

# MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

## SISTEMAS DE MEDICIÓN DEL AGUA: PRODUCCIÓN, OPERACIÓN Y CONSUMO

9



# MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

## SISTEMAS DE MEDICIÓN DEL AGUA: PRODUCCIÓN, OPERACIÓN Y CONSUMO

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento  
Sistemas de Medición del Agua: Producción, Operación y consumo

ISBN: 978-607-626-006-7

D.R. © Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña  
C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua  
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo  
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.  
Tel. (55) 5174•4000

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Impreso y hecho en México  
Distribución gratuita. Prohibida su venta.  
Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.  
Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra,  
sin fines de lucro y citando la fuente

# CONTENIDO

Presentación	VII
Objetivo general	IX
Introducción a la macro y micromedición	XI
1. Medición de los procesos de abastecimiento	1
1.1. Consideraciones generales	1
1.2. Objetivos de la macromedición	4
1.3. Requerimientos de medición establecidos en la ley de aguas nacionales	4
1.4. Localización de estaciones de medición en unidades operacionales	6
1.4.1. Captación en las fuentes de abastecimiento	6
1.4.2. Conducción	6
1.4.3. Potabilización	7
1.4.4. Distribución	7
1.4.5. Otros puntos de la infraestructura	7
2. Conceptos básicos	9
2.1. Instrumentación y metrología	9
2.1.1. Elementos activos de un instrumento de medición	9
2.1.2. Configuración de entrada y salida de los instrumentos	10
2.2. Calibración	11
2.3. Calibración estática	12
2.3.1. Características dinámicas	16
3. Clasificación general de medidores de flujo	19
3.1. Características principales de medidores de flujo a presión	20
3.2. Características principales de medidores de flujo a superficie libre	23
4. Medidores de caudal para conductos cerrados a presión	25
4.1. Medidores mecánicos: volumétricos y de velocidad	25
4.2. Medidores de presión diferencial	33
4.3. Medidores ultrasónicos	35
4.4. Medidores electromagnéticos	36
4.5. Selección, operación y mantenimiento	37
4.5.1. Criterios de selección	37
4.5.2. Efectos de sitio	40
4.5.3. Operación y mantenimiento	42
5. Medición con vertedores y canaletas	45
5.1. Vertedores	45
5.1.1. Vertedores de pared delgada	45
5.1.2. Vertedores de cresta ancha	52

5.2. Canaletas de tirante crítico	53
5.2.1. De garganta corta (Parshall)	53
5.2.2. De garganta larga	63
6. Métodos de velocidad área para canales y ríos	67
6.1. Velocidad media del agua en una corriente	67
6.2. Área de la sección transversal de una corriente	68
6.3. Aforo con molinete	69
6.3.1. Registro y cálculo de un aforo con molinete	73
6.4. Aforo con flotador	77
6.5. Método de relación escala-gasto	78
6.5.1. Aforo con limnómetro	78
6.5.2. Aforo con limnógrafo	79
6.5.3. Los sensores de nivel de agua	80
6.6. Medición de la velocidad del agua por efecto doppler	83
6.6.1. Principios de funcionamiento	84
6.6.2. Medición de la velocidad del agua por efecto Doppler	84
6.6.3. Determinación de perfiles de velocidad	88
6.6.4. Determinación del gasto con equipos Doppler	90
6.6.5. Tecnología "VD" (Velocímetro Doppler)	91
6.6.6. Tecnología "PD" (Perfilador Doppler)	94
6.6.7. Tecnología "AD" (Aforador Doppler)	100
6.6.8. Forma de aforar y comparación con otras técnicas	101
7. Medidores de presión y nivel	111
7.1. Medidores de presión	111
7.1.1. Generalidades	111
7.1.2. Presión en los fluidos	113
7.1.3. Sensores de presión	116
7.1.4. Manómetros mecánicos	120
7.1.5. Métodos de protección de los sensores de medición, contra efectos destructivos	124
7.1.6. Medición de la presión absoluta	125
7.1.7. Registro de transitorios de presión	126
7.2. Medidores de nivel	126
7.2.1. Regla limnimétrica	126
7.2.2. Tubo piezométrico con visor de nivel	127
7.2.3. Flotador	127
7.2.4. Medidor neumático	128
7.2.5. Medidor con resistencia variable	129
7.2.6. Medidor con electrodos	130
8. Sistema de información de la macromedición	133
8.1. Entradas, procesos y salidas	133
8.1.1. Planificación de las entradas	134

8.1.2. Fase de procesos	135
8.1.3. Salidas	137
9. Comunicaciones y telemetría	139
9.1. Comunicación digital	139
9.2. Telemetría para la transmisión y despliegue de datos en tiempo real	141
9.2.1. Módem de transmisión de datos	141
9.2.2. Internet/WIFI/satelital	142
9.2.3. Radio Frecuencia	143
9.2.4. GPRS/3G	144
9.2.5. Satelital	145
9.3. Pruebas de transmisión de datos	146
9.4. Conclusiones y discusiones	146
10. Macromedición	149
10.1. Importancia de la macromedición	149
10.2. Tipo de macromedidores	151
10.2.1. Medidores de velocidad	151
10.2.2. Medidor ultrasónico de flujo o caudal	154
10.2.3. Medidores electromagnéticos	157
10.3. Análisis de requerimientos	159
11. Micromedición	169
11.1. Importancia de la micromedición	169
11.2. Tipo de medidores	171
11.2.1. Definición de Medidor	171
11.3. Mecanismo de funcionamiento por tipo de medidor	173
11.3.1. Medidores de chorro único	173
11.3.2. Medidores de chorro múltiple	174
11.4. Medidor volumétrico	175
11.5. Medidor electromecánico	178
11.6. El Sistema comercial	180
11.6.1. Subsistema de medición de consumos	180
11.6.2. Sistemas informáticos para el sistema comercial	181
11.7. Pérdidas físicas y comerciales	183
11.7.1. Pérdidas relacionadas con la medición de consumos	183
11.8. Beneficios de la medición de consumos	184
11.9. Estatus de la medición de consumos	185
11.9.1. Coberturas y problemática para su incremento	185
11.9.2. Aspectos legales sobre la medición de consumos	187
11.9.3. Derecho humano al agua y la medición de consumos	187
11.10. Usuarios, consumos, demandas y dimensionamiento de medidores	188
11.11. Normativa de medidores de consumo	190
11.12. Posibilidades de lectura en medidores mecánicos	191

11.12.1. Medidores ultrasónicos y electromagnéticos, según ISO 4064-1 2014	192
11.13. Selección y dimensionamiento de medidores de consumo	193
11.13.1. Estudios de consumos en campo	194
11.13.2. Dimensionamiento de medidores	196
11.14. Instalación	196
11.14.1. Accesorios para la instalación	197
11.14.2. Instalación	197
11.14.3. Primera operación de medidores	198
11.14.4. La toma domiciliaria	198
11.15. Organización del subsistema de medición de consumos	200
11.15.1. Tipo de lecturas de medidores	201
11.15.2. Medición de altos consumidores	204
11.15.3. Rutas	204
11.15.4. Parque de medidores	205
11.15.5. Calibración de medidores	205
Conclusiones del libro	209
Bibliografía	211
Tabla de conversiones de unidades de medida	213
Ilustraciones	223
Tablas	229

# PRESENTACIÓN

Uno de los grandes desafíos hídricos que enfrentamos a nivel global es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, debido, por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las dificultades técnicas, cada vez mayores, que conlleva hacerlo.

Contar con estos servicios en el hogar es un factor determinante en la calidad de vida y desarrollo integral de las familias. En México, la población beneficiada ha venido creciendo los últimos años; sin embargo, mientras más nos acercamos a la cobertura universal, la tarea se vuelve más compleja.

Por ello, para responder a las nuevas necesidades hídricas, la administración del Presidente de la República, Enrique Peña Nieto, está impulsando una transformación integral del sector, y como parte fundamental de esta estrategia, el fortalecimiento de los organismos operadores y prestadores de los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento.

En este sentido, publicamos este manual: una guía técnica especializada, que contiene los más recientes avances tecnológicos en obras hidráulicas y normas de calidad, con el fin de desarrollar infraestructura más eficiente, segura y sustentable, así como formar recursos humanos más capacitados y preparados.

Estamos seguros de que será de gran apoyo para orientar el quehacer cotidiano de los técnicos, especialistas y tomadores de decisiones, proporcionándoles criterios para generar ciclos virtuosos de gestión, disminuir los costos de operación, impulsar el intercambio de volúmenes de agua de primer uso por tratada en los procesos que así lo permitan, y realizar en general, un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas del país, considerando las necesidades de nueva infraestructura y el cuidado y mantenimiento de la existente.

El Gobierno de la República tiene el firme compromiso de sentar las bases de una cultura de la gestión integral del agua. Nuestros retos son grandes, pero más grande debe ser nuestra capacidad transformadora para contribuir desde el sector hídrico a Mover a México.

**Director General de la Comisión Nacional del Agua**



## OBJETIVO GENERAL

El *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)* está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país; busca ser una referencia sobre los criterios, procedimientos, normas, índices, parámetros y casos de éxito que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en su carácter de entidad normativa federal en materia de agua, considera recomendable utilizar, a efecto de homologarlos, para que el desarrollo, operación y administración de los sistemas se encaminen a elevar y mantener la eficiencia y la calidad de los servicios a la población.

Este trabajo favorece y orienta la toma de decisiones por parte de autoridades, profesionales, administradores y técnicos de los organismos operadores de agua de la República Mexicana y la labor de los centros de enseñanza.



# INTRODUCCIÓN A LA MACRO Y MICROMEDICIÓN

Los pesos y las medidas son la base para el comercio, el mercado y las leyes para su regulación. Los productos de consumo se compran por peso, por tamaño, o por volumen; los servicios como la electricidad y el agua, también se miden para la aplicación de tarifas que permitan cubrir los costos que se generan con su prestación, afectando a su vez las economías domésticas. Por ello todas las actividades diarias están ligadas a la metrología.

En México el abastecimiento a las ciudades requiere de la captación de fuentes cada vez más lejanas y más profundas, y con agua de menor calidad, que implica procesos más costosos de potabilización. Por ésta y otras razones es imprescindible contar con sistemas apropiados para medir los caudales que se extraen, potabilizan, conducen, regulan, distribuyen y se comercializan. Otra de las razones es el control operacional de los sistemas de abastecimiento, que hace necesario el conocimiento de las principales variables de operación, especialmente de caudal, presión y nivel, cuya determinación, registro y divulgación, constituye el objetivo principal de los denominados sistemas de macromedición. Vinculada a esta actividad de control está la simulación matemática de diferentes escenarios de operación, ampliación de redes, introducción de nuevas líneas, integración de nuevas fuentes de abastecimiento, y otras situaciones, la cual requiere de datos de caudal, presión y nivel para calibración de los modelos de simulación.

Una razón más es la evaluación de las pérdidas de agua a través de balances, que requiere de datos como el volumen de extracción en las fuentes de abastecimiento y el volumen consumido por los usuarios conectados a las redes de distribución, este último determinado por los sistemas de medición de consumos denominados micromedición. La reducción y control de pérdidas los requiere. Uno de los principales métodos actualmente aplicados para la reducción de pérdidas por fugas de agua, es el control de presiones, por lo que la medición y control de ésta variable reviste gran importancia. La medición y registro de las variaciones de nivel en pozos profundos y demás obras de captación, suministra la información necesaria para la gestión de fuentes

de abastecimiento, el cual es un tema de importancia primordial en la actualidad, por las razones antes expuestas.

A su vez, los procesos de saneamiento, desde la recolección de las aguas servidas, hasta los volúmenes de agua tratada que generan, para reúso, recargas de acuíferos, y en su caso para su disposición en los cuerpos de agua, también requieren de medición. Actualmente muchas plantas de tratamiento están concesionarias a empresas privadas cuya retribución depende de estos volúmenes. En casos como éste, tanto el organismo operador como la empresa concesionaria instalan su propio medidor, dado que con base en los volúmenes registrados se hacen los pagos que se convienen, por lo general de sumas millonarias.

Adicionalmente la administración de los derechos por la explotación de recursos hídricos y por descargas a cuerpos de agua, requiere que los organismos operadores cuenten con los sistemas de medición apropiados para determinar los volúmenes correspondientes.

La medición es necesaria no sólo para la planificación, administración y control de los procesos del prestador del servicio, sino también para mostrar y registrar la calidad con que éste se presta a los usuarios, en cuanto a cantidad, continuidad y presiones de suministro.

Pero la macromedición y la micromedición no son sólo los aparatos, son sistemas que además implican una organización con personal para su operación y mantenimiento. Instalar aparatos sin el personal capacitado, espacios, vehículos, sistemas de información, y otros recursos, para realizar las funciones de medición, registro, procesamiento y divulgación de la información, no producirá los resultados deseados.

La situación de la macromedición en los sistemas de abastecimiento de México, muestra que la cobertura promedio de medición en las fuentes de abastecimiento en el año al 2012 estaba entre el 50 y el 79 por ciento, y al 2014 entre el 78 y el 87 por ciento; dentro de estas cifras se incluyen aparatos que han dejado de funcionar, aunque no se sabe con exactitud los porcentajes. De cualquier manera esto significa que en los últimos años se ha dado un fuerte impulso a la medición, mediante inversiones provenientes de los Programas Federalizados. Este nivel de cobertura debe consolidarse y capitalizarse a través de la organización adecuada de sistemas de macromedición, conforme a las mejores prácticas nacionales e internacionales.

Respecto al estatus de la micromedición, al 2013 las coberturas promedio a nivel nacional estaban por abajo del 60 por ciento aunque por otro lado, en los últimos cuatro años la tendencia es a la alza. Esto debido a los diferentes programas federalizados y de otro tipo que apoyan acciones como éstas. Sin embargo hay todavía un déficit del 40 por ciento que impide la obtención de todos los beneficios que significa la cobertura total, pues su uso permite racionalizar el consumo, propiciando una mejor administración del abastecimiento, su planeación y operación. Las ciudades que no cuentan con un adecuado sistema de medición de consumos, corren el riesgo de que sus demandas de proyecto sean sobrepasadas antes de lo planeado, y con ello la capacidad de la infraestructura de abastecimiento. Esto en lo que respecta a su relación con el Sistema Operacional de los organismos operadores. Respecto al Sistema Comercial, la micromedición adecuada posibilita la generación de mayores ingresos por la medición y facturación del agua consumida, así como la aplicación de una tarifa justa de acuerdo al volumen de agua consumida.

En este libro se presentan las etapas necesarias para organizar sistemas de macromedición y de micromedición, acordes a las necesidades y posibilidades de los distintos organismos operadores de agua potable de México, la integración de personal, y la operación y mantenimiento de los sistemas.

En todo esto es parte fundamental la selección y dimensionamiento adecuados de los aparatos de medición, su instalación, y su operación y verificación, partiendo de un conocimiento de los conceptos básicos de instrumentación y de la metrología de flujo, necesarios para quien estará a cargo de estas tareas.



# 1

## MEDICIÓN DE LOS PROCESOS DE ABASTECIMIENTO

### 1.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Desde la extracción del recurso hídrico de las fuentes de abastecimiento, pasando por su potabilización, conducción, regulación, distribución y comercialización, recolección como aguas servidas, tratamiento, reúso, aplicación en recarga de acuíferos o su descarga en cuerpos de agua, es requerida la medición en esos procesos, tanto para fines administrativos de producción y comercialización, como de control de la operación.

La medición objeto de este libro, denominada macromedición, se centra en las variables de flujo, caudal, presión y nivel, excluyendo el proceso de comercialización, sin dejar de observar la importancia de las variables de calidad del agua, y las eléctricas de los equipos electromecánicos vinculados a esos procesos. Su alcance se restringe a las primeras variables y prioritariamente al caudal, debido a que corresponde a la materia prima que se procesa y al producto que se distribuye. La medición de consumos correspondiente al proceso de comercialización, denominada micromedición, se maneja aparte debido precisamente a que es operada por las

áreas comerciales de los organismos operadores de agua potable, mientras que la macromedición es manejada por las áreas operacionales.

Aunque normativamente sólo se indican medidores para agua potable fría, sin acotar entre macro y micro, operativamente sí hay mucha diferencia. Se puede hablar de sistemas de macromedición y sistemas de micromedición, ya que en ambos casos los aparatos de medición son solo una parte de la infraestructura y organización que se requiere para el cumplimiento de sus funciones primarias, productivas y operativas en el primero, y comerciales en el segundo.

La micromedición aplica sólo para caudal en conductos a presión de agua potable fría, mientras que la macromedición aplica para caudal, nivel y presión, en conductos a presión y en flujos a superficie libre, para agua cruda, y agua potable, e incluso para agua residual y agua tratada. Hablando de flujo de agua potable fría en conductos a presión, la única diferencia entre los aparatos de medición para macro y micro sería su capacidad de alcance en la medición de volumen y su tamaño dimensional. Tabla 1.1 y Tabla 1.2 de la NOM-012-SCFI-1994).

Tabla 1.1 Medidores para agua con conexiones roscadas de entrada y salida. Designación, tamaño y dimensiones

Designación del medidor	Tamaño del medidor mm	Tamaño (designación de la rosca (5))	amin mm	bmin mm	L1 (1) mm	H2 máx mm	H1 máx mm	H2 máx mm
N 0,6	13	G ¾ B (2)	10	12	110	50	50	180
N 1,0	13	G ¾ B (2)	10	12	115; 130	50	50	180
N 1,5 (3)	13, 13x16	G ¾ B (2)	10	12	165; 190	65	50	180
N 2,5 (3)	16, 16 x 19	G 1 B (2)	12	14	190	65	60	240
N 3,5 (3)	19	G 1¼ B	12	16	228; 260	85	65	260
N 5	19	G 1¼ B (2)	13	18	260	85	70	280
N 6,0 (3)	25	G 1½ B	13	18	260; 273	85	70	280
N 10 (3)	38	1½ B	13	20	320	135	75	300
N 10	51	G 2 B	13	20	300; 320 387	105	75	300
N 15 (3)	51	G 2 (4) B	13	20	387	105	75	300

Fuente: NOM-012-SCFI-1994.

Notas:

- (1) La tolerancia para L1 es de  $\pm 2$
- (2) El tamaño de la rosca del valor mayor próximo se acepta como una opción
- (3) Véase 10.10 a 10.12
- (4) Roscas internas
- (5) Véase 10.3 y 10.9 a 10.14

Por lo anterior la macromedición de caudal comprende una gran variedad de equipos, sistemas y métodos de medición, aunque su gran división es por cuanto al tipo de flujo, ya sea a presión o a superficie libre. Una variante más se tiene en el concepto de medidores permanentes y medidores portátiles, donde los segundos son usados principalmente para mediciones temporales. Hasta hace algunos años el Tubo de Pitot era el equipo que se empleaba para estas necesidades, sin embargo actualmente los medidores ultrasónicos y los electromagnéticos de inserción ofrecen grandes ventajas, tanto para la medición temporal como para la medición permanente.

En la elaboración de un proyecto ejecutivo de macromedición se debe partir de un diagnóstico del sistema actual y del levantamiento de sitios en los que se pretenda instalar los aparatos de

medición, incluyendo mediciones de caudal y presión con equipo portátil. Se debe incluir el diseño de un sistema de información de la macromedición, para tenerlo listo antes de que se instalen los medidores.

La selección de los medidores, apropiados a cada sitio requerido para medición, es una de las decisiones más importantes en la planeación de un sistema de macromedición. Los climas extremos, la continuidad del servicio, la calidad del agua, el contenido de arenas, la seguridad de los equipos, posibilidad de inundación, la pérdida de carga, las facilidades de mantenimiento, los costos de adquisición y de instalación, los costos de operación y mantenimiento, los efectos de sitio y otras situaciones, son algunos de los aspectos que se deberán de tener en cuenta para esta selección.

Tabla 1.2 Medidores para agua con bridas de entrada y salida Designación, tamaño y dimensiones

Designación del medidor m <sup>3</sup> /h N		Tamaño mm (DN de la brida)	L1 mm		(1)	L2 y L3 mm		H1 mm		H2 mm	
Medidores tipo volumétrico, de chorro único y chorro múltiple	Medidores tipo hélice		Medidores tipo volumétrico, de chorro único y chorro múltiple	Medidores tipo hélice		Medidores tipo volumétrico, de chorro único y chorro múltiple	Medidores tipo hélice	Medidores tipo volumétrico, de chorro único y chorro múltiple	Medidores tipo volumétrico, de chorro único y chorro múltiple	Medidores tipo hélice	Medidores tipo volumétrico, de chorro único y chorro múltiple
N 15(2)	N 15(2)	50	255;350;432	200;	135	135	115	216	300	390	
N 20	N 25	65	450	210;254;300;457	150	135	130	250	320	390	
N 30	N 40(2)	80	500	200;220;300	180	177	150	330	320	410	
N 50	N 60(2)	100	650	200;220;305;350;609	225	197	215	355	320	440	
N 100	N 100	125		250;290;350;356;736		200		381		440	
N 150(2)	N 150(2)	150		250;315;350		266		381		500	
N 200	N 200	200		300;340;457;500;927		290		406		500	
N 250(2)	N 250(2)	200		350;500;550		350		406		500	
N 400(2)	N 400(2)	250		350;500;508;550;1104		368		508		500	
N 600(2)	N 600(2)	300		450;600;660;1 524		393		533		500	
N 1 000	N 1 000	400		500;700;800;1 727		400		540		500	
N 1 500	N 1 500	500		500;600;759;800		450		550		520	
N 2 500	N 2 500	600		800;900;1 000		500		560		600	
N 4 000	N 4 000	800		1 000;1 200		510		570		700	
				1 200							

Fuente: NOM-012-SCFI-1994.

NOTAS:

(1) Las tolerancias para L1 son las siguientes:

Para 200 L1 400: ± 3

Para 400 L1 1 200: ± 5

(2) Véase 10.7, 10.10, 10.11 y 10-14

## 1.2. OBJETIVOS DE LA MACROMEDICIÓN

El objetivo fundamental de los sistemas de macromedición es cuantificar y registrar los caudales y volúmenes de agua que se captan, potabilizan, conducen, regulan, y distribuyen en los sistemas de abastecimiento, incluyendo la medición de presiones y niveles, con fines de administración de la producción y de control operacional de la infraestructura, así como de su planificación, diseño, construcción, y mantenimiento.

El registro y procesamiento de datos de las variables indicadas permitirá realizar las determinaciones siguientes para los fines mencionados:

- Caudales y volúmenes extraídos en las zonas de captación, y entregados en los diferentes sectores de distribución, comparando la disponibilidad con la demanda
- Dotación per cápita real de los sistemas de abastecimiento y de sus diferentes zonas o sectores de distribución
- Presiones y niveles en puntos significativos de la infraestructura de abastecimiento
- Equilibrio de suministro y homogeneidad de presiones en las zonas de distribución
- Funcionamiento hidráulico real en la infraestructura de abastecimiento
- Programas de mantenimiento preventivo y correctivo de conducciones, redes de distribución e instalaciones electromecánicas
- Volúmenes no facturados y componentes de pérdidas físicas y comerciales,

con apoyo de datos de la medición de consumos

- Evaluación de aspectos de los sistemas de micromedición existentes, como es su dimensionamiento, eficiencia en la toma de lecturas y su procesamiento, y planes de sustitución
- Planes de instalación de micromedidores
- Formulación de políticas tarifarias, así como su implantación y control.
- Programas de reducción de costos de operación
- Evaluación de programas de operación y mantenimiento, de uso eficiente del agua, y de programas de macromedición

## 1.3. REQUERIMIENTOS DE MEDICIÓN ESTABLECIDOS EN LA LEY DE AGUAS NACIONALES

La Ley de Aguas Nacionales, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 1° de Diciembre de 1992, con una última reforma publicada en el DOF el 07 de junio de 2013, establece requerimientos de medición de las aguas nacionales y del ciclo hidrológico, relacionados con la captación en las fuentes de abastecimiento y las descargas de aguas residuales en los cuerpos receptores. Estos requerimientos de medición, que a continuación se fundamentan, aplican directamente a los organismos operadores de agua potable del país, para que sean observados según se describe.

En el Artículo 7 Fracción III se establece la instalación de los dispositivos necesarios para la medición de la cantidad y calidad de las aguas nacionales y en general para la medición del ciclo hidrológico.

En el Artículo 22 se establece que para el trámite de títulos de concesión, los municipios, los estados y el Distrito Federal, en su caso, en su solicitud de asignación presentarán ante "la Autoridad del Agua":

- a) La programación para aprovechar las fuentes de suministro de agua y la forma de su ejecución
- b) Los sitios y formas de medición tanto del suministro como de la descarga de aguas residuales

En el Artículo 29 Fracción II se establece que los concesionarios tendrán la obligación de instalar dentro de los cuarenta y cinco días siguientes a la recepción del título respectivo por parte del interesado, los medidores de agua respectivos o los demás dispositivos o procedimientos de medición directa o indirecta que señalen las disposiciones legales y reglamentarias aplicables, así como las Normas Oficiales Mexicanas.

Asimismo en la Fracción III se establece la obligación de conservar y mantener en buen estado de operación los medidores u otros dispositivos de medición del volumen de agua explotada, usada o aprovechada.

En el XII la de permitir a "la Autoridad del Agua" con cargo al concesionario, asignatario o permisionario y con el carácter de crédito fiscal para su cobro, la instalación de dispositivos para la medición del agua explotada, usada o aprovechada, en el caso de que por sí mismos no la realicen, sin menoscabo de la aplicación de las sanciones previstas en esta Ley y sus respectivos reglamentos.

En el XIII dar aviso inmediato por escrito a "la Autoridad del Agua" en caso de que los dispositi-

tivos de medición dejen de funcionar, debiendo el concesionario o asignatario reparar o en su caso reemplazar dichos dispositivos dentro del plazo de 30 días naturales.

El Artículo 29 BIS 2 establece que se suspenderá la concesión o asignación para la explotación, uso o aprovechamiento de aguas y bienes nacionales a cargo del Ejecutivo Federal, independientemente de la aplicación de las sanciones que procedan, cuando el usufructuario del título: III. Se oponga u obstaculice el ejercicio de las facultades de inspección, la medición o verificación sobre los recursos e infraestructura hidráulica concesionada o asignada, por parte del personal autorizado.

El Artículo 88 BIS establece que las personas físicas o morales que efectúen descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores a que se refiere la presente Ley, deberán:

Fracción IV. Instalar y mantener en buen estado, los medidores y los accesos para el muestreo necesario en la determinación de las concentraciones de los parámetros previstos en los permisos de descarga

Fracción XI. Permitir al personal de "la Autoridad del Agua" o de "la Procuraduría", conforme a sus competencias, la realización de:

- a) La inspección y verificación de las obras utilizadas para las descargas de aguas residuales y su tratamiento, en su caso
- b) La lectura y verificación del funcionamiento de los medidores u otros dispositivos de medición
- c) La instalación, reparación o sustitución de equipos u otros dispositivos de medi-

ción que permitan conocer el volumen de las descargas

Finalmente el Artículo 119 establece que "La Autoridad del Agua" sancionará conforme a lo previsto por esta Ley, las siguientes faltas:

Fracción VII. No instalar, no conservar, no reparar o no sustituir, los dispositivos necesarios para el registro o medición de la cantidad y calidad de las aguas, en los términos que establece esta Ley, sus reglamentos y demás disposiciones aplicables, o modificar o alterar las instalaciones y equipos para medir los volúmenes de agua explotados, usados o aprovechados, sin permiso correspondiente, incluyendo aquellos que en ejercicio de sus facultades hubiere instalado "la Autoridad del Agua".

#### 1.4. LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES DE MEDICIÓN EN UNIDADES OPERACIONALES

Para determinar los sitios prioritarios de medición en un sistema de abastecimiento de agua potable, así como su factibilidad, es conveniente realizar un diagnóstico del sistema de macro-medicación actual y de las necesidades específicas de cada organismo operador, incluyendo levantamientos de sitios de las estaciones de medición existentes y de puntos adicionales propuestos para ello, los cuales pueden incluir mediciones temporales de caudal y presión con equipo portátil. Sin embargo las recomendaciones generales para localizar estaciones de medición, permanentes y para medición temporal, son las siguientes (ver Ilustración 1.1).

#### 1.4.1. CAPTACIÓN EN LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO

La recomendación en estos casos es que todas las obras de captación en fuentes de abastecimiento cuenten con su estación de medición, con medidor permanente al inicio de la conducción respectiva, ya sea por gravedad o por bombeo. En general se recomienda que en las estaciones de medición permanente existan las facilidades para realizar mediciones temporales con medidor portátil, con el fin de poder hacer mediciones comparativas entre los medidores, así como medir con el equipo portátil cuando el permanente requiera mantenimiento. Eso incluye una válvula de inserción para medidor electromagnético de ese tipo o incluso para Tubo de Pitot; así como también la preparación para poder conectar un manómetro.

#### 1.4.2. CONDUCCIÓN

Además de la estación descrita para la parte inicial de las conducciones, se recomienda una estación no permanente al final de las mismas. De acuerdo con la extensión de los acueductos, es recomendable la instalación intermedia de estaciones para medición no permanente. Esto permitirá detectar y ubicar tramos con conexiones clandestinas y fugas. En caso de que se tengan derivaciones a lo largo de las líneas, también deben contar con su estación de medición permanente.

En el caso de líneas que converjan en otra, o salgan de ella, se deberán instalar sólo los medidores que sean necesarios para determinar los caudales de todos los conductos o instalaciones. En el caso de rebombes también se recomienda la instalación de medidores permanentes con el fin de evaluar los caudales y volúmenes enviados a las zonas de distribución que correspondan.

### 1.4.3. POTABILIZACIÓN

En las plantas potabilizadoras es importante tener medición a la entrada y a la salida, para poder conocer la cantidad de agua que se pierde en retrolavados, calcular la dosificación de reactivos y en general determinar su eficiencia hidráulica.

### 1.4.4. DISTRIBUCIÓN

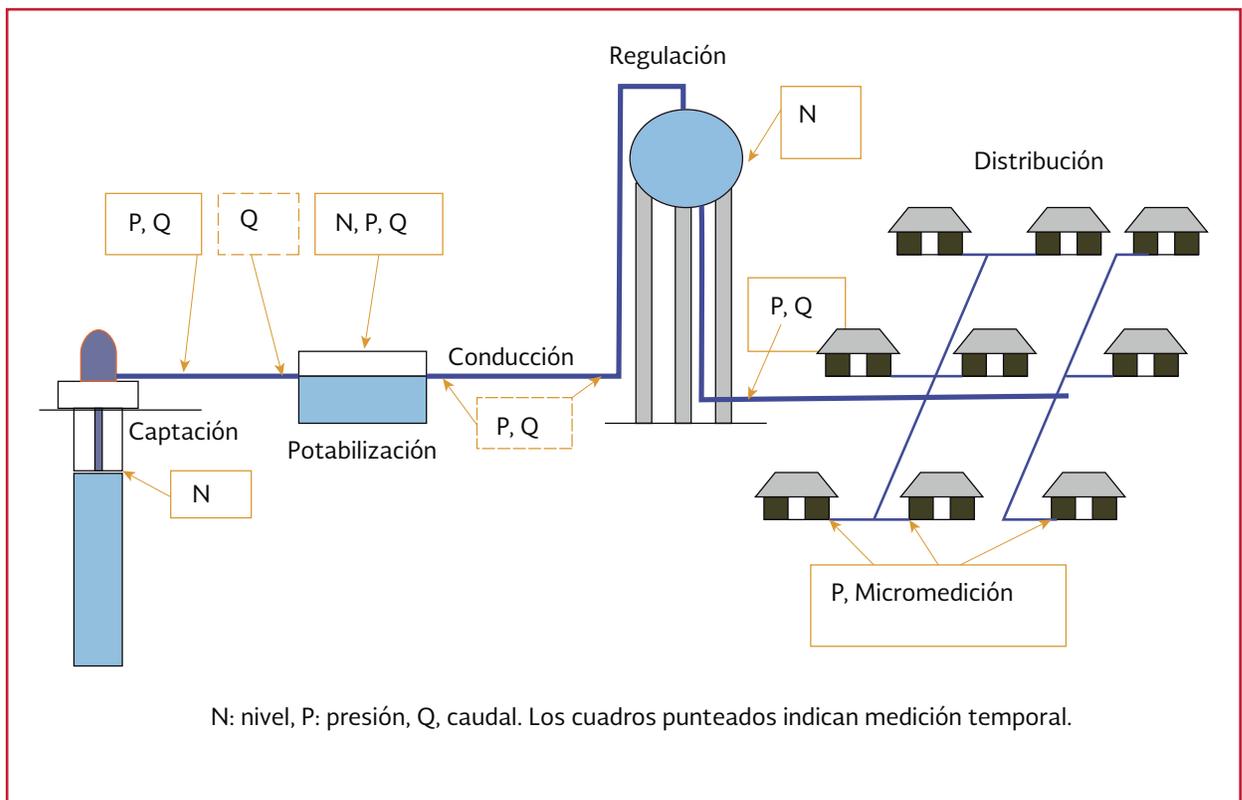
En el caso de contar con red de distribución sectorizada por definición cada distrito hidrométrico debe contar con su estación de medición en la línea de alimentación respectiva, con el fin de que operen según los criterios y beneficios de este tipo de distribuciones: ba-

lance con la medición de consumos, detección de pérdidas físicas y comerciales, reducción de pérdidas físicas mediante el control de presiones, consumos mínimo nocturnos, variación de consumos, caudales y presiones, etcétera. Ver Ilustración 1.1.

### 1.4.5. OTROS PUNTOS DE LA INFRAESTRUCTURA

Otros sitios importantes de medición se tienen en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), conforme a lo indicado en la Ley de Aguas Nacionales. En los libros correspondientes al tema de tratamiento se describen detalles de localización de la medición requerida en las PTAR.

Ilustración 1.1 Esquema de monitoreo de variables de flujo en los procesos de abastecimiento.





# 2

## CONCEPTOS BÁSICOS

### 2.1. INSTRUMENTACIÓN Y METROLOGÍA

El personal a cargo de la planeación, diseño, implantación, operación y mantenimiento de un sistema de medición, estará en contacto necesariamente con términos y conceptos básicos de instrumentación y metrología, tales como: elemento o sensor primario, transductor, funcionamiento analógico y digital, entradas y salidas de un medidor, calibración, umbral, linealidad, resolución, exactitud, precisión, rango, etcétera. Se describen en seguida algunos de los más empleados.

#### 2.1.1. ELEMENTOS ACTIVOS DE UN INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

En la descripción de los instrumentos de medición y su equipo auxiliar se considera tanto su operación como su rendimiento, refiriéndose este último concepto al grado en que un instrumento se aproxima a la perfección. La operación puede describirse en función de los

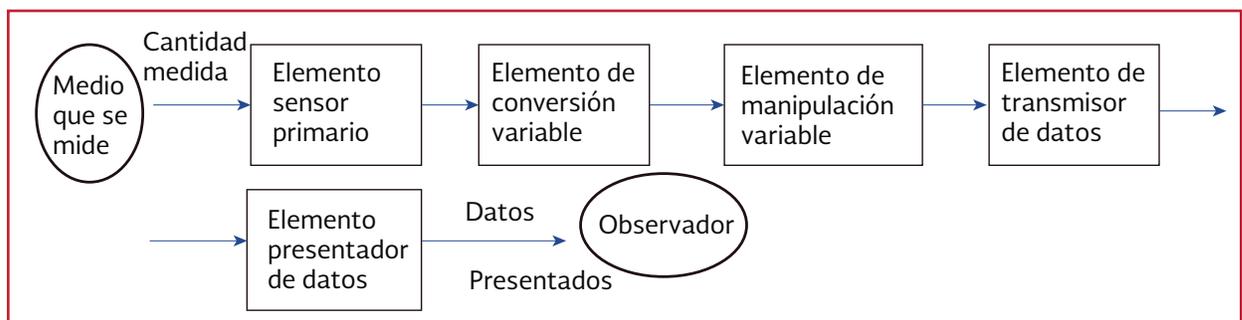
elementos activos mientras que el rendimiento se define en función de las características de rendimiento estático y dinámico (Doebelin, 1980).

Los elementos activos de un instrumento, que incluyen todas las funciones básicas necesarias para su descripción son los siguientes: elemento sensor primario, elemento de conversión variable, elemento variable de manipulación, elemento transmisor de datos, elemento de presentación de datos. Algunos elementos pueden no aparecer mientras que otros pueden aparecer varias veces. Ver Ilustración 2.1.

**Sensor primario:** recibe la energía del medio medido y produce una salida que depende de la cantidad medida. El primario siempre extrae energía del medio medido, por lo cual es imposible una medición perfecta.

**Convertidor variable:** la salida del primario es una variable física como un desalojamiento o un voltaje, la que puede ser necesario convertir

Ilustración 2.1 Elementos activos de un instrumento de medición (Doebelin, 1980)



en otra más adecuada mediante el elemento de conversión variable.

**Elemento de manipulación variable:** permite un cambio en valor numérico de acuerdo con una regla definida, pero conservando la naturaleza física de la variable. Por ejemplo un amplificador electrónico acepta una señal de bajo voltaje como entrada y produce una señal de salida que es también un voltaje en un número constante de veces mayor que la entrada.

**Transmisor de datos:** es necesario cuando los elementos funcionales de un instrumento están materialmente separados. Puede ser un eje, una tubería o bien un sistema de telemetría.

**Presentador de datos:** pone la información en forma que puede ser reconocida por alguno de sus sentidos del observador. Incluye la indicación y el registro, ya sea de forma continua o bien discreta. El registro puede almacenar los datos sin que sean apreciables directamente por los sentidos, por ejemplo los data logger.

Los elementos activos de un medidor pueden encontrarse dentro de la clasificación siguiente de funcionamiento:

- a) **Transductores pasivos:** componentes en los que la energía de salida la proporciona casi en su totalidad la señal de entrada
- b) **Transductores activos:** tiene una fuente auxiliar de potencia para la señal de salida. La señal de entrada proporciona sólo una parte insignificante de energía. Ejemplo el amplificador electrónico y las válvulas servo motoras
- c) **Funcionamiento analógico y digital:** las señales que varían en forma continua y

que pueden tomar una infinidad de valores en un rango dado se llaman señales analógicas. Las que varían en pasos discretos y pueden tomar sólo un número finito de valores se describen como señales digitales

- d) **Método de la puesta a cero y de la deformación:** en un dispositivo del tipo de deformación la cantidad medida produce algún efecto físico que engendra un efecto similar pero opuesto en alguna parte del instrumento, como es el caso de un manómetro. En los dispositivos del tipo de puesta a cero se trata de mantener en cero la deformación por la aplicación adecuada de un efecto opuesto al generado por la cantidad medida, tal es el caso de las balanzas de peso muerto. Estos son más precisos que los de tipo deformación, puesto que se hace una comparación directa de la fuerza desconocida con el patrón (pesas). Su desventaja es el manejo de señales dinámicas

## 2.1.2. CONFIGURACIÓN DE ENTRADA Y SALIDA DE LOS INSTRUMENTOS

Las cantidades o señales de entrada de un instrumento de medición se clasifican en tres categorías: entradas deseadas, interferencias y modificadoras. Las dos segundas afectan por supuesto la salida del instrumento, es decir la medición que se realiza. Por ejemplo en un manómetro diferencial con mercurio las entradas deseadas son las presiones en cada una de las ramas del manómetro o tubo U, las de interferencia alguna inclinación del mismo, y las modificadoras la temperatura y la gravedad actuando sobre el manómetro inclinado.

