajo se obtienen los mejores resultados tanto en la operación normal de una red (suministro entregado a la red, presión y gasto que se entrega a los usuarios) como durante algún proceso de reparación de la misma.
- ❖ Se obtuvieron valores del exponente “X” que varían entre 0.55 y 2.00, lo cual concuerda con los reportes en las referencias. Con relación al coeficiente de descarga, C, los valores registrados son muy dispersos, dependen tanto del material de la tubería, así como del tamaño y la longitud de la fisura -mientras mayor es la longitud de la fisura mayor es el gasto de fuga a una misma presión.
- ❖ Al realizar pruebas con ciclos de incremento-decremento de presión se observó que en este tipo de fugas existe un fenómeno de histéresis, consecuencia del comportamiento visco-elástico de los tubos, que da como resultado líneas de tendencia con exponentes del orden de la unidad.
- ❖ En el análisis de las fugas en las piezas recuperadas y en piezas especiales (abrazaderas, bridas y juntas) se observó que los especímenes con elementos elásticos, inicialmente contienen la fuga pero al incrementar la presión son removidos con lo que se alcanzan exponentes altos, incluso mayores a 2.0, mientras que los elementos con área inicial no nula presentaron un comportamiento tipo orificio, exponente cercano a 0.5.
- ❖ Respecto a la relación que existe entre presión y caudal, expresada en forma adimensional y en ciclos de presión, puede observarse que los puntos medidos durante la etapa de incremento de presión se aproximan a la línea de tendencia con exponente $X=1.5$, mientras que los puntos medidos durante la etapa de decremento se ubican entre las líneas de tendencia con exponente $X=0.5$ y $X=1$.

Las ventajas que se obtienen con el control de presiones, que requiere necesariamente de una sectorización, incluyen:

- Identificar los sectores más dañados y así dirigir las inversiones de la mejor manera para reparar la red de esos sectores.

- Los ahorros que se logren con reparaciones o reducciones de consumo se tendrán disponibles en forma inmediata para abastecer otras zonas o para reducir el suministro.
- Las redes primarias se pueden utilizar con mayor eficacia para llevar agua de una zona a otra de la ciudad, con lo que se evita la construcción de líneas extras de distribución.

En cuanto al análisis de la señal del ruido para localizar fugas y los ensayos realizados con el correlador, pudo observarse la complejidad para identificar las frecuencias asociadas a la vibración emitida por una fuga, ya que la tubería no solamente transmite el ruido que proviene de su interior sino también el de su entorno, en este caso, la vibración generada por los equipos de bombeo, por lo que fue necesario mantener el flujo en la tubería mediante la acumulación de energía en forma de presión en tanques hidroneumáticos para poder prescindir de la operación de la bomba durante las pruebas y poder identificar de manera más clara los espectros asociados al ruido emitido por la fuga.

De esta manera se pudieron obtener los resultados en las pruebas referentes a la atenuación de la vibración en tuberías plásticas, con los cuales se demuestra que en las tuberías plásticas, la vibración transmitida por la tubería se atenúa rápidamente.

El análisis comparativo de los tres materiales ensayados muestra como rápidamente, la energía del ruido emitida por la fuga cae desde la ubicación de ésta, 80% para el PVC, 50 % para el Asbesto-Cemento y 40% para el polietileno de alta densidad (PEAD), ya para una distancia de entre 20 y 30 diámetros, la energía se reduce cerca del 90% en cada material.

Por lo anterior, si se pretende detectar fugas con sensores de vibración en este tipo de tuberías es necesario colocarlos a distancias relativamente cortas, además es recomendable combinar diferentes tipos o técnicas para la detección de fugas en tuberías plásticas.

Los resultados conseguidos al utilizar el equipo correlador para detectar la fuga en la instalación experimental mostraron que la precisión en la ubicación de la fuga osciló entre 0.02 y 1.69 m en el caso del PVC, para el Asbesto-Cemento entre 0.03 y 1.10 m y en el polietileno de alta densidad (PEAD) entre 0.03 y 1.51 m.