La corrección de las entradas deseadas con interferencias y entradas modificadoras se realiza con los métodos:

- a) **Insensibilización inherente:** Propone que los elementos del instrumento de medición deben ser inherentemente sensibles sólo a las entradas deseadas
- b) **Correcciones de salida calculadas:** Requiere que se midan las magnitudes de las entradas de interferencia y de las modificadoras y que se conozca de manera cuantitativa la forma en que afectan la salida. Así por ejemplo puede calcularse la densidad del mercurio o del líquido manométrico utilizado en función de la temperatura, para efectos de medición de caudal con Tubo de Pitot
- c) **Filtrado de señal:** Se basa en la posibilidad de introducir ciertos elementos (filtros) en los instrumentos, para detener las señales espurias de manera que se eliminen o se reduzcan sus efectos en la salida. En general es común diseñar filtros de tipo mecánico, eléctrico, térmico, neumático, y de cualquier otro tipo, que separen señales de acuerdo con su frecuencia en alguna forma específica. Por ejemplo los amortiguadores de pulsaciones en los manómetros son útiles para la medición de presiones promedio. En general en los laboratorios experimentales y de calibración se dice que las actividades se realizan en condiciones controladas, por ejemplo de temperatura, para lo cual se emplean aislantes térmicos que actúan como filtros de esta variable ambiental
- d) **Método de las entradas opuestas:** Consiste en introducir intencionalmente entradas de interferencia y modifica-

adoras que tiendan a anular los efectos no deseados de las inevitables entradas espurias

## 2.2. CALIBRACIÓN

Las características de funcionamiento de los instrumentos de medición se dividen, por varias razones, generalmente en características estáticas y características dinámicas. Cuando se miden cantidades que son constantes o que sólo varían lentamente, es posible definir un conjunto de criterios de funcionamiento que dan una descripción significativa de la calidad de la medida, sin referirse a las descripciones dinámicas en las que haya que usar ecuaciones diferenciales. A estos criterios se les llama características estáticas.

Muchos otros problemas de medida se refieren a cantidades rápidamente variables, donde las relaciones dinámicas entre la entrada y la salida del instrumento deben examinarse, generalmente mediante ecuaciones diferenciales. Los criterios de funcionamiento basados en estas relaciones constituyen las características dinámicas de los instrumentos.

En realidad las características estáticas influyen también en la calidad de la medida bajo condiciones dinámicas, pero aquellas generalmente aparecen como efectos alinéales o estadísticos en los que de otra manera serían ecuaciones diferenciales lineales que dieran las características dinámicas. Estos efectos harían inmanejables las ecuaciones diferenciales; por tanto los dos aspectos del problema se tratan de forma separada.

Así las ecuaciones diferenciales del funcionamiento dinámico desprecian los efectos del ro-

zamiento seco, holgura, histéresis, dispersión estadística, etcétera, aun cuando afecten este comportamiento. Estos fenómenos se estudian de manera más conveniente como características estáticas, y el funcionamiento global del instrumento se evalúa por superposición semicuantitativa de las características estáticas y dinámicas.

### 2.3. CALIBRACIÓN ESTÁTICA

Todas las características estáticas se determinan mediante la calibración del mismo nombre. Esta se refiere al caso en que todas las entradas (deseadas, de interferencia y modificadoras), excepto una, se mantienen en algunos valores constantes. Las relaciones entre la entrada y la salida obtenidas de esta manera, comprenden una calibración estática que es válida bajo las condiciones constantes establecidas de todas las demás entradas.

La expresión de que todas las demás entradas se mantienen constantes, se refiere a una situación ideal, a la que sólo se puede aproximar, pero nunca alcanzar en la práctica. Al decir que una entrada se hace variar y las demás se mantienen constantes, implica que estas se determinan y se miden, independientemente del instrumento que se está calibrando.

La calibración también se describe como el proceso de suprimir errores sistemáticos y evaluar la precisión. No tiene sentido hablar de la exactitud de un instrumento como si se tratara de un aparato aislado. Siempre deberá considerarse el instrumento más su ambiente, y el método que se use, es decir, el instrumento más sus entradas.

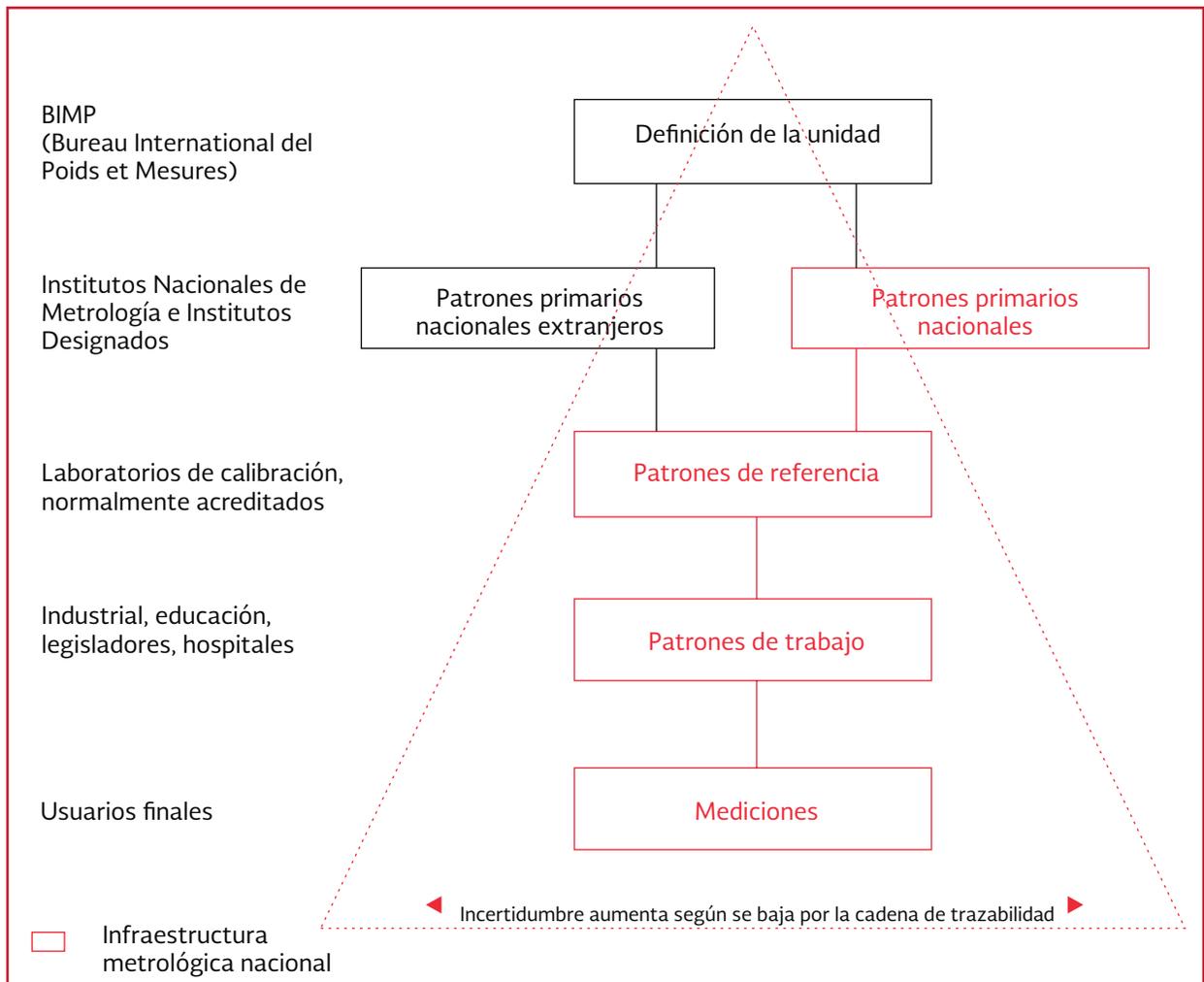
Por otra parte, conforme al documento Metrología Abreviada (EURAMET © eV 2008), se dice sobre la calibración que una herramienta fundamental para asegurar la trazabilidad de una medida es la calibración del instrumento o sistema de medida o del material de referencia. La calibración determina las características metro-lógicas de un instrumento, sistema o material de referencia. Esto se logra mediante comparación directa con patrones de medida o materiales de referencia certificados. Se emite un certificado de calibración y, en la mayoría de los casos, se adhiere una etiqueta al instrumento calibrado.

Según la misma referencia una cadena de trazabilidad (Ilustración 2.2) es una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas ellas con incertidumbres establecidas. Esto asegura que un resultado de medida o el valor de un patrón está relacionado con referencias de niveles superiores, hasta llegar al patrón primario.

Un usuario final puede obtener trazabilidad al máximo nivel internacional, bien directamente de un Instituto Nacional de Metrología, o de un laboratorio secundario de calibración, normalmente un laboratorio acreditado. Como resultado de los diversos acuerdos de reconocimiento mutuo, puede obtenerse reconocimiento internacional de la trazabilidad de laboratorios de fuera del propio país del usuario.

Dentro de la metrología científica se encuentra el campo temático de FLUJO, el cual incluye el subcampo de caudal de líquidos (volumen, masa y energía). En este subcampo los patrones de medida importantes son: Patrones volumétricos, patrones de efecto Coriolis, medidores de nivel, medidores inductivos de flujo, y medidores ultrasónicos de flujo.

Ilustración 2.2 Cadena de trazabilidad (Metrología Abreviada, 2008)



De conformidad con la misma fuente, un patrón de medida es una medida materializada, un instrumento de medida, un material de referencia o un sistema de medida concebido para definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o más valores de una magnitud, de modo que sirva de referencia.

La incertidumbre es una medida cuantitativa de la calidad del resultado de medición, que permite que los resultados de medida sean comparados con otros resultados, referencias, especificaciones o normas. Todas las mediciones están

sujetas a error, por lo que el resultado de una medición difiere del valor verdadero del mensurando. Con tiempo y recursos, la mayoría de las fuentes de error en la medida pueden identificarse, y los errores de medición cuantificarse y corregirse, por ejemplo, mediante calibración. Sin embargo, nunca hay tiempo ni recursos suficientes para determinar y corregir completamente estos errores de medida.

En esta fuente se establece que hay cuatro razones principales para tener calibrado un instrumento:

1. Para establecer y demostrar su trazabilidad
2. Para garantizar que las lecturas del instrumento son compatibles con otras mediciones
3. Para determinar la exactitud de las lecturas del instrumento
4. Para establecer la fiabilidad del instrumento, es decir que se puede confiar en sus indicaciones

Es imposible calibrar un instrumento a una precisión mayor que la del patrón de medida con el que se compara. El patrón de calibración debe ser cuando menos 10 veces más preciso que el instrumento que se calibra. Ver en Ilustración 2.3 el *patrón nacional de flujo volumétrico de líquidos*, del Centro Nacional de Metrología (CENAM), que se fundamenta en el principio de desplazamiento positivo, técnica volumétrica. Su incertidumbre expandida es:  $\pm 1.5 \times 10^{-3}$  ( $k = 2$ ), con un alcance de 0.04 L/min a 40 L/min. Se aplica en la calibración de medidores de presión diferencial, medidores de flujo tipo turbina, medidores máscos, electromagnéticos, medidores de desplazamiento positivo, y otros.

Para realizar la calibración es necesario seguir los pasos siguientes.

- a) Se examina la construcción del instrumento y se identifican todas las entradas posibles
- b) Se decide qué entrada es importante en la aplicación para la que se va a calibrar.
- c) Conseguir los aparatos que permitan variar todas las entradas importantes dentro de los intervalos que se consideren necesarios
- d) Manteniendo constantes algunas entradas, haciendo variar otras y registrando

la salida o salidas, se obtienen las relaciones deseadas entre la entrada y la salida.

El proceso de medida consiste en ejecutar, tan bien como sea posible, las instrucciones para llevar a cabo la medición. Como la calibración es de modo esencial una forma de medida refinada, se le aplican las mismas instrucciones o proceso de medida.

Ilustración 2.3 Patrón Nacional de Flujo Volumétrico de Líquidos (CENAM, 2008)



Las características estáticas principales de los instrumentos son: la exactitud, la precisión, la sensibilidad estática, la linealidad, el umbral, la resolución, la histéresis, la legibilidad de la escala, y el alcance o rango. En seguida se describen algunas y otras más adelante:

- **Sensibilidad estática.** Se define como la pendiente de la curva de calibración. Si la curva no es nominalmente una línea recta, la sensibilidad variará con el valor de la entrada. Aunque la sensibilidad del instrumento a su entrada deseada es de gran importancia, su sensibilidad a entradas de interferencia o modificadoras puede también ser de interés. Por ejemplo en el caso de un manómetro Bourdon la temperatura puede producir una contracción y dilatación relativas

que generen un cambio en la lectura de la salida, aunque la presión no haya cambiado. En ese sentido, la entrada es interferente. Además la temperatura puede cambiar el módulo de elasticidad del muelle del manómetro, produciendo un cambio en la sensibilidad a la presión. En este sentido es una entrada modificadora. Al primer efecto se le llama corrimiento del cero, y al segundo variación de sensibilidad o variación de factor de escala. Estos pueden evaluarse también experimentalmente

- **Linealidad.** La linealidad independiente, está relacionada a la línea recta de referencia que coincide con los mínimos cuadrados. La linealidad es por lo tanto simplemente una medida de la desviación máxima de cualesquier puntos de calibración de la línea recta, lo que puede expresarse como un porcentaje de la lectura real, como porcentaje de la lectura de toda la escala, o como combinación de ambas
- **Umbral.** Si se aumenta gradualmente la entrada de un instrumento a partir de cero, hay un valor mínimo abajo del cual no se detectan cambios medibles en la salida. Este valor se denomina umbral del instrumento
- **Resolución.** Si la entrada de un instrumento se incrementa lentamente a partir de un valor diferente de cero, se observa que la salida no cambia, en forma medible, hasta que excede un cierto incremento. Este incremento se denomina resolución
- **Rango.** Conjunto de valores comprendido entre las indicaciones extremas de un instrumento de medida analógico.

El rango también es denominado alcance, y descrito como el intervalo de una variable para cuya medición se ha proyectado un instrumento. En otros términos es el límite superior de operación y el límite inferior de operación. También se entiende como la relación de la mayor a la menor entrada que el instrumento puede medir “fielmente”. Cómo se verá más adelante este concepto es fundamental para la selección de un medidor

Doebelin (1980) define la exactitud como el grado de ausencia de error de una muestra de lecturas de medición. Asimismo, describe la inexactitud total, a la que también llama incertidumbre, como la combinación de la imprecisión (error aleatorio) y la tendencia (error sistemático). La norma ISO 5168 (1978) expresa lo que denomina incertidumbre combinada, en términos de incertidumbre aleatoria y de incertidumbre sistemática.

En relación al párrafo anterior el Error aleatorio es la componente del error de medida que, en mediciones repetidas, varía de manera impredecible, mientras que el error sistemático (de un instrumento de medida) es la componente del error de medida que, en mediciones repetidas permanece constante o varía de forma predecible.

Otros conceptos metrológicos básicos son los siguientes:

- **Error máximo permitido (de un instrumento de medida):** Valores extremos para un error de medida con respecto al valor de una magnitud de referencia co-

nocida permitido por especificaciones, reglamentos, etcétera, para una medida, instrumento de medida o sistema de medida dado

- **Error relativo:** Cociente entre el error de medida de una medición y el verdadero valor del mensurando

### 2.3.1. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

Al igual que en otras áreas de la ingeniería, como es el caso de la teoría de las vibraciones, teoría de los circuitos y teoría del control automático, el modelo matemático que se emplea para el estudio de las respuestas dinámicas de los sistemas de medida ante cualquier entrada (deseada, modificadora, o interferente), es la ecuación diferencial lineal ordinaria con coeficientes constantes (Doebelin, 1980):

$$a_n \frac{d^n q_0}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} q_0}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dq_0}{dt} + a_0 q_0 = b_m \frac{d^m q_i}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} q_i}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dq_i}{dt} + b_0 q_i$$

Ecuación 2.1

donde:

- $q_0$  = Cantidad de salida
- $q_i$  = Cantidad de entrada
- $t$  = Tiempo
- $a, b$  = Combinaciones del sistema físico, que se suponen constantes

Si se define el operador diferencial  $D=d/dt$ , la Ecuación 2.1 se puede expresar como:

$$(a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0) q_0 = (b_m D^m + a_{m-1} D^{m-1} + \dots + b_1 D + b_0) q_i$$

Ecuación 2.2

Del modelo general representado por la ecuación anterior se tienen casos particulares que permiten clasificar a los instrumentos de medición como: instrumentos de orden cero, instrumentos de primer orden e instrumentos de segundo orden.

#### 2.3.1.1. Instrumentos de orden cero

Un caso particular de la ecuación diferencial presentada se tienen cuando los coeficientes  $a$  y  $b$ , excepto  $a_0$  y  $b_0$ , son cero, resultando así la expresión:

$$q_0 = \frac{b_0}{a_0} q_i = K q_i \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde:

$$K \triangleq \frac{b_0}{a_0} = \text{Sensibilidad estática}$$

Cualquier instrumento que obedezca en forma aproximada la ecuación anterior dentro de su intervalo de condiciones de operación, se define como un instrumento de orden cero. En estos no importa como pueda variar la señal de entrada con el tiempo, la salida del instrumento le sigue “perfectamente” sin distorsión ni retraso, representando el funcionamiento dinámico ideal.

#### 2.3.1.2. Instrumentos de primer orden

Estos instrumentos tienen un funcionamiento dinámico en el que la respuesta presenta retrasos respecto a la señal de entrada, debido a la inercia de alguno o algunos de sus elementos activos. Su funcionamiento es expresado por medio de la ecuación siguiente:

$$(\tau D + 1) q_0 = K q_i \quad \text{Ecuación 2.4}$$

donde:

$$\tau \triangleq \frac{a_1}{a_0} \triangleq \text{Constante de tiempo}$$

$$D = \frac{d}{dt}$$

Las cantidades de entrada pueden ser escalonadas, rampa e impulso. La que se muestra en la Ilustración 2.4 es del primer tipo, y se muestra la respuesta del instrumento a esta función.

### 2.3.1.3. Instrumentos de segundo orden

Estos instrumentos tienen características de vibración y amortiguamiento en sus elementos activos, que de acuerdo con la forma de la señal de entrada, pueden presentar distorsiones

en ciertos intervalos de salida. La ecuación que representa el funcionamiento dinámico de estos instrumentos es:

$$\left(\frac{D^2}{W_n^2} + \frac{2\delta D}{W_n} + 1\right) q_0 = K q_i \quad \text{Ecuación 2.5}$$

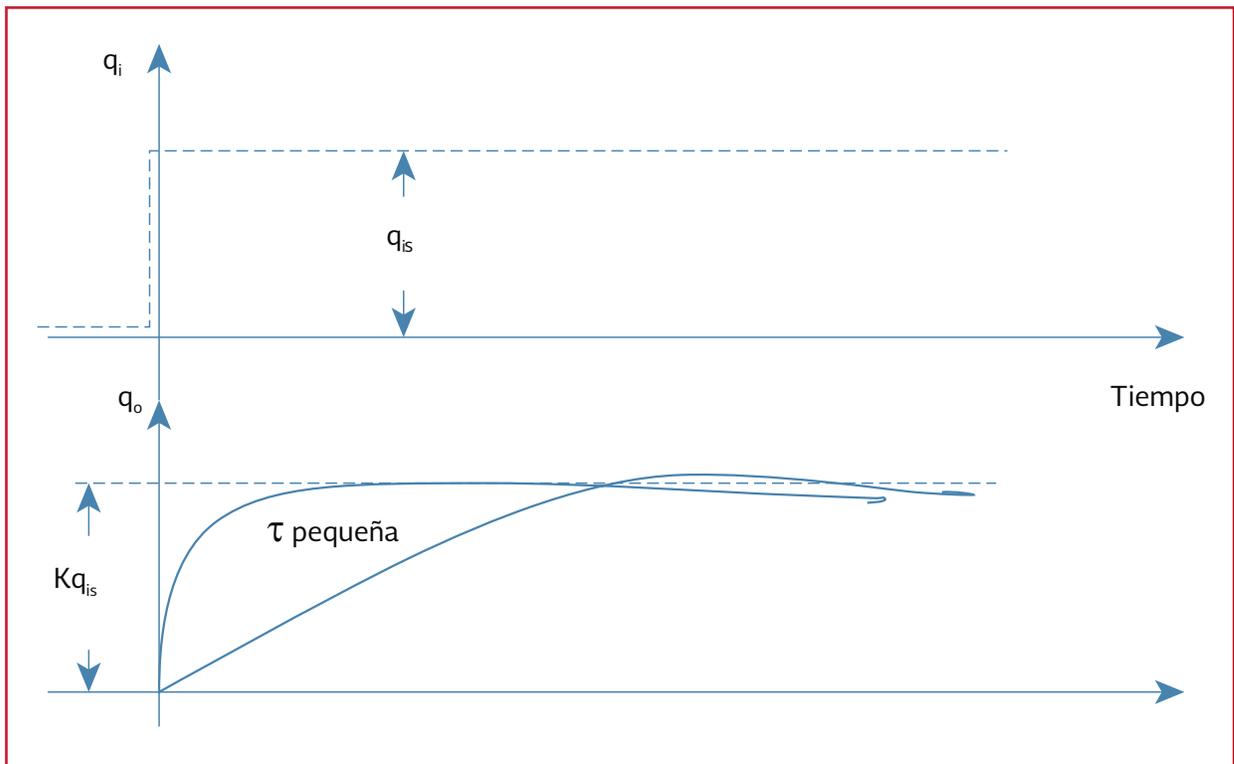
donde:

$$W_n \triangleq \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \triangleq \text{Frecuencia natural sin amortiguar (rad/s)}$$

$$\delta \triangleq \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}} \triangleq \text{Relación de amortiguamiento (adimensional)}$$

En la Ilustración 2.4 se muestra un ejemplo de la curva de respuesta de un instrumento de primer orden a una entrada de tipo escalonado, en función de su sensibilidad estática y de la constante de tiempo. Los instrumentos de segundo orden también tienen su respuesta a las funciones de entrada, escalón,

Ilustración 2.4 Ejemplo de respuesta de un instrumento de primer orden a una función escalonada de entrada



rampa, e impulso, en función de su sensibilidad estática, frecuencia natural y relación de amortiguamiento. Para mayor información se recomienda consultar la referencia indicada (Doebelin, 1980).

Respecto a errores de medición, en el apartado 2.1.1 se explica que la calibración es el proceso de suprimir errores sistemáticos y evaluar la precisión, y que no tiene sentido hablar de la

exactitud de un instrumento como si se tratara de un aparato aislado. Siempre deberá considerarse el instrumento más su ambiente, y el método que se use, es decir, el instrumento más sus entradas. En la NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCFI-1994, “Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos-Medidores para agua potable fría –Especificaciones”, se describen los errores permisibles de medición (ver Tabla 4.2).

# 3

## CLASIFICACIÓN GENERAL DE MEDIDORES DE FLUJO

Existe en el mercado una gran variedad de aparatos y sistemas de medición, para todo tipo de fluidos, líquidos y gases, e incluso flujo de granos. La medición, principalmente de caudal, en los sistemas de abastecimiento de agua potable, alcantarillado y saneamiento, restringe esta variedad a los equipos y sistemas de medición más aplicables al flujo de agua, acordes con las características de flujo y calidad del agua a medir, la exactitud requerida, así como de las condiciones del sitio en que se instalarán, como la seguridad, el vandalismo, los climas extremos, la continuidad del servicio, el contenido de arenas, la posibilidad de inundación, y la pérdida de carga. Teniendo en cuenta además los costos de adquisición, instalación, operación y mantenimiento. En este sentido, tecnología de medición como la másica no es de uso común en los sistemas de abastecimiento de agua potable.

Los diferentes procesos de los sistemas de agua y saneamiento implican flujos a presión y flujos a superficie libre, que es necesario medir con los equipos y sistemas apropiados. En ambos casos uno de los objetivos principales es determinar el volumen acumulado en determinado tiempo. En

la Tabla 3.1 se presenta una clasificación general de equipos y sistemas de medición más aplicables al flujo de agua en conductos a presión y a superficie libre, en sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento.

Para conductos a presión se presentan los medidores que directamente determinan el volumen acumulado, que son los medidores de desplazamiento positivo, generalmente para uso en la determinación de consumos por parte de los usuarios, debido a los diámetros disponibles en el mercado. Asimismo se presentan los medidores que determinan el volumen de manera indirecta, mediante la velocidad y el área de flujo. De estos se tienen principalmente los medidores mecánicos de turbina y de propela, los electromagnéticos, los ultrasónicos, los de presión diferencial, los de área variable, y otros de poca aplicabilidad en agua potable como los Vortex. Existen equipos y sistemas másicos para flujo a presión, como los de efecto Coriolis, también no usados en sistemas de abastecimiento.

Para canales se pueden distinguir tres principales métodos de medición:

- Las canaletas de tirante crítico que se subdividen en canaletas de garganta corta y canaletas de garganta larga
- Los vertedores, que se subdividen en vertedores de cresta afilada y vertedores de cresta ancha
- Los métodos de velocidad- área, entre los que se encuentran los tradicionales molinetes, y los modernos métodos acústicos (ultrasónicos).

### 3.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE MEDIDORES DE FLUJO A PRESIÓN

En la Tabla 3.2 se presentan los principales medidores de flujo a presión, agrupados según la relación entre sus señales de entrada y salida, la cual define su rango o alcance de medición. Se tienen primero los de escala de raíz cuadrada,

Tabla 3.1 Clasificación general de principales equipos y sistemas para medir flujo de agua a presión y a superficie libre

En conductos a presión		En canales (gravedad)		
Volumétricos	Volumétricos velocidad-área	Canaletas de tirante crítico	Vertedores	Otros métodos
Desplazamiento positivo Disco nutativo Pistón oscilante	Mecánicos de velocidad -Turbina - Propela o hélice	Garganta corta -Parshall -Khafagi -Garganta cortada - Aforador H	De cresta afilada o pared delgada -Triangulares -Rectangulares -Proporcional: Sutro y Rettgers - Parabólico -Trapezoidal (Cipoletti)	Velocidad-Área -Método con molinetes -Método con flotadores -Método ultrasónico o acústico -Método electromagnético
	Electromagnéticos -Carrete -Inserción	Garganta larga -Rectangular -Trapezoidal -Triangular -Palmer Bowlus (Sección U)	De cresta ancha -Rectangular -Triangular bidimensional -Triangular V -Cresta redondeada	Dilución -Trazador químico -Trazador Radioactivo -Trazador fluorescente
	Ultrasónicos -Tiempo en tránsito -Efecto Doppler	Otros		Otros -Área-pendiente
	Inserción -Electromagnéticos -Microturbina			
	Presión diferencial -Venturi -Placa de orificio -Tobera -Pitot -Annubar			
	Área variable -Rotámetros			
	Otros			

según ecuación 6, que son los equipos de presión diferencial y los tubos de Pitot, con un rango de 4:1. Esto significa que un aparato específico tendrá capacidad para medir flujos con velocidades de 4 a 1 m/s, 8 a 2 m/s, 2 a 0.5 m/s, etcétera.

$$V = C\sqrt{2gh} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde:

- $C$  = Constante de calibración del primario, adimensional
- $g$  = Aceleración de la gravedad,  $m/s^2$
- $h$  = Diferencial de presiones, m
- $V$  = Velocidad de flujo, m/s

Por ejemplo en el caso de los tubos de Pitot en combinación con Tubos U y líquidos manométricos que permiten medir la carga de velocidad para calcular la velocidad y el caudal, si las velocidades son altas se utiliza mercurio. No es posible detectar velocidades medias o bajas con este líquido. Lo que se hace es utilizar tetracloruro de carbono para velocidades medias, y benceno para velocidades bajas.

En los demás elementos primarios de escala de raíz cuadrada, placa de Orificio, Venturi, y Tobera, también se puede emplear el tubo U para medir el diferencial de presiones, pero más común es emplear celdas de presión diferencial. En estos casos, para ampliar su rango de medición se puede conectar en paralelo una celda con rango menor, con los accesorios necesarios para su protección.

Junto con el rango se indican los diámetros de aplicación, la exactitud, y los precios relativos. Se observa que el tubo de Pitot presenta la mayor incertidumbre, lo cual se debe a que está sujeto a fuentes de error como la medición real del diámetro de la tubería, además de la debida a la medición de la velocidad. Aunque es un equipo prácticamente en desuso, debido a que tiene la ventaja de permitir determinar los perfiles de flujo de manera puramente hidráulica, aún hay especialistas que lo siguen empleando.

En la segunda parte de la Tabla 3.2 se tienen los equipos de escala lineal con rango típico de 10:1. Dentro de estos se encuentran los medidores vo-

Tabla 3.2 Características de medidores para flujo a presión (Miller, 1989)

Tipo de medidor	Diámetro pulgadas (mm)	Exactitud	Precios relativos
Escala de raíz cuadrada; Rango Máximo simple: 4:1			
Orificio anular	>4 (100)	±2% a escala llena	Bajo
Venturi	>2 (50)	±1% a ±2%	Alto
Tobera	>2 (50)	±1% a ±2%	Medio
Pitot	>3 (75)	±5%	Bajo
Escala lineal; rango típico 10:1			
Electromagnético	1-72 (25- 1800)	±0.5% del valor, a ±1% de escala llena	Alto
Desplazamiento positivo (volumétrico)	<12 (300)	±0.5% del valor	Alto
Turbina	0.25-24 (6-600)	±1% del valor	Medio
Ultrasónico tiempo en tránsito	>0.5 (12)	±1% del valor a ±5% de escala llena	Alto
Ultrasónico de efecto Doppler	>0.5 (12)	±5% de escala llena	Medio

Fuente: R. W. Miller, Flow Measurement Engineering Handbook, USA, 1989.

lumétricos de desplazamiento positivo, y los que permiten determinar el volumen de manera indirecta mediante la velocidad y el área. En estos se distingue la exactitud de los electromagnéticos y los de desplazamiento positivo, seguidos de los mecánicos de turbina. Los electromagnéticos aquí indicados son los de tipo carrete. Hay equipos de electromagnéticos de inserción, cuya exactitud es sensiblemente menor a la de estos, pero que tienen ventajas en costos y facilidades de mantenimiento.

En cuanto a los diámetros de aplicación los de desplazamiento positivo se indican hasta 300 milímetros, aunque para agua potable los diámetros comerciales son menores, al menos en el mercado nacional. Asimismo se observa que los precios de los electromagnéticos, de desplazamiento positivo y los ultrasónicos de tiempo en tránsito, son relativamente altos.

Dentro de las características de los medidores de desplazamiento positivo y los de turbina, es que ambos son mecánicos, a los que aplica la NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCFI-1994, “Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos-Medidores para agua potable fría –Especificaciones”, en la cual textualmente indica que aplica a medidores para agua definidos como instrumentos de medición con integración propia, que continuamente determinan el volumen de agua que pasa a través de ellos, empleando un proceso mecánico directo o un proceso de transmisión magnética o de otro tipo que incluye el uso de cámaras volumétricas de paredes móviles (medidores volumétricos) o la acción de la velocidad del agua

sobre la rotación de una parte en movimiento (medidores de velocidad).

La versión vigente incluye sólo este tipo de medidores, recalcando que son para agua potable fría. Sin embargo en su aplicación se pueden encontrar parámetros fuera de norma que pueden afectar su funcionamiento en el corto o en el mediano plazo.

En flujos con arenillas y sedimentos también conocidos o llamados como sólidos suspendidos, ocasionan que los medidores tiendan a presentar un mal funcionamiento debido a que puede obstruirse el mecanismo mecánico del medidor provocando la interrupción del registro del flujo de agua o llegando a obstruir cualquier elemento de la parte mecánica del medidor. Este mal funcionamiento se determinó a través de estudios experimentales realizados en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, donde se encontró éste tipo de problemática afectando principalmente los apoyos y rodamientos del medidor. Bonola et. al., (2011). Ver Ilustración 3.1.

Ilustración 3.1 Arreglo experimental para evaluación de medidores con flujo de agua con sedimentos



### 3.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE MEDIDORES DE FLUJO A SUPERFICIE LIBRE

En la Tabla 3.3 se presentan las características de los principales métodos de medición para flujo a superficie libre. Se indica su aplicación en cuanto a ancho del canal o cauce, tirante y velocidad de flujo. Asimismo su incertidumbre. Por ejemplo para el primer caso del método de velocidad-área con uso de molinete con varilla de vadeo, aplica para cualquier ancho, desde más de 50 m hasta menos

de 5 m; en tirantes menores de 1m, velocidades medias (1 y 3 m/s) y velocidades bajas (menores de 1 m/s), e incertidumbre de  $\pm 3$  por ciento.

Como se puede observar, el método más exacto es el del vertedor rectangular de pared delgada con una incertidumbre de  $\pm 1$  por ciento, sólo que aplica a anchos menores de 5 m, tirantes menores de 1 m, y velocidades medias y bajas. También se puede ver que las canaletas tienen una incertidumbre de  $\pm 5$  por ciento, y se aplican para anchos medios y angostos, a tirantes bajos y velocidades medias y bajas.

Tabla 3.3 Características de métodos de medición de flujo en canales

Método	Criterios			Incertidumbre
No. Descripción	Ancho	Tirante	Velocidad	Porcentaje mínimo
1 Velocidad-área, vadeo	L, M, S	S	S, M	$\pm 3\%$
2 Velocidad-área, puente	M,L	M,L	M,L	$\pm 3\%$
3 Velocidad-área, canastilla	M.L	M,L	M,L	$\pm 4\%$
4 Velocidad-área, bote estático	M.L	M,L	M,L	$\pm 4\%$
5 Velocidad-área, bote en movimiento	L	M,L	M,L	$\pm 6\%$
6 Velocidad-área, flotadores	M.L	M,L	M,L,S	$\pm 10\%$
7 Pendiente-área	M.L	M,L	M,L	$\pm 10\%$
8 Ultrasónico	M.L	M,L	M,L,S	$\pm 5\%$
9 Electromagnético	M.S	S,M	S, M	$\pm 5\%$
10 Dilución química inyección continua	S, M	S,M	S, M,	$\pm 3\%$
11 Dilución química inyección súbita	S, M	S,M	S,M	$\pm 3\%$
12 Vertedor triangular de pared delgada	S	S	M,S,	$\pm 3\%$
13 Vertedor rectangular de pared delgada	S	S	M,S	$\pm 1\%$
14 Vertedor de cresta ancha	M.S	S	M,S	$\pm 5\%$
15 Vertedor de perfil triangular	M.S	S	M,S	$\pm 5\%$
16 Canaleta rectangular	M.S	S	M,S	$\pm 5\%$
17 Canaleta trapezoidal	M.S	S	M,S	$\pm 5\%$

Fuente: International Standard ISO 8363-1986 "Liquid flow measurement in open channels-General guidelines for the selection of methods".

L: Ancho grande (más de 50 m); velocidad alta (más de 3 m/s); tirante profundo (más de 5 m)

M: Ancho medio (entre 5 y 50 m); velocidad media (entre 1 y 3 m/s); tirante medio (entre 1 y 5 m)

S: Ancho angosto (menos de 5 m); velocidad baja (menos de 1 m/s); tirante bajo (menos de 1 m)



# 4

## MEDIDORES DE CAUDAL PARA CONDUCTOS CERRADOS A PRESIÓN

### 4.1. MEDIDORES MECÁNICOS: VOLUMÉTRICOS Y DE VELOCIDAD

Como ya se describió, estos medidores son los únicos a los que aplica la NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCFI-1994, “Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos-Medidores para agua potable fría-Especificaciones”.

Una de las características principales de este tipo de aparatos de medición es que generan una importante pérdida de carga, que se debe tener en cuenta en la evaluación de los sitios en que se proponga su instalación. De acuerdo con esta norma, de los resultados de las pruebas, los medidores se clasifican en cuatro grupos sobre la base de pérdida de presión correspondiente a uno de los siguientes valores máximos: 1 bar; 0.6 bar; 0.3 bar y 0,1 bar, del alcance de medi-

ción. Su ventaja es su costo sensiblemente menor al de cualquier otra tecnología de medición.

La NOM-012-SCFI-1994 establece como límites permisibles de errores de medición  $\pm 5$  por ciento en el campo inferior, comprendido entre el gasto mínimo  $q_{min}$  incluido y el gasto de transición  $q_t$  excluido y  $\pm 2$  por ciento en el campo superior, comprendido entre  $q_t$  incluido y el gasto de sobre carga  $q_s$  incluido. Los gastos  $q_{min}$  y  $q_t$  dependen de la clase metrológica A, B o C, y de la designación del medidor “N” en  $m^3/h$ . Ver Tabla 4.1. Ver también en la Tabla 4.2  $q_{min}$  y  $q_t$  para medidores Clase B y Clase C de  $1.5 m^3/h$ .

Sin embargo, la norma mexicana no ha sido actualizada y continua considerando la clase metrológica para determinar la sensibilidad del medidor, en lugar de hacer uso de los factores de influencia del medidor, tal y como ya se encuentran establecido en la norma ISO 4064-1:2014, con el objeto de homologar los criterios

Tabla 4.1 Clasificación de los medidores de acuerdo a los valores de  $q_{min}$  y  $q_t$

Clase	$q_{min}$		$q_t$	
	Para N < 15	Para N $\geq$ 15	Para N < 15	Para N $\geq$ 15
A	0.04	0.08	0.1	0.3
B	0.02	0.03	0.08	0.2
C	0.01	0.006	0.015	0.015

Fuente: NOM-012-SCFI-1994

Tabla 4.2 Gasto mínimo ( $q_{min}$ ), gasto de transición ( $q_t$ ), gasto permanente ( $q_p$ ) y gasto de sobrecarga ( $q_s$ ) para medidores Clase B y Clase C, de 1.5 m<sup>3</sup>/h

Campos	Error permisible	Gastos referentes (L/h) Clase B		Gastos referentes (L/h) Clase C
Campo inferior	5%	Mínimo $q_{min}$	30	15
		Transición $q_t$	120	22.5
Campo superior	2%	Permanente $q_p$	1 500	1500
		Sobrecarga $q_s$	3 000	300

Fuente: Elaboración propia con datos de la NOM-012-SCFI-1994.

y parámetros de control en el error de medición y contar con equipos más precisos, con mayor exactitud y menor por ciento de error en los registros de medición.