Cabe señalar que las condiciones de apoyo de la tubería de la instalación experimental no son necesariamente las que se presentan en las redes de agua potable, lo que podría reflejarse también en las frecuencias de las señales obtenidas.

Finalmente, ya que en las redes de agua potable no se puede evitar que existan fugas, es necesario realizar acciones permanentes encaminadas a disminuir su periodicidad y las pérdidas que implican lo que lleva a que, en redes deterioradas, las medidas que se apliquen serán inútiles si no se arregla la infraestructura para permitir un control de presiones eficaz y posteriormente, campañas para localización de fugas.

REFERENCIAS

1. ARDAKANIAN, Reza y Ali Akbar Ghazali. “*Pressure-Leakage Relation in Urban Water Distribution Systems*”. New Pipeline Technologies, Security, and Safety, 2003.
2. BOND, Anthony y otros. “*Pinpointing Leaks in Water Transmission Mains*”. Pipeline Engineering and Construction: What's on the Horizon?, 2004.
3. BROTHERS, Kenneth J. “*International Approach to Water Loss Reduction in Halifax, Nova Scotia, Canada*”. September 2003.
4. Échavez Aldape, Gabriel. “*Fugas en redes de agua potable*”. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, IMTA, Mayo 1991.
5. Échavez Aldape, Gabriel. “*Fugas en redes de agua potable*”. Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua, CNA – IMTA - IWRA, MÉXICO, D. F., Octubre 1991.
6. HUNAIDI, Osama y otros. “*Detecting Leaks in Plastic Pipes*”. AWWA Journal, Vol. 92, No. 2, February 2000. Pp. 82-94.
7. HUNAIDI, Osama. “*Detecting Leaks in Water-Distribution Pipes*”. Construction Technology Update No. 40. National Research Council of Canada. October 2000. ISSN 1206-1220.
8. HUNAIDI, Osama y otros. “*Acoustic Methods for Locating Leaks in Municipal Water Pipe Networks*”. Institute for Research in Construction. NRCC-47062. June, 2004.
9. JÖNSSON, L. “*Leak detection in pipelines using hydraulic transient*”. Hydraulic Engineering Software V, Vol. 1, Water Resources and distribution. Computational Mechanics Publications. Vol. 1 1994. Pp. 343-352.
10. LAMBERT, Albert. O. “*What do we know about Pressure: Leakage Relationships in Distribution Systems?*”. IWA Conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management. 2001. Brno ISBN 80-7204-197-5.
11. LIEMBERGER, R. “*Do You Know How Misleading the Use of Wrong Performance Indicators Can Be?*”. Paper to IWA Leakage Management Conference. A practical Approach, Cyprus, November 2002. ISBN 9963-8759-0-4.
12. LIGGETT, James A. y Li-Chung Chen. “*Monitoring Water Distribution Systems. The Inverse Method as a Tool for Calibration and Leak Detection*”. 1994.
13. LIGGETT, James A. “*Localización de fugas por seguimiento de la red en régimen estacionario y no estacionario*”. 1994.
14. MCKENZIE, R.S. y Wegelin W.A. “*Leakage Reduction Through Pressure Management in South Africa*”. 2002.
15. OCHOA, Leonel y Víctor Bourguett. “*Reducción integral de pérdidas de agua potable*”. IMTA, Coordinación de Tecnología de Hidráulica. 2ª Edición, 2001.
16. PEARSON D. “*Lies, Damn Lies and Leakage Statistics*”. Meeting on the Pipeline Industries Guild on 21st September 1998.
17. SÁNCHEZ Bibriesca, José L. y Óscar A. Fuentes Mariles. “*Método para calcular redes de tubos y su empleo para detectar fugas en ellas*”. Instituto de Ingeniería, UNAM, 1997.

18. SÁNCHEZ Huerta, Alejandro y otros. *“Estudio de la problemática de las acciones de reducción de fugas en las redes de agua potable y propuesta para mejorar su eficiencia”*. Instituto de Ingeniería, UNAM, 2005.
19. SÁNCHEZ Huerta, Alejandro y otros. *“Estudio de los métodos y técnicas acústicas para la detección de fugas en redes de agua con tuberías de materiales plásticos y de asbesto cemento”*. Instituto de Ingeniería, UNAM, 2006.
20. WALDRON, T. *“Where are the Advancements in Leak Detection?”*. Leakage 2005 Conference Proceedings. Pp 1-7.
21. WALSKI, Thomas y otros. *“Understanding the Hydraulics of Water Distribution System Leaks”*. Critical Transitions in Water And Environmental Resources Management. 2004.
22. YEPES G. y otros. *“The High Cost of Intermittent Water Supplies”*. 2001.
23. *“Administración eficiente del agua mediante la sectorización y control de presiones”*. Caso práctico en el sistema de agua potable, alcantarillado y saneamiento de Atizapán (SAPASA).
24. *“Leak Location & Repair Guidance Notes”*. Specialist Group Efficient Operation and Management Water Loss Task Force, IWA, 2007.
25. *“Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento (MAPAS)”*. CONAGUA, Subdirección General Técnica, Gerencia de Ingeniería y Normas Técnicas, 2000.
26. *“Water audits and leak detection”*. American Water Works Association, 1990.

XXII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, CIUDAD GUAYANA, VENEZUELA, OCTUBRE 2006

27. ARAQUE Fuentes, Diego Alejandro y otros. *“Implementación del transiente inverso y flujo oscilatorio permanente con algoritmos genéticos para la detección de fugas en redes reales de acueducto”*.
28. CASTAÑEDA Galvis, Luis Fernando y María Carolina Vega Sánchez. *“Herramienta informática para detectar fugas en redes de acueducto”*.
29. FUENTES Mariles, Óscar A. y otros. *“Detección, localización y cuantificación de fugas en una red cerrada de tuberías de agua potable usando un algoritmo genético simple”*.
30. GARZÓN Contreras, Fabio. *“Influencia de la presión en las pérdidas de agua en sistemas de distribución”*.

XIX CONGRESO NACIONAL DE HIDRÁULICA (AMH), CUERNAVACA, MORELOS, NOVIEMBRE 2006

31. FUENTES Mariles, Óscar Arturo y otros. *“Aplicación de los algoritmos genéticos para detectar fugas en redes de distribución de agua potable”*.
32. GARCÍA Villanueva, Nahún Hamed y otros. *“Mejoramiento del abastecimiento de agua potable en la red del fraccionamiento Burgos de Cuernavaca”*.

33. SALAS Limón, Daniel y Efraín Alcorta García. “*Problemática relacionada con localización de fugas en tuberías*”.

WATER LOSS 2007: CONFERENCE PROCEEDINGS, BUCHAREST, ROMANIA. IWA INTERNATIONAL SPECIALISED CONFERENCE. SPECIALIST GROUP EFFICIENT OPERATION AND MANAGEMENT. WATER LOSS TASK FORCE.

34. ARSCOTT, A. “*Innovations in step testing using sluice valve metering*”.

35. ALGAARD, E. y otros. “*Leakage Detection - Assessment of four different leakage control techniques*”.

36. BROTHERS, Kenneth J. “*GIS Acoustic Mapping in Ottawa*”.

37. CANGAHUALA Janampa, Ana y Wilhelm Urban. “*Integrated Decision Support for Water Loss Management in Water Distribution Networks in Developing Countries by the example of Peru*”.

38. ÇAKMAKCI, M. y otros. “*The Dimension and Significance of Water Losses in Turkey*”.

39. CHARALAMBOUS, B. “*Effective Pressure Management of District Metered Areas*”.

40. CHUENKUL, B. y otros. “*Development of an Enterprise System of Integrated Water Leakage Management Applications (i WLMA) for Bangkok’s Metropolitan Waterworks Authority*”.