Una de las características importantes que debemos conocer y saber interpretar es la capacidad del medidor para detectar y registrar volúmenes de agua muy pequeños, porque esta característica indica la precisión de la medición con menor error en cada registro que realice. Es decir, si el medidor tiene una mayor capacidad para detectar y medir un flujo pequeño es más exacto, que otro que no pueda medir la misma cantidad de ese volumen. Esta característica está determinada por el gasto entre  $Q_{min}/Q_t$  y de acuerdo a la nueva versión de la Norma ISO 4064-1:2014 se mide en función de la “R” que son las condiciones de uso que se obtiene del rango de valores de los factores de influencia del medidor, para lo cual se requieren conocer los errores indicados para el tipo del medidor de agua dentro del error máximo permitido en el campo inferior dentro del  $\pm 5$  por ciento, de acuerdo a lo indicado en la Norma ISO 4064-1:2014, inciso 5.1.2. Esto significa que entre el valor de la “R” sea mayor, la sensibilidad del medidor para detectar y registrar un flujo de agua es más exacto e incide

en menor error. Esta característica con los factores de influencia que se han establecido en la norma ISO antes mencionada, han sido actualizados recientemente y son una referencia importante para que próximamente la NOM-012-SCFI-1994 mexicana sea revisada y mejorada acorde a estos avances y mejoras tecnológicas en los equipos de medición, debido a que la tendencia internacional está evolucionando con mayor precisión y exactitud en cuanto a registros de medición de flujo.

Conforme a la misma norma (NOM-012-SCFI-1994) se define el gasto permanente,  $q_p$  (m<sup>3</sup>/h), como el gasto al cual se requiere que el medidor opere de manera satisfactoria bajo condiciones de flujo estable o intermitente, y que se determina con relación al valor numérico de la designación del medidor. Asimismo gasto de sobre carga  $q_s$  (m<sup>3</sup>/h) definido como el gasto al cual se requiere que el medidor opere de manera satisfactoria por un corto periodo de tiempo sin deteriorarse; su valor es igual al doble del gasto permanente.

El cálculo de errores se realiza conforme a la Ecuación 4.1 siguiente según la NOM-012-SCFI-1994:

$$E_m = \frac{V_i - V_c}{V_c} \% \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde:

- $E_m$  = Error de medición (%)
- $V_c$  = Valor convencionalmente verdadero (patrón)
- $V_i$  = Valor indicado por el medidor bajo prueba (unidades de gasto)

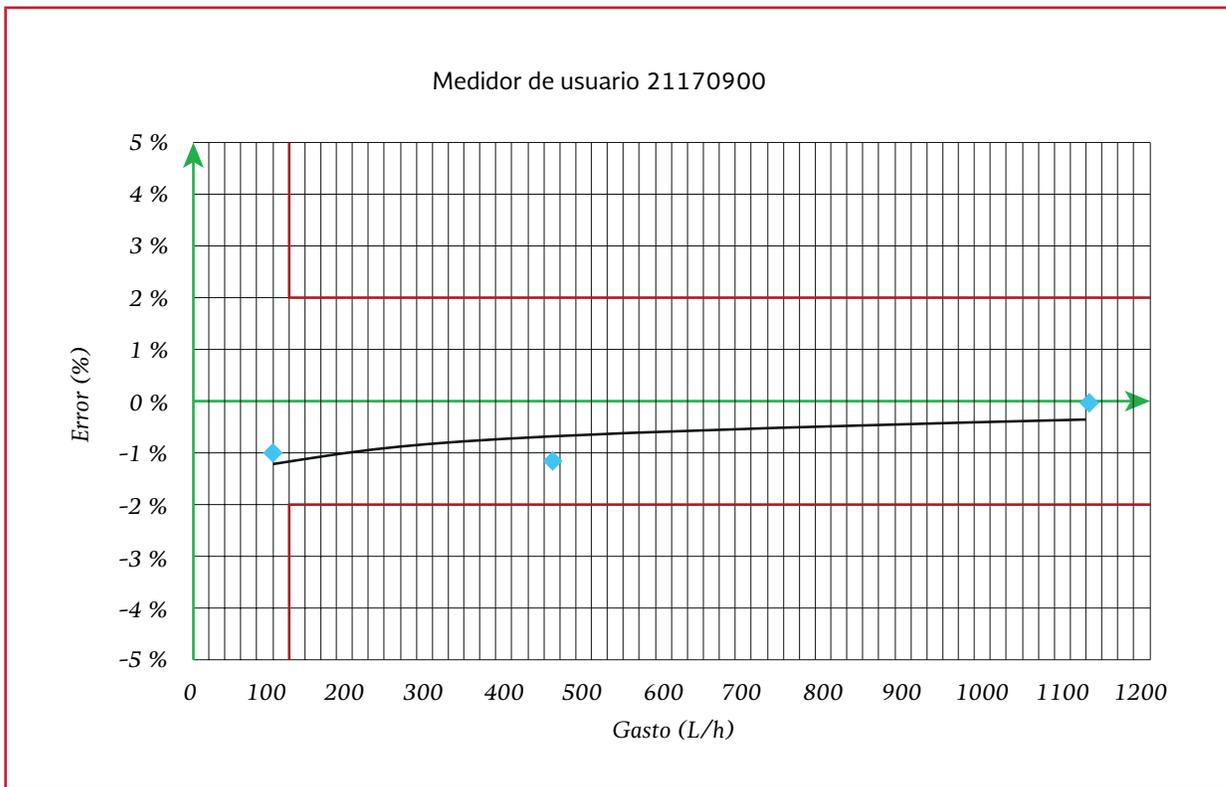
En la Ilustración 4.1 se muestra un ejemplo de la curva de errores de un medidor mecánico de velocidad Clase B, con tres puntos de prueba en los

campos inferior y superior. El resultado en este caso es de conformidad con la norma al encontrarse dentro de los límites permisibles que especifica.

#### 4.1.1.1. Consideraciones generales de selección

Para la selección técnica de cualquier tipo medidor, y principalmente los mecánicos, volumétricos y de velocidad tipo turbina, se deben investigar o levantar entre otros los siguientes parámetros en las zonas y sitios propuestos para medición permanente:

Ilustración 4.1 Ejemplo de curva de errores de un medidor clase B, en los campos inferior y superior, con prueba de tres puntos



- Características físico químicas del agua (temperatura, viscosidad, densidad, características de corrosividad o incrustación, etcétera), lo que se logra realizando un análisis físico -químico al agua
- Caudales máximo, mínimo, y normal de operación en el sitio de medición, para determinar correctamente la capacidad y diámetro de los medidores a instalar. Para conocer estos datos se pueden hacer mediciones temporales con equipos portátiles como el ultrasónico, el electromagnético de inserción y el mismo tubo de Pitot
- Presiones máxima, mínima, y normal de operación, en el sitio de medición. Se pueden emplear registradores de presión para analizar las variaciones, si es posible de 24 h
- Pérdida máxima de carga admisible cuando el medidor funcione a gasto máximo y normal, operando 24 h/día.
- La precisión requerida en el campo superior e inferior de medición
- Las características de la descarga en el caso de pozos en operación o sitio donde se ubicará el medidor (diámetro de la tubería, distancia disponible para su instalación, disponibilidad de energía, etcétera), y en proyectos nuevos, su instalación deberá cumplir con los requerimientos mínimos del fabricante
- Tipo de elementos secundarios requeridos para lectura, registro y transmisión de datos
- Revisar la compatibilidad con el sistema de Macromedición existente
- Condiciones del medio ambiente, y posibilidades de congelamiento del agua de las tuberías (ver Ilustración 4.2 e Ilustración 4.3, así como de inundación.
- Disponibilidad de energía eléctrica, situación de inseguridad y vandalismo

Con la información anterior se deberá consultar los catálogos de fabricantes y seleccionar el medidor más conveniente a las necesidades de medición, considerando además costos de adquisición, operación, mantenimiento y calibración. Evaluar calidad del equipo, características constructivas del medidor (longitud, peso, tipo de conexiones, metalurgia de elementos internos y cuerpo, etcétera). Asimismo asistencia técnica proporcionada por el fabricante o distribuidor, y disponibilidad de refacciones.

Ilustración 4.2 Protección contra heladas en múltiple de descarga de pozo profundo con medidor de velocidad, en la JMAS Aldama, Chihuahua



Ilustración 4.3 Protección contra heladas en múltiple de descarga de pozo profundo con medidor de electromagnético, en la JMAS Juárez, Chihuahua



#### 4.1.1.2. Medidor volumétrico de desplazamiento positivo

Los medidores volumétricos aplican el principio de una cámara de volumen conocido dentro de la cual se coloca un elemento móvil que con el flujo del agua adquiere un movimiento cíclico con el que continuamente se llena y se vacía la cámara. El desplazamiento de este elemento móvil divide la cámara en al menos dos compartimentos, uno que se llena y otro que se vacía, trasladándose el flujo de agua en el sentido en que se traslada el mecanismo, por ello la denominación de desplazamiento positivo.

Conforme a la NOM-012-SCFI-1994 el medidor volumétrico es un dispositivo, conectado a un conducto cerrado, que consiste de una cámara de volumen conocido y un mecanismo operado por el flujo de agua donde esta cámara es sucesivamente llenada y descargada. El movimiento de un elemento móvil es transmitido mecánicamente, o por otros medios, a un contador que registra el número de los volúmenes que pasan a través del dispositivo indicador, que totaliza el volumen de agua que ha pasado por el medidor.

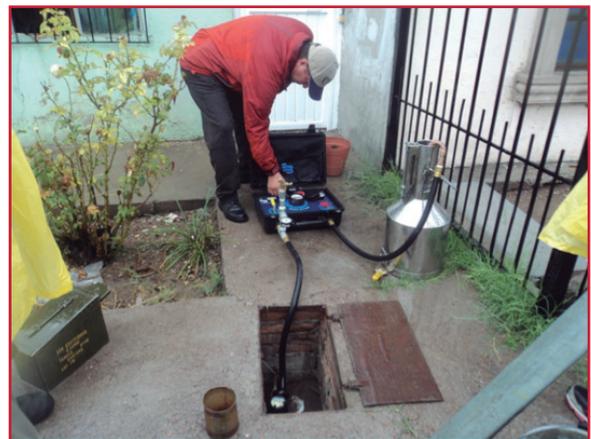
Según esta norma los medidores volumétricos pueden ser para un gasto permanente de hasta 50 m<sup>3</sup>/h, aunque comercialmente en el mercado nacional se encuentran disponibles sólo para capacidades menores, en aplicaciones de medición de consumos. En este sentido su aplicación en sistemas de macromedición es limitada, independientemente que en el mercado extranjero se puedan encontrar hasta en 300 mm para industrias diferentes a las del agua.

Por lo general los medidores volumétricos corresponden a Clase C, aunque también algunos medidores de turbina están en esta clase, de

acuerdo a los valores de  $q_{min}$  y  $q_t$ , siendo  $q_{min}$  el gasto más bajo al cual se requiere que el medidor muestre indicaciones dentro de la tolerancia de error máximo permisible. Esto significa que los medidores Clase C tienen capacidad para medir flujos menores que los que puede medir un Clase B.

Dentro de este tipo de medidores existen los de “disco nutante” y los de “pistón rotativo”. En general se trata de medidores muy precisos, que no se ven afectados por las condiciones de instalación aguas arriba, y por tanto no requieren recomendaciones especiales. Por esa característica se usan como patrón en equipos portátiles para evaluar medidores de consumo (Ilustración 4.4).

Ilustración 4.4 Medidor volumétrico empleado como medidor patrón para evaluar medidores de consumo



Debido a que son medidores muy sensibles, llegan a obstruirse cuando el agua contiene partículas sólidas, pudiendo incluso obstruir el servicio. Por ello es muy importante que en las zonas donde se proponga su instalación, el agua distribuida cumpla con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, aunque conforme a la

NOM-012-SCFI-1994, también los de velocidad la deben satisfacer.

#### 4.1.1.3. Medidor de velocidad tipo turbina y tipo hélice o propela

Los medidores de velocidad, determinan el volumen de agua de manera indirecta mediante la velocidad y área de flujo dentro del aparato. Con el paso del agua la turbina o la propela de los aparatos gira a  $N$  revoluciones por minuto, que es proporcional a la velocidad de flujo. Finalmente el volumen, conforme a  $N$  y al diámetro del medidor, se obtiene con la siguiente expresión:

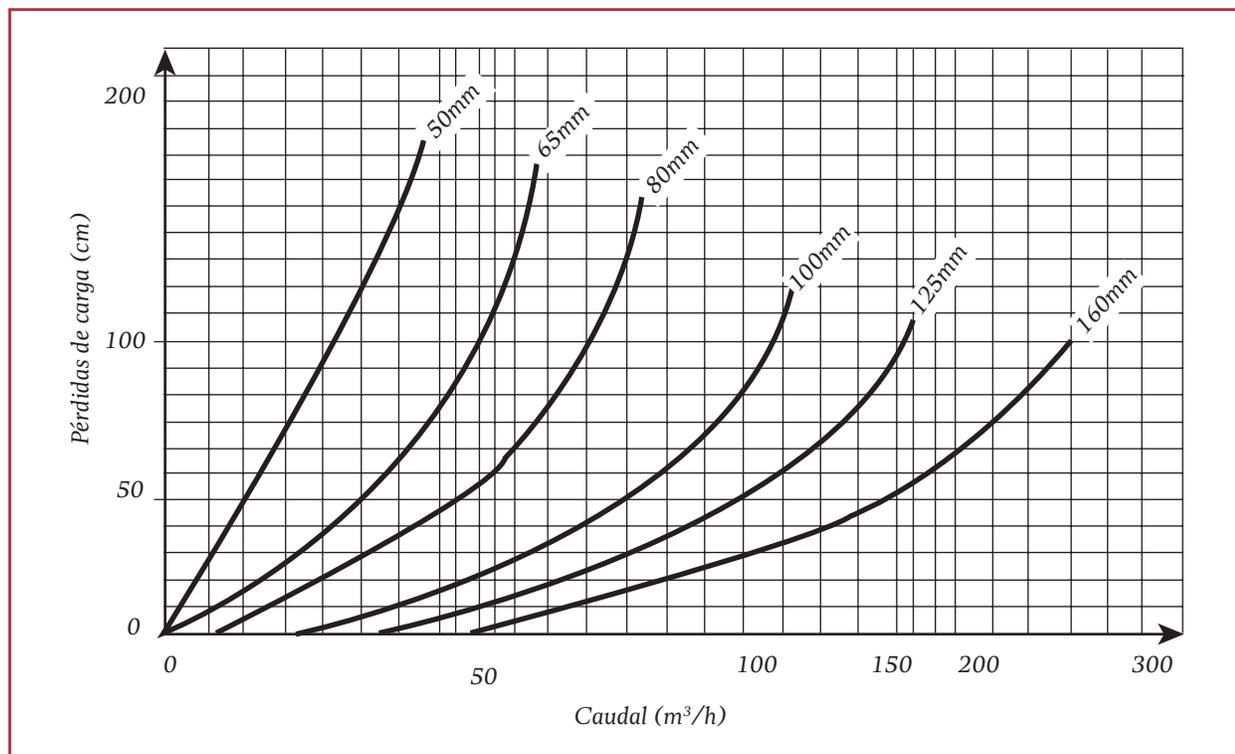
$$Volumen = K(N) \quad \text{Ecuación 4.2}$$

donde:

- $K$  = Constante que depende de la forma, área del orificio y diámetro de la turbina o propela (sensibilidad estática)
- $N$  = Velocidad angular de la turbina del medidor, en r/min

La literatura existente sobre el tema, menciona que las pérdidas normales de carga de un medidor de velocidad, se consideran del orden de 0.5 metros columna de agua (m) sin embargo es admisible que la pérdida alcance en casos excepcionales y por períodos cortos hasta un máximo de 1.0 m, ya que esto puede ocasionar deterioro en el equipo. La pérdida de carga, está en función del incremento del caudal

Ilustración 4.5 Ejemplo de pérdida de carga ocasionada por los medidores de velocidad



que circula por el medidor, por lo que se recomienda que trabaje en lo posible, alrededor del caudal permanente de operación. A manera de ejemplo en la Ilustración 4.5 se presenta una gráfica con las curvas de pérdida de carga para medidores de diferentes diámetros.

Dentro de los medidores de velocidad tipo turbina se encuentran los medidores Woltman, que se consideran aparatos de elevada precisión con una mínima pérdida de carga, siempre que su selección e instalación se efectúe correctamente. Existen dos tipos de ellos: el horizontal y el vertical, ver Ilustración 4.6.

Por otra parte se tienen también los medidores de velocidad tipo propela o hélice, disponibles en el mercado con cuello bridado, cuello Soldable, y tipo silleta (Ilustración 4.7).

Ilustración 4.7 Medidor de propela con carrete bridado



Para ambos tipos de medidores de velocidad es muy importante observar tramos rectos mínimos aguas arriba y aguas abajo para evitar efectos de sitio que afecten su exactitud, cuando existen conexiones o accesorios en la tubería. Los tramos rectos deben ser del mismo diámetro del medidor, conforme a las recomendaciones del fabricante.

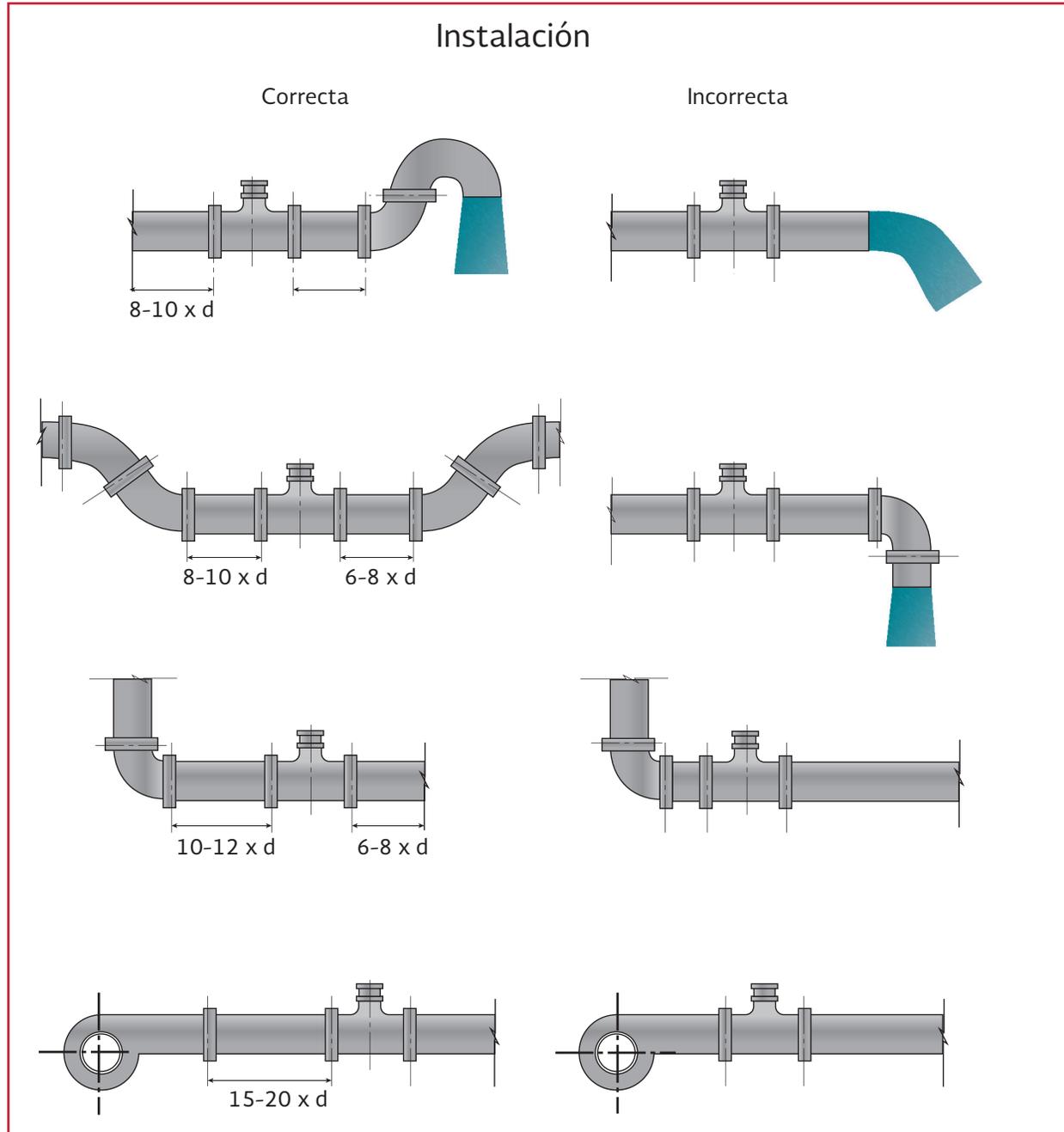
Ilustración 4.6 Medidores de turbina tipo Woltman: vertical y horizontal



La Ilustración 4.8 presenta algunas consideraciones de tramos rectos mínimos aguas arriba y aguas

abajo de medidores de velocidad tipo turbina tipo propela, en función del diámetro del medidor.

Ilustración 4.8 Consideraciones para una instalación adecuada



## 4.2. MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Se les llama deprimógenos a este tipo de medidores, porque en la sección de medición contraen la vena líquida; consisten básicamente de una reducción gradual o brusca de la sección de flujo, ocasionando un aumento de velocidad y una pérdida de presión. Las pérdidas de presión en la sección de medición, se expresan en m y se leen con manómetros diferenciales (tubo U) o celdas de presión diferencial. Con ésta se calcula velocidad media de flujo, y con el área de flujo se calcula el caudal, de acuerdo con la Ecuación 4.3.

$$V = C\sqrt{2gh} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

donde:

- $V$  = Velocidad media del flujo (m/s)
- $g$  = Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
- $h$  = Deflexión leída en el manómetro (m)

Dentro de estos equipos se tiene el Venturi, el tubo Dall, la Tobera, y la Placa de orificio. Ver Venturi largo en Ilustración 4.9. El diseño diferente de cada uno de estos equipos genera diferente pérdida de carga, como se muestra a manera de ejemplo en la Ilustración 4.10. Para información más precisa se deben consultar especificaciones de fabricantes y proveedores.

La ventaja de estos medidores son:

- Más precisos
- Menor pérdida de carga

Desventajas:

- Mayor costo de adquisición

Entre los materiales que se usan para su construcción se encuentran los siguientes:

- Acero al carbón.
- Acero inoxidable 316

Ilustración 4.9 Venturi largo

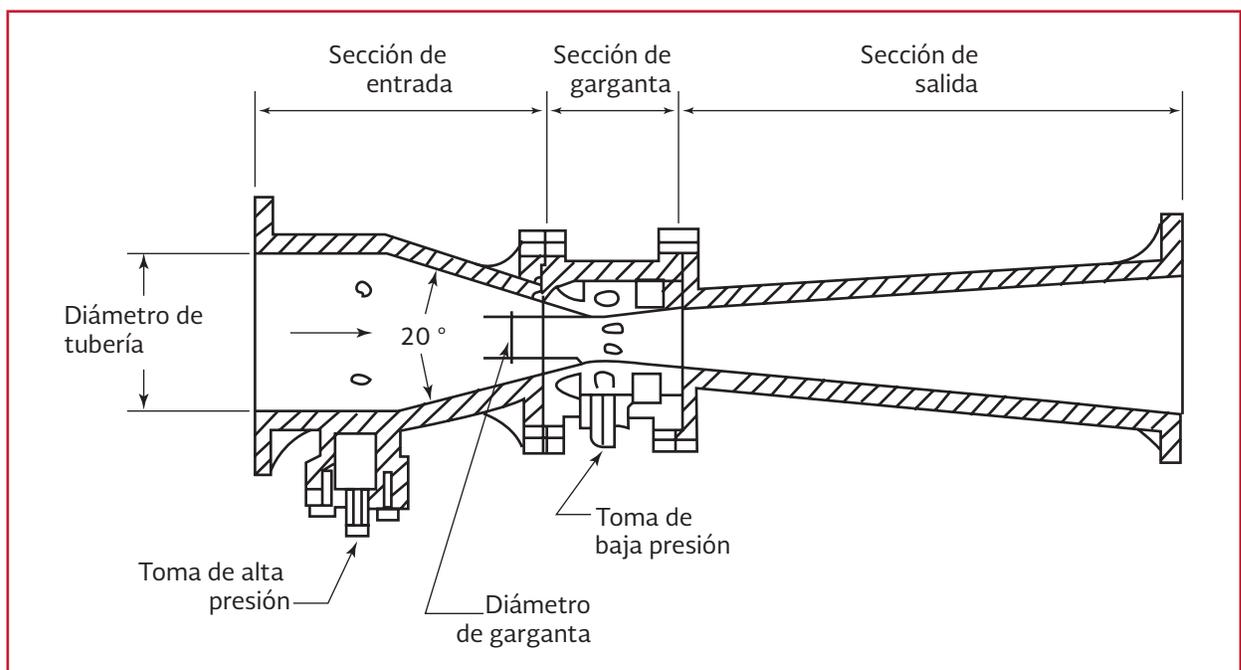
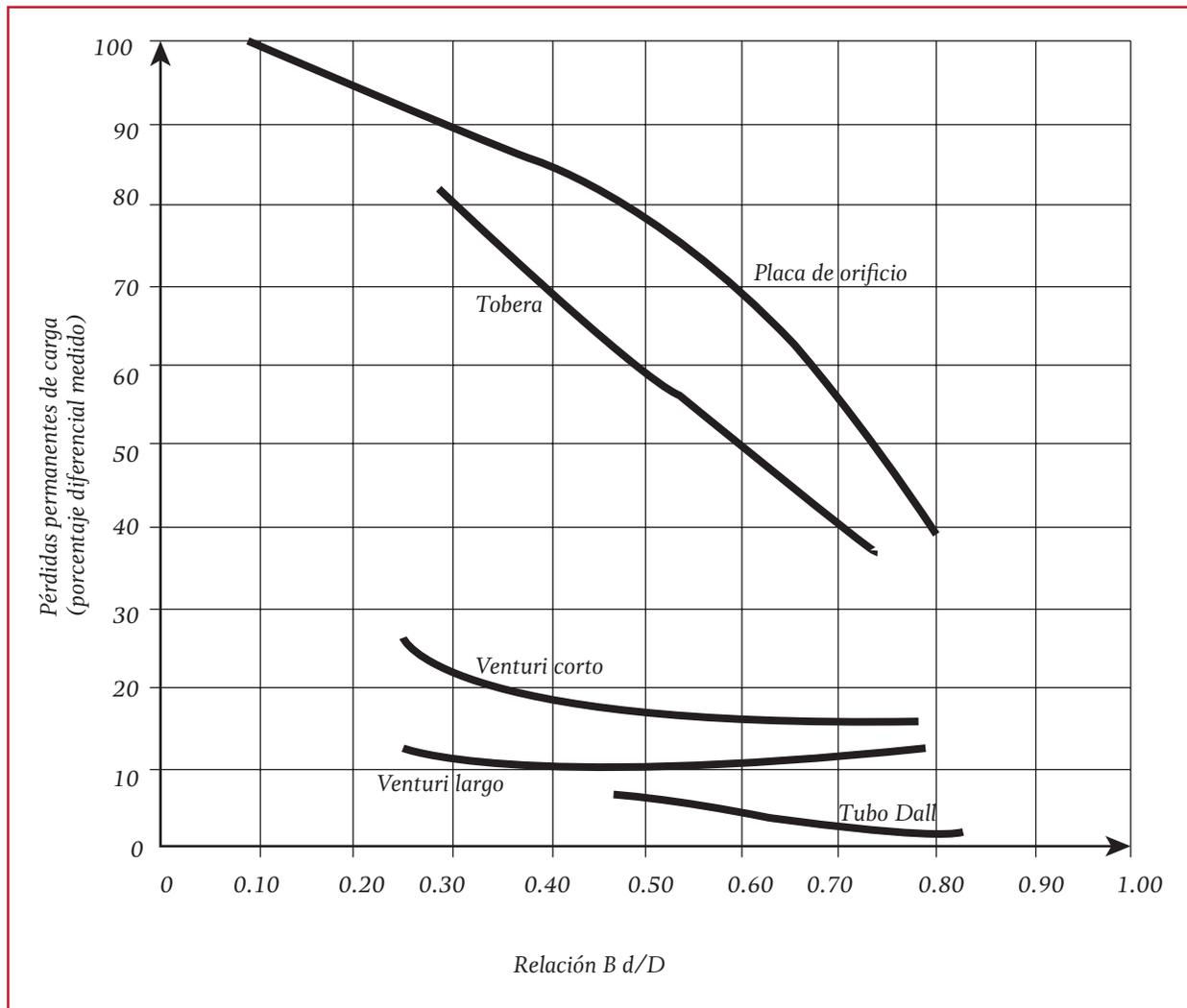


Ilustración 4.10 Pérdida de carga para medidores deprimógenos. (Cepis, 1985)



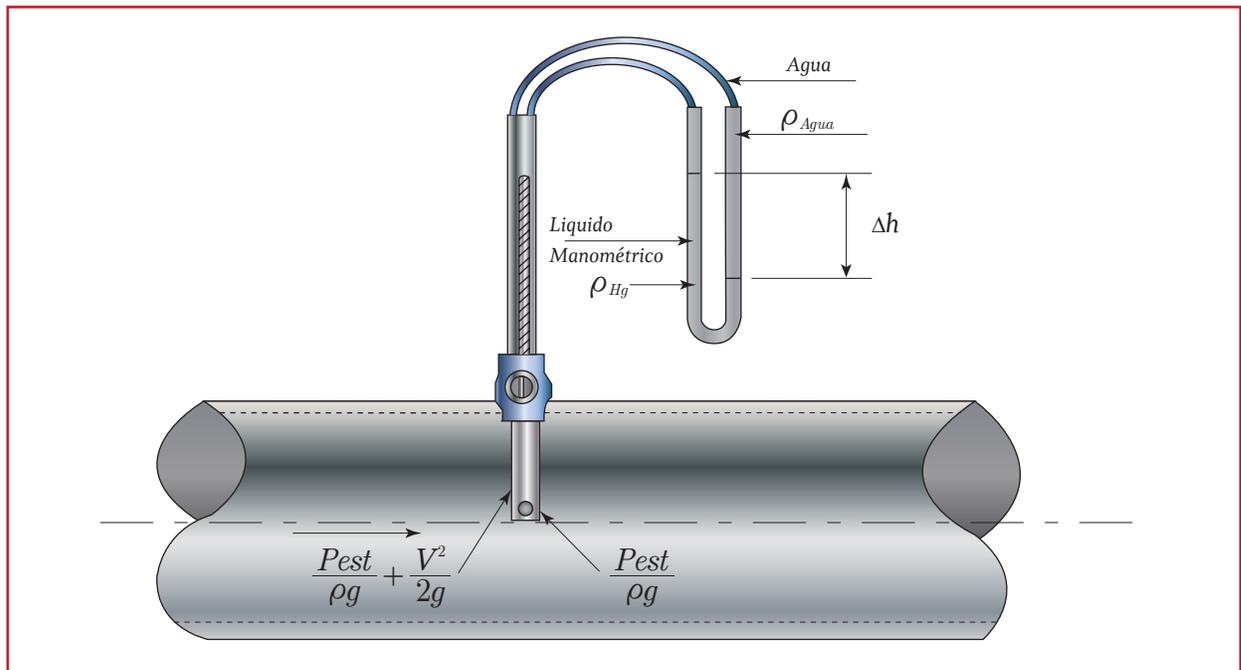
- Acero inoxidable 304
- Acero inoxidable hastelloy B y C
- Acero inoxidable monel
- Fibra de vidrio

Por otra parte, el Tubo de Pitot, aunque no es un medidor deprimógeno, ya que no se genera una contracción para producir una caída de presión, de manera similar que en los anteriores medidores se miden las cargas de velocidad y de presión en un manómetro diferencial (Tubo U) o celda de presión, para determinar la velocidad de flujo, tanto al centro del tubo como en varios puntos de la traver-

sa, lo que permite obtener el perfil de velocidades y la velocidad media (ver Ilustración 4.11).

La medición con tubo de Pitot Simplex, que es el más común, requiere de la instalación de una válvula de incorporación de una pulgada de diámetro. Estas válvulas se instalan con una máquina Mueller. El Pitot se conecta a estas válvulas para introducir el extremo con los orificios que reciben las cargas de presión y de velocidad del flujo. Antes se introduce de manera similar una varilla de calibración para determinar el diámetro interno real de la tubería.

Ilustración 4.11 Tubo de Pitot con manómetro diferencial (Tubo U) y líquido manométrico para lectura de carga de velocidad



Si la carga de velocidad se mide mediante un Tubo U, se necesitan líquidos manométricos. Los más usados son el Mercurio con una densidad relativa de 13.58, el tetracloruro de carbono 1.60, y el benceno mezclado con el anterior 1.25. La velocidad de flujo se calcula con la siguiente expresión.

$$V = c\sqrt{2gh(\rho - 1)} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

donde:

- $c$  = Coeficiente de calibración de los orificios igual 0.795
- $h$  = Deflexión leída en el manómetro (m)
- $d$  = Densidad relativa del líquido manométrico

#### 4.2.1.1. Elementos secundarios

Tanto los medidores deprimógenos como los tubos de Pitot, como elementos primarios, tie-

nen diferentes posibilidades de lectura, registro y presentación de datos. El más simple sería el Tubo U, que sería el elemento secundario para lectura puntual de deflexiones y cálculos de velocidades y caudales. Una segunda opción, tanto para lecturas puntuales como para registros temporales, serían las celdas de presión diferencial con presentación de datos de caudal, y con equipos registradores (*data logger*).

### 4.3. MEDIDORES ULTRASÓNICOS

El principio de funcionamiento de estos medidores tiene su origen en las aplicaciones de la acústica, y de estas específicamente la relacionada con el sonar. De acuerdo con esto en el funcionamiento de un medidor ultrasónico una señal sónica es transmitida diagonalmente a través del tubo por donde circula el agua; la velocidad que lleva el agua afecta el tiempo que la señal emplea para viajar del transmisor al receptor.

Con base en este principio de funcionamiento, se han desarrollado diversos esquemas utilizando por lo menos un transmisor y un receptor (transductores). Su precisión depende de la exactitud en la medición del tiempo que tarda la señal sónica, en viajar del transmisor al receptor.

Los medidores ultrasónicos más usados son los conocidos como tiempo en tránsito (time of flight) y el de efecto Doppler. La diferencia entre ambos medidores estriba en lo siguiente, en el medidor “tiempo en tránsito” la señal acústica va del emisor al receptor; y en el de efecto Doppler, la señal es reflejada por el material que lleva el agua en suspensión.

Por lo anterior el medidor ultrasónico “tiempo en tránsito” es únicamente utilizable en aguas limpias que no contengan sólidos en suspensión. En cambio el de efecto Doppler, solo puede usarse en aguas que contengan sólidos en suspensión. Ver Ilustración 4.12.

Ilustración 4.12 Equipo portátil de medición de flujo ultrasónico de tiempo en tránsito



Aunque los equipos ultrasónicos más empleados son los de tipo portátil, también existen versiones para instalación permanente. Ambos con opciones de *data logger* integrado. En las versiones permanentes los sensores pueden ser exter-

nos, pero también internos. Los internos normalmente tienen mayores requerimientos de tramos rectos agua arriba debido a que son más susceptibles a los efectos de sitios ocasionados por accesorios y equipos como codos, válvulas, y bombas.

#### 4.4. MEDIDORES ELECTROMAGNÉTICOS

El principio de operación de este medidor está basado en la Ley de Faraday, la cual expresa: Que el voltaje inducido en un conductor que se desplaza a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad de ese conductor.

El medidor magnético de flujo utiliza la Ley de Faraday para medir la velocidad media del agua en la forma siguiente: dos bobinas colocadas una a cada lado del cuerpo del medidor, son excitadas por una corriente alterna, produciendo un campo magnético uniforme a través de la parte interna del tubo, conforme pasa el agua a través del cuerpo del medidor, corta el campo magnético, generando una inducción de voltaje que es percibida por dos electrodos diametralmente opuestos y perpendiculares al campo magnético.

En cuanto a su estructura, el medidor magnético para instalación permanente consiste en un tubo metálico, que generalmente es de acero inoxidable o aluminio, ya que las propiedades magnéticas de estos materiales son bajas, recubierto con neopreno, plástico, teflón, cerámica o cualquier material no magnético y no conductor. Alrededor del tubo se encuentran una serie de bobinas de diseño parecido al devanado de un motor, y con un núcleo semejante a los que se usan en un transformador, siendo las que producen el campo magnético, también cuenta con un par de electrodos que detectan la fuerza

electromotriz que genera el agua a su paso por el campo magnético, enviando la señal para medición a un registrador que traduce la señal en información de caudales o volúmenes. Ver Ilustración 4.13 e Ilustración 4.14.

Las ventajas principales de los medidores electromagnéticos según información de fabricantes son:

- No poseen partes móviles en contacto con el agua
- Una pequeña longitud de tramo recto aguas arriba, normalmente un mínimo de 5 diámetros, es solicitado por el fabricante
- Pérdida de carga ínfima
- La señal de salida de un medidor electromagnético es lineal con el caudal, lo que simplifica los circuitos de generación de señales, en comparación con los medidores que provocan presión diferencial
- Exactitud de medición
- Amplio rango de flujo
- No requieren de un filtro
- No tienen orificios que se pueden obstruir

Ilustración 4.13 Medidor electromagnético de carrete con bridas para instalación permanente



- Resistentes a abrasión o corrosión
- Apropriados para diámetros grandes y pequeños
- Salida de datos en diferentes formatos (analógico, pulsos o digital), con fácil transmisión y procesamiento por medios electrónicos

También existe la versión de medidor electromagnético portátil de inserción, que de alguna manera suple las bondades del tubo Pitot, ya que igual que este requiere de una válvula de inserción de una pulgada de diámetro para hacer la travesa del diámetro de la tubería en varios puntos para determinar el perfil de velocidades, la velocidad media y el caudal. Ver Ilustración 4.15 e Ilustración 4.16, donde se muestra la instalación de estos equipos.

## 4.5. SELECCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

### 4.5.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Como ya se ha visto, hay una gran variedad tecnologías y principios de medición, y una gran canti-

Ilustración 4.14 Ejemplo de elemento secundario de medidor ultrasónico



Ilustración 4.15 Medidor electromagnético portátil inserción



dad de factores que pueden influir en la elección del medidor adecuado a la necesidad específica. Por ello es importante elaborar un listado de todos los factores relevantes que debe satisfacer el aparato propuesto, con todos los requisitos y parámetros de la aplicación. Asimismo se deben preparar especificaciones completas que se adapten a la aplicación requerida y al presupuesto disponible.

Para fines de macromedición en sistemas de abastecimiento el fluido a medir se restringe sólo al agua, la cual es principalmente potabilizada, pero también cruda de diferentes fuentes y calidades. Asimismo, dentro de las funciones de saneamiento se tiene la necesidad de medir agua residual y agua tratada, con sus propias características de calidad. Por esto tener elementos para la selección del medidor es necesario determinar los factores siguientes:

1. Medición permanente o con equipo portátil
2. Propiedades químicas y físicas del agua a medir
3. Rango de caudal esperado o requerido
4. Rangos de temperatura y presión del agua

Ilustración 4.16 Elemento secundario o convertidor del medidor electromagnético portátil



5. Temperatura ambiente y su variación
6. Continuidad del servicio o del flujo en los puntos a medir
7. Ubicación del sitio de medición
8. Accesibilidad para mantenimiento o verificación
9. Seguridad del sitio por robo o vandalismo
10. Precisión requerida de la medición
11. Presupuesto para la adquisición

Para una mejor selección de un medidor las características anteriores se pueden agrupar en: propiedades del fluido y condiciones de flujo, instalación del equipo, entorno, económicas, y del equipo de medición (Tabla 4.3).