41. FANNER, P. V. “*Pressure Management Works.....and Doesn’t!*”.

42. FANTOZZI, M. y Lambert, A. “*Including the effects of pressure management in calculations of Short-Run Economic Leakage Levels*”.

43. GANGL, G. y otros. “*Influence of Measurement Inaccuracies at a Storage Tank on Water Losses*”.

44. GARZON-CONTRERAS, F. y C. Palacio-Sierra. “*A Case Study of Leakage Management in Medellin City, Colombia*”.

45. HAMILTON, S. “*An Economic Active Leakage Control Policy without a Performance Indicator is not a Myth*”.

46. HAMMERER, M. “*Cost efficient leakage management in water supply systems*”.

47. HÉBEL P. “*Water Loss Management in difficult operating situations. Experience with NRW reduction in Latina Province (Italy)*”.

48. HUNAIDI, Osama y Ken Brothers. “*Night Flow Analysis of Pilot DMAs in Ottawa*”.

49. KISS, G. y otros. “*WaterPipe project: an innovative high resolution Ground Penetration Imaging Radar (GPIR) for detecting water pipes and for detecting leaks and a Decision-Support-System (DSS) for the rehabilitation management of the water pipelines*”.

50. KORAL, Wojciech. “*Research on pressure-leakage relationship in water networks of housing estates*”.

51. KORAL, Wojciech y Slawomir Kedzierski. “*Remote DMA Monitoring As a Useful Tool In Water Loss Control*”.

52. KOVAC, Jurica. *“Case studies in applying the IWA WLTF approach in the West Balkan region: Pressure management”*.
53. LISERRA, T. y otros. *“Decision Support System (DSS) for Water Loss Reduction: Approach Based on Simulation Models”*.
54. MANESCU, Al. y B. Manescu. *“Research for the establishment of an optimum water loss reduction level from the economic point of view”*.
55. MCKENZIE, R. S. y otros. *“Hidden benefits of small Scale performance based public private partnerships”*.
56. MORRISON, J. A. E. y otros. *“Sustainable District Metering”*.
57. PEARSON, D. *“Do you know how many of your colleagues will come to your funeral?”*.
58. PILCHER, Richard. *“Leak Location and Repair Guidance Notes and..... The Never Ending War against Leakage”*.
59. RISTOVSKI, B. y S. Spirovska. *“Active leakage control project; the particular DMA’s in the city of Skopje, Macedonia”*.
60. ROGERS, Dewi y otros. *“The reality of undertaking a large leakage control project”*.
61. SAVIĆ, Stevo. *“Some experiences in reduction of losses in Belgrade water supply system”*.
62. SVITÁK, Zdeněk y otros. *“Technical and economical evaluation of integrated approach to the water loss management in the Czech Republic”*.
63. THORNTON, J. y A. O. Lambert. *“Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs”*.
64. TROW, Stuart. *“Alternative Approaches to Setting Leakage Targets”*.

ANEXO. DESCRIPCIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN

BERMAD Abastecimiento de agua

Válvulas de control hidráulicas

Serie 700 y 800

Válvula accionada por diafragma

Válvula básica

Las válvulas de los modelos 700/705 con diafragma y 800/805 a pistón son válvulas hidráulicas esféricas, que se presentan en las formas oblicua (Y) o angular. Cada válvula está constituida por dos componentes principales: el conjunto cuerpo-asiento y accionador.

El nadoaccior, que consta de una cámara superior y otra inferior, es una unidad integral y puede desmontarse como una sola pieza. Cada válvula básica puede configurarse fácilmente, en el sitio, como válvula de cámara única (Modelo 705/805), o de cámara doble (Modelo 700/800). Tanto el modelo de cámara única como el de cámara doble tienen el subconjunto del eje con guía central, para no obstruir el área del asiento.

El funcionamiento de la válvula básica de cámara doble Modelo 700/800 no depende de la presión diferencial en la válvula, puesto que la presión en la línea es la que actúa como presión diferencial del accionador. Ésta desarrolla la máxima potencia y asegura así la respuesta inmediata de la válvula. La cámara superior se presuriza para cerrar la válvula, y se despresuriza para abrirla. La cámara inferior está por lo general abierta a la atmósfera, pero también puede presurizarse para impulsar la apertura de la válvula.