Para fines de instalación y mantenimiento es necesario tener en cuenta también el tamaño y el peso del medidor, los materiales que se vayan a emplear y la posibilidad de actualizar o escalar el medidor gradualmente con los avances tecnológicos.

Muy importantes son los costos totales de operación, adicionales a los de suministro e instalación. Para los operadores de la infraestructura

Tabla 4.3 Agrupación de factores y características para la selección de medidores de flujo

Propiedades del fluido y variables de flujo	Condiciones de fontanería en sitio de instalación	Condiciones del entorno	Aspectos económicos	Requisitos técnicos del medidor
Tipo de fluido	Diámetro nominal y orientación	Temperatura ambiente	Precio de adquisición	Requisitos de precisión de la medición
Caudal en tubería	Dirección de circulación del caudal (unidireccional o bidireccional)	Interferencia eléctrica local	Costos de instalación	Requisitos de repetibilidad
Presión de trabajo	Tramos de entrada y salida	Humedad	Costos generados por la falta de precisión en la medición	Requisitos de rangeabilidad
Temperatura de trabajo	Presencia de vibraciones en la tubería	Factores locales de seguridad	Costos de operación	Perdida de carga máxima aceptable
Densidad del fluido	Ubicación y tipo de accesorios más cercanos	Efectos de la presión	Costos de mantenimiento	Tiempo de respuesta a los cambios de tipo de función escalón
Viscosidad del fluido	Filtros y acondicionadores de caudal		Costos de calibración	Señales de salida
Compresibilidad del fluido	Conexiones eléctricas		Costos de las piezas de repuesto	
Propiedades químicas	Accesibilidad para servicio		Costo de tenencia en propiedad	
Abrasividad	Necesidad de tuberías/válvulas de derivación			
Fase única o fluido multifásico	Presencia de bombas o compresores cercanos			
Presencia o ausencia de partículas sólidas en suspensión				

y para los responsables de los sistemas de medición lo ideal sería contar con aparatos que pudieran tener las características siguientes:

- Un amplio rango de valores de caudal y de temperatura de trabajo
- Apto para medición de flujos con aire
- Inmune a turbulencias y distorsiones del perfil de velocidades
- Disponible en todos los tamaños
- Inmune a las vibraciones y las pulsaciones de proceso

- Pérdida de carga baja o nula para el caudal permanente
- Verificable en campo o con posibilidad de calibración en campo
- Estabilidad en la precisión de medición durante al menos cinco años
- Bajo costo de suministro, instalación y funcionamiento

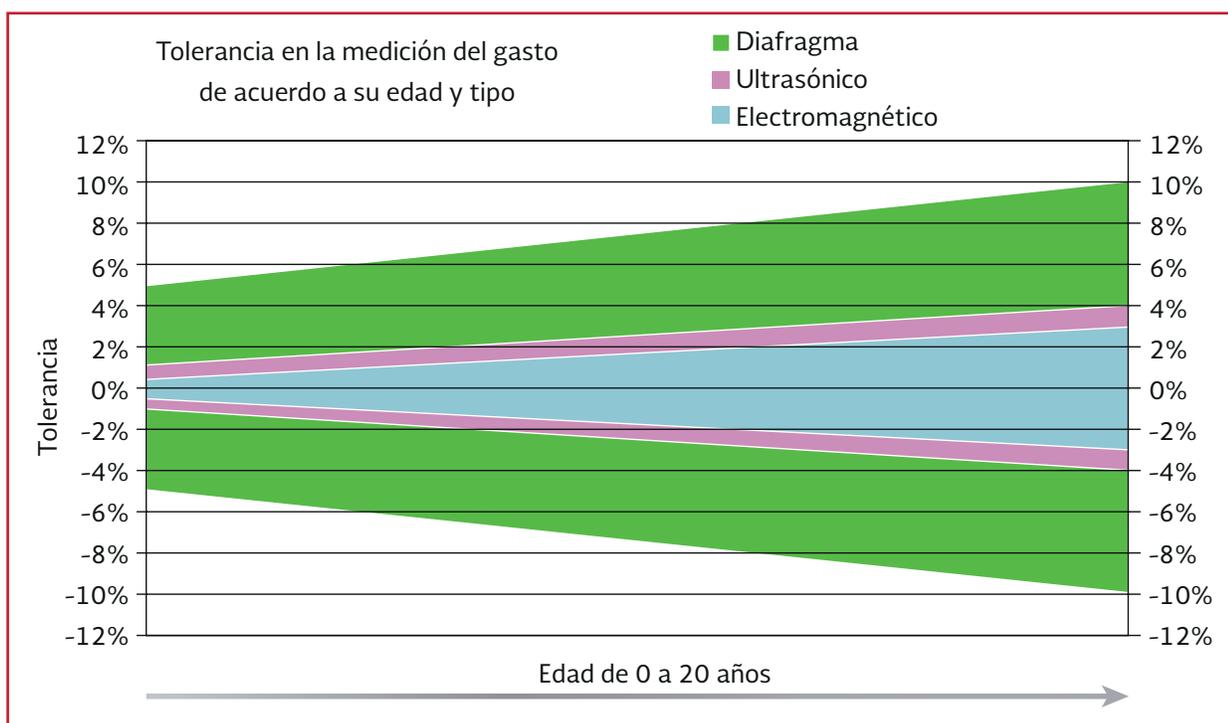
Ningún medidor reúne todas estas características técnicas, y finalmente con el pasar del tiempo los equipos se van deteriorando y van perdiendo exactitud, como se puede observar en la Ilustración 4.17. Sin embargo, las características de un medidor ideal son un referente para la elaboración de especificaciones de los equipos que se vayan a adquirir.

#### 4.5.2. EFECTOS DE SITIO

Si las condiciones de instalación aguas arriba y aguas abajo de un medidor, cambian de tramos rectos favorables, a conexiones con elementos cercanos generadores de disturbios, como codos, válvulas y bombas, se crean efectos que pueden afectar de manera significativa sus coeficientes de calibración, considerando que un mismo patrón de flujo puede afectar de forma diferente a diferentes tipos de medidores.

Los efectos de sitio pueden ser: cambios en el patrón de flujo, pulsaciones, etcétera. Así que es importante conocer la sensibilidad que un medidor determinado tenga con dicho patrón,

Ilustración 4.17 Variación de la exactitud de los medidores con la antigüedad (Guibentif, 2006)



para usarlo apropiadamente. La sensibilidad se establece determinando el funcionamiento del medidor en instalaciones de referencia, y luego las variaciones resultantes causadas por otras condiciones de instalación.

Los medidores de caudal se calibran normalmente para unas condiciones de referencia fábrica, en laboratorios de verificación o en centros de calibración con fluidos de propiedades conocidas. Los sistemas de tuberías de estos laboratorios están diseñados para evitar la presencia de remolinos y distorsiones en el perfil de velocidades, de modo que el medidor de caudal en prueba se evalúa casi en condiciones ideales.

Sin embargo, en una situación real de funcionamiento, los sistemas de tuberías raramente cumplen condiciones ideales, pues el hecho de poner espacio suele ser casi un lujo y las implicaciones acostumbran a venir gobernadas por los dictados de los costos. Además de los aspectos del sistema de tuberías, algunos medidores de caudal son sensibles a influencias externas como la humedad, la interferencia eléctrica, las vibraciones y los cambios en la temperatura ambiente. Estos diversos efectos se denominan colectivamente “efectos de sitio”, y pueden inducir errores sustanciales.

Se puede clasificar estas diversas influencias en tres grupos principales:

Efectos dinámicos del fluido debidos a:

- El perfil de velocidades del caudal
- Los remolinos/torbellinos
- Los caudales pulsantes
- Los fluidos multifásicos

- Los efectos del fluido en el punto de medición

Efectos mecánicos debidos a:

- Accesorios inadecuadamente colocados (codos, etcétera)
- Dos o más accesorios muy cercanos entre sí
- Válvulas
- La rugosidad de la tubería y las deposiciones
- Acondicionadores de caudal o filtros

Otros efectos:

- Temperatura ambiente
- Factores electroquímicos
- Compatibilidad electromagnética (EMC) local
- Vibraciones en la tubería
- Humedad localizada

La situación se agrava por el hecho de que algunos de estos efectos son inmediatamente perceptibles (remolinos, vibraciones) mientras que otros cambian con el transcurso del tiempo (incrustaciones, temperatura ambiente). Estos defectos dependientes del tiempo son los más difíciles de cuantificar, pero un mantenimiento y comprobaciones locales regulares pueden reducir significativamente su influencia.

Para un funcionamiento confiable del medidor es imprescindible una correcta instalación y la aplicación de servicios regulares de mantenimiento. Muchos efectos, como se ha visto, pueden causar errores positivos o negativos y con frecuencia se presentan varios de estos factores

simultáneamente que impiden una medición de exactitud.

El diseño de una instalación de medición depende de diversos factores, entre los que podemos mencionar:

- Caudales continuos o pulsantes
- La temperatura y la presión de trabajo
- Las propiedades del fluido
- El tipo de señal de salida requerido
- El espacio disponible
- La necesidad o no de un calibrado regular
- El costo, el método y la frecuencia de servicio y mantenimiento

#### 4.5.3. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Un medidor correctamente seleccionado e instalado requiere poco mantenimiento, operando bien sin necesidad de cuidados especiales.

Si el medidor no se somete a cambios bruscos de temperatura y presión, y se inspecciona y verifica de manera regular y programada, regularmente, no dará mayores problemas. Sin embargo en sistemas de abastecimiento sí son comunes los cambios de presión. Las tuberías se pueden vaciar y luego llenarse a diferentes presiones. Es pues uno de los factores más importantes a tener en cuenta.

La periodicidad de los servicios de mantenimiento depende de cada aplicación y de cada sitio de medición en particular. Por eso es tan importante la elección adecuada de un principio de medición, las dimensiones del equipo, la elección de los materiales y otros factores para

el buen rendimiento de un medidor de caudal, sobre todo a largo plazo. El mantenimiento correctivo podría requerir la sustitución del medidor, incluyendo el desmontaje, drenado y limpieza de las tuberías. Por eso la facilidad de mantenimiento de un medidor debe ser una característica importante al seleccionarlo.

#### ***Inspección de la tubería***

El paro periódico del flujo para la inspección del interior de las tuberías debería ser un requerimiento que se cumpliera, ya que en puntos de baja velocidad, dependiendo de la calidad del agua, pueden ocasionar incrustaciones que afecten los procesos de que se trate y además debilitar la respuesta dinámica del medidor de caudal. Existen sistemas modernos de inspección que no necesitan que se saquen de operación las redes y conducciones. Si se altera la forma o el diámetro de la tubería aguas arriba del punto de medición provocara errores.

#### ***Calibración en campo***

Los efectos de las incrustaciones o de las instalaciones pueden identificarse por medio de calibraciones regulares en campo. Hay métodos de calibración en campo que permiten tomar medidas con un nivel de incertidumbre, manteniendo el medidor de caudal instalado, lo cual es muy ventajoso.

#### ***Lubricación***

Durante el funcionamiento regular, los medidores con partes móviles como los de turbina y los de desplazamiento positivo pueden requerir la sustitución de los pivotes o los rotores de desplazamiento y algún de lubricación periódica. Por esta razón, algunos modelos están provistos de

lubricación externa, que si no se lleva a cabo, se acelera su desgaste y pueden llegar a provocar el atascamiento de los medidores.

#### 4.5.3.1. Mantenimiento

Las actividades de mantenimiento, preventivas, correctivas, y otras, pueden ser diversas: inspección, supervisión, comprobaciones funcionales, reparación, revisión general, mantenimiento rutinario, calibración.

#### 4.5.3.2. Análisis de mantenimiento

Los responsables del sistema de medición deben definir su propia estrategia de mantenimiento de acuerdo con los criterios siguientes:

- Los medidores deben estar siempre disponibles para llevar a cabo su función de medición, mejor costo que se pueda obtener
- Se deben aplicar requisitos de seguridad específicos para cada medidor en su estación de medición, tanto para protección del personal de mantenimiento como de los operadores, ya que en diámetros y presiones altas se vuelve muy peligroso maniobrar, incluso prevenir posibles impactos ambientales y sociales

#### 4.5.3.3. Mantenimiento regular

Hay diversos métodos para verificar un medidor de caudal. Se puede retirar para llevarlo a un laboratorio acreditado para una completa verificación y/o calibración con flujo, lo cual implica tener que parar el proceso. También se pueden hacer

comprobaciones en campo que ayudan a identificar problemas. Otro método es la verificación de las funciones de entrada y salida del transmisor mediante el uso de dispositivos eléctricos.

La verificación de la electrónica y la inspección visual del interior del tubo de medición permiten identificar fallas que ocasionan inestabilidad en las lecturas del caudal. La verificación y calibración en un banco de pruebas siempre es la mejor opción, pero por razones prácticas y operativas es difícil que se lleve a cabo. Los medidores de tipo electrónico cuentan con estándares internos de referencia, rutinas de diagnóstico y funciones de autocomprobación

Otros tipos de mantenimiento incluyen la sustitución de componentes clave, de manera preventiva o correctiva. Estas piezas pueden ser pivotes, rotores, tarjetas electrónicas, transmisores completos y hasta elementos primarios.

#### 4.5.3.4. Planeación del mantenimiento

La planeación del mantenimiento de medidores, principalmente en organismos con gran cantidad de aparatos, requiere de la aplicación de procedimientos de Administración del Mantenimiento, y del software respectivo, ya que además de los aparatos, implican servicios preventivos y correctivos, personal, rendimientos, refacciones, herramientas, equipos, vehículos, y sus costos.

Una aproximación práctica a una planificación de mantenimiento tiene en cuenta las tareas operativas siguientes:

- Preparación para un plan de contingencia para un mantenimiento correctivo

- Planificación de las actividades principales de mantenimiento preventivo
- Planificación de la sustitución de los equipos de campo

En casos de funcionamiento incorrecto, es necesario sustituir el dispositivo completo o bien algunas partes de este. En este punto hay que considerar la posibilidad de tener a disposición personal preparado y piezas de repuesto para reparar las aplicaciones más críticas e intentar que el tiempo de paro sea lo más corto posible. En términos generales, se identifican dos estrategias de reparación básicas:

- Sustitución del dispositivo en caso de falla
- Reparación del dispositivo por sustitución de piezas (como los módulos de

electrónica) sin retirar el equipo de la tubería

Los equipos de campo deberían evaluarse cada 3–5 años para determinar si es necesaria su renovación.

Las mejores prácticas exigen una aproximación estructurada al mantenimiento y la calibración en campo. Los intervalos de mantenimiento deben determinarse a partir de una combinación de conocimientos sobre tecnología de medidor de caudal y comprensión de su funcionamiento en la aplicación y de la importancia del dispositivo en el proceso de abastecimiento. Es mejor implementar el análisis de mantenimiento para definir una estrategia equilibrada de mantenimiento.

# 5

## MEDICIÓN CON VERTEDORES Y CANALETAS

### 5.1. VERTEDORES

#### 5.1.1. VERTEDORES DE PARED DELGADA

También denominados vertedores de cresta afilada. Es un dispositivo usado para medir caudales en canales, consta básicamente de una sección transversal de geometría definida, por la cual escurre el líquido, manteniéndose la superficie libre (Ilustración 5.1).

Entre los vertedores más comunes de este tipo se tienen los siguientes:

- Vertedor Rectangular
- Vertedor Triangular
- Vertedor proporcional Sutro
- Vertedor Trapezoidal o Cipolletti

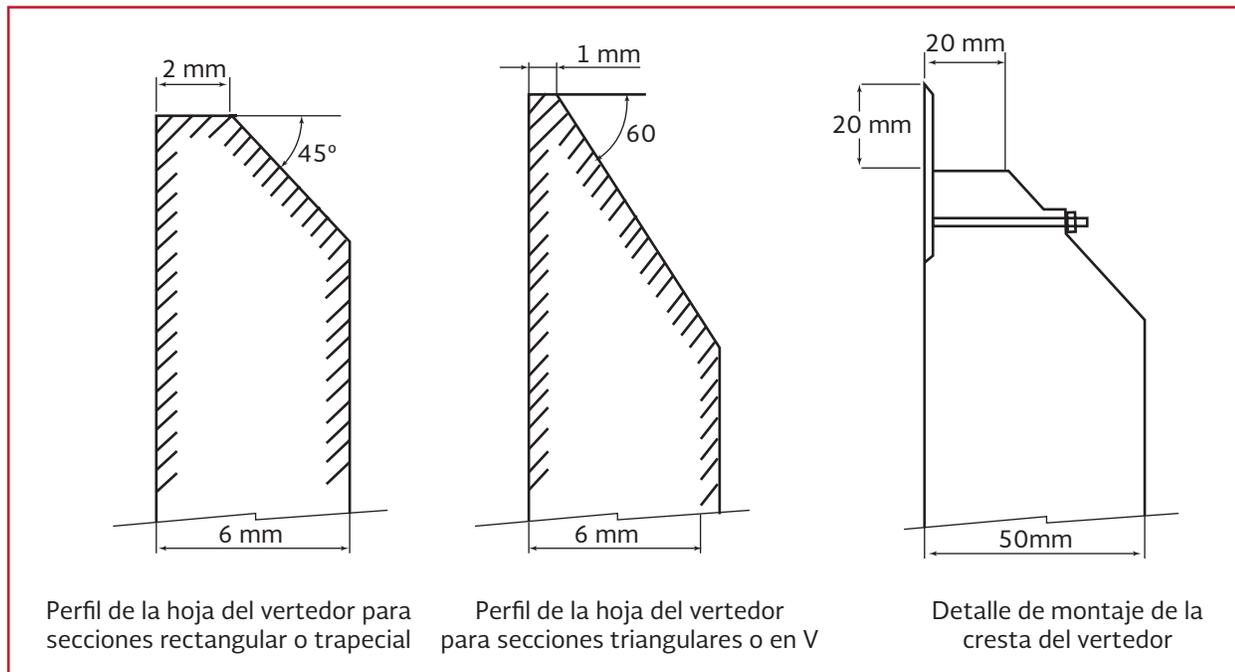
En estos vertedores se pueden identificar los siguientes conceptos y condiciones generales de su funcionamiento:

- **Altura (W):** Es la diferencia de cotas entre el fondo del canal de aproxima-

ción y la cresta, medida aguas arriba y junto al vertedero

- **Carga Hidráulica (h):** Es la altura alcanzada por el agua, medida desde la cota de la cresta del vertedor
- **Contracción Lateral (c):** En un vertedor de pared delgada, es la reducción del ancho efectivo de la vena líquida, como consecuencia de su angostamiento lateral con relación al ancho del canal de aproximación
- **Cresta:** Es el punto más bajo del corte, en el vertedor triangular la cresta es el vértice y en el vertedor rectangular, la cresta es el borde horizontal
- **Lámina de Agua:** Es la vena líquida que pasa por encima del vertedor
- **Velocidad de Aproximación o Llegada:** Es la velocidad promedio en una sección transversal situada aguas arriba, a una distancia de hasta 10 veces el ancho de la cresta del vertedor
- Es conveniente que la corriente llegue a la estructura sin velocidad, como esto es físicamente imposible, se acepta que para que se cumpla esta condición, la velocidad máxima de llegada sea de 0.4 m/s

Ilustración 5.1 Perfiles de la cresta de los vertedores de pared delgada



#### 5.1.1.1. Vertedor rectangular

Estos vertedores son las estructuras más usuales para el aforo de canales y la precisión con que se obtiene el gasto, se considera que es buena para fines prácticos.

Las expresiones usadas por Francis para calcular el caudal en este tipo de vertedores son las siguientes:

Para vertedores sin contracción lateral:

$$Q = 1.84 L H^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Para Vertedores con contracción lateral:

$$Q = 1.84(L - 0.2h)h^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

donde:

$Q$  = Caudal en  $m^3/s$

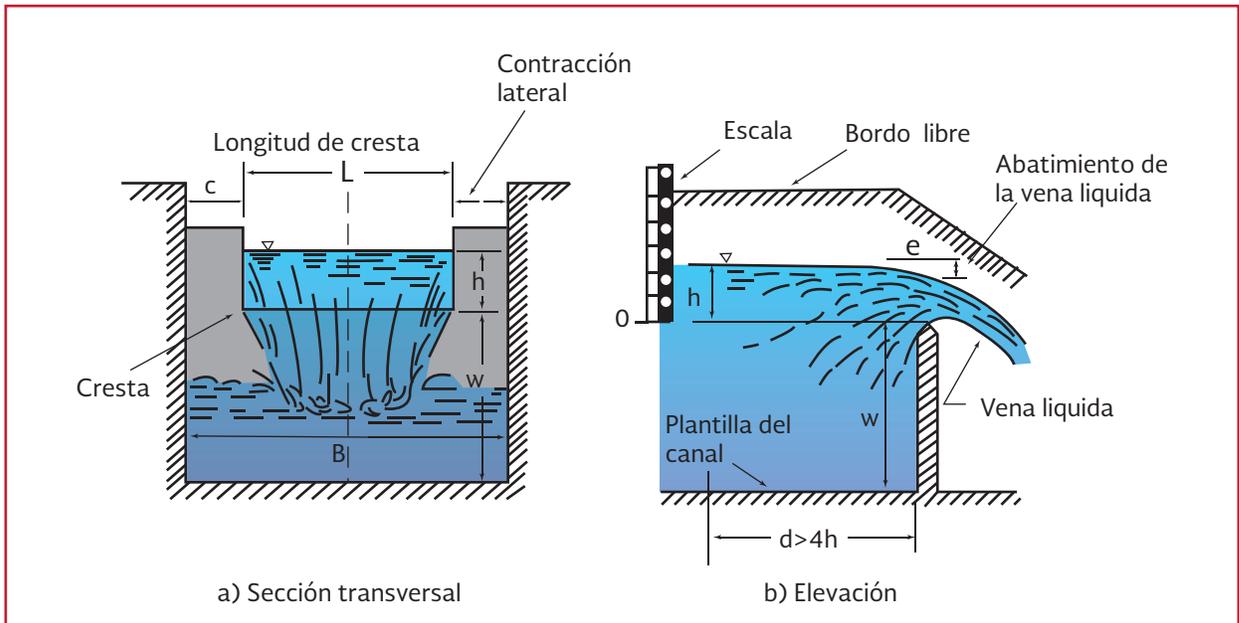
$L$  = Longitud de la cresta en m  
 $h$  = Carga hidráulica sobre el vertedor en m

En la Ilustración 5.3 se muestran los detalles de un vertedor rectangular con contracciones, y sus diferentes elementos de diseño. En la Ilustración 5.2 se presenta un ejemplo de este tipo de vertedores.

Ilustración 5.2 Ejemplo de vertedor rectangular a base de placa de acero



Ilustración 5.3 Esquema de vertedor rectangular



5.1.1.2. Vertedor triangular

$$Q = Ch^{5/2} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Los vertedores triangulares son apropiados para medir gastos pequeños. En estos se toma en cuenta solamente la carga hidráulica (h) y el ángulo de abertura del vertedor; por razones prácticas puede ser de 60° y 90°. Estos vertedores son fáciles de construir y pueden ser de diversos materiales como: madera, aluminio, fierro, concreto, o de una combinación de estos (Ilustración 5.4 e Ilustración 5.5).

donde:

- Q = Caudal en m<sup>3</sup>/s
- C = Coeficiente de descarga según ángulo (adimensional)
- h = Carga hidráulica sobre el vértice en m

La ecuación para el gasto en un vertedor triangular es:

Ilustración 5.4 Vertedor triangular

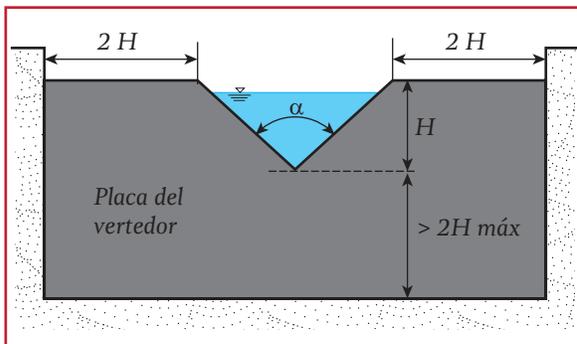


Ilustración 5.5 Ejemplo de vertedor triangular



El coeficiente ( $C$ ) depende, entre otros factores, del ángulo en el vértice del vertedor, las ecuaciones para obtener el gasto son:

para 60°:

$$Q = 0.81h^{2.5} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

para 90°:

$$Q = 1.40h^{2.5} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

### 5.1.1.3. Vertedor Trapezoidal (Cipoletti)

Este vertedor fue desarrollado por Cipoletti, al tratar de compensar las contracciones laterales con una ampliación progresiva del nivel de la vena líquida; consiste en una sección transversal trapezoidal de talud 1 horizontal a 4 vertical. Se considera como una combinación de los vertedores rectangular y triangular, por lo que la expresión del gasto se obtiene de la combinación de las fórmulas de estos dos tipos de vertedores.

Mediante este vertedor se mide el mismo rango de gastos que con los rectangulares, para las mismas longitudes de cresta, pero con mayor dificultad de construcción; si no se requieren mediciones muy precisas no es recomendable su construcción.

Las ecuaciones para obtener el gasto son las siguientes:

Sin velocidad de aproximación.

$$Q = 1.86 L h^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Esta fórmula es válida si se cumple:

$$\begin{aligned} 0.08 \text{ m} &\leq h \leq 0.60 \\ 30 h &\geq B \geq 60 h \\ L &\geq 3h \\ W &\geq 3h \end{aligned}$$

### 5.1.1.4. Vertedor proporcional Sutro

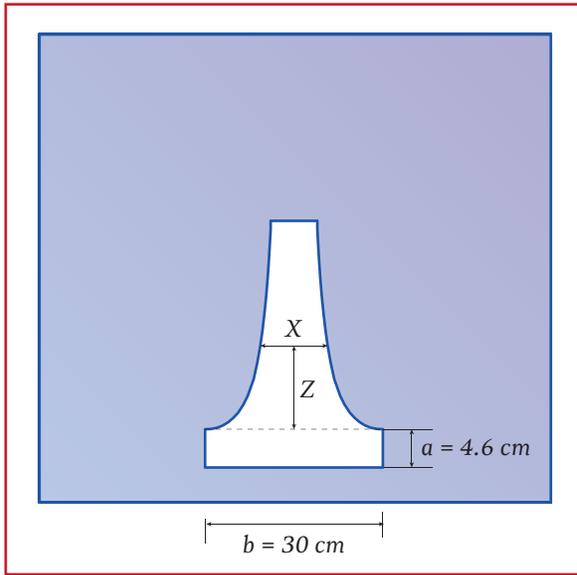
De acuerdo con la literatura técnica en este tipo de vertedores el caudal es linealmente proporcional a la carga sobre un nivel de referencia arbitrario, el cual para el Sutro es de un tercio de la altura a de la sección rectangular arriba de la cresta vertedora, conforme a la ecuación siguiente:

$$Q = C_s a^{\frac{1}{2}} 2b \sqrt{2a} \left( h - \frac{a}{3} \right) \quad \text{Ecuación 5.7}$$

También a partir de las recomendaciones de la literatura técnica, se aconseja que se tome  $h = 2a$  como el límite inferior de aplicación. Otro criterio de tipo práctico de la misma literatura, relativo a la magnitud de la influencia de las propiedades del fluido y la exactitud con la cual  $h$  puede ser determinada, es que el límite inferior sea de 0.03 metros.

Las coordenadas de la parte curva del vertedor, con  $x$  en función de la altura  $z$ , se determinan con la ecuación siguiente, de acuerdo a los valores de  $b$  y  $a$ . En la Ilustración 5.6 se presenta el detalle de una placa de acero con  $Z$  máxima de 25 centímetros, para  $Q = 40.6 \text{ L/s}$ :

Ilustración 5.6 Ejemplo de diseño de Vertedor Sutro



En la Tabla 5.1 se presenta un ejemplo de coordenadas para una  $z$  máxima de 25 cm, la cual corresponde a un gasto de 40.6 L/s.

Conforme a los valores estándar de  $b$  y  $a$ ,  $Cd = 0.608$ . Asimismo considerando  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ , y una  $h$  mínima de 0.05 m, mayor que  $a$ , los gastos respectivos calculados mediante la anterior ecuación, se muestran en la Tabla 5.2.

Según la literatura técnica específica de este vertedor, la carga  $h$  sobre la cresta del vertedor debe medirse a una longitud aguas arriba de la cresta, igual a dos veces la  $h$  máxima, o sea

Tabla 5.1 Coordenadas de parte curva del Sutro

Z (cm)	X (cm)	Z (cm)	X (cm)
0.1	27.2	21	8.4
0.5	23.9	22	8.2
1	21.7	23	8.0
2	18.9	24	7.9
3	17.0	25	7.7
4	15.7	26	7.6
5	14.6	27	7.5
6	13.7	28	7.4
7	13.0	29	7.2
8	12.4	30	7.1
9	11.9	31	7.0
10	11.4	32	6.9
11	11.0	33	6.8
12	10.6	34	6.7
13	10.2	35	6.6
14	9.9	36	6.6
15	9.7	37	6.5
16	9.4	38	6.4
17	9.2	39	6.3
18	8.9	40	6.2
19	8.7	41	6.2
20	8.5		

Tabla 5.2 Escala-gastos de parte curva del Sutro

h (cm)	Q (L/s)	h (cm)	Q (L/s)	h (cm)	Q (L/s)
5.0	6.0	12.5	19.0	20.0	32.0
5.5	6.9	13.0	19.9	20.5	32.8
6.0	7.7	13.5	20.7	21.0	33.7
6.5	8.6	14.0	21.6	21.5	34.6
7.0	9.5	14.5	22.5	22.0	35.4
7.5	10.3	15.0	23.3	22.5	36.3
8.0	11.2	15.5	24.2	23.0	37.2
8.5	12.1	16.0	25.1	23.5	38.0
9.0	12.9	16.5	25.9	24.0	38.9
9.5	13.8	17.0	26.8	24.5	39.8
10.0	14.7	17.5	27.7	25.0	40.6
10.5	15.5	18.0	28.5	25.5	41.5
11.0	16.4	18.5	29.4	26.0	42.4
11.5	17.3	19.0	30.3	26.5	43.2
12.0	18.1	19.5	31.1	27.0	44.1

a 0.5 m. De cualquier manera es conveniente que se realicen pruebas comparativas con otro sistema de medición para hacer los ajustes que sean necesarios a las curvas de escala-gastos, conforme a las condiciones reales del vertedor.

### ***Fabricación e instalación de vertedores***

De la Ilustración 5.7 a la Ilustración 5.10 se muestran gráficamente aspectos de fabricación, inspección y montaje de los vertedores Sutro y rectangulares.

Ilustración 5.7 Placas vertedoras puestas en sitio



Ilustración 5.8 Inspección dimensional de vertedores



Ilustración 5.9 Montaje de vertedores Sutro



Ilustración 5.10 Uno de los vertedores en operación



### ***Comparativas de medición***

Con la finalidad de verificar la confiabilidad de los vertedores Sutro diseñados, fabricados e instalados, se hicieron mediciones comparativas entre éstos y un medidor ultrasónico DCT 7088, el cual se montó sobre la tubería de descarga (acero al carbón, 6 pulgadas de diámetro) del sistema de bombeo instalado. La Ilustración

5.11 y la Ilustración 5.12 muestran y describen aspectos del proceso para diferentes gastos de bombeo.

En la Ilustración 5.13 se presentan los resultados de la comparativa de medición entre el vertedor Sutro diseñado, fabricado e instalado, y el medidor ultrasónico portátil, instalado en la tubería aguas arriba de la descarga al canal.

Ilustración 5.11 Proceso de Medición en múltiple de descarga con medidor ultrasónico



Ilustración 5.12 Escala provisional para medir la carga sobre la cresta de los vertedores

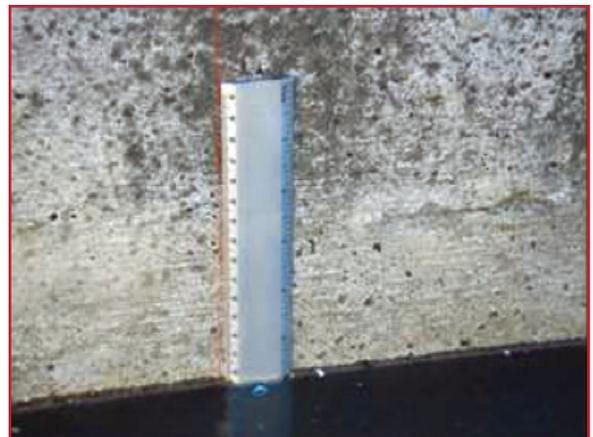
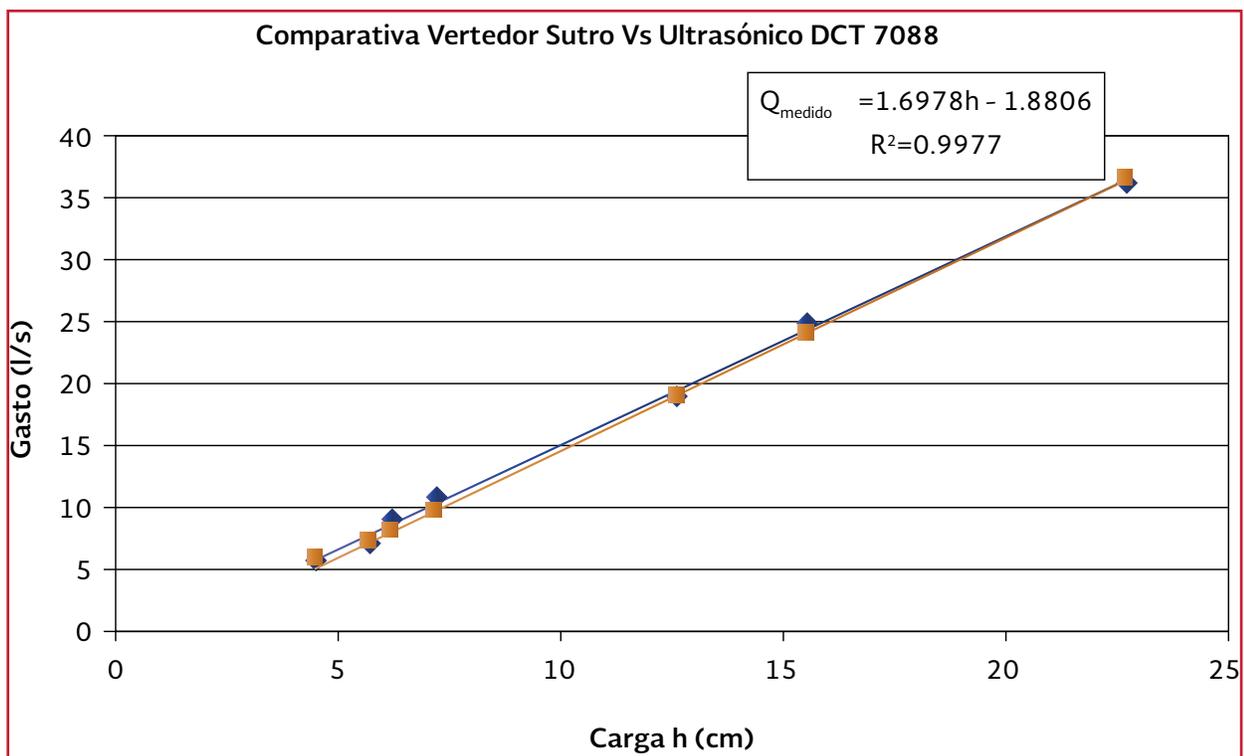


Ilustración 5.13 Comparativa entre caudales medidos en vertedor Sutro y medidor ultrasónico instalado en tubería aguas arriba de la descarga en canal



### 5.1.2. VERTEDORES DE CRESTA ANCHA

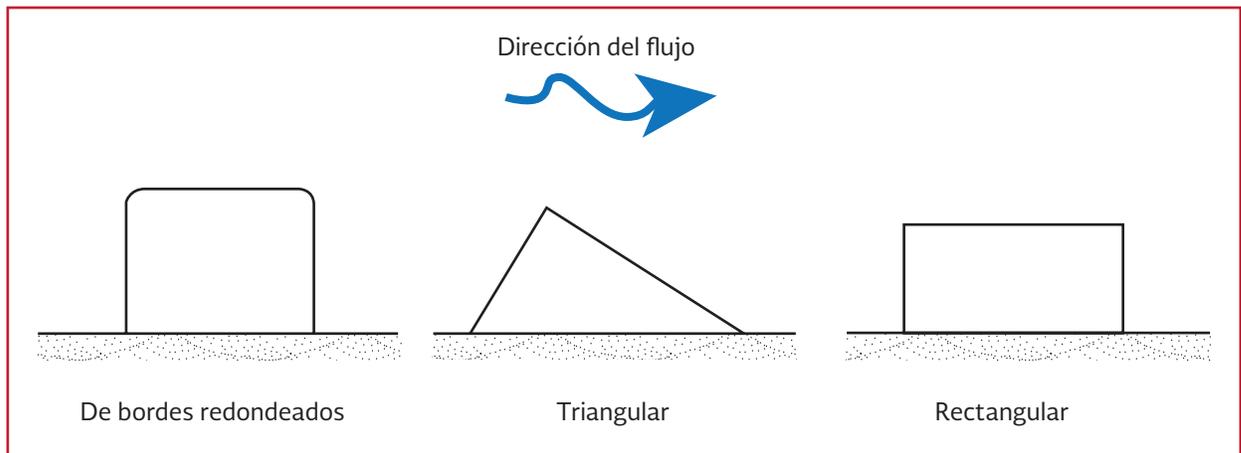
Este tipo de vertederos es utilizado principalmente para el control de niveles en los ríos o canales, pero pueden ser también calibrados y usados como estructuras de medición de caudal. Son estructuras fuertes que no se dañan fácilmente y pueden manejar grandes caudales. No son muy usados en la infraestructura de agua potable y saneamiento.

Existen básicamente tres tipos de vertedores de cresta ancha:

- Rectangular de bordes redondeados
- Triangular
- Rectangular

El vertedero horizontal de bordes redondeados y el triangular, pueden utilizarse para un amplio rango de descarga y operan eficazmente aún con flujo con carga de sedimentos. El vertedero rectangular es un buen elemento de investigación para medición del flujo de agua libre de sedimentos. Es fácil de construir, pero su rango de descarga es más restringido que el de otros tipos (Ver Ilustración 5.14).

Ilustración 5.14 Tipos de vertedores de cresta ancha



## 5.2. CANALETAS DE TIRANTE CRÍTICO

### 5.2.1. DE GARGANTA CORTA (PARSHALL)

Esta estructura aforadora (ver Ilustración 5.15), consiste esencialmente de una contracción lateral en un canal a superficie libre, la contracción se forma por una elevación de la plantilla y el estrechamiento de la sección transversal.