La válvula básica Modelo 705/805 utiliza la presión diferencial en la válvula para impulsar la apertura o el cierre del mecanismo de accionamiento. La cámara inferior, que sirve para amortiguar el cierre de la válvula, está expuesta a la presión aguas abajo, a través de un orificio fijo conectado al lado de aguas abajo de la válvula. La presión en la cámara superior es variable, generalmente como resultado de la acción conjunta de un piloto regulador y un orificio fijo. La variación de presiones actúa como moduladora para abrir o cerrar la válvula.

La válvula hidráulica básica está disponible en una amplia gama de materiales, tamaños, presiones y conexiones terminales. Las versiones de cámara única o doble se utilizan como válvula principal en todas las aplicaciones de las Series 700 y 800.

Válvula a pistón

4



Principio de funcionamiento

Series 700 y 800

Modo "On-Off"



Posición cerrada

La presión de la línea aplicada a la cámara superior genera una fuerza mayor que lleva a la válvula a la posición de cerrada y proporciona un cierre hermético a prueba de fugas.



Posición abierta

La descarga de presión de la cámara superior a la atmósfera o a otra área de más baja presión hace que la presión de la línea que actúa sobre el disco de cierre lleve la válvula a la posición de abierta.



Posición abierta propulsada

La presión de la línea se aplica a la cámara inferior, a la vez que se alivia la presión en la cámara superior. En combinación con el efecto de la presión de la línea en el disco de cierre, esto crea una fuerza que abre la válvula.

Modo regulador (modulante)

Modelos de reducción de presiones



Posición cerrada

La válvula piloto ajustable cerrada dirige la presión de la línea en la cámara superior de control. La mayor fuerza resultante lleva a la válvula a la posición de totalmente cerrada y proporciona un cierre hermético a prueba de fugas.



Posición de modulación

La válvula piloto percibe las variaciones de presión en la línea y se abre o se cierra según corresponda. Controla la presión acumulada en la cámara superior de control, lo que hace que la válvula principal module a una posición intermedia y mantenga la presión en el valor predefinido.



Posición abierta

La válvula piloto abierta libera la presión de la línea desde la cámara superior de control. La acción de la presión de la línea sobre la cámara inferior y el disco de cierre lleva a la válvula a la posición abierta.



* Todo el texto precedente es válido para las Series 700 y 800.

**Características del producto****Series 700 y 800****[1] - Actuador de cámara doble**

- El mecanismo de accionamiento puede desmontarse como una sola pieza integral
- Sencilla conversión a cámara única en el sitio de instalación
- El mismo cuerpo de válvula admite ambos actuadores (con diafragma y a pistón)

[2] - Conjunto del diafragma

El diafragma flexible, no moldeado y reforzado con nylon está sostenido en la mayor parte de su superficie. La carga del diafragma está limitada sólo a las fuerzas de estiramiento aplicadas al área activa.

[3] - Conjunto del pistón

La descarga de la cámara inferior proporciona al pistón la diferencia de presiones para el funcionamiento y la amortiguación de aire. El área constantemente activa, junto con la robusta construcción y la larga carrera sin obstrucciones, aseguran una regulación estable y precisa. Gracias a la guía central del "diámetro del eje" y al cierre del pistón se reducen los riesgos de fricción y de atascamiento.

[4] - Tapón de la cubierta

Permite la instalación en el sitio de:

- Indicador [4A]: Señal visual de la posición de la válvula
- Final de carrera: Señala la posición de la válvula
- Transmisor de posición: Transmisión analógica de la posición de la válvula

[5] - Cuerpo intermedio

El cuerpo intermedio inherente comprende el cojinete [5A], que proporciona la guía central para el mecanismo móvil de la válvula.

El cuerpo intermedio separa a la cámara inferior del flujo, en ambas configuraciones: de cámara doble y de cámara única.

[6] - Muelle

Es necesario en la configuración de cámara única, pero no en la configuración de cámara doble, salvo que se requiera la característica de cierre.

[7] - Conjunto del disco de cierre

El conjunto del disco de cierre autoalineante proporciona un movimiento libre y equilibrado junto con un cierre flexible, perfecto y hermético a prueba de fugas.

Este conjunto permite utilizar distintos tipos de juntas y tapones para una amplia gama de aplicaciones y condiciones de trabajo.

[8] - Asiento

Asiento elevado de acero inoxidable, reemplazable en línea y en el sitio de la instalación

[9] - Cuerpo ancho (en Y o en ángulo)

Un diseño hidrodinámico para que el agua fluya eficientemente con una pérdida mínima de carga y excelente resistencia a la cavitación. Cavity totalmente libre de obstrucciones, sin protuberancias. Aumento de capacidad del 25% respecto de las válvulas en forma de globo.

[10] - Conexiones terminales

De conformidad con los valores de presión nominal y normas ISO, ANSI, JIS, BS, etc.

Opciones del cierre de la válvula**Disco plano**

"Apertura rápida": este cierre estándar proporciona un alto caudal y reacciona rápidamente. Cierre regulador

Cierre regulador

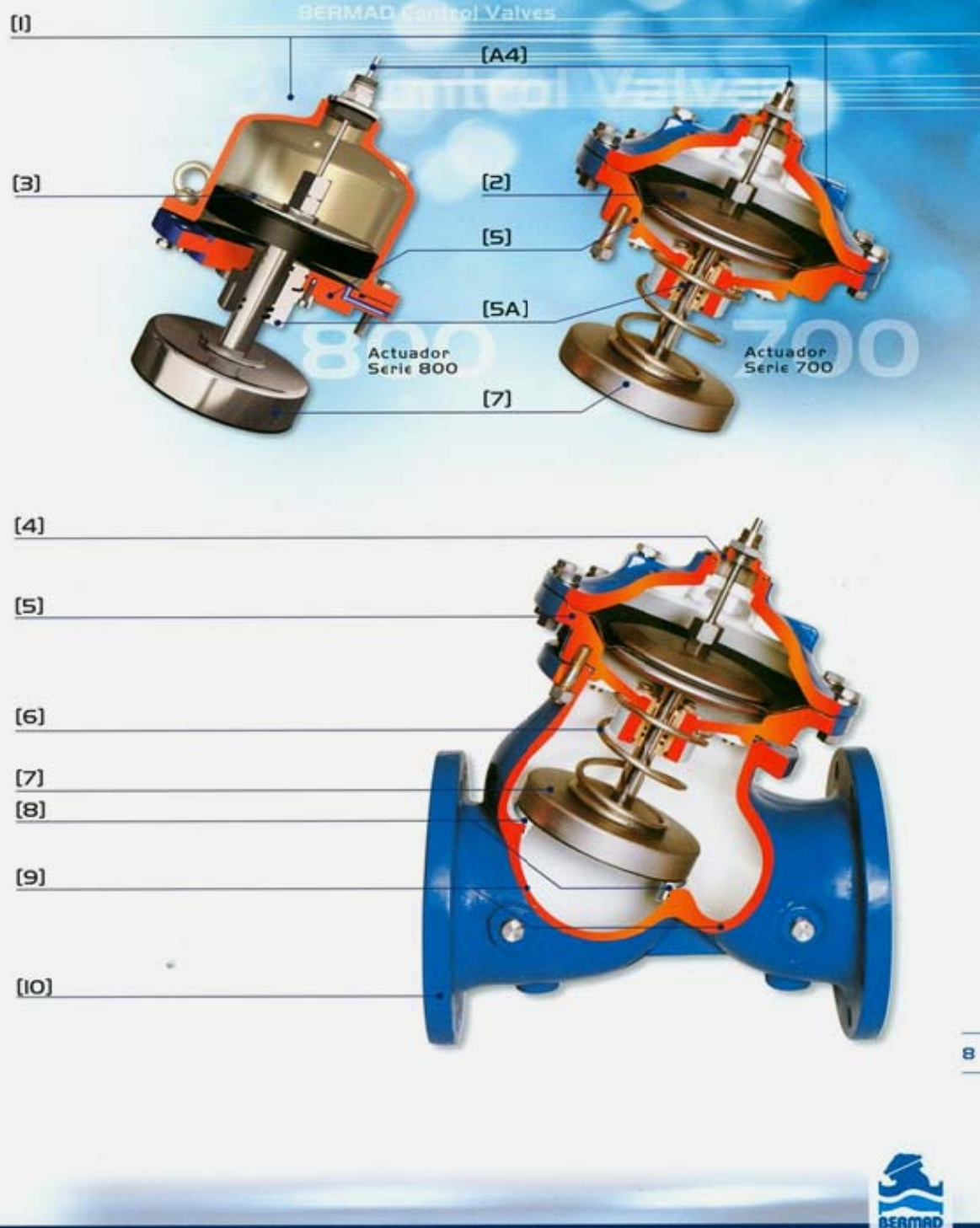
El cierre regulador se utiliza para obtener una respuesta más precisa, estable y sin altibajos a la regulación de las presiones y caudales, y reducir a la vez el ruido y las vibraciones. Disponible en dos formas: abertura en "U" (estándar) y en "V".