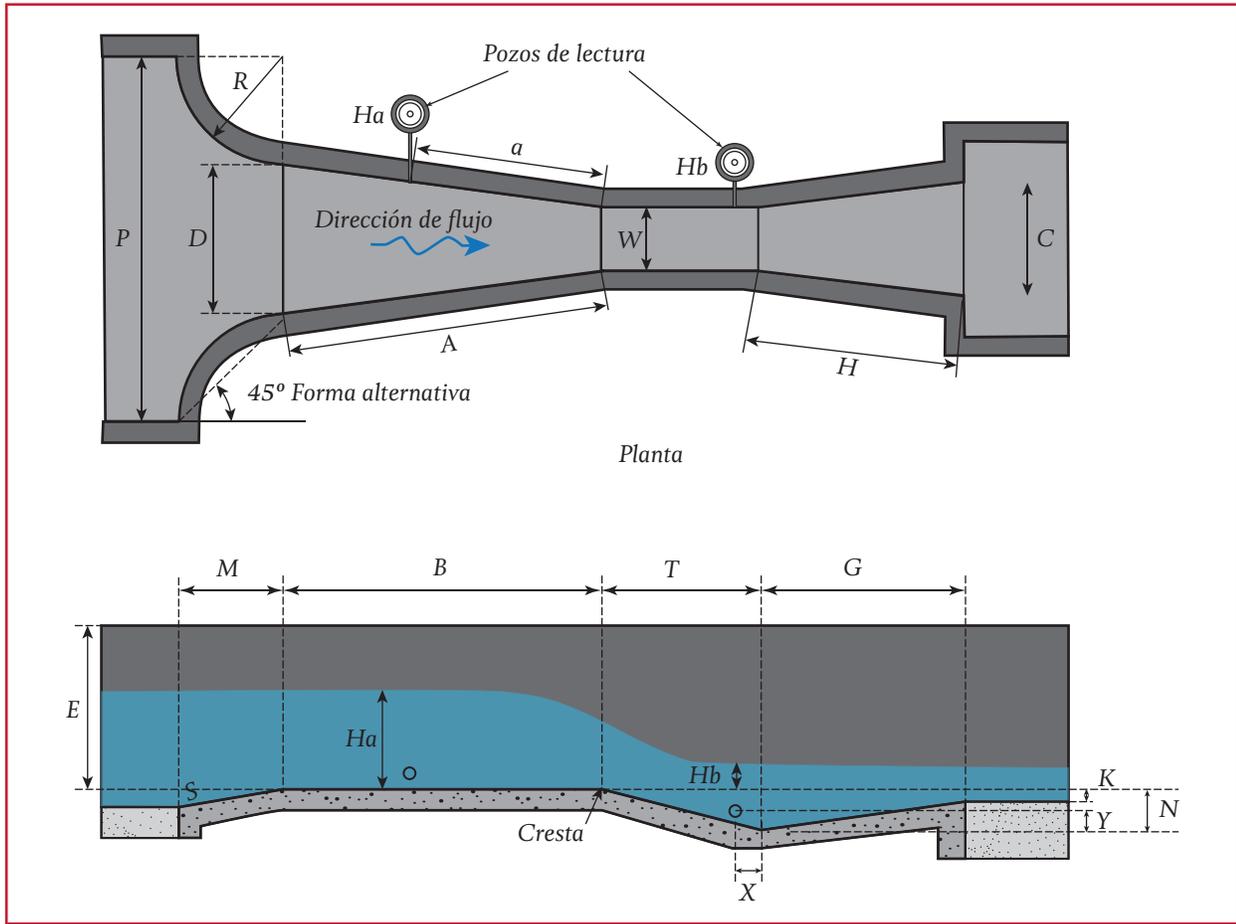
El medidor Parshall está constituido por tres partes fundamentales Skertchly M. (1988): Entrada, garganta y salida. La estructura tiene dos tanques de reposo que sirven para medir la carga ( $H_a$ ), a la entrada del medidor antes de la garganta y la carga ( $H_b$ ), cerca del extremo inferior de la garganta, estando colocados a los lados de la estructura y comunicados a ella por tubería, en estas cámaras se alojan los flotadores de los limnigrafos, medidores de nivel electrónicos o

Ilustración 5.15 Instalación de canaleta Parshall en una planta de tratamiento de aguas residuales



simplemente escalas graduadas. A continuación se presenta un croquis con la planta y elevación de un medidor Parshall (Ver Ilustración 5.16).

Ilustración 5.16 Diseño estandarizado de la canaleta Parshall



La descripción de las dimensiones, de acuerdo a la Ilustración 5.16 del aforador Parshall es la siguiente:

- |   |  |
|---|--|
| $W$ = Ancho de la garganta (m)  | $G$ = Longitud de la sección divergente (m)  |
| $A$ = Longitud de las paredes laterales de la sección convergente (m) | $H$ = Longitud de las paredes de la sección divergente (m)                                 |
| $a$ = Ubicación del punto de medición del tirante $H_a$ (m)           | $K$ = Diferencia en elevación entre el extremo inferior del canal y la cresta (m)          |
| $B$ = Longitud axial de la sección convergente (m)                    | $M$ = Longitud del piso de la entrada (m)  |
| $C$ = Ancho del extremo aguas abajo del canal (m)                     | $N$ = Profundidad de la cubeta (m)   |
| $D$ = Ancho del extremo aguas arriba del canal (m)                    | $P$ = Ancho de la entrada de la transición (m)   |
| $E$ = Profundidad del canal (m)                                       | $R$ = Radio de la cubeta (m)   |
| $T$ = Longitud de la garganta (m)                                     | $X$ = Distancia horizontal desde el punto bajo en la garganta al punto de medida $H_b$ (m) |
|   | $Y$ = Distancia vertical desde el punto bajo en la garganta al punto de medida $H_b$ (m)   |

El dimensionamiento del Aforador Parshall, es función de su ancho de garganta  $W$ ; estas dimensiones se muestran en la Tabla 5.3. En la misma se indican por comodidad para el lector, dimensiones en mm para los aforadores pequeños, (al usar dichas unidades, y aplicando la Ecuación 5.8 ecuación 1 el gasto será en L/s) y en metros para aquellos de más de 0.3048 metros de ancho de la garganta (en este caso al usar dichas unidades y la Ecuación 5.8 el gasto estará dado en  $m^3/s$ ).

Por medio de trabajos de experimentación en los que se colocaron diferentes tamaños de aforadores Parshall, se midió el gasto ( $Q$ ) y la profundidad ( $H_a$ ), se observó que los aforadores tienen un comportamiento similar en la relación Profundidad ( $H_a$ ) contra gasto ( $Q$ ), para condiciones de descarga libre, es decir, se pueden representar matemáticamente con la Ecuación 5.8, Pedroza G. (2001).

$$Q = C_p H_a^n \quad \text{Ecuación 5.8}$$

donde:

- $Q$  = Caudal en  $m^3/s$
- $H_a$  = Profundidad del agua en una ubicación determinada del aforador, en m (ver Ilustración 5.16)
- $C_p, n$  = Constantes cuyo valor depende del ancho de garganta  $W$  del aforador (ver Tabla 5.4)

Es importante mencionar que en función de los valores y unidades dados de las constantes  $C_p$  y  $n$ , las unidades a tener en cuenta de las variables  $H_a$  y el gasto  $Q$  cambiarán en L/s o  $m^3/s$  según lo indicado en la Tabla 5.4.

### Ejemplo

Determinar el gasto para un aforador Parshall que tiene un ancho de garganta de 50.8 mm y una profundidad de 100 mm.

Solución

$$W = 50.8 \text{ mm}$$

$$H_a = 100 \text{ mm}$$

De la Tabla 5.4 se obtienen las constantes  $C_p = 0.002702$  y  $n = 1.55$ , con la Ecuación 5.8 se calcula el gasto.

$$Q = 0.002702(100)^{1.55} = 3.40 \frac{L}{s}$$

El aforador Parshall puede funcionar a descarga libre en el que se aplica la Ecuación 5.8 directamente, como el mostrado en el ejemplo anterior o descarga ahogada, en el que es necesario definir la sumergencia que es la relación entre el valor de la profundidad  $H_a$  entre la profundidad  $H_b$  con la Ecuación 5.9.

$$S = \frac{H_a}{H_b} 100 \quad \text{Ecuación 5.9}$$

donde:

- $S$  = Sumergencia (%)
- $H_a$  = Profundidad del agua en una ubicación determinada del aforador, en m (ver Ilustración 5.16)
- $H_b$  = Profundidad del agua cerca del extremo inferior de la garganta (m o mm)

La sumergencia permitida para una descarga libre para tamaño de aforador que está en función de su ancho de garganta se presenta en la Tabla 5.4, cuando la sumergencia calculada con la Ecuación 5.9 es mayor a valor mostrado en dicha tabla se dice que el aforador Parshall trabaja ahogado o que presenta una descarga sumergida, para esto será necesario corregir el gasto calculado con la ecuación 1. El gasto corregido está dado por la Ecuación 5.10.

$$Q_s = Q - Q_e = (C_p H_a^n) - Q_e$$

Ecuación 5.10

donde:

- $Q_s$  = Gasto del aforador bajo condiciones de sumergencia mayor permitida ( $m^3/s$  o  $L/s$ )
- $Q$  = Gasto del aforador calculado con la Ecuación 5.8 ( $m^3/s$  o  $L/s$ )
- $C_e$  = Gasto de corrección ( $m^3/s$  o  $L/s$ )

### **Especificaciones de instalación**

La localización apropiada del aforador, por conveniencia, debe ubicarse cerca del punto de distribución y cerca de las compuertas de regulación usadas para controlar el gasto.

Los aforadores deben estar accesibles en vehículo para propósitos de instalación y de mantenimiento.

En general, la corriente antes del aforador debe estar tranquila, es decir, en un tramo recto en el que se puedan respetar las dimensiones del medidor de acuerdo a la Tabla 5.3, la pendiente del fondo suave, sin curvas ni oleaje.

Comúnmente los aforadores Parshall, y en general cualquier aforador, colocados en canales sin revestir tienden a sufrir asentamientos después de largos periodos de operación, por lo que es necesario inspecciones periódicas de dicha instalación.

En estos casos la nivelación del fondo en la entrada puede alterarse, por lo que es necesaria una revisión y renivelación en caso necesario, estos trabajos se recomienda realizarse después cuando no se encuentre en operación la infraestructura hidráulica en el que está instalado el aforador Parshall.

El cálculo del gasto de corrección  $Q_e$  en función de la sumergencia, se presenta como gráficas de la Ilustración 5.17 a la Ilustración 5.23.

El gasto de corrección de las gráficas de la Ilustración 5.17 a la Ilustración 5.17 puede aplicarse directamente al medidor con un ancho de garganta de 0.3048 m. Para medidores cuyo ancho de garganta sea mayor a 0.3048 metros el gasto de corrección  $Q_e$  deberá ser el producto de dicho gasto por el Factor de Multiplicación de la Tabla 5.5, mismo que está dado en función del ancho de garganta.

Tabla 5.3 Dimensiones del aforador Parshall en función del ancho de garganta W, (Pedroza, 2001)

W	A	a	B	C	D	E	T	G	K	M	N	P	R	X	Y
<b>Dimensiones en (mm)</b>															
25.4	363	242	356	93	167	229	76	203	19		29			8	13
50.8	414	276	406	135	214	254	114	254	22		43			16	25
76.2	467	311	457	178	259	457	152	305	25		57			25	38
152.4	621	414	610	394	397	610	305	610	76	305	114	902	406	51	76
228.6	879	587	864	381	575	762	305	457	76	305	114	1080	406	51	76
<b>Dimensiones en (m)</b>															
0.3048	1.3720	0.914	1.343	0.610	0.845	0.914	0.61	0.914	0.076	0.381	0.229	1.492	0.508	0.051	0.076
0.4572	1.4480	0.965	1.419	0.762	1.026	0.914	0.61	0.914	0.076	0.381	0.229	1.676	0.508	0.051	0.076
0.6096	1.5240	1.016	1.495	0.914	1.206	0.914	0.61	0.914	0.076	0.381	0.229	1.854	0.508	0.051	0.076
0.9144	1.6760	1.118	1.645	1.219	1.572	0.914	0.61	0.914	0.076	0.381	0.229	2.222	0.508	0.051	0.076
1.2192	1.8290	1.219	1.794	1.524	1.937	0.914	0.61	0.914	0.076	0.457	0.229	2.711	0.610	0.051	0.076
1.5240	1.9810	1.321	1.943	1.829	2.302	0.914	0.61	0.914	0.076	0.457	0.229	3.080	0.610	0.051	0.076
1.8288	2.1340	1.422	2.092	2.134	2.667	0.914	0.61	0.914	0.076	0.457	0.229	3.442	0.610	0.051	0.076
2.1336	2.2860	1.524	2.242	2.438	3.032	0.914	0.61	0.914	0.076	0.457	0.229	3.810	0.610	0.051	0.076
2.4384	2.4380	1.626	2.391	2.743	3.397	0.914	0.61	0.914	0.076	0.457	0.229	4.172	0.610	0.051	0.076
3.0480	2.7432	1.829	4.267	3.658	4.756	1.219	0.914	1.829	0.152		0.343			0.305	0.229
3.6580	3.0480	2.032	4.877	4.470	5.607	1.524	0.914	2.438	0.152		0.343			0.305	0.229
4.5720	3.5052	2.337	7.620	5.588	7.620	1.829	1.219	3.048	0.299		0.457			0.305	0.229
6.0960	4.2672	2.845	7.620	7.315	9.144	2.134	1.829	3.658	0.305		0.686			0.305	0.229
7.6200	5.0292	3.353	7.620	8.941	1.668	2.134	1.829	3.962	0.305		0.686			0.305	0.229
9.1440	5.7912	3.861	7.925	10.566	12.313	2.134	1.829	4.267	0.305		0.686			0.305	0.229
12.1920	7.3152	4.877	8.230	13.818	15.481	2.134	1.829	4.877	0.305		0.686			0.305	0.229
15.2400	8.8392	5.893	8.230	17.272	18.529	2.134	1.829	6.096	0.305		0.686			0.305	0.229

Tabla 5.4 Valores de Cp y n de la Ecuación 5.8 para diferentes anchos de garganta (W), Pedroza G. (2001)

Ancho de garganta W (mm o m)	Valores de la constante	Valores de la constante n	Sumergencia máxima permitida (%)
<b>W (mm) y H<sub>a</sub> (mm) y el valor del gasto Q será en L/s</b>			
25.4	0.001352	1.55	50
50.8	0.002702	1.55	50
76.2	0.003966	1.55	50
152.4	0.006937	1.58	60
228.6	0.013752	1.58	60
<b>W (m) y H<sub>a</sub> (m) y el valor del gasto Q será en m<sup>3</sup>/s</b>			
0.3048	0.69	1.52	70
0.4572	1.06	1.54	70
0.6096	1.43	1.55	70
0.9144	2.18	1.57	70
1.2192	2.95	1.58	70
1.5240	3.73	1.59	70
1.8288	4.62	1.60	70
2.1336	6.31	1.6	70
2.4384	6.41	1.61	70
3.0480	7.48	1.60	80
3.6580	8.86	1.60	80
4.5720	10.96	1.60	80
6.0960	14.45	1.60	80
7.6200	17.94	1.60	80
9.1440	21.44	1.60	80
12.1920	29.43	1.60	80
15.2400	36.41	1.60	80

Tabla 5.5 Factor de multiplicación del gasto del gasto de corrección en función del ancho de garganta

Ancho de Garganta W (m)	Factor de Multiplicación M	Ancho de Garganta W (m)	Factor de Multiplicación M
0.3048	1	3.0480	1
0.4572	1.4	3.6580	1.2
0.6096	1.8	4.5720	1.5
0.9144	2.4	6.0960	2.0
1.2192	3.10	7.6200	2.5
1.5240	3.7	9.1440	3.0
1.8288	4.3	12.1920	4.0
2.1336	4.9	15.2400	5.0
2.4384	5.4		

Ilustración 5.17 Aforador Parshall de 25.4 mm de ancho de garganta

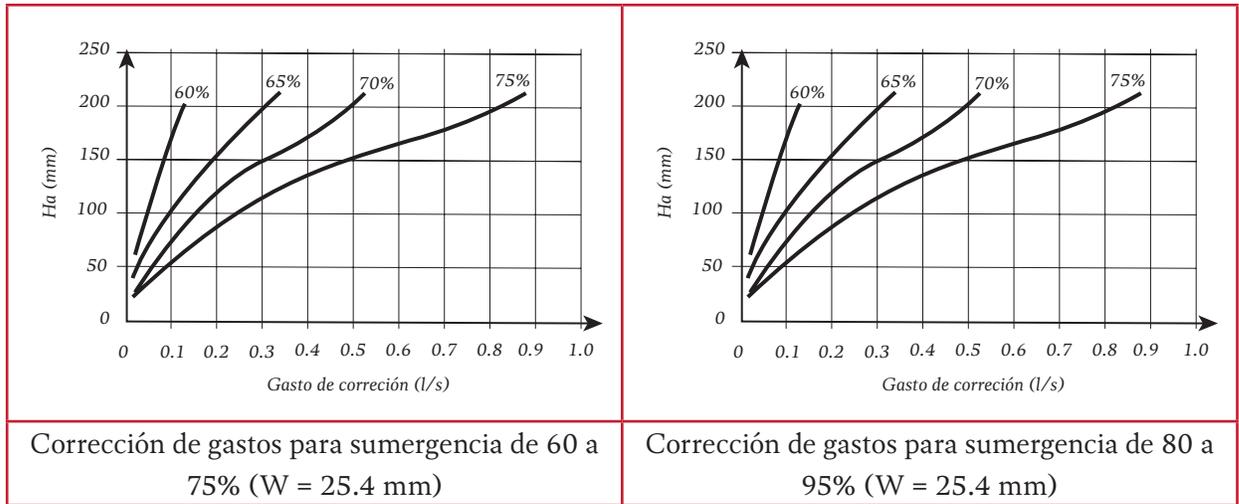


Ilustración 5.18 Aforador Parshall de 50.8 mm de ancho de garganta

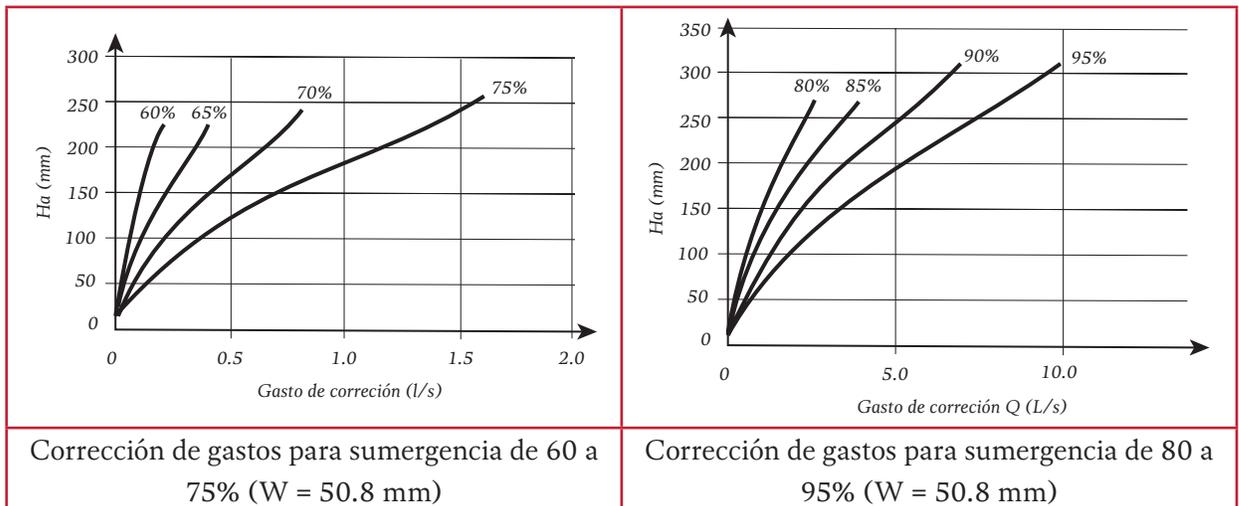


Ilustración 5.19 Aforador Parshall de 76.2 mm de ancho de garganta

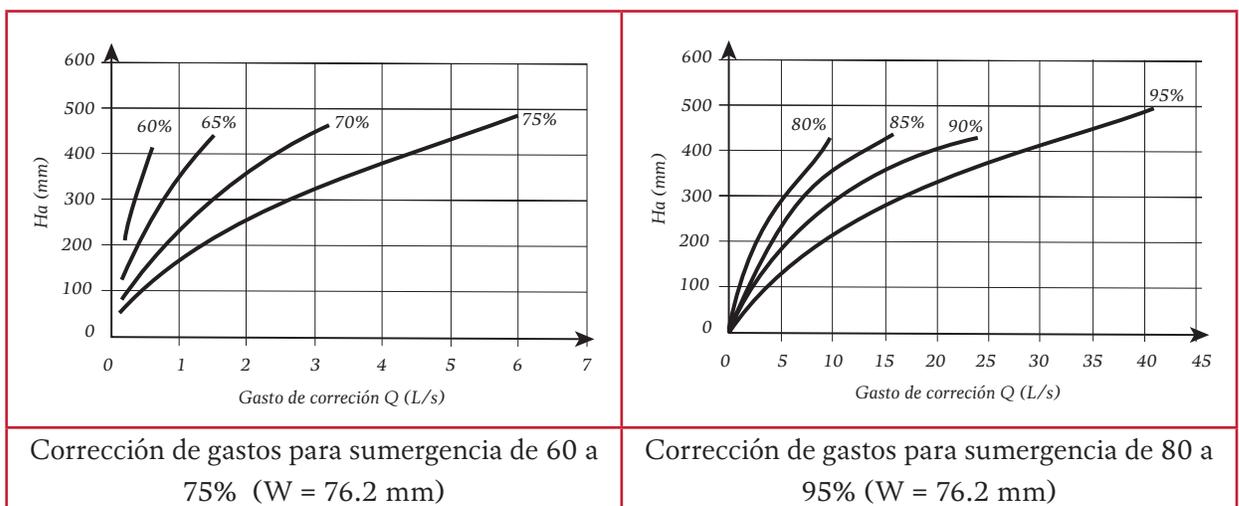


Ilustración 5.20 Aforador Parshall de 152.4 mm de ancho de garganta

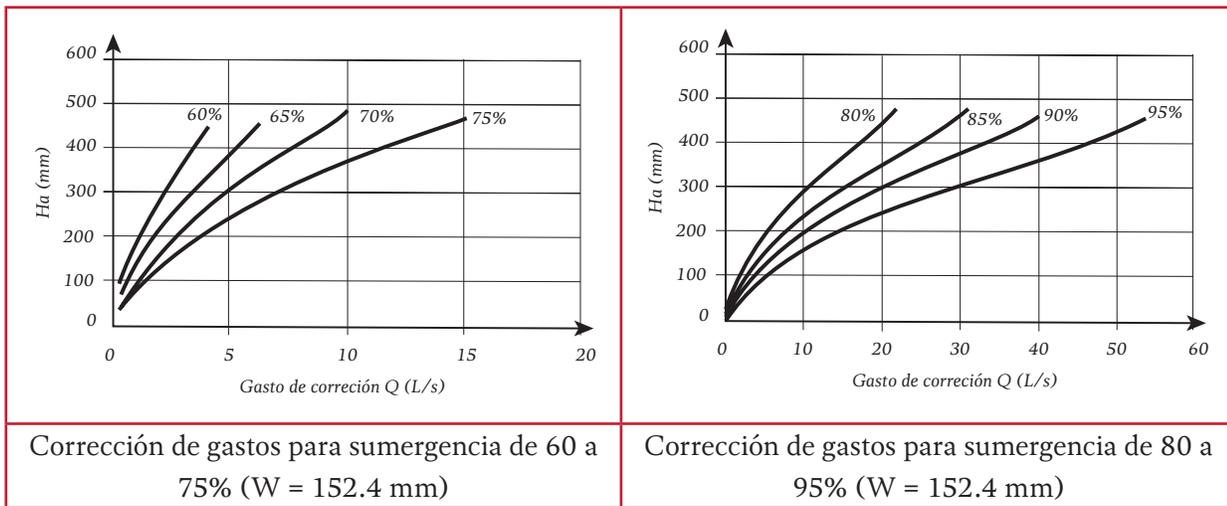


Ilustración 5.21 Aforador Parshall de 228.6 mm de ancho de garganta

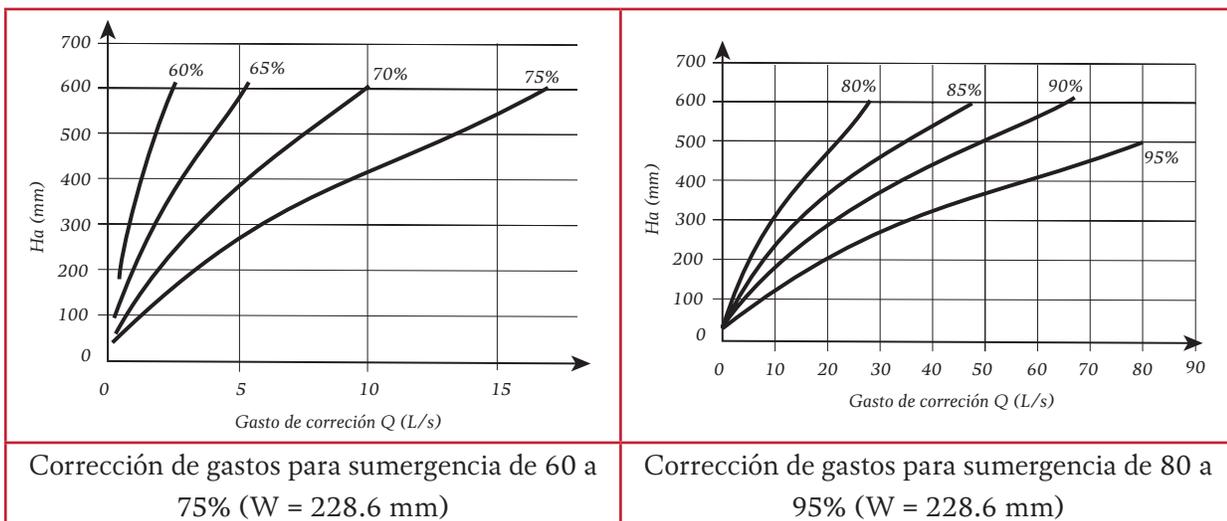


Ilustración 5.22 Aforador Parshall de 0.3048 m hasta 2.4384 m de ancho de garganta

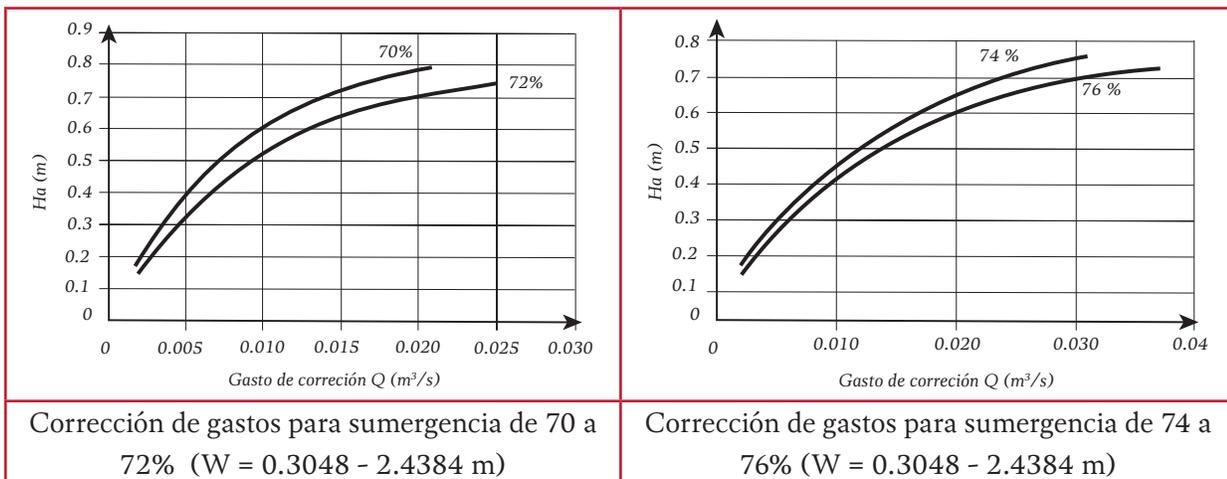
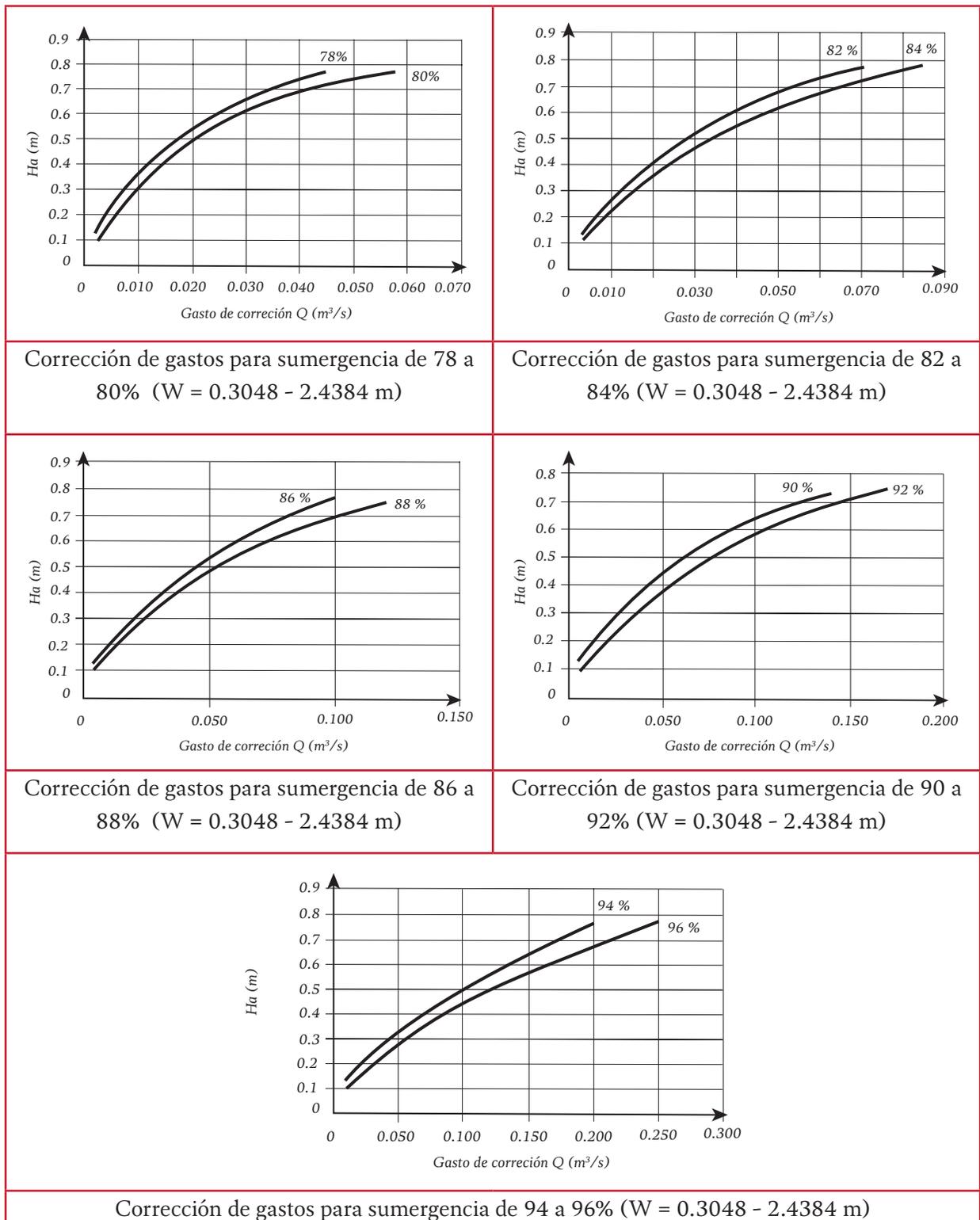


Ilustración 5.22 Aforador Parshall de 0.3048 m hasta 2.4384 m de ancho de garganta (continuación)



Corrección de gastos para sumergencia de 94 a 96% ( $W = 0.3048 - 2.4384$  m)

Ilustración 5.23 Aforador Parshall de 3.048 m hasta 15.24 m de ancho de garganta

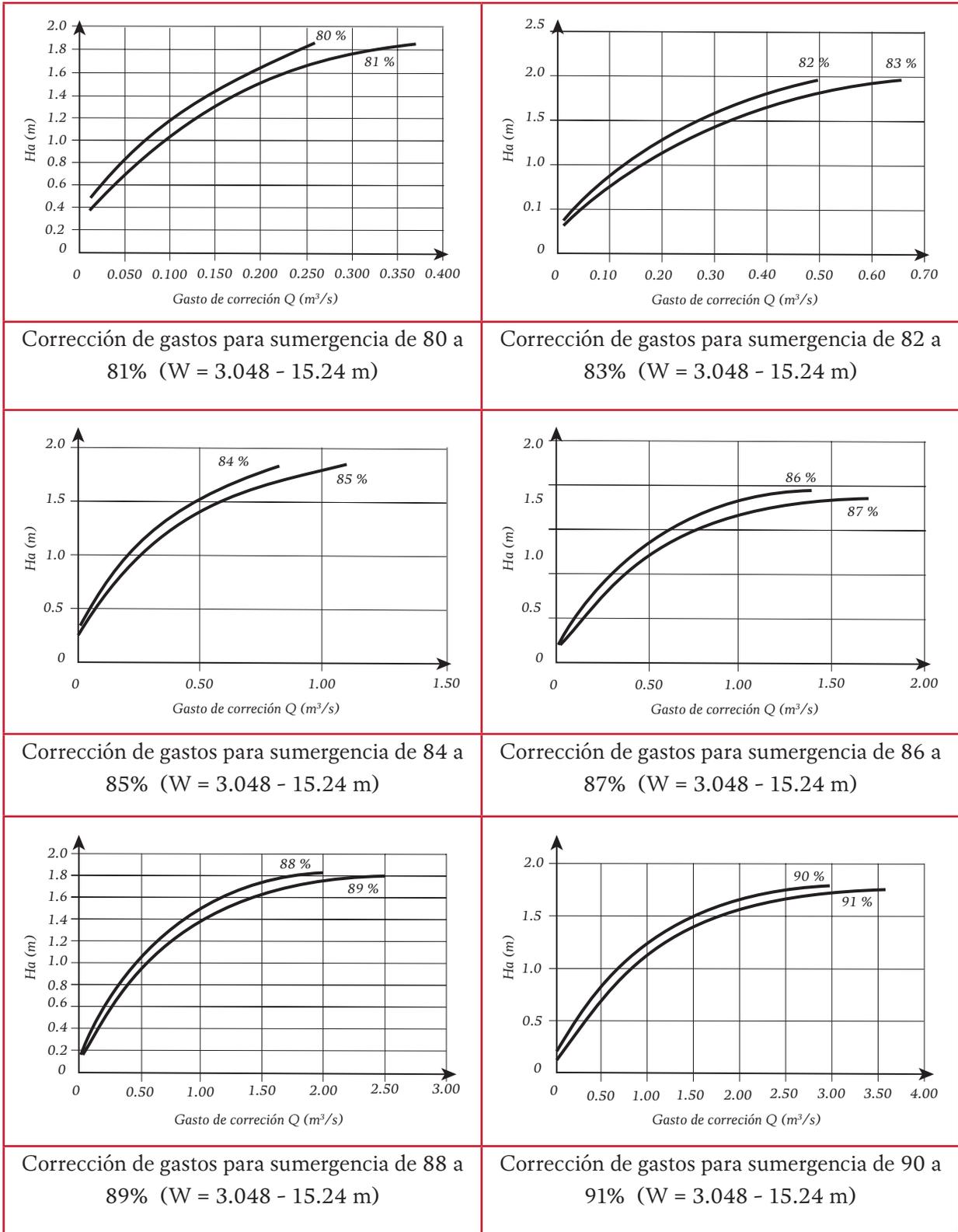
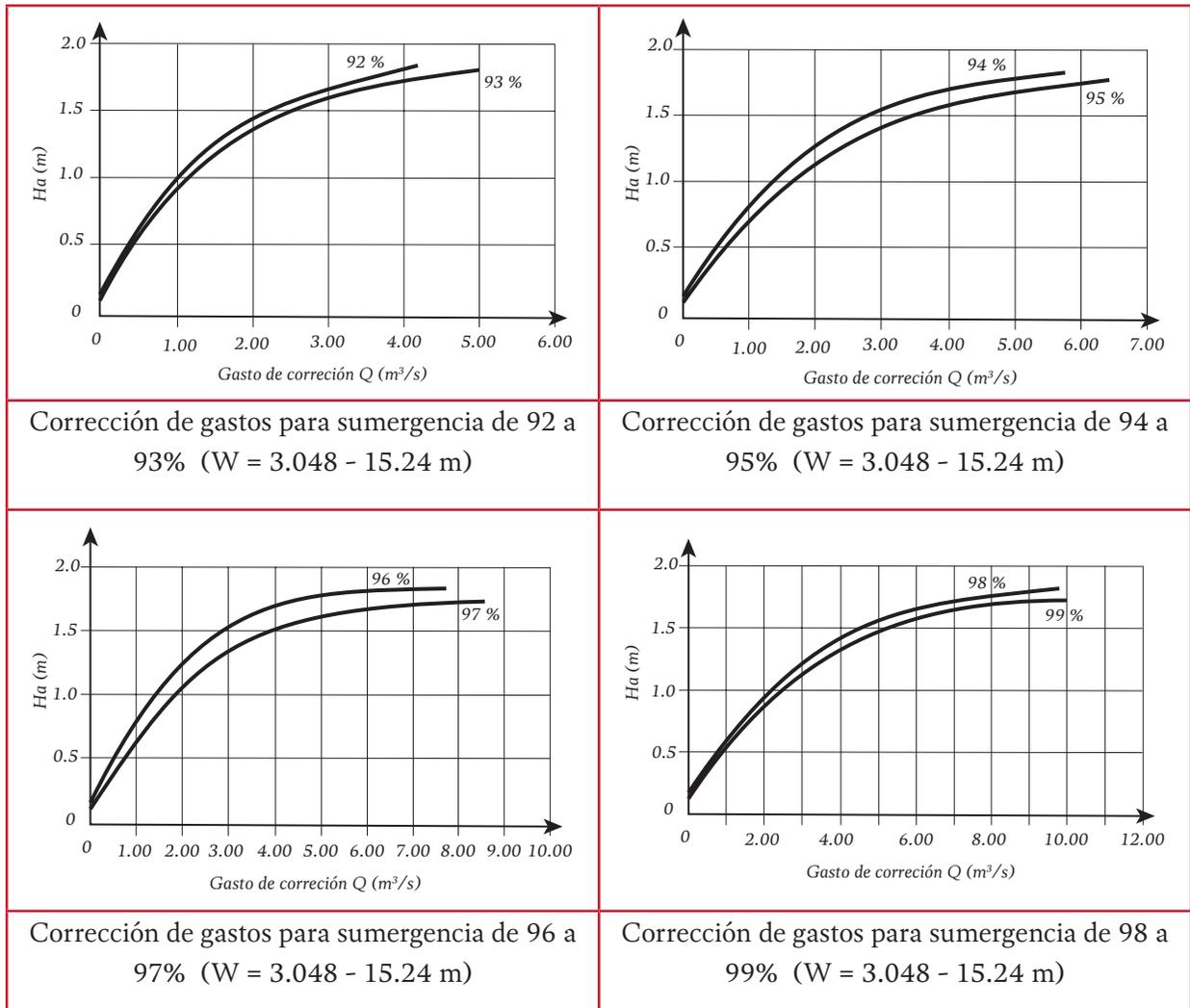


Ilustración 5.23 Aforador Parshall de 3.048 m hasta 15.24 m de ancho de garganta (continuación)



### 5.2.2. DE GARGANTA LARGA

Los aforadores de garganta larga son aforadores de sección crítica, en los cuales el flujo crítico se produce mediante una contracción: en las paredes laterales, en el fondo, o en ambos, como se muestra en la Ilustración 5.24. La sección contracta se denomina “garganta”, y debe tener una longitud suficiente para que en ella las líneas de corriente sean prácticamente paralelas. En este sentido es que se denominan de “garganta larga” (Martínez et. al., 2004).