Características del producto

Series 700 y 800





Válvulas reductoras de presión

El establecimiento de varias zonas de presión es uno de los métodos más comunes para alcanzar el equilibrio en las redes de transporte y distribución de agua. Las válvulas reductoras de presión (o PRV por sus siglas en inglés) "obligan" a los parámetros dinámicos del sistema de suministro a mantener una presión constante de entrega predeterminada. A través de la definición de la presión mínima requerida en el punto crítico de cada zona de presión, las válvulas del tipo "PRV Activas", permiten reajustar constantemente la presión de entrega, con lo cual el sistema trabaja con una menor presión promedio.



Modelo 720

Modelo 720

La válvula reductora de presión modelo 720 es una válvula de control de operación hidráulica accionada por diafragma, que reduce la mayor presión aguas arriba a una presión aguas abajo constante y menor, sin que le afecten las fluctuaciones en la demanda o en la presión aguas arriba.



Modelo 820

Modelo 820

La válvula reductora de presión modelo 820 a pistón permite el funcionamiento con mayores presiones aguas arriba. Con ella el límite superior del rango de presiones se eleva a 40 bar (600 psi).

Aplicaciones

- Reducción del caudal y fugas
- Protección contra los daños de cavitación
- Reducción del ruido
- Protección antirrotura
- Ahorro en el mantenimiento del sistema





Válvulas de alivio / sostenedoras de presión

Las válvulas de alivio / sostenedoras de presión protegen a las estaciones de bombeo y a los sistemas de distribución contra los efectos de dos situaciones extremas:

- Cuando se instalan fuera de la línea (derivación), alivian los nocivos excesos de presión
- Cuando se instalan en la línea (intercaladas), mantienen una presión mínima dando así prioridad a ciertas zonas de presión, y evitando el vaciado de la línea, la sobrecarga de la bomba, etc.



Modelo 730

La válvula de alivio / sostenedora de presión modelo 730 es una válvula de control de operación hidráulica, activada por diafragma, que puede actuar como sostenedora de presión o como válvula de alivio.

Intercalada en la línea, sostiene una presión mínima predeterminada aguas arriba, sin que le afecten las fluctuaciones de caudal o de presión aguas abajo. Si se instala como válvula de alivio, alivia los excesos de presión en la línea.

Aplicaciones

- Dar prioridad a ciertas zonas de presión
- Asegurar un llenado controlado de la tubería
- Evitar el vaciado de la tubería
- Proteger a la bomba contra la sobrecarga y la cavitación
- Salvaguardar el caudal mínimo de la bomba
- Proteger contra los excesos de presión en la línea



15