Conforme a Martínez et. al. (2004), los aforadores de garganta larga son probablemente la mejor opción; son muy exactos, poseen una geometría sencilla, se adaptan a muy variadas condiciones de gasto y geometría del canal y producen pocas pérdidas de energía. Asimismo que pueden calibrarse analíticamente, ahorrándose los costos de calibraciones en campo, pero que sin embargo su diseño y calibración no son sencillos, ya que la calibración hace necesaria la solución de ecuaciones diferenciales del flujo y de la capa límite, y deben probarse varias alternativas antes de obtener un diseño satisfactorio.

Para evitar las dificultades citadas, Martínez et (2004) desarrollaron un programa de computadora, que permite estudiar opciones de diferentes geometrías, analizar los efectos sobre el flujo en el canal, y calcular y dibujar curvas de calibración, entre otras opciones.

De acuerdo con Martínez et (2004), la curva de calibración es una relación única tirante-gasto en la sección de medición. Esta se ubica aguas arriba de la garganta, y es necesario el cálculo del perfil de la superficie libre desde la sección crítica hasta la de medición. El siguiente desarrollo se retoma de la fuente citada:

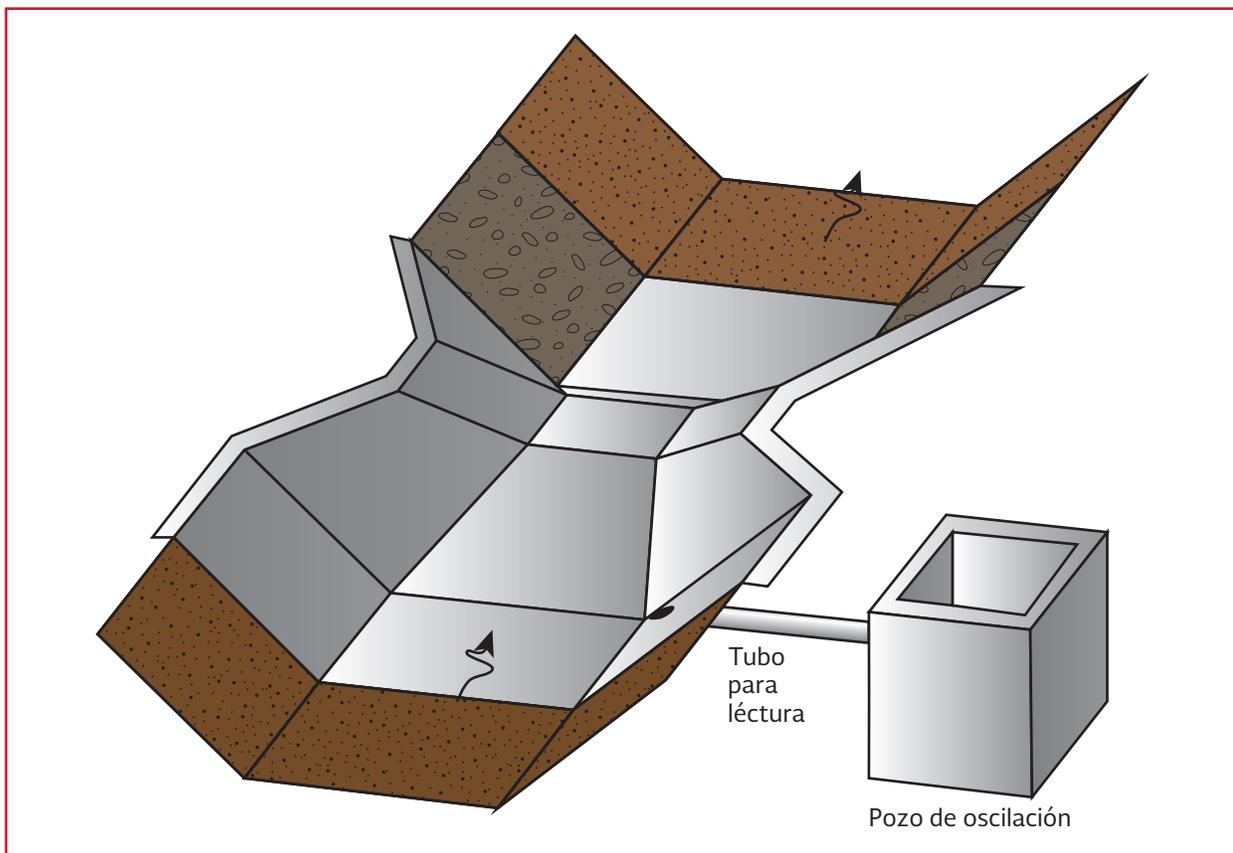
$$Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + z + H_f \quad \text{Ecuación 5.11}$$

donde:

- $Y$  = Tirantes (m)
- $V$  = Velocidades (m/s)
- $g$  = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- $z$  = Cambio en el nivel
- $H_f$  = Pérdida de carga

Para la primera sección, denotando con el subíndice  $c$  la sección crítica:

Ilustración 5.24 Aforador de garganta larga (Martínez et. al., 2004)



$$Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Y_c + \frac{V_c^2}{2g} + z + H_f \quad \text{Ecuación 5.12}$$

En la sección crítica se cumple:

$$Q = \sqrt{\frac{gA_c^3}{T_c}} \quad \text{Ecuación 5.13}$$

donde:

- $Q$  = Gasto ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $A_c$  = Área crítica ( $\text{m}^2$ )
- $T_c$  = Ancho de la superficie en la sección crítica (m)

El cálculo comienza a la salida de la garganta, donde ocurre la sección crítica, donde por la Ecuación 5.13 se conoce la condición de frontera. Utilizando la Ecuación 5.12 se calcula el tirante una sección aguas arriba, separada una distancia  $x$ . Generalizando este procedimiento con la Ecuación 5.11 se calcula el tirante hasta la sección de aforo.

En las ecuaciones anteriores se desconocen las pérdidas de energía  $H_f$ . Para calcularlas, no es suficiente el uso de ecuaciones empíricas de fricción, como las de *Manning* o *Chezy*. Es necesario el empleo de ecuaciones de capa límite.

De acuerdo a la teoría de capa límite, la pendiente de fricción se puede expresar como:

$$S_f = C_f R \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 5.14}$$

donde:

- $S_f$  = Pendiente de fricción

- $R$  = Radio hidráulico del escurrimiento
- $C_f$  = Coeficiente de fricción
- $V$  = Velocidad media de flujo en la sección considerada

Si se considera que  $S_f = H_f/L$ , la pérdida de carga puede expresarse como:

$$H_f = C_f (R)(L) \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 5.15}$$

En esta ecuación debe aún evaluarse el coeficiente  $C_f$ , que es función de la rugosidad y del número de Reynolds. Para capa límite laminar ( $Rx < 10\,000$ ), puede utilizarse la solución de Blasius:

$$C_f = \frac{1.328}{Rx^{0.5}} \quad \text{Ecuación 5.16}$$

donde:

- $Rx$  = Número de Reynolds de la capa límite

Para capa límite turbulenta, lisa o en transición, Schlichting (1960) recomienda:

$$\frac{0.544}{C_f} - 5.67C_f + 0.638 + \ln\left(\frac{1}{Rx C_f} + \frac{1}{4.84 \frac{x}{k} C_f}\right) = 0$$

Ecuación 5.17

donde:

- $k$  = Rugosidad absoluta de las paredes

La solución de la Ecuación 5.17 procede con un método iterativo.



# 6

## MÉTODOS DE VELOCIDAD ÁREA PARA CANALES Y RÍOS

Consiste en determinar el área de una sección transversal de la corriente y la velocidad del agua a través de ésta; la primera por medio de sondeos y la velocidad por cualquiera de los métodos que se describen posteriormente.

### 6.1. VELOCIDAD MEDIA DEL AGUA EN UNA CORRIENTE

La velocidad del agua en los canales abiertos depende: de las características de la sección transversal, rozamiento, viscosidad, tensión superficial y alineación de la corriente. Las líneas de igual velocidad son aproximadamente paralelas al fondo y a los costados del canal. En la superficie se presenta una disminución ligera de la velocidad.

Con base en mediciones experimentales sobre la distribución de velocidades, que se presenta en una vertical de la corriente, se concluyeron las siguientes reglas prácticas (Manual de hidráulica king 1981).

- La velocidad máxima se presenta entre el 5 y el 25 por ciento de la profundidad del agua en el canal y el porcentaje aumenta con incrementos en la profundidad del canal. En corrientes poco profundas con lecho rugoso la velocidad

máxima se presenta muy cerca de la superficie

- La velocidad media en una vertical de un canal se presenta a 0.6 de la profundidad. Esto se cumplió con un error medio de 1 por ciento y un error máximo de 3 por ciento
- La velocidad media en una vertical, es la media aritmética de las velocidades a 0.2 y 0.8 de la profundidad, respectivamente. Esto se cumplió con un error medio nulo (cero) y error máximo de 1 por ciento
- La velocidad media en una vertical es del 85 al 95 por ciento de la velocidad de la superficie, siendo 90 por ciento el promedio de varios cientos de observaciones. La variación de este coeficiente es más irregular que los anteriores
- La curva de variación vertical de la velocidad se aproxima a una parábola de eje vertical, es decir aumenta de la superficie del agua hacia abajo, hasta llegar al punto de velocidad máxima y a partir de éste comienza a disminuir

La determinación de la velocidad media del agua en una corriente puede hacerse por métodos directos o indirectos; los primeros se realizan empleando el molinete o el flotador; los segundos mediante el uso de fórmulas.

## 6.2. ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA CORRIENTE

Para determinar el gasto en una sección se requiere conocer el área hidráulica de la sección transversal de la corriente. El método a emplear dependerá de las condiciones del cauce; en el caso de canales revestidos de mampostería o de concreto, las secciones están bien definidas y será fácil el cálculo del área hidráulica, en caso contrario se tendrá que determinar por medio de sondeo.

La sección transversal de una corriente está limitada en la parte superior por la superficie del agua, que es prácticamente horizontal, por las paredes del cauce que forman los lados y por el fondo. En canales naturales, la sección es una línea arbitraria con cierta tendencia a la forma de "U".

El área puede determinarse seccionando en franjas verticales usando sondas, ya sean rígidas o flexibles. La separación de los sondeos dependerá del ancho de la corriente (Tabla 6.1).

Las sondas rígidas consisten en una varilla metálica o de madera graduada, del tamaño suficiente como para tocar el fondo del cauce, pudiendo medir con ella la profundidad en las secciones transversales; este tipo de sonda se emplea cuando la corriente lleva gastos pequeños o en canales de riego y regaderas

La sonda flexible está compuesta de un escandallo, que es un cuerpo pesado, generalmente de plomo para no ser arrastrado por la corriente y de forma aerodinámica para no oponer resis-

Tabla 6.1 Separación de sondeo en función del ancho de la corriente

Ancho de la corriente (m)	Número de Sondeos
0.0 - 0.5	3 - 4
0.5 - 1.0	4 - 5
1.0 - 3.0	5 - 8
3.0 - 5.0	8 - 10
5.0 - 10.0	10 - 20
> 10	> 20

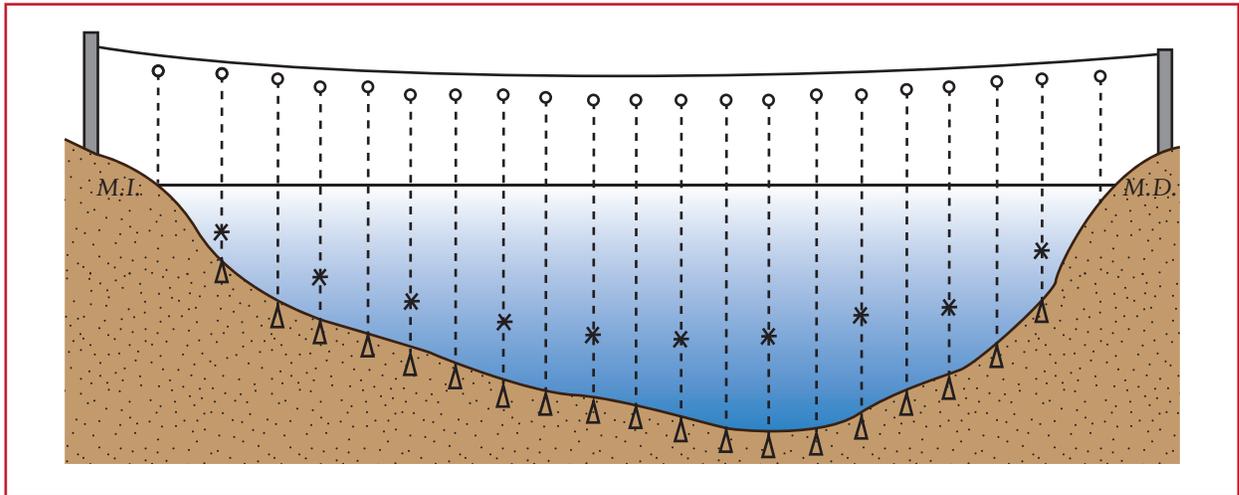
tencia, sujeto al extremo de una sondaleza que puede ser una cuerda, cable o cadena, similar al empleado para lastrar al molinete.

El sondeo consiste en dejar que el escandallo llegue al fondo del cauce, si el técnico aforador está cerca de la superficie del agua, simplemente marcará la sonda tomándola con los dedos; de otra manera, deberá tomar la cuerda referida a un punto fijo una vez que el escandallo esté en el fondo e irá midiendo la longitud de cuerda que vaya sacando hasta que el escandallo esté sobre la superficie del agua.

En las secciones de aforo seleccionadas se puede instalar: un puente, un cable con canastilla o con una lancha; con la finalidad de dividir el ancho de la corriente en franjas, generalmente de igual anchura, que queden marcadas y sean la base para dividir la sección transversal de la corriente en áreas pequeñas (Ilustración 6.1), en las cuales se mide la velocidad media.

Un método rápido para determinar el área hidráulica en regaderas de tierra pequeñas consiste en hacer un sondeo en el centro del canal, multiplicarlo por el ancho y por 0.667, esto equivale a considerar que la sección tiene forma de "U".

Ilustración 6.1 División en franjas de la sección transversal de una corriente



### 6.3. AFORO CON MOLINETE

Este método es muy conocido tanto en los Distritos y las Unidades de Riego como en las áreas técnicas de la CONAGUA, aplicable a todo tipo de corrientes y se emplea como método patrón para calibrar otros métodos de aforo.

El molinete consiste esencialmente de dos partes: una hélice de aspas o copas, que el agua en movimiento hace girar y un mecanismo que permite contar el número de vueltas que da la hélice a intervalos de tiempo definido (Ilustración 6.2).

La relación velocidad-número de revoluciones, se determina en laboratorio, midiéndose el tiempo en segundos que tarda la hélice en dar cierto número de vueltas y para diferentes velocidades. Con estos valores se obtiene una ecuación y una tabla, de las cuales debe disponer cada molinete.

Los molinetes requieren mantenimiento, debido al desgaste y a golpes durante su uso, es por esto que cada molinete debe calibrarse por personal especializado, para obtener la nueva ecuación y tabla que le corresponde; si un molinete no se ha

calibrado después de mucho tiempo, sus mediciones serán erróneas.

Para obtener el gasto que pasa por la sección transversal de la corriente, mediante el molinete, se acostumbra dividir la sección transversal en franjas verticales (Ilustración 6.1), debido a que la velocidad media en una corriente no es uniforme, para medir en cada franja el área ( $a_i$ ) y la velocidad media ( $v_i$ ). El producto de ( $a_i$ ) y ( $v_i$ ) en la franja, proporciona un gasto parcial ( $q_i$ ) de la sección transversal. El gasto total se estima, sumando los gastos parciales obtenidos en cada franja, por medio de la expresión:

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i v_i = \sum_{i=1}^n q_i \quad \text{Ecuación 6.1}$$

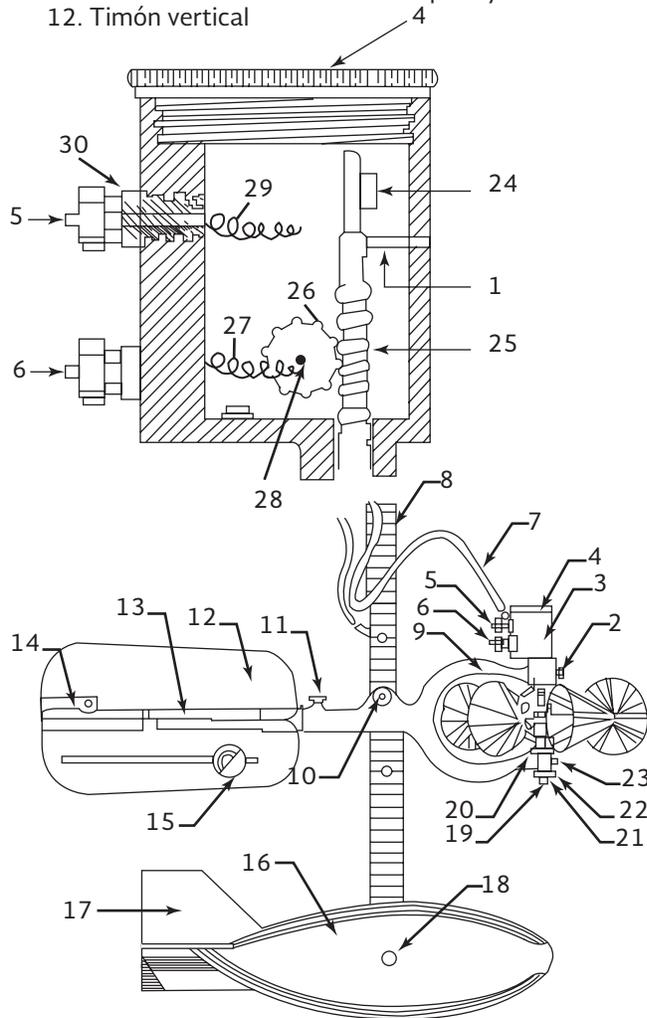
donde:

- $Q$  = Gasto ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $a_i$  = Área de la franja  $i$  ( $\text{m}^2$ )
- $T_c$  = Velocidad media en la franja  $i$  ( $\text{m/s}$ )
- $v_i$  = Gasto en la franja  $i$
- $q_i$  = 1, 2, 3, ...  $n$  franjas

Ilustración 6.2 Molinete Gurley Tipo Price No. 622

1. Rueda de copas
2. Tornillo de ajuste
3. Cámara de contactos
4. Tapa de la cámara de contactos
5. Bome para el contacto simple (una revolución)
6. Bome para el contacto penta (cinco revoluciones)
7. Alambre conductos de corriente
8. Solera de soporte
9. Horquilla
10. Tornillo de suspensión en solera
11. Tornillo de conexión entre horquilla y cola
12. Timón vertical

13. Timón horizontal
14. Broche de cierre para armar el timón
15. Contrapeso corredizo
16. Escandallo (torpedo)
17. Timón vertical de escandallo
18. Tornillo de suspensión del escandallo
19. Pivote
20. Tuerca para ajuste del pivote
21. Tornillo opresor
22. Tornillo de ajuste
23. Eje
24. Soporte del eje de la rueda de copas
25. sinfin para el contacto penta
26. Engrane de contacto penta
27. Espiral del contacto penta
28. Topes del contacto penta
29. Espiral del contacto simple
30. Rosca de pasta aislante del contacto



En corrientes cuyas velocidades varían desde 0.1 m/s hasta 2.5 m/s, la velocidad se puede obtener mediante el molinete, ligado a un escandallo; si la velocidad está por abajo de 0.1 m/s, disminuye la precisión del aparato, mientras que en velocidades arriba de 2.5 m/s, puede ser dañado por objetos que acarrea la corriente.

El método más sencillo para determinar la velocidad media en la franja, consiste en colocar el molinete a un 60 por ciento de la profundidad medida a partir de la superficie libre del agua en cada franja vertical, ya que a esta profundidad la velocidad es muy semejante a la velocidad media (Ilustración 6.3).

Otra forma más precisa para determinar la velocidad media, consiste en tomar lecturas a 20 y 80 por ciento del tirante a partir de la superficie libre del agua y promediar las velocidades a dichas profundidades.

Si la velocidad del agua es mayor a 2.5 m/s, es preferible no hacer observaciones profundas, tanto por la dificultad de mantener el molinete en posición correcta, como por el peligro de que sufra desperfectos, ya que puede ser golpeado por diversos objetos. En este caso, basta con tomar lecturas a 0.15 m de profundidad y multiplicar el valor resultante por un factor de

reducción de 0.9, este producto corresponde a la velocidad media.

Las mediciones de la velocidad del agua con molinete, se pueden realizar desde un puente (pasarela), una barca o un sistema de cable canastilla, donde se instala el operador (Ilustración 6.4).

El sistema cable canastilla, permite hacer mediciones sobre un eje que generalmente es transversal a la corriente, en cauces mayores a 20 metros de ancho, consiste de un cable de acero tendido a una altura conveniente, por donde se desplaza la canastilla, desde allí, el personal de la estación toma las lecturas del molinete.

Debido al empuje de la corriente, el cable que sostiene el molinete, se desplaza un ángulo ( $\Phi$ ) con respecto a la vertical ( $\overline{BC}$ ), presentando una curvatura ( $\overline{EF}$ ), ésta lectura se debe corregir para obtener la profundidad real de la corriente:

$$\overline{BC} = (1 - k) \overline{EF} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

donde:

- $\overline{BC}$  = Profundidad real de la corriente (m)
- $\overline{EF}$  = Longitud del cable (m)
- $K$  = Coeficiente de corrección, está en función del ángulo  $\Phi$  (Ilustración 6.5)

Ilustración 6.3 Variación de la velocidad en la sección transversal y en una vista lateral vertical de la corriente

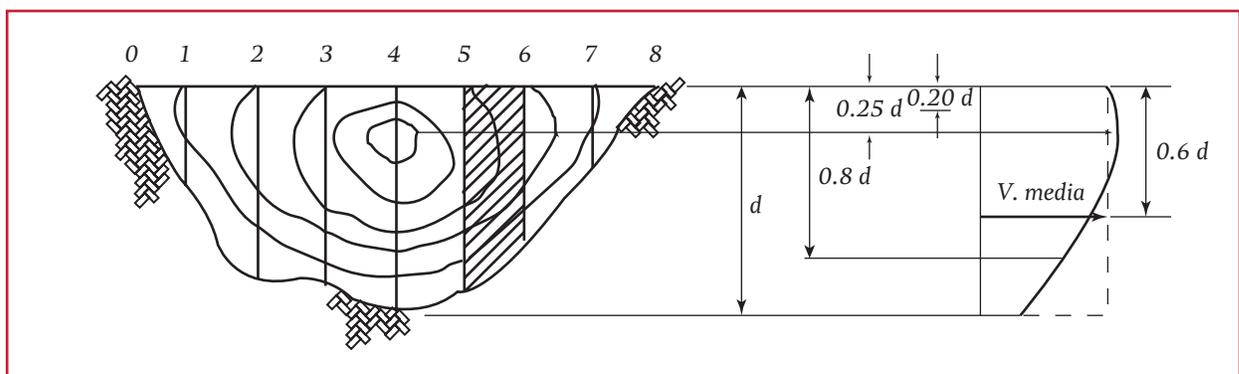
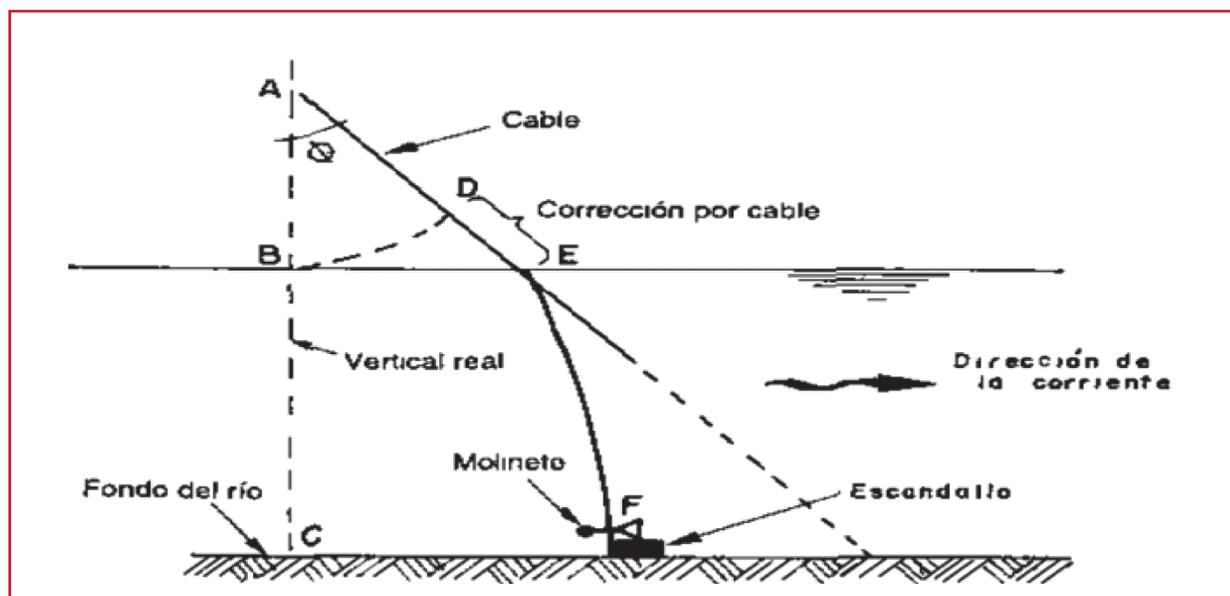


Ilustración 6.4 Izquierda pasarela para aforo, derecha sistema cable canastilla



Ilustración 6.5 Corrección por desviación de la vertical



Ejemplo: Si la longitud del cable ( $\overline{EF}$ ) es 10 m, y el ángulo con respecto a la vertical ( $\Phi$ ) es 16°. Encontrar la vertical real ( $\overline{BC}$ ). Primero, localizar el valor del ángulo ( $\Phi$ ) en la primer columna de la Tabla 6.2; después desplazarse a la segunda columna en forma horizontal, para obtener el valor del coeficiente (0.0128).

Reemplazando los datos en la anterior ecuación, resulta:

$$\overline{BC} = (1 - 0.0128)10 = 9.87 \text{ m}$$

(Profundidad real)

### 6.3.1. REGISTRO Y CÁLCULO DE UN AFORO CON MOLINETE

Un ejemplo de medición del gasto, empleando molinete, se presenta en la hoja de "Registro de aforo con molinete" (Tabla 6.3). En ésta se tienen 15 columnas y un número variable de líneas, que depende de la cantidad de lecturas realizadas en la sección transversal de la corriente.

La primer línea indica las características: distancia y profundidad, de la orilla en que se inician las lecturas; orilla del agua margen derecha (O.A.M.D.) u orilla del agua margen izquierda (O.A.M.I). La profundidad de la orilla generalmente es nula, excepto los casos en que el cauce tenga pared vertical.

La segunda línea proporciona las características: distancia, profundidad, velocidad, etcétera, de la vertical central, primera franja en la que se realiza el primer aforo con el molinete. La tercera línea corresponde al punto límite entre la primera y segunda franja; la cuarta línea es el punto medio de la 2a franja, en que se realiza el 2o aforo; las líneas subsecuentes

Tabla 6.2 Factor de corrección en función del ángulo

$\Phi$	K
10	0.0050
12	0.0072
14	0.0098
16	0.0128
18	0.0164
20	0.0204
22	0.0248
24	0.0296
26	0.0350
28	0.0408
30	0.0472
32	0.0544
34	0.0620
36	0.0698

siguen el mismo orden, una corresponde al límite y otra al aforo, así hasta llegar a la orilla contraria.

Respecto a las columnas; las dos primeras proporcionan información de los sondeos, límites de franja y profundidad de aforo.

**Columna 1:** distancia (m) del origen al punto límite o punto de aforo. Se considera origen el punto donde se inicia el puente o cable, pudiendo ser de cualquier orilla

**Columna 2:** profundidad, considerada desde el nivel del agua hasta el fondo del cauce (m)

Desde la columna 3 hasta la 7 se proporciona información del molinete en los puntos de aforo

**Columna 3:** método empleado, es decir la profundidad en décimos a que se realiza la medición de la velocidad: superficial (sup); seis décimos (6/10); dos y ocho décimos (2/10 y 8/10)

**Columna 4:** profundidad (m) a que se realiza la medición de la velocidad, resulta del producto de las columnas 2 y 3

**Columna 5:** número de revoluciones ( $R$ ), proporcionadas por el molinete

**Columna 6:** tiempo ( $T$ ), en segundos, que duró la observación

**Columna 7:** número de revoluciones por segundo ( $N$ ), resulta de dividir la columna 5 por la 6 ( $N=R/T$ ). Se obtiene únicamente cuando no se dispone de la tabla, pero sí de la ecuación.

Desde la columna 8 hasta la 10, se tiene información de la velocidad media

**Columna 8:** velocidad en el punto (m/s); si el método es el superficial o el de 6/10, se tendrá una sola medición; pero si es el de 2/10 y 8/10, se tendrán dos mediciones. Esta velocidad se obtiene entrando con los valores de  $R$  y  $T$ , columnas 5 y 6, en la tabla que le corresponde únicamente al molinete empleado. Para el ejemplo descrito (Tabla 6.3) la velocidad 5 se ha obtenido de la Tabla 6.2

**Columna 9:** en esta columna se anota el coeficiente, generalmente se considera de 0.9, se emplea únicamente en caso de que la profundidad, de medición de la velocidad, haya sido superficial

**Columna 10:** proporciona la velocidad media en la franja (m/s), se obtiene según el método empleado para determinar la velocidad; si el método es de 6/10 la velocidad es la misma que en la columna 8; si es el superficial, la velocidad se obtiene del producto de las columnas 8 y 9; si es el método 2/10 y 8/10 la velocidad media, se obtiene promediando las dos velocidades que se tienen en la columna 8 para la misma vertical.

Desde la columna 11 hasta la 14 se tiene información respecto a la franja vertical

**Columna 11:** anchura de la franja (m), se obtiene restando al límite final el inicial, los cuales se encuentran en la columna uno, antes y después, de la distancia al origen, correspondiente al aforo.

**Columna 12:** profundidad media en la franja, se obtiene mediante la expresión:

$$Pm = \frac{a + 2b + c}{4} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

donde:

$Pm$  = Profundidad promedio en la franja (m)

$a$  = Profundidad límite inferior (m)

$b$  = Profundidad de la vertical sobre la que se realiza el aforo (m)

$c$  = Profundidad límite superior (m)

**Columna 13:** área de la franja ( $m^2$ ), resulta del producto de las columnas 11 y 12

**Columna 14:** gasto parcial ( $m^3/s$ ) o gasto que pasa a través de la franja considerada, se obtiene multiplicando las columnas 10 y 13

Finalmente, el área de la sección transversal se obtiene sumando los valores de la columna 13 y el gasto total a través de esta sección, sumando la columna 14, en el ejemplo el área ( $A$ ) es  $93.924 m^2$  y el gasto ( $Q$ )  $230.43 m^3/s$ .

Tabla 6.3 Formato de registro de aforo con molinete

Registro de aforo con molinete																
Sondeos		Molinete						Velocidad				Sección			Gasto parcial	Observaciones
Distancia del punto inicial	Profundidad	Profundidad de la observación	Numero de revoluciones	Tiempo en segundos	Revoluciones por segundo	En el punto	Coficiente	Media del tramo	Anchura	Profundidad media	Area	Gasto parcial				
m	m	Método	m			m/s	m	m	m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
26.40	0.03	O	A	M	D											
28.20	0.40	SUP	SUP	30	40	0.523	0.90	0.471	3.60	0.335	1.206	0.568				
30.00	0.51	6/10														
33.00	0.72	6/10	0.43	40	41	0.677	0.677	0.677	6.00	0.723	4.335	2.955				
36.00	0.94	6/10														
39.00	1.06	6/10	0.64	50	42	0.824		0.824	6.00	1.048	6.285	5.179				
42.00	1.13	6/10														
45.00	1.24	6/10	0.74	70	46	1.050		1.050	6.00	1.248	7.485	7.859				
48.00	1.38	6/10														
51.00	1.55	6/10	0.93	80	40	1.377		1.377	6.00	1.530	9.180	12.641				
54.00	1.64	6/10														
57.00	1.73	6/10	1.04	100	40	1.718		1.718	6.00	1.710	10.260	17.627				
60.00	1.74	6/10														
63.00	1.76	6/10	1.06	100	42	1.637		1.637	6.00	1.765	10.590	17.336				
66.00	1.80	6/10														
69.00	1.83	6/10	1.10	90	42	1.474		1.474	6.00	1.835	11.010	16.229				
72.00	1.88	6/10														
75.00	2.00	6/10	1.20	90	44	1.403		1.403	6.00	1.913	11.835	16.605				
78.00	2.01	6/10														
81.00	2.07	6/10	1.24	80	43	1.282		1.282	6.00	2.055	12.330	15.807				
84.00	2.07	6/10														

Tabla 6.3 Formato de registro de aforo con molinete (continuación)

Sondeos		Registro de aforo con molinete										Observaciones			
		Molinete				Velocidad			Sección				Gasto parcial		
Distancia del punto inicial	Profundidad	Profundidad de la observación		Numero de revoluciones	Tiempo en segundos	Revoluciones por segundo	En el punto	Coefficiente	Media del tramo	Anchura	Profundidad media	Área			
m	m	Método	m				m/s	m	m	m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
87.00	1.92	6/10	1.15	70	44		1.093		1.093	6.00	1.948	11.685	12.712		
90.00	1.88	6/10													
93.00	1.72	6/10	1.03	60	44		0.942		0.942	6.00	1.745	10.470	9.863		
96.00	1.66	6/10													
99.00	1.63	6/10	0.98	60	43		0.964		0.964	6.00	1.618	9.705	9.356		
102.00	1.55	6/10													
105.00	1.45	6/10	0.87	60	43		0.964		0.964	6.00	1.433	8.395	8.286	Municipio	
108.00	1.28	6/10												Estado	
111.00	1.15	6/10	0.69	40	41		0.677		0.677	6.00	1.160	6.960	4.712	Calculó	
114.00	1.06											131.931	157.775	Revisó	
		Fecha:													
		Molinete (Marca, tipo y número):													
Estación:		Número de la tabla de:													
Corriente:		Observador:													
Cuenca:		Principio (HH:MM)													
		Lect. esc:													
		Término (HH:MM)													
		Lect. esc:													

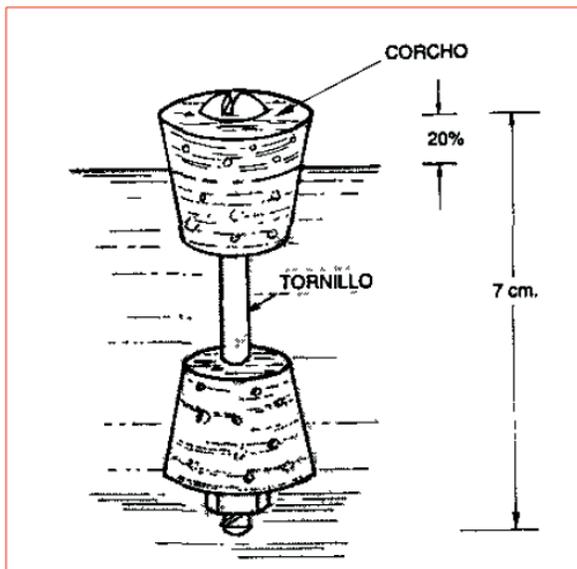
## 6.4. AFORO CON FLOTADOR

Los flotadores son cuerpos u objetos más ligeros que el agua y que conducidos en suspensión por la corriente, adquieren una velocidad similar a la superficial. Pueden ser: un trozo de madera, una pelota de esponja, etcétera; estos cuerpos no deben ser muy ligeros, pues la velocidad del viento afecta su recorrido, esto ocurre principalmente en los flotadores superficiales, por lo que es preferible el uso de los flotadores semisumergidos, que son los que van ligeramente abajo de la superficie del agua.

En este método se utiliza un flotador, reloj (cronómetro), cinta métrica y regla graduada para medir las distancias y áreas hidráulicas.

En algunos puntos de aforo, se han utilizado con éxito flotadores hechos con dos corchos lastrados con un tornillo (Ilustración 6.6). Se le agrega un peso para que no flote totalmente. El tamaño de este flotador varía de 7 a 10 cm y se lastra de manera que sólo sobresalga del orden de un 20 por ciento. Para hacerlos se les pinta de color naranja o amarillo, debido a la cintura que se forma entre los corchos, se rescatan con facilidad.

Ilustración 6.6 Flotador semisumergido de corcho lastrado



Para estimar la velocidad, se elige un tramo del cauce, para el recorrido de los flotadores, instalando postes, balizas o escalas para limitar el tramo, referidas a un mismo punto de comparación, con el fin de que si se desea conocer la pendiente se haga con facilidad. Las marcas sirven para definir las secciones de inicio y final del tramo, cuya longitud conviene que sea un número cerrado: 5, 10, 15, 20, 30 metros, para facilidad de cálculo.

Instaladas las marcas, se arroja el flotador, al menos tres metros, aguas arriba de la marca inicial, para que adquiera la velocidad de la corriente antes de llegar a ésta; en el momento de pasar por la marca inicial se comienza a contar el tiempo que tarda en llegar a la marca colocada al final del tramo.

La velocidad se estima dividiendo la distancia del tramo entre el tiempo que tarda el flotador en recorrerla. Este valor tiene que corregirse por un factor de reducción, ya que en observaciones realizadas se indica que la velocidad media fluctúa desde 85 hasta 95 por ciento de la velocidad superficial, aceptándose el promedio 90 por ciento. El área de la sección transversal de la corriente, se determina por sondeos, según lo descrito anteriormente.

Finalmente, el gasto se obtiene mediante:

$$Q = 0.9 AV \quad \text{Ecuación 6.4}$$

donde:

- $Q$  = Gasto ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $A$  = Área de sección transversal ( $\text{m}^2$ )
- $V$  = Velocidad en el tramo ( $\text{m}/\text{s}$ )
- $0.9$  = Factor de reducción

Una ventaja de este método es la forma práctica y sencilla de su aplicación, además de que no requiere construcción de estructuras especiales, su costo es bajo y la aproximación de las mediciones es buena. En corrientes turbulentas no se obtienen buenos resultados debido a los cambios bruscos que ocurren en este tipo de escurrimiento.

Ejemplo: se tiene un canal de sección trapezoidal con las características geométricas indicadas, determinar el gasto.

Plantilla	$b = 1.00 \text{ m}$
Espejo del agua	$B = 1.90 \text{ m}$
Tirante	$d = 0.65 \text{ m}$
Distancia	$L = 10 \text{ m}$
Tiempo	$T = 14.5 \text{ s}$

Procedimiento: se toma un tramo del canal lo más recto posible y se mide con una cinta métrica una distancia de 10 m, luego con un reloj o cronómetro se toma el tiempo que tarda el corcho o flotador en recorrer la distancia antes medida. El área se obtiene multiplicando el tirante ( $d$ ) por el promedio de las bases  $A = (B+b)/2$ . La velocidad se obtiene dividiendo la longitud entre el tiempo ( $V=L/T$ ). Sustituyendo  $A$  y  $V$  en la ecuación, se encuentra el gasto ( $Q$ ).

a) Área de la sección trapezoidal:

$$A = \left[ \frac{B+b}{2} \right] d$$

$$A = \left[ \frac{1.9+1.0}{2} \right] 0.65$$

$$A = 0.9425 \text{ m}^2$$

b) Velocidad del flujo:

$$v = \frac{d}{t} = \frac{10}{14.5} = 0.6897 \text{ m/s}$$

c) Gasto que pasa por el canal:

$$Q = 0.9 A v$$

$$Q = 0.9(0.9425)(0.6897)$$

$$Q = 0.585 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 585 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

## 6.5. MÉTODO DE RELACIÓN ESCALA-GASTO

Este método consiste en seleccionar un tramo de río o canal en el cual permanecen constantes sus características hidráulicas; no debe cambiar el área transversal de la sección para un mismo gasto; ni variar los niveles por abrir y cerrar compuertas aguas abajo. Seleccionado el tramo se realizan aforos con molinete calibrado y personal especializado, determinando para cada aforo el tirante o profundidad del agua y el gasto total de la corriente. Los aforos deben realizarse en el rango de gastos de operación del río o del canal y en cantidad suficiente para minimizar el error del muestreo. En la práctica es difícil cambiar los gastos cuando se entrega agua a usuarios, por lo que deben efectuarse al iniciar el ciclo de riego y en el momento de llenar la red de canales.

Con los resultados de los aforos, se grafican los valores de elevación (eje vertical) vs gasto (eje horizontal) y mediante regresión puede obtenerse la curva ajustada, como la que se muestra posteriormente.

### 6.5.1. AFORO CON LIMNÍMETRO

El limnómetro (Ilustración 6.7) consiste de una escala graduada, pintada en madera, concreto o metal; se instala verticalmente en el fondo del río y se debe ubicar en un lugar bien visible, de manera que se obtienen las lecturas desde un

punteo u orilla; esta lectura proporciona la profundidad o tirante del agua. Este sistema permite obtener gasto instantáneo. Cuando se trata de canales revestidos, las escalas se pintan sobre las paredes de los taludes.

Este método tiene problemas cuando hay efectos de oleaje y de variaciones del nivel del agua por turbulencias originadas por la rugosidad o la geometría del canal, por lo cual debe interpretarse una lectura media.

Ilustración 6.7 Limnímetro o escala

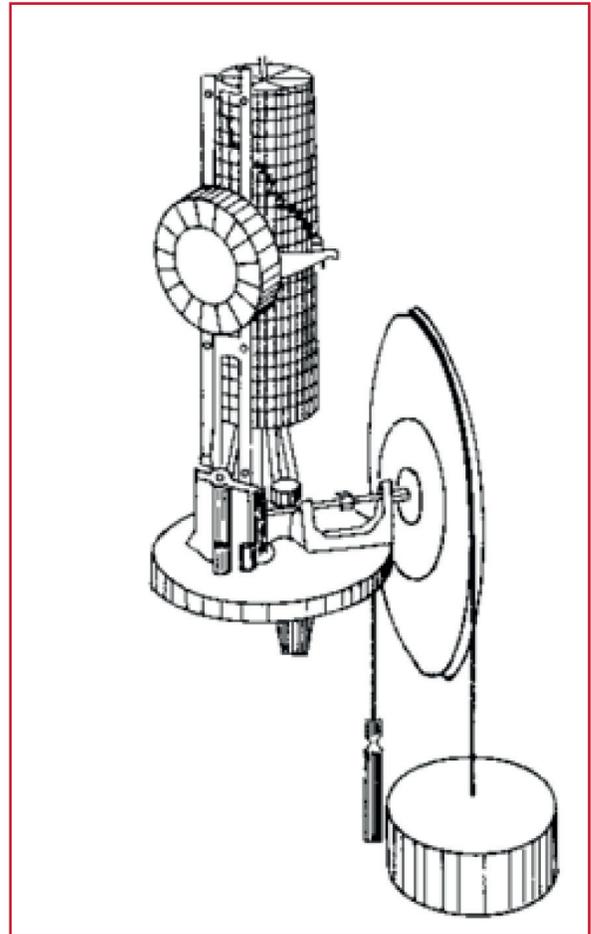


### 6.5.2. AFORO CON LIMNÍGRAFO

Los limnímetros automáticos o limnógrafos, tienen un flotador que se coloca sobre la superficie del agua, el cual está ligado a una aguja que marca sobre el papel de registro las variaciones de los

niveles de agua que le transmite dicho flotador. El papel está montado sobre un cilindro, provisto de un sistema de relojería que le permite desplazarse de izquierda a derecha, obteniéndose registros de cambios de elevación de la superficie del agua contra el tiempo (Ilustración 6.8).

Ilustración 6.8 Limnógrafo convencional, de flotador contrapeso y papel



El limnógrafo se instala dentro de una caseta junto a la corriente para lo cual se construye un pozo con un tubo que se conecta con el canal o una zanja en la orilla del canal por aforar. Esto evita que el oleaje o la turbulencia del agua estén haciendo variar fuertemente el flotador del sistema y permita lecturas más estables (Ver Ilustración 6.9).

Ilustración 6.9 Pozo Tranquilizador para limnógrafo



### 6.5.3. LOS SENSORES DE NIVEL DE AGUA

Un sensor de nivel de agua es un dispositivo que determina o percibe de forma automática, la posición vertical de la superficie del agua. En realidad, los sensores de nivel son por lo general no es un solo dispositivo, pero una combinación de dos o más componentes que trabajan juntos para detectar la posición del nivel de agua. Los dos sensores etapa más comúnmente utilizados son los sistemas de flotación impulsada y gas de purga sistemas (burbujeo). Otros sensores de nivel menos utilizados comúnmente son transductores de presión sumergibles, también hay métodos utilizados son sistemas sin contacto con el agua (láser) acústica, radar y óptico. Las siguientes secciones describen los distintos instrumentos utilizados para determinar automáticamente los niveles de agua.

#### 6.5.3.1. Flotador contrapeso y potenciómetro

El medidor de flotador consiste típicamente en un flotador, una cinta graduada de acero, un contrapeso de acero inoxidable, y una polea unida a un codificador de eje análogo o SDI- 12 como se muestra en la Ilustración 6.10. La polea de flotador es típicamente un diámetro de aproximadamente 4 in (0.10 m), está ranurado en la circunferencia para dar cabida a la cinta, y está montado directamente en el eje del codificador.

El codificador de eje está conectado a una unidad electrónica donde se registran las mediciones cronometradas de nivel de la superficie libre. Cuenta con un brazo ajustable que sirve para calibrar la lectura del nivel del agua. La cinta está conectada al flotador por una abrazadera que también puede ser utilizada para realizar ajustes a la lectura de la cinta, en caso de que los ajustes son demasiado grandes para ser corregidos con la electrónica misma.

Un codificador de eje es un dispositivo flotador guiado que está conectado con un eje de la polea de un sistema de flotación básica. El codificador de eje interpreta la posición de rotación y el número de revoluciones del eje para determinar el nivel del agua. Codificadores de eje pueden o no pueden tener lecturas visuales para indicar la fase de agua. Además, codificadores de eje son programables para transmitir el nivel a una plataforma colectora de datos basándose en las instrucciones especificadas por el usuario. Algunos codificadores de eje tienen su propio sistema de grabación interna, tal como una tarjeta de memoria de computadora.

Hay varios fabricantes, los cuales hacen varios modelos de codificadores de eje que cumplan las normas de exactitud del USGS. Las ilustraciones siguientes, muestran codificadores que es-

tán diseñados para transmitir niveles de agua a una unidad electrónica colectora de datos.

### 6.5.3.2. Medidores de burbujeo

El medidor de burbuja se basa en determinar las diferencias de presión. Un gas, tal como nitrógeno o aire, se ve obligado (burbujeado) a través de un orificio fijo instalado en la corriente. La presión del agua en el orificio se transmite a través del tubo de gas a un sensor de presión ubicado en una caseta donde se convierte a una medición de nivel de la corriente. Medidores de burbujas utilizados por primera vez en la década de 1960, utilizan un manómetro de mercurio para medir diferencias de presión. Sin embargo,

debido a la naturaleza peligrosa de mercurio, estos manómetros fueron prohibidos a finales de 1980 y todos los manómetros de mercurio existentes utilizados por el USGS fueron retirados.

Actualmente los medidores de burbujas utilizan algún tipo de transductor de presión no sumergible como el método de medición de las diferencias de presión. Cuentan con una serie de diferentes transductores de presión que cumplen con los requisitos de precisión del USGS.

Dos de los componentes esenciales de un sistema de burbuja, además de los sensores de presión, son un sistema de gas - purga, y un orificio de burbuja - nivel. Estos se describen en los siguientes párrafos.

Ilustración 6.10 Sistemas automáticos de limnigrafo con flotador contrapeso y registrador electrónico



### 6.5.3.3. Sistemas de purga de gas

El sistema de purga de gas es un componente crítico de un sistema de burbujas de gas. Está diseñado para alimentar un gas, generalmente nitrógeno, a través de un sistema de válvulas, reguladores, y la tubería a un orificio situado en una elevación fija en la corriente. La formación continua de burbujas en el orificio transmite la carga de presión (profundidad del agua sobre el orificio) causada por el nivel de flujo, por medio del tubo de conexión, al sensor de presión ubicado en la caseta de resguardo del equipo.

Varios sistemas de gas de purga están disponibles para su uso en medidores de burbujas. La USGS comúnmente usa el sistema de gas de purga de. Otros sistemas de gas de purga incluyen sistemas que auto contiene el sistema.

Un sistema burbujeador se muestra en la Ilustración 6.11. El sistema consiste en el regulador diferencial, el conjunto de mira de alimentación y válvula de aguja, y diversas válvulas y tubos. El conjunto de mira de alimentación y válvula

de aguja incluye un depósito de aceite, donde la tasa de burbujas se puede ajustar visualmente. Un tubo conduce a la corriente y el orificio, y otro tubo conduce al sensor de presión. El sistema de burbujeo Conoflow es un método comprobado que cumple con los estándares de exactitud del USGS.

### 6.5.3.4. Radar

El Radar es un método de medición de distancia que se ha utilizado desde antes de la Segunda Guerra Mundial. Una frecuencia de radio se propaga en un campo electromagnético, y por lo tanto, se lleva a cabo a la velocidad de la luz. Las ventajas de radar son que la señal es generalmente inmune a las condiciones climáticas, como la nieve y la lluvia, y la onda de radio utilizado para esta aplicación es inofensiva para los seres humanos y la vida silvestre.

El rango útil de detección del nivel al agua es de distancia cercana hasta 20 m y puede ser mayor, dependiendo del instrumento radar. La

Ilustración 6.11 Unidad de sensor de nivel por burbujeo



tecnología de radar para el uso de medición de los niveles de agua es todavía nueva, aunque hay disponibles varios instrumentos desarrollados comercialmente. También, como en todas las transmisiones de radio-frecuencia.

Varios sensores de radar están disponibles comercialmente para su uso en arroyos y embalses. Sensores de radar son unidades generalmente autónomas que tienen típicamente un dispositivo de transmisión corniforme y circuitos electrónicos. Los sensores de radar están programados internamente para convertir reflexiones de radar de frecuencia de las unidades de distancia a la superficie del agua a escala.

Para utilizar estos sensores se requiere una unidad electrónica que almacene los datos y energía (batería). Estas unidades se montan directamente sobre la corriente o presas en los puentes o una estructura estable. (Ver Ilustración 6.12)

## 6.6. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AGUA POR EFECTO DOPPLER

Desde los años 50' hasta los años 70', se han desarrollado equipos acústicos basados en el efecto Doppler para detectar objetos que se mueven en el mar, estudiar el flujo de la sangre en las arterias y medir las corrientes en el océano. A partir

Ilustración 6.12 Sistema de Radar para determinar nivel de superficie libre

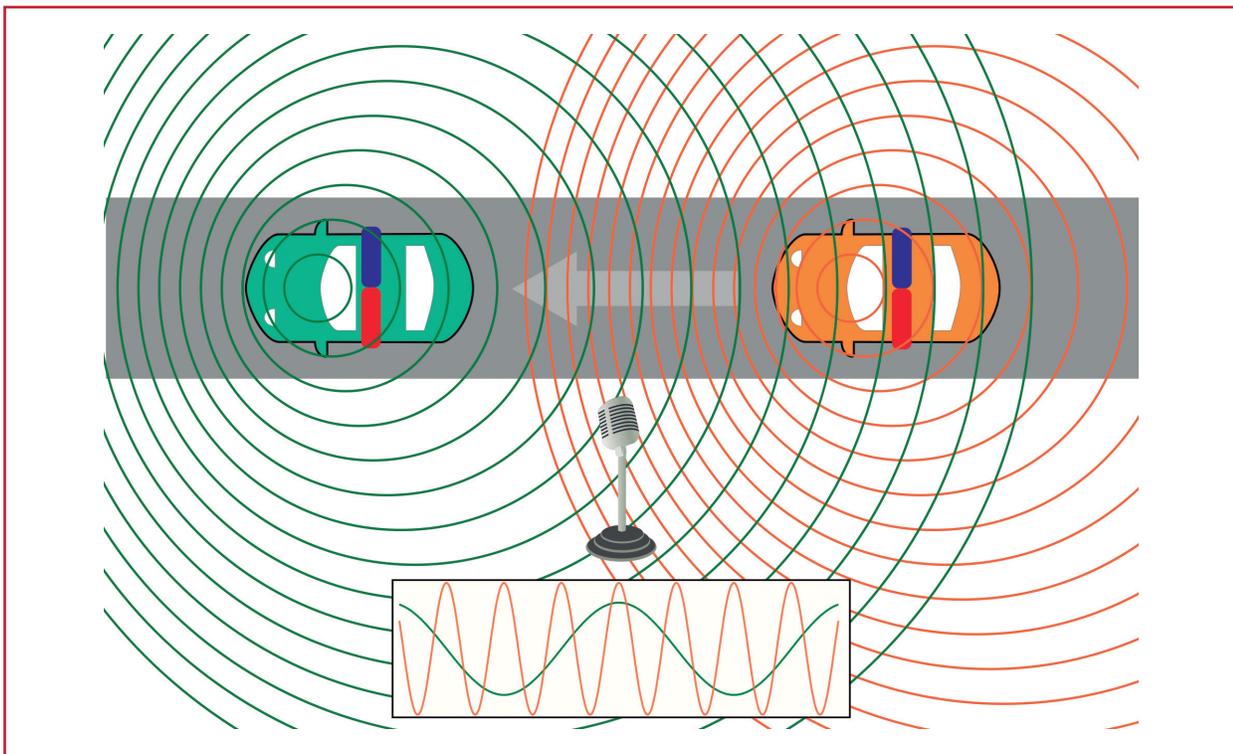


de los años 80', se empezaron a usar equipos similares para aforar en canales o ríos (Tabla 6.4): por un lado, los equipos móviles (VD y PD) son una alternativa al aforo clásico con molinetes en canales; y por otro lado, los equipos fijos (AD) son una alternativa al aforo por medio de sistemas automáticos clásicos.

### 6.6.1. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Cuando un objeto emite un sonido con una cierta frecuencia y este se acerca, se percibe un sonido con una frecuencia mayor (más aguda); al revés, si el objeto se aleja, se percibe un sonido con una frecuencia menor (más grave). Por ejemplo, esto ocurre cuando se escucha el sonido de una ambulancia que se acerca y luego se aleja. Este fenómeno se conoce como efecto Doppler (Ilustración 6.13).

Ilustración 6.13 Esquema del principio del efecto Doppler



Nota: En este documento, se habla del efecto Doppler para ondas acústicas. Sin embargo, también se presenta un efecto Doppler cuando un objeto que emite ondas electromagnéticas (luz) se acerca o se aleja.

### 6.6.2. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AGUA POR EFECTO DOPPLER

Básicamente, los equipos Doppler para aforar cuentan con un arreglo de sensores de velocidad, que envían pulsos de sonido con una cierta frecuencia (ultrasonido) en el agua y miden la frecuencia del eco enviado por partículas que están normalmente presentes en suspensión en el agua y que se mueven con ella. En este caso, se puede determinar la componente radial de la velocidad (promedio) de un grupo de partículas con base al efecto Doppler (Ilustración 6.14):

Tabla 6.4 Clasificación de los equipos acústicos basados en el efecto Doppler que se usan para aforar en canales

Tipo de uso	Tipo de tecnología	Acrónimo usado en este documento
Equipos móviles	Medidor de velocidad (puntual)	VDVelocímetro Doppler
		PD Perfilador Doppler
Equipos fijos	Perfilador de velocidad	ADL Lateral
		ADF de Fondo

$$vr = \frac{c}{2} \left( \frac{f - f_0}{f_0} \right) \quad \text{Ecuación 6.5}$$

donde:

- $vr$  = Componente radial de la velocidad de las partículas, es decir, proyección de su velocidad (promedio) sobre el eje que pasa entre estas partículas y el sensor de velocidad (m/s)
- $c$  = Velocidad del sonido en el agua (m/s)
- $f$  = Frecuencia del eco enviado por las partículas (Hz)
- $f_0$  = Frecuencia del sonido emitido por el sensor de velocidad (Hz)

Nota: dicha fórmula es para el caso de una onda de sonido enviada por un observador inmóvil y re-enviada por un objeto en movimiento.

La velocidad (promedio) de las partículas ( $v$ ) se relaciona geoméricamente con su componente radial ( $vr$ ) de la siguiente manera (Ilustración 6.14):

$$v = \frac{vr}{\cos(\theta)} \quad \text{Ecuación 6.6}$$

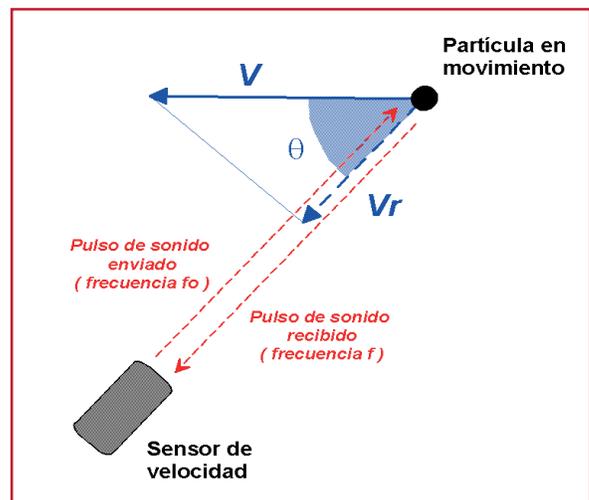
donde:

- $vr$  = Velocidad promedio de las partículas que reflejan el sonido (m/s)
- $c$  = Velocidad del sonido en el agua (m/s)
- $\theta$  = Ángulo entre la dirección del movimiento de las partículas y el eje que pasa por estas partículas y el sensor de velocidad (-)

Se deduce:

$$v = \frac{c}{2 \cos(\theta)} \left( \frac{f - f_0}{f_0} \right)$$

Ilustración 6.14 Esquema del funcionamiento de un sensor acústico basado en el efecto Doppler



El sensor envía pulsos de sonido con una cierta frecuencia en el agua y mide la frecuencia del eco enviado por partículas que se mueven con ella. Con esta información, el sensor determina la componente radial de la velocidad de estas partículas.

Por lo anterior, se puede concluir lo siguiente acerca de la estimación de la velocidad del agua por medio de los equipos acústicos basados en el efecto Doppler:

1. Tal como se puede apreciar en la ecuación, la estimación de la velocidad depende del término  $(f - f_0)/f_0$ , que equivale al cambio de frecuencia en la señal acústica. Básicamente, es lo que mide el sensor de velocidad
2. Los equipos Doppler asumen que la velocidad del agua es la de las partículas en suspensión que se mueven con ella. La señal acústica re-enviada por las partículas en suspensión es bastante "ruidosa". Por lo tanto, los equipos Doppler cuentan con sistemas sofisticados para procesar dicha señal y estimar a partir de ella la velocidad del agua. En la práctica, hay suficiente partículas en suspensión en el agua de los canales de riego, para que los equipos Doppler puedan trabajar adecuadamente. Además, y al contrario de otros equipos que miden la velocidad del agua (como son: los Aforadores de Tiempo de Travesía), los equipos Doppler pueden usarse -hasta un cierto límite- en aguas con altas concentraciones de partículas en suspensión
3. La estimación de la velocidad depende del término  $\cos(\theta)$  = orientación del sensor de velocidad con respecto al flujo. Al contrario de otros equipos que miden la velocidad del agua (como son: los molinetes), los equipos Doppler son sensibles a la orientación del flujo. En la actualidad, la mayoría de los equipos Doppler actuales cuentan con un arreglo de sensores de velocidad (entre 2 y 4), que les permite determinar las componentes del flujo en 2 o 3 dimensiones del espacio. Pero para poder hacerlo, deben ser orientados adecuadamente: cuando se afora en un canal (Ilustración 6.15, Ilustración 6.16), se orientan los equipos de tal forma que determinan las componentes de la velocidad del agua con respecto a un plano vertical y longitudinal (caso de los VD, PD y ADF) o con respecto a un plano horizontal y perpendicular al eje principal del canal (caso de los ADL)
4. La estimación de la velocidad depende del término  $c$  = velocidad del sonido en el agua. En la práctica, se puede estimar la velocidad del sonido en el agua con una tolerancia suficiente (del orden de  $\pm 0.25$  por ciento), si se mide la temperatura del agua con una tolerancia de  $\pm 1$  °C y si se estima la salinidad del agua con una tolerancia de  $\pm 1$  g/L. Por lo tanto, la mayoría de los equipos Doppler actuales cuentan con una sonda de temperatura, que mide la temperatura del agua cerca del instrumento; se estima la velocidad del sonido en el agua a partir de esta información (asumiendo que la salinidad del agua varía poco)

Ilustración 6.15 Orientación de los equipos Doppler móviles

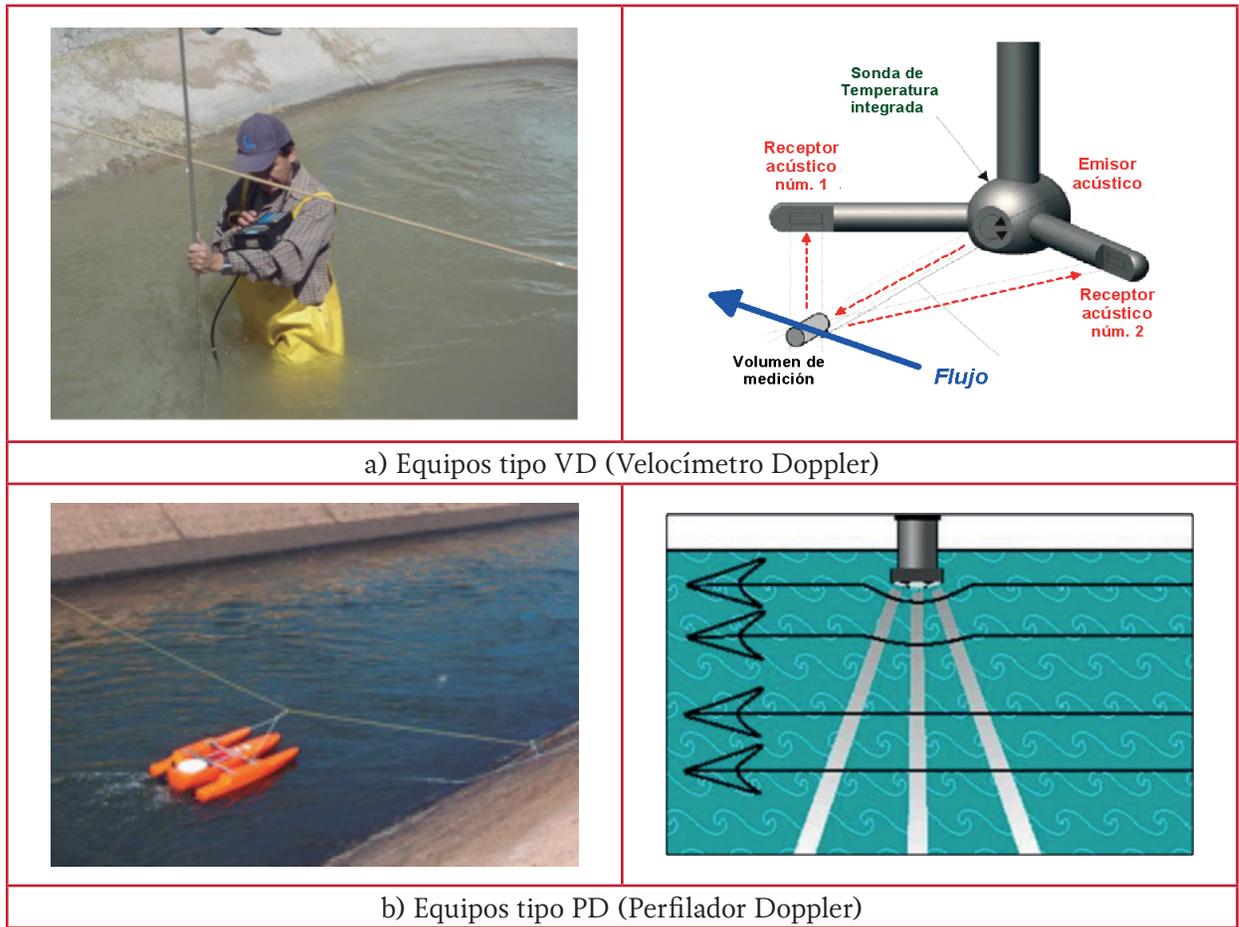
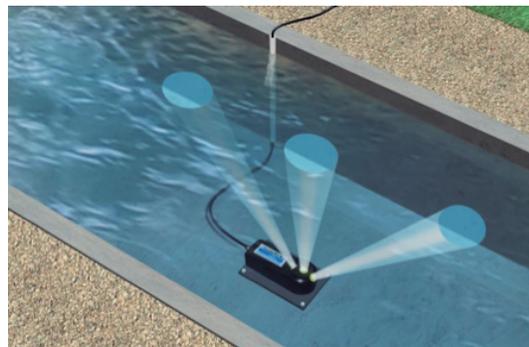
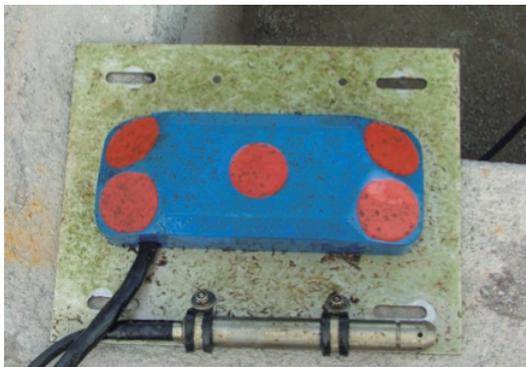


Ilustración 6.16 Orientación de los equipos Doppler fijos



a) Equipos tipo ADL (Aforador Doppler Lateral)



b) Equipos tipo ADF (Aforador Doppler de Fondo)

### 6.6.3. DETERMINACIÓN DE PERFILES DE VELOCIDAD

Los equipos Doppler que miden la velocidad del agua "puntualmente" (VD) tienen un arreglo geométrico de sus sensores de velocidad tal, que solo se detecta el movimiento de las partículas en suspensión dentro de un cierto volumen de agua. Para poder determinar perfiles de velocidad del agua, los otros equipos Doppler (PD y AD) no solo miden el cambio de frecuencia en la señal acústica re-enviada por un grupo de partículas en suspensión, sino también el tiempo que tarda esta señal en ir y regresar.

Cada sensor de velocidad envía pulsos de sonido en el agua y detecta los ecos enviados por partículas en suspensión. Enseguida, el sensor determina la componente radial de la velocidad de estas partículas (con base al cambio de frecuencia del sonido) y su distancia (con base al tiempo que tardan los ecos para llegar al sensor).

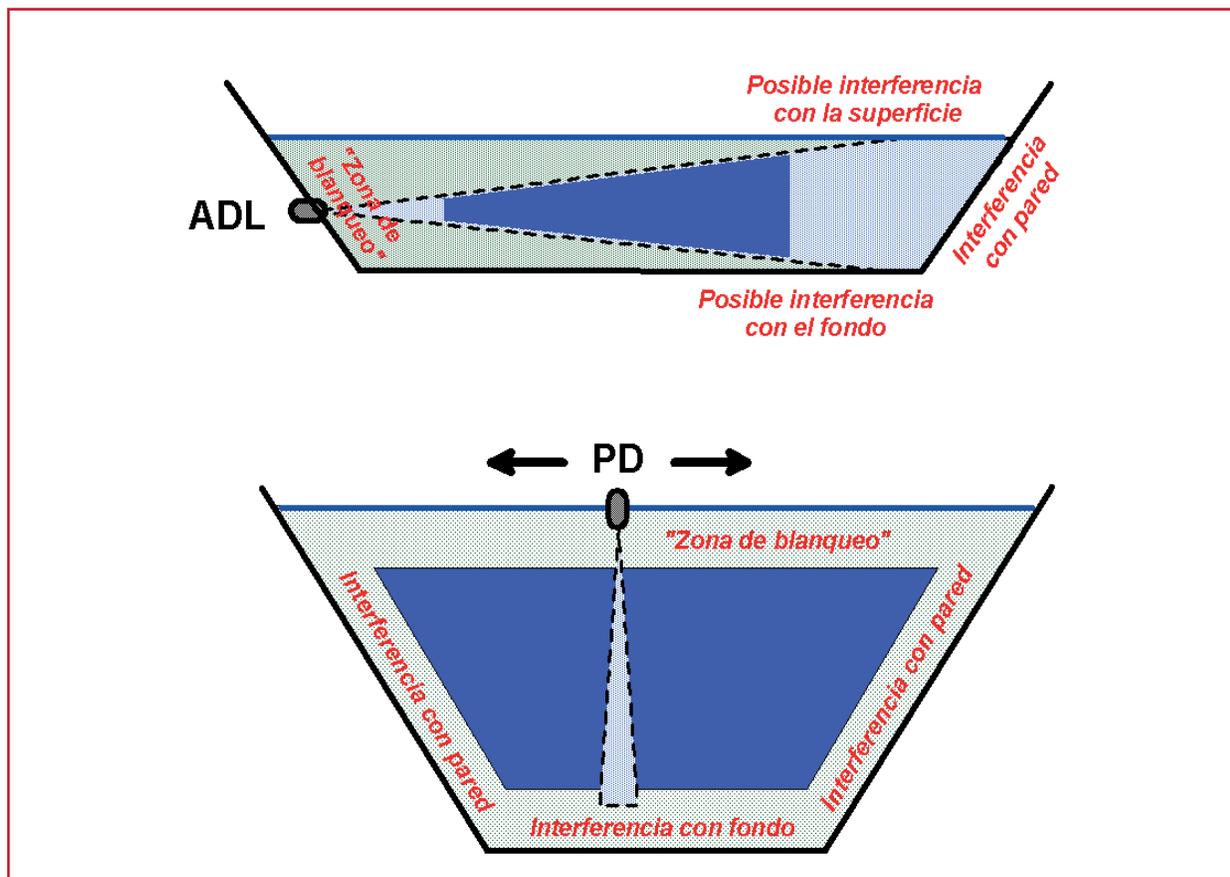
Por lo general, los perfiladores Doppler cuentan con un arreglo de sensores de velocidad, dos por ejemplo. Cada sensor determina un perfil de velocidades radiales en una cierta dirección; en seguida, se utiliza dicha información para calcular un perfil de velocidad promedio (asumiendo que

el patrón de flujo no cambia mucho en el tramo de canal).

Ahora bien, la forma como los equipos Doppler determinan perfiles de velocidad en el agua tiene ciertas limitantes:

1. En la práctica, la señal que reciben los equipos proviene de muchas partículas en suspensión que se encuentran a varias distancias del equipo; por lo tanto, es una señal compleja, que requiere de algoritmos sofisticados para procesarla.
2. Un error sobre la estimación de la velocidad del sonido en el agua ( $c$ ) conducirá a un error proporcional sobre las distancias ( $x$ ) para las cuales se estima la velocidad del agua.  
Nota: este tipo de error puede tenerse, cuando el agua presenta estratificaciones (cambios de temperatura y/o de salinidad muy pronunciados)
3. No se puede determinar un perfil de velocidad demasiado cerca de un equipo Doppler (Ilustración 6.17). Esto se debe a que el tiempo que tarda el sonido para ir y regresar es tan corto, que el equipo no puede determinarlo. En la práctica, la zona cercana a los equipos donde no se puede determinar un perfil de velocidad (o "zona de blanqueo") mide entre 0.1 y 0.5 m (dependiendo de las especificaciones del equipo)
4. Tampoco se puede determinar un perfil de velocidad muy lejos de un equipo Doppler (Ilustración 6.17). Por un lado, esto se debe a que a partir de una cierta distancia, el eco re-enviado por las partículas en suspensión es demasiado tenue para poder ser detectado; esto depende de la frecuencia de los pulsos de sonido enviados por el equipo (a menor frecuencia, la distancia hasta donde se puede medir la velocidad es mayor). Por otro lado, no se puede medir la velocidad del agua demasiado cerca del fondo de un canal, o de una pared, o de la superficie del agua, porque en este caso, las ondas acústicas que viajan en el agua interfieren con las interfaces sólidas o con la atmósfera.  
Nota: por lo anterior, debe tenerse un especial cuidado en no instalar un perfilador horizontal (ADL) demasiado cerca del fondo de un canal o demasiado cerca del tirante mínimo de operación
5. En la práctica, los equipos Doppler determinan perfiles de velocidad en un canal a partir de un conjunto de sensores de velocidad que no exploran el mismo volumen. Por lo tanto, los equipos Doppler deben usarse en tramos de canal suficientemente uniformes, para poder asumir que los perfiles de velocidad (transversales o verticales) no cambian mucho a lo largo del tramo

Ilustración 6.17 Partes de un canal donde los equipos Doppler pueden medir la velocidad del agua



#### 6.6.4. DETERMINACIÓN DEL GASTO CON EQUIPOS DOPPLER

Fundamentalmente, los equipos Doppler para aforar en canales miden la velocidad del agua en un cierto volumen. En este caso, se pueden usar para determinar el gasto con base a dos métodos:

- **Método "área - velocidad":** el gasto ( $Q$ ) se calcula como la suma de todos los gastos elementales ( $Q_i$ ) que cubren el área de una sección del canal; cada gasto elemental es el producto de la componente longitudinal de velocidad ( $V_i$ ) multiplicado por el área asociado a esta velocidad ( $A_i$ ). Los equipos de tipo  $VD$  y  $PD$  estiman el gasto con base a este método. En este caso, no basta medir la ve-

locidad del agua en distintas partes del canal; también debe medirse el tirante y la geometría de la sección. Como se verá a continuación, los equipos  $PD$  cuentan a menudo con sensores adicionales para poder hacerlo (Ilustración 6.18).

- **Método de la "velocidad índice":** el gasto ( $Q$ ) se calcula como el producto del área hidráulica ( $A$ ) por la velocidad media en el canal ( $V$ ). Asumiendo que la sección del canal no cambia con el tiempo (es decir, no hay problemas de azolve, inestabilidades de los taludes, o crecimiento de malezas acuáticas), se determina el área hidráulica conociendo la geometría de la sección y midiendo el tirante ( $y$ ). La velocidad media se determina a partir de una ecuación empírica (que se

determina con una calibración en sitio) que usa la velocidad medida (o "velocidad índice") por el equipo Doppler en una cierta porción del canal ( $V_m$ ) y eventualmente el tirante medido en el canal ( $y$ ). Por lo general, se utiliza este método cuando se trabaja con un AD. En este caso, no basta medir la velocidad en una cierta porción del canal; también debe estimarse el área hidráulica. Para poder hacerlo, los equipos tipo AD cuentan con un sensor de nivel.

Los equipos Doppler para aforar en canales son equipos sofisticados, que cuentan con múltiples sensores y circuitos electrónicos que procesan la señal recibida por estos sensores (Ilustración 6.18). Sin embargo, no son tan difíciles de usar, porque vienen con programas de cómputo bastante amigables para poder manejarlos. Cuando

se utiliza un programa de cómputo para calcular el gasto a partir de los datos proporcionados por un equipo Doppler, debe reportarse el nombre del software y su versión.

#### 6.6.5. TECNOLOGÍA "VD" (VELOCÍMETRO DOPPLER)

Un VD está constituido por dos o tres sensores que envían ultrasonidos en el agua, un cable eléctrico y un circuito electrónico para poder programar el equipo y adquirir datos. El equipo mide la velocidad a unos 10 cm de distancia de sus sensores y en un volumen del orden de algunos  $\text{cm}^3$ .

Para aforar con un VD, se requiere de una varilla para poder sujetar el equipo y orientarlo (Ilustración 6.19).

Ilustración 6.18 Los equipos Doppler para aforar son equipos que cuentan con múltiples sensores



Ejemplos de equipos de tipo PD

Ilustración 6.19 Equipo de tipo VD y forma de sujetarlo



#### 6.6.5.1. Forma de aforar y comparación con otras técnicas

El aforo con un VD es similar a un aforo desde una varilla con molinete: se divide la sección del canal en una sucesión de dovelas vertica-

les, donde se mide la velocidad a ciertas profundidades (por ejemplo, una, dos o tres profundidades). En este caso, se requiere medir el ancho de las dovelas (con una cinta) y el nivel del agua en cada dovela, con una varilla (Tabla 6.5).

Tabla 6.5 Comparación entre la tecnología VD y el aforo con molinete desde una varilla

<p><b>Principales ventajas del VD</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El VD no requiere de una calibración periódica; de hecho, viene ajustado de fábrica y no tiene partes móviles.</li> <li>• El VD mide la dirección del flujo del agua</li> <li>• El VD puede programarse para calcular automáticamente el gasto.</li> </ul>
<p><b>Principales desventajas del VD</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El VD normalmente solo se usa para canales someros (profundidad menor a 3 m).</li> <li>• Un VD es aproximadamente 3 veces más caro que un buen molinete.</li> <li>• Solo el fabricante puede reparar un VD dañado</li> </ul>
<p><b>Requisitos comunes</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere conocer la geometría del canal, el tirante y la posición del espejo del agua.</li> <li>• Se debe realizar una serie de mediciones de velocidad a lo largo del canal (típicamente, se recomienda definir entre 20 y 30 dovelas); cada lectura tarda entre 30 y 60 segundos</li> <li>• Es difícil aforar con una varilla, cuando la velocidad del agua es mayor a 2 m/s.</li> </ul>

#### 6.6.5.2. Uso y mantenimiento de los equipos

- Selección del tramo de canal para aforar: al igual que cualquier otra técnica basada en el método de "área - velocidad", es aconsejable aforar en un tramo de canal con las siguientes características:
  - Tramo recto y con una geometría bien definida
  - Tramo donde el flujo es uniforme y donde las líneas de flujo son paralelas al eje principal del canal (aunque este último requisito no es tan importante, como en el caso de un aforo con molinete)
- Configuración de un VD: los equipos actuales vienen con una pantalla de control y un software que permite configurarlos fácilmente. Los principales parámetros de configuración de un VD son los siguientes:
  - Tiempo de muestreo: se tendrá una medición más precisa de la velocidad del agua con un mayor tiempo de muestreo; en la práctica, se recomienda elegir un tiempo de muestreo entre 30 y 60 s
  - Salinidad del agua: por lo general, la salinidad del agua en los canales de riego es  $\approx 0.1$  g/L (o "partes por mil"). Sin embargo, debe tenerse cuidado cuando los canales transportan aguas residuales o saladas: en este caso, debe medirse la salinidad del agua y usar esta información para configurar adecuadamente el equipo Doppler
  - Temperatura del agua: normalmente, el equipo mide por sí solo este parámetro
- Distancia a la cual el equipo mide la velocidad del agua: este parámetro viene ajustado de fábrica
- Operación de un VD:
  - Ajustes preliminares: véase el manual del usuario (por ejemplo, puede ser necesario exponer los circuitos electrónicos del equipo a la presión atmosférica antes de iniciar un aforo)
  - Colocación del equipo dentro del agua: el equipo se coloca dentro del agua y se orienta por medio de una varilla similar a la que se usa para vadear con un molinete. Nuestra experiencia indica que no siempre es fácil controlar la orientación de un VD, cuando se utilizan varillas con elementos que se atornillan, o cuando el agua del canal es turbia
  - Tomar lecturas de velocidad del agua: el software de los equipos VD permite tomar sucesivamente varias mediciones de velocidad y almacenarlas en la memoria del equipo
  - Tomar mediciones complementarias: cuando se afora con un VD, se requiere tener una cinta métrica para poder medir el ancho de las dovelas y una varilla con graduaciones para poder medir el tirante en cada dovela
  - Descargar los datos: al final de un aforo, los datos almacenados en la memoria del VD pueden descargarse fácilmente hacia una computadora mediante un cable de tipo serial y un software suministrado por el proveedor del equipo
  - Calcular el gasto: el gasto puede calcularse manualmente, con base a

una hoja de cálculo similar a la que se usa cuando se afora con molinete; también puede calcularse automáticamente por medio del software de los equipos

- Mantenimiento de un *VD*:
  - El mantenimiento de los equipos es sencillo, ya que vienen ajustados de fábrica y no tienen partes móviles; en la práctica, basta cambiar las baterías cuando es necesario y limpiar con un poco de agua la superficie de los sensores de velocidad
  - Precauciones de uso: no dejar caer un equipo *VD*, no rayar la superficie de sus sensores acústicos, no dejar el equipo expuesto al sol por mucho tiempo
  - Verificación del equipo: el software de los equipos permite realizar una serie de pruebas de funcionamiento, para saber si el equipo está en buenas condiciones de uso. No intentar reparar un *VD* dañado, ya que solo el fabricante puede hacerlo

La tecnología *VD* es una alternativa al aforo con molinete desde una varilla. La precisión de los *VD* actuales es similar a la de un molinete

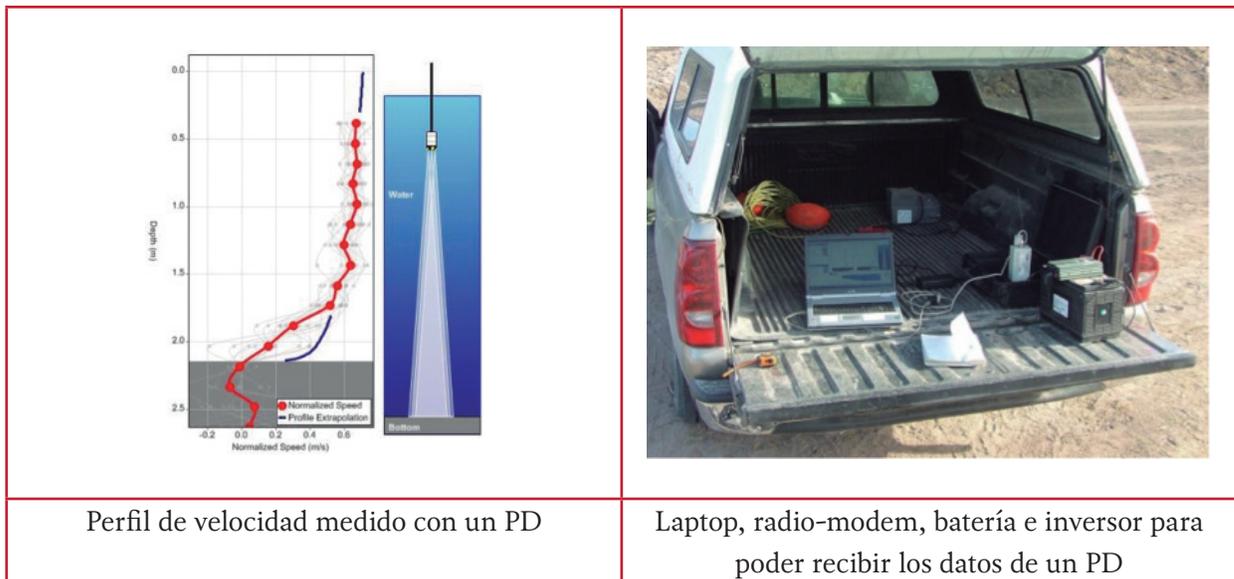
calibrado. En la práctica, un técnico que sepa utilizar una computadora y que tenga nociones de cómo aforar con molinete, puede aprender a usar un *VD* en dos días.

#### 6.6.6. TECNOLOGÍA "PD" (PERFILADOR DOPPLER)

Un PD está constituido por tres o cuatro sensores orientados hacia abajo. Dichos sensores envían ultrasonidos en el agua y luego analizan el eco emitido por partículas en suspensión que se encuentran a diferentes profundidades; de esta manera, se logra determinar perfiles verticales de velocidad del agua. Para poder desplazarlo sobre la superficie del agua, un PD está normalmente montado sobre un bote pequeño (tipo catamarán) que puede ser arrastrado por medio de un cable.

La configuración y recuperación de datos con un PD se hace por medio de una computadora portátil y de una comunicación inalámbrica (tipo radio-modem o bluetooth). Los proveedores de PD suministran programas de cómputo específicos para poder configurar sus equipos y recuperar sus datos en tiempo real, y así calcular el gasto (Ilustración 6.20).

Ilustración 6.20 Perfil vertical de velocidad generado por un PD y forma de recuperar los datos en tiempo real



#### 6.6.6.1. Forma de aforar y comparación con otras técnicas

El aforo con PD es similar a un aforo con molinete: se divide la sección del canal en una sucesión de dovelas verticales, donde se miden perfiles de velocidad. En este caso, se requiere medir el ancho de las dovelas y el nivel del agua en cada dovela: al respecto, diversos modelos de equipos PD cuentan con sensores que permiten hacerlo en forma más o menos automática (por ejemplo: ecosonda para medir el tirante, compass y brújula para corregir la orientación del equipo, sistema de rastreo de fondo o GPS para ubicar la posición del equipo en un canal).

Se puede aforar con un ADCP desde un puente de aforo o desde un cable tendido a lo largo del canal, y existen dos formas de aforar (Ilustración 6.22):

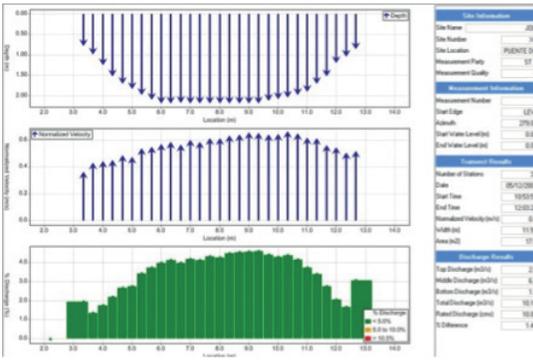
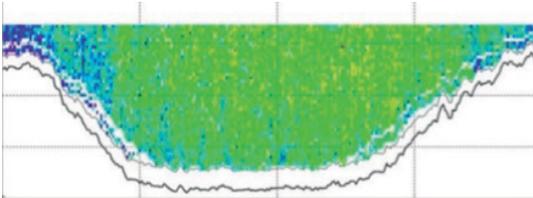
- **Modo "estacionario"**: se mide un cierto número de perfiles verticales de velocidad (típicamente, entre 20 y 30) a lo largo de una sección transversal de

canal, se calcula la velocidad media en cada dovela, y luego se calcula el gasto con esta información. Esta forma de aforar se parece mucho a un aforo clásico con molinete y es a priori la más confiable, esta descrita en la norma ISO 748: 2007.

- **Modo "dinámico"**: se mueve lentamente el equipo a lo largo de una sección de canal; el ADCP registra automáticamente su posición y determina el gasto a partir de la información adquirida. Esta forma de aforar es atractiva, porque es rápida. Sin embargo, todavía no existe una norma internacional que diga claramente cuál es su precisión. Aunque el documento de trabajo ISO/TS 24154: 2005 emite recomendaciones sobre esta forma de aforar.

Nota: a veces, no se puede aforar en modo dinámico; este problema -conocido como "problema de fondo móvil"- se presenta cuando el fondo del canal contiene muchos azolves arrastrados por el agua.

Ilustración 6.21 Formas de aforar con un PD: (a-b) Modo "estacionario" y (c-d) Modo "dinámico"

	
<p>a) Aforo desde un puente y en modo "estacionario"</p>	<p>b) Resultado del aforo con un PD en modo "estacionario"</p>
	
<p>c) Aforo con PD desde una cuerda y en modo "dinámico"</p>	<p>d) Resultado del aforo con un PD en modo "dinámico"</p>

Crterios que deben tomarse en cuenta para seleccionar un PD:

- Frecuencia de la señal enviada por los sensores acústicos: en la actualidad, cada PD emite una señal acústica con una frecuencia específica. Los equipos que trabajan con una mayor frecuencia tienen una mayor resolución espacial, mientras que los equipos que trabajan con una menor frecuencia tienen un mayor alcance. Para la mayoría de los canales de riego, se recomienda elegir

un PD que trabaja con una frecuencia entre 1 000 y 3 000 kHz

- Presencia de una brújula y de un sensor de inclinación: con estos sensores, se pueden corregir las fluctuaciones en la orientación del equipo durante las mediciones; a priori, los equipos que cuentan con estos sensores son más precisos
- Posibilidad de aforar en modo estacionario y en modo dinámico: todos los PD pueden usarse para aforar en modo estacionario (aunque a veces, debe comprarse el software adecuado), pero

algunos no permiten aforar en modo dinámico

- Sistema de posicionamiento del PD cuando se utiliza en modo dinámico: la mayoría de los PD cuentan con un sistema denominado "rastreo de fondo", que les permite posicionarse con respecto al canal. Es la opción más usada para aforar en un canal con un PD que trabaja en modo dinámico. Pero a veces, esta opción no funciona (en particular, cuando hay movimiento de lodo o plantas en el fondo del canal) y en este caso, debe considerarse la alternativa de utilizar un PD con GPS integrado
- Forma de procesar la señal acústica: ciertos PD procesan la señal según la

tecnología de "banda ancha" y los demás usan la tecnología de "banda estrecha". Hasta donde sabemos, la tecnología de banda ancha es menos ruidosa cuando se trabaja en modo dinámico. Sin embargo, no se tiene una evidencia clara de cuál tecnología es superior, cuando se pretende trabajar en modo estacionario para estimar el gasto

- Tamaño y forma del catamarán: hasta donde sabemos, no existe un bote mejor que los demás para poder aforar en cualquier sitio. Deben considerarse las dimensiones de los canales donde se pretende aforar y el tipo de corriente para elegir el bote más adecuado. Tabla 6.6

Tabla 6.6 Comparación entre la tecnología PD y el aforo con molinete desde un escandallo

<b>Principales ventajas del PD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El PD no requiere de una calibración periódica; de hecho, viene ajustado de fábrica</li> <li>• El PD puede usarse en sitios que no cuentan con un puente de aforo o con una canastilla</li> <li>• El PD mide el tirante; además, determina también la geometría del canal cuando trabaja en modo "dinámico"</li> <li>• El PD tarda menos en determinar perfiles de velocidad del agua, e integrarlos para calcular el gasto</li> <li>• El PD mide la dirección del flujo del agua</li> <li>• El PD puede programarse para calcular automáticamente el gasto</li> </ul>
<b>Principales desventajas del PD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El PD no ree usarse en sitios que no cuentan con un puente de aforo o con una canastilla</li> <li>• El PD mide el tirante; además, determina también la geometría del canal cuando trabaja en modo "dinámico"</li> <li>• El PD tarda menos en determinar perfiles de velocidad del agua, e integrarlos para calcular el gasto</li> <li>• El PD mide la dirección del flujo del agua</li> <li>• El PD puede programarse para calcular automáticamente el gasto</li> </ul>
<b>Requisitos comunes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Siempre debe medirse la posición del espejo de agua en ambos márgenes del canal</li> <li>• Se recomienda verificar el valor del tirante a partir de una escala</li> </ul>

#### 6.6.6.2. Uso y mantenimiento de los equipos

- Selección del tramo de canal para aforar: al igual que cualquier otra técnica basada en el método de "área - velocidad", es aconsejable aforar en un tramo de canal con las siguientes características:
  - Tramo recto y con una geometría bien definida
  - Tramo donde el flujo es uniforme y donde las líneas de flujo son paralelas al eje principal del canal (aunque este último requisito no es tan importante, como en el caso de un aforo con molinete)
- Configuración de un PD: los equipos actuales vienen con un software que permite configurarlos desde una computadora portátil. Los principales parámetros de configuración de un PD son los siguientes:
  - Elegir el modo de funcionamiento del PD: en este documento, solo se considera un PD que trabaja en modo "estacionario", porque es la forma de aforar más documentada en la literatura (véase la norma ISO 748: 1997) y porque en este caso, no se presenta el problema denominado "de fondo móvil". Además, es bastante sencillo programar un PD para que trabaje en modo "estacionario"
  - Tiempo de muestreo: se tendrán perfiles verticales de velocidad del agua más precisos con un mayor tiempo de muestreo; en la práctica, se recomienda elegir un tiempo de muestreo entre 30 y 60 s
- Salinidad del agua: por lo general, la salinidad del agua en los canales de riego es  $\approx 0.1$  g/L (o "partes por mil"). Sin embargo, debe tenerse cuidado cuando los canales transportan aguas residuales o saladas: en este caso, debe medirse la salinidad del agua y usar esta información para configurar adecuadamente el equipo Doppler
- Temperatura del agua: normalmente, el equipo mide por sí solo este parámetro
- Configuración del PD para que pueda medir perfiles verticales de velocidad del agua: antes de realizar un aforo, debe indicarse cuál es aproximadamente el tirante máximo en el canal; y en función de este valor, debe procurarse minimizar los valores de los parámetros conocidos como "zona de blanqueo" y "tamaño de celdas"
- Profundidad del PD dentro del agua: antes de iniciar un aforo, debe indicarse a cuál profundidad se encuentran los sensores de velocidad por debajo de la superficie del agua: este parámetro debe medirse con una cinta métrica (típicamente es entre 2 y 8 cm)
- Operación de un PD:
  - Armar el equipo: se requiere de una cierta experiencia para armar un PD y sujetarlo a su catamarán. En particular, debe tenerse un especial cuidado en orientar adecuadamente los sensores de velocidad del equipo (consultar el manual del usuario en caso de duda)

- Ajustes preliminares: cuando el PD viene con una brújula, deben hacerse algunos ajustes preliminares para que dicha brújula trabaje adecuadamente: calibración de la brújula (en sitio) y determinación del azimut (es decir, el ángulo entre el norte magnético y el eje principal del canal); dichos ajustes tardan unos minutos (véase el manual del usuario al respecto)
- Medir perfiles verticales de velocidad del agua: para medir un perfil de velocidad en una cierta dovela, se deja el equipo sobre el agua a una cierta distancia de la orilla del canal; cuando en catamarán es relativamente estable, se empieza a tomar lecturas de velocidad. Después, se desplaza el equipo por medio de una cuerda, y se mide el perfil de velocidad que corresponde a otra dovela. Las mediciones se toman desde una computadora portátil, la cual se comunica vía radio con el PD
- Nota: cuando se afora desde un puente, nuestra experiencia indica que se controla mejor la posición de un PD con un sistema de dos cuerdas (Ilustración 6.22a). Y cuando se afora desde un cable en un canal profundo, puede ser necesario utilizar un arreglo de cuerdas y poleas (Ilustración 6.22b)
- Tomar mediciones complementarias: cuando se afora con un PD en modo estacionario, se requiere de una cinta métrica para medir el ancho de las dovelas. En particular, no debe olvidarse medir la posición del espejo del agua en los márgenes izquierda y derecha del canal
- Nota: se recomienda verificar que las lecturas de tirante proporcionadas por un PD son exactas; por lo contrario, puede ser necesario ajustar el valor del parámetro denominado "profundidad de los sensores de velocidad dentro del agua"
- Descargar los datos: cuando se afora con un PD, los datos son directamente almacenados en la memoria de una computadora portátil
- Calcular el gasto: después de aforar con un PD, se calcula el gasto por medio de un software suministrado por el proveedor del equipo. En este caso, el usuario puede elegir ciertas formas de extrapolar los perfiles de velocidad del agua en las partes del canal donde no se pudieron medir: orilla del canal, fondo y superficie del agua
- Mantenimiento de un PD:
  - Los equipos PD vienen ajustados de fábrica y no tienen partes móviles. Sin embargo, son equipos costosos y sofisticados: después de cada aforo, deben desmontarse, limpiarse con un poco de agua, secarse con una tela y almacenarse cuidadosamente en su caja
  - Precauciones de uso: no dejar caer los componentes de un PD, no rayar la superficie de sus sensores acústicos, no dejar los sensores acústicos o los componentes electrónicos expuestos al sol por mucho tiempo, manipular las antenas del equipo con cuidado

- Verificación del equipo: el software de los equipos permite realizar una serie de pruebas de funcionamiento, para saber si el equipo está en buenas condiciones de uso. En caso de duda, no intentar reparar un PD dañado: solo el fabricante puede hacerlo

La tecnología PD es una alternativa al aforo con molinete desde un puente de aforo, además, se puede aforar con un PD en sitios donde no hay puente de aforo o canastilla. La literatura sugiere que con un PD se puede estimar el gasto en la mayoría de los canales de riego, con una precisión del orden de  $\pm 5$  por ciento [ $p = 0.95$ ]. En la práctica, se requiere de dos personas para poder aforar con un PD. Un técnico que sepa utilizar una computadora y que tenga nociones de cómo aforar con molinete, puede aprender a usar un PD en menos de quince días.

### 6.6.7. TECNOLOGÍA "AD" (AFORADOR DOPPLER)

Un AD sirve para monitorear el gasto en canales. Básicamente, se trata de un aparato que se sujeta en un punto del canal, y que realiza simultáneamente dos tipos de medición: tirante y perfil de velocidad del agua en una dirección dada (hasta una cierta distancia del aparato). La medición de tirante ( $y$ ) permite estimar el área hidráulico ( $A_w$ ), siempre y cuando se conoce la geometría de la sección del canal. Las mediciones de velocidad sirven para estimar una velocidad "índice" ( $v_x$ ), la cual se relaciona con la velocidad media del agua en el canal ( $v_m$ ) mediante una ecuación experimental obtenida a través de un proceso de calibración. Finalmente, se calcula el gasto ( $Q$ ) como siendo el producto del área hidráulico ( $A_w$ ) por la velocidad media ( $v_m$ ).

Ilustración 6.22 Algunas formas de controlar la posición de un PD en un canal



a) Forma de sujetar un PD con dos cuerdas, cuando se afora en modo estacionario



b) Arreglo de cuerdas y poleas para poder mover un PD en un canal profundo

### 6.6.8. FORMA DE AFORAR Y COMPARACIÓN CON OTRAS TÉCNICAS

Los AD actuales se usan para calcular el gasto según el método de la "velocidad índice"

1. Se deja el equipo programado de tal forma que mide la velocidad del agua en una cierta porción del canal. Dicha velocidad se conoce como "velocidad índice" ( $V_m$ )
2. Al mismo tiempo, el equipo mide el tirante ( $y$ )
3. Asumiendo que la sección del canal es conocida, el equipo estima el área hidráulica ( $A$ ) a partir del tirante medido ( $y$ )
4. Luego, se utiliza una ecuación empírica para estimar la velocidad media del agua en el canal ( $V$ ) a partir de la velocidad índice ( $V_m$ )
5. Finalmente, se calcula el gasto como siendo el producto de la velocidad media por el área hidráulica ( $Q = V A$ )

Al respecto, puede comentarse lo siguiente sobre el uso de los equipos AD (Ilustración 6.23):

- Se requiere de una cierta experiencia para definir la velocidad índice que se pretende medir con el equipo. Según los casos, puede ser la velocidad que corresponde siempre a una misma porción

del canal, o la velocidad máxima que el equipo detectan en una cierta dirección

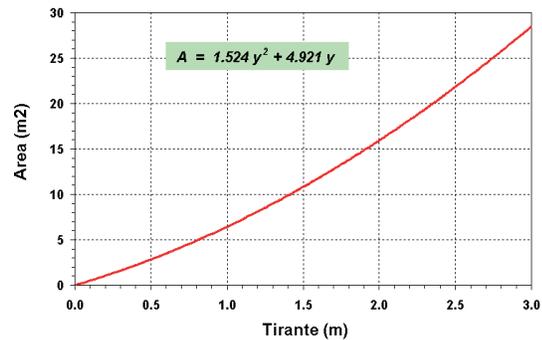
- Se debe calibrar un AD en sitio, para poder determinar la ecuación empírica entre la velocidad índice y la velocidad media. En ocasiones, dicha relación puede llegar a ser compleja; en particular, puede incluir el tirante medido en el canal ( $y$ )
- Se asume que la sección del canal es conocida, para poder estimar el área hidráulica a partir del tirante. Por lo tanto, no se recomienda instalar un AD en canales donde la geometría de la sección cambia rápidamente (es decir, en canales con problemas de azolve, derrumbes de talud o de crecimiento de malezas acuáticas)
- Si se cambia la orientación o la programación de un AD, se debe a priori volver a calibrarlo

Al contrario de otras técnicas (como son los Aforadores de Tiempo de Travesía), los equipos AD actuales deben ser vistos como una técnica de aforo secundaria, es decir una forma de aforar que requiere de una calibración y cuya incertidumbre no está bien documentada en normas internacionales. Sin embargo, los AD pueden ser útiles para aforar en sitios que no cumplen con los requerimientos básicos para poder usar técnicas a priori más confiables (Tabla 6.7). Dicha calibración debe hacerse al momento de instalar el equipo, si se cambia su orientación, o si la geometría de la sección del canal cambia con el tiempo.

Ilustración 6.23 Un equipo AD debe calibrarse en sitio



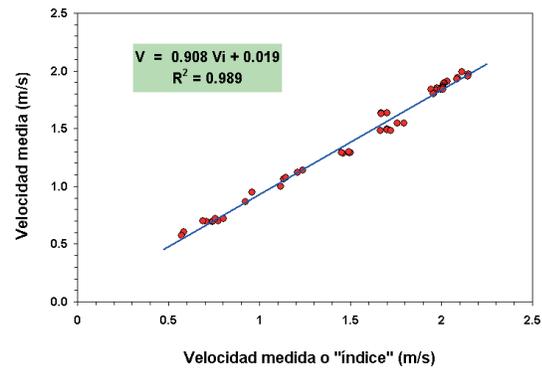
a) Medición de la sección de un canal



b) Ejemplo de relación entre "tirante" y "área hidráulico"



c) Ejemplo de campaña de aforos para calibrar un AD



d) Ejemplo de relación entre "velocidad medida" y "velocidad media"

### 6.6.8.1. Uso y mantenimiento de los equipos

- Selección del tramo de canal para aforar: al igual que cualquier otra técnica basada en el método de "área - velocidad", es aconsejable aforar en un tramo de canal con las siguientes características:
  - Tramo adecuado para poder calibrar el AD
  - Tramo recto y con una geometría bien definida

- Tramo donde el flujo es uniforme y donde las líneas de flujo son paralelas al eje principal del canal (aunque este último requisito no es tan importante, como en el caso de un aforo con molinete)
- Configuración de un AD: los equipos actuales vienen con un software que permite configurarlos desde una computadora portátil. Los principales parámetros de configuración de un AD son los siguientes:

Tabla 6.7 Comparación entre la tecnología ADL y la tecnología ATT (Aforador de Tiempo de Travesía)

Equipos fijos para aforar		ATT (Tiempo de Travesía)	ADL (Doppler Lateral)
Condiciones de uso	Rango de para medir la velocidad del agua	+/- 20 m/s	+/- 5 a 8 m/s
	Canal con agua limpia (< 250 mg/L)	Sí	No funciona (caso poco común)
	Agua con alto contenido de sedimentos	No funciona	Si
	Fuertes cambios de temperatura o de densidad en el agua	No funciona	Si
	Presencia de flujos secundarios	No funciona	Si (sólo perfilación)
	Flujo de agua mezclada con otra fase (por ejemplo, aire)	No funciona	Si
Incertidumbre de las técnicas [p = 0.95]	Incertidumbre en las mediciones de velocidad (> 0.30 m/s)	» 0.5 a 2%	™ 2 a 4%
	Incertidumbre en la determinación del gasto	» 2 a 6 %	» 4 a 10 % (dependiendo de la calibración)
	Tipo de técnica	Primaria (documentado en la norma ISO 6416: 2004)	Secundaria (requiere de una calibración en campo)
Costos	Costo de instalación	Mayor (sistema multipath)	Menor
	Costos adicionales	Menor	Mayor (calibración)

- Tiempo de muestreo: se tendrán perfiles verticales de velocidad del agua más precisos con un mayor tiempo de muestreo; en la práctica, se recomienda elegir un tiempo de muestreo entre 300 y 600 s
- Salinidad del agua: por lo general, la salinidad del agua en los canales de riego es  $\approx 0.1$  g/L (o "partes por mil"). Sin embargo, debe tenerse cuidado cuando los canales transportan aguas residuales o saladas: en este caso, debe medirse la salinidad del agua y usar esta información para configurar adecuadamente el equipo Doppler
- Temperatura del agua: normalmente, el equipo mide por si solo este parámetro
- Configuración del AD para que pueda medir la velocidad índice: esta parte de la configuración de un AD requiere de una cierta experiencia
- Profundidad del AD dentro del agua: debe indicarse a cual profundidad se encuentra el sensor de nivel del AD, para que el equipo pueda calcular el tirante

- Operación de un AD:
  - Instalar el equipo: se requiere de una cierta experiencia para instalar un AD, aunque esta operación normalmente se puede hacer en menos de un día cuando el canal está seco. Según las características del canal (en particular, si está revestido o no), se puede construir un nicho o colocar rieles para sujetar el equipo. A veces, es conveniente instalar una placa ("deflector") aguas arriba del equipo, para protegerlo mecánicamente de los objetos arrastrados por el agua y evitar que las malezas acuáticas se acumulen sobre los sensores
  - Ajustes preliminares: cuando el AD viene con un sensor de inclinación, es conveniente apuntar la orientación del equipo al momento de su instalación, y verificar después que no cambió con el tiempo
  - Tomar mediciones: los AD son equipos que se pueden configurar de tal forma, que tomen lecturas en forma automática, es decir, a ciertos intervalos de tiempo (por ejemplo, cada hora), miden el tirante y la velocidad índice, y luego calculan el gasto y el volumen acumulado que ha pasado por el canal desde una cierta fecha
- Descargar los datos: se pueden recuperar los datos de aforo almacenado en la memoria de un AD, por medio de una computadora portátil que se conecta al equipo mediante un cable serial (ver el manual del usuario en caso de duda; a veces, es necesario re-arrancar la adquisición de datos después de haber descargado datos)
- Mantenimiento de un AD:
  - Precauciones de uso: no dejar caer un AD, no rayar la superficie de sus sensores acústicos, no dejar el equipo expuesto al sol por mucho tiempo, asegurarse de que la fuente de energía del equipo (batería interna o externa con panel solar) está protegida de los rayos
  - Verificación del equipo: el software de los equipos permite realizar una serie de pruebas de funcionamiento, para saber si el equipo está en buenas condiciones de uso. En caso de duda, no intentar reparar un AD dañado: solo el fabricante puede hacerlo
  - Los equipos AD vienen ajustados de fábrica y no tienen partes móviles. Por lo tanto, su mantenimiento en sí mismo es bastante sencillo: basta limpiar sus sensores de velocidad con un poco de agua, de vez en

cuando (es decir, cuando se seca el canal)

- Verificación de la calibración del equipo: de vez en cuando (por ejemplo, dos veces al año), es conveniente verificar la calibración de un AD.
- Mantenimiento del tramo de canal: a medida de lo posible, debe mantenerse limpio el tramo de canal donde se tiene un AD (lo que puede requerir un programa costoso de desazolve y de control de malezas acuáticas); por lo contrario, puede ser necesario volver a calibrar el equipo
- Protección del equipo cuando el canal está seco: como no es conveniente quitar un AD a cada vez que se seca el canal (ya que en este caso, debería verificarse de nuevo la calibración del equipo), es importante prever una forma de protegerlo en sitio (Ilustración 6.24), tanto de la luz solar como del vandalismo (por ejemplo, se puede usar una tapa metálica)

La relación escala-gasto de la sección transversal de una corriente, se puede obtener cuando se tiene flujo uniforme en el canal, o bien, no exista efecto de remanso en dicho canal.

Para obtener ésta relación se selecciona un tramo recto y se hacen una serie de aforos, ya sea con molinete u otro método; para cada aforo se mide la escala o tirante en el canal. Con los pares de datos escala-gasto se ecuaciones de tendencia o regresión

En la Tabla 6.8 se presenta un ejemplo en el que se ilustra el método de regresión, mediante el

cual se obtienen los parámetros de la ecuación empírica. Los aforos se realizaron en el río Suchiapa, Chiapas.

Capturar en MsExcel® ambas columnas, con el que se hará un gráfico por medio de seleccionar las columnas que contienen el nivel y el gasto y hacer click en el botón “Dispersión” (Ilustración 6.25).

Aparece el gráfico de dispersión, ahora hacer clic sobre cualquiera de los puntos de datos de la gráfica con el botón de la derecha del ratón y se mostrará “agregar línea de tendencia” (Ver Ilustración 6.26).

Las opciones de tendencia o regresión son del tipo exponencial, lineal, logarítmica, polinómica, potencial y media móvil (Ilustración 6.27). Se debe ensayar con ellas una a una para definir el mejor ajuste, aquel en el que el factor  $R^2$  sea más cercano a 1.00, para ello tener habilitado las opciones de la parte final de la ventana (señalar intersección = 0.0, presentar ecuación en el gráfico, presentar el valor de  $R$  cuadrado en el gráfico (Ilustración 6.28 a Ilustración 6.32).

De los ajustes observados, la de polinomio de orden dos y tres son los que tienen el coeficiente más cercano a 1.00 (por lo que la correlación es mejor). Por lo tanto se recomienda usar la de orden 2 puesto que no es mucho mayor el ajuste ( $R^2$  mejora en 0.0001) y es más sencillo manejar dos términos en lugar de tres.

Se debe tomar en cuenta que la ecuación ajustada únicamente es válida para la sección y en el rango de aforos considerado; es decir, los gastos que se determinen mediante ésta curva

Ilustración 6.24 Caseta de protección de ADL, escalerilla y base de concreto de AD

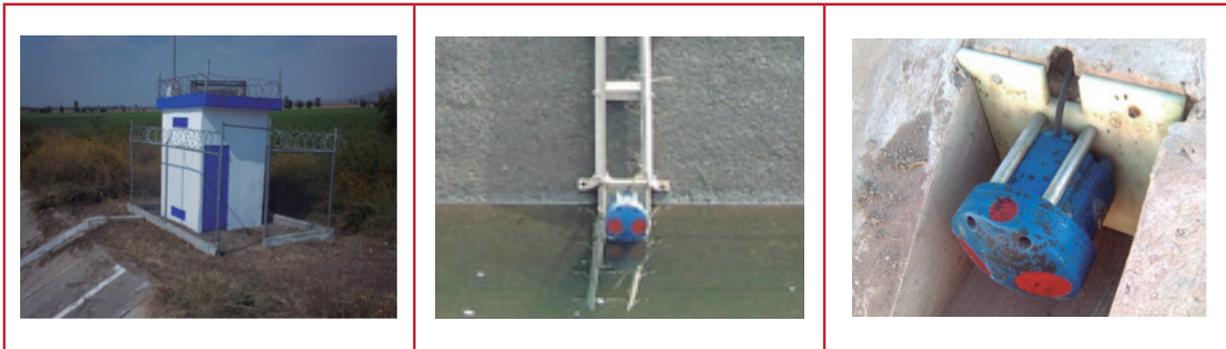


Tabla 6.8 Datos escala gasto de aforos en el río Suchiapa, Chiapas

Escala h (m)	Gasto Q (m³/s)	Escala h (m)	Gasto Q (m³/s)
1.00	1.085	1.19	6.230
1.02	1.368	1.22	8.000
1.02	1.496	1.26	8.776
1.00	1.565	1.24	10.570
1.05	1.880	1.29	11.000
1.07	2.029	1.28	11.124
1.05	2.110	1.32	13.789
1.06	2.263	1.34	13.979
1.05	2.339	1.38	17.088
1.09	3.071	1.44	17.911
1.12	3.803	1.42	18.026
1.13	5.011	1.46	19.310
1.16	5.412	1.46	19.391
1.18	5.978		

Ilustración 6.25 Pantalla de Ms Excel® con datos capturados e inicio de gráfico

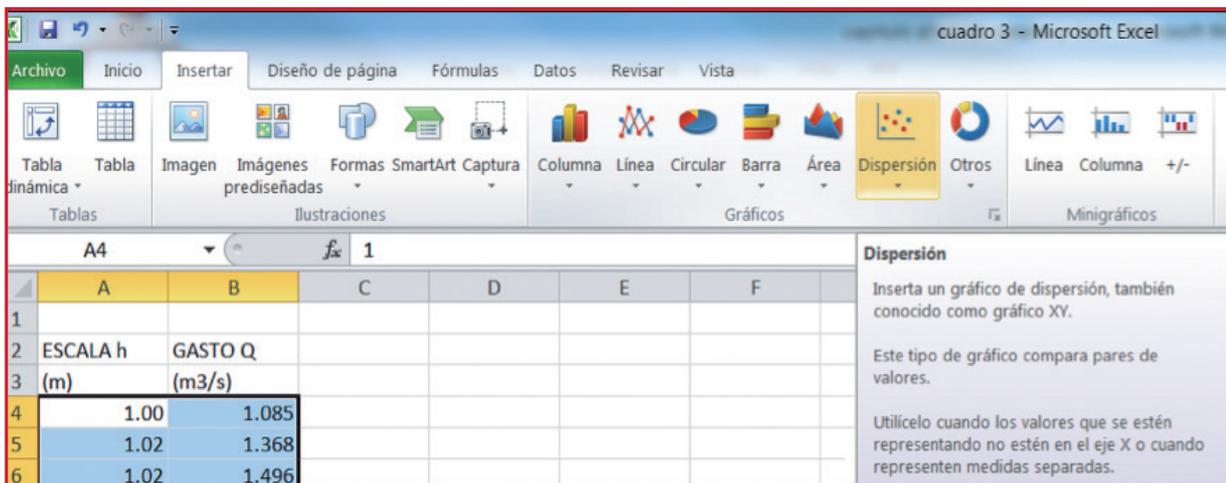
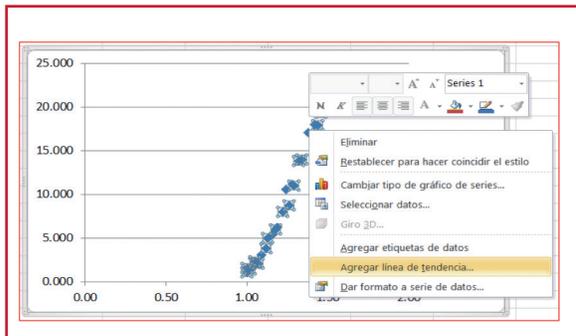


Ilustración 6.26 Gráfico de datos con la opción de “agregar línea de tendencia”



son confiables para tirantes desde 1.0 m hasta 1.46 m; que corresponden a gastos desde 1.085 m<sup>3</sup>/s hasta 19.391 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, fuera de estos rangos el gasto es erróneo.

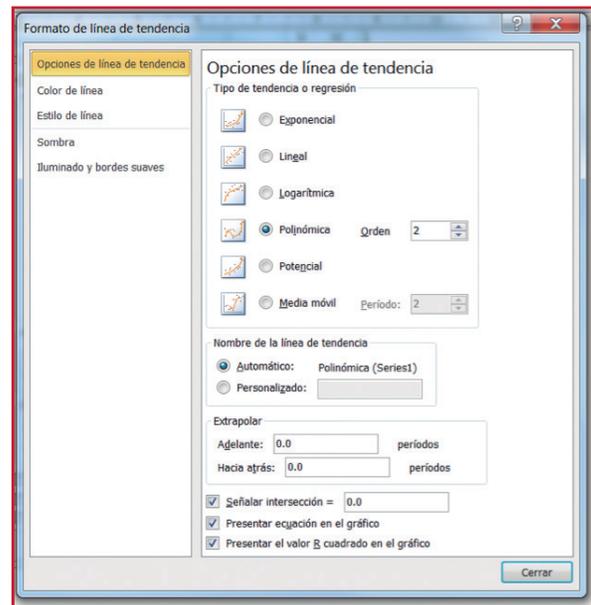
Ejemplo: obtener el gasto para un tirante de 1.25 m, en la sección de aforo.

$$Q = 28.136h^2 - 27.539h$$

$$Q = 28.136 (1.25)^2 - 27.539 (1.25)$$

$$Q = 43.9625 - 34.42375$$

Ilustración 6.27 Ventana de “Formato de línea de tendencia”



Mediante la ecuación; con la carga de 1.25 m se ingresa a la ecuación 1.6, se sustituye el mismo tirante en ésta y resulta:

$$Q = 9.539 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ilustración 6.28 Regresión lineal

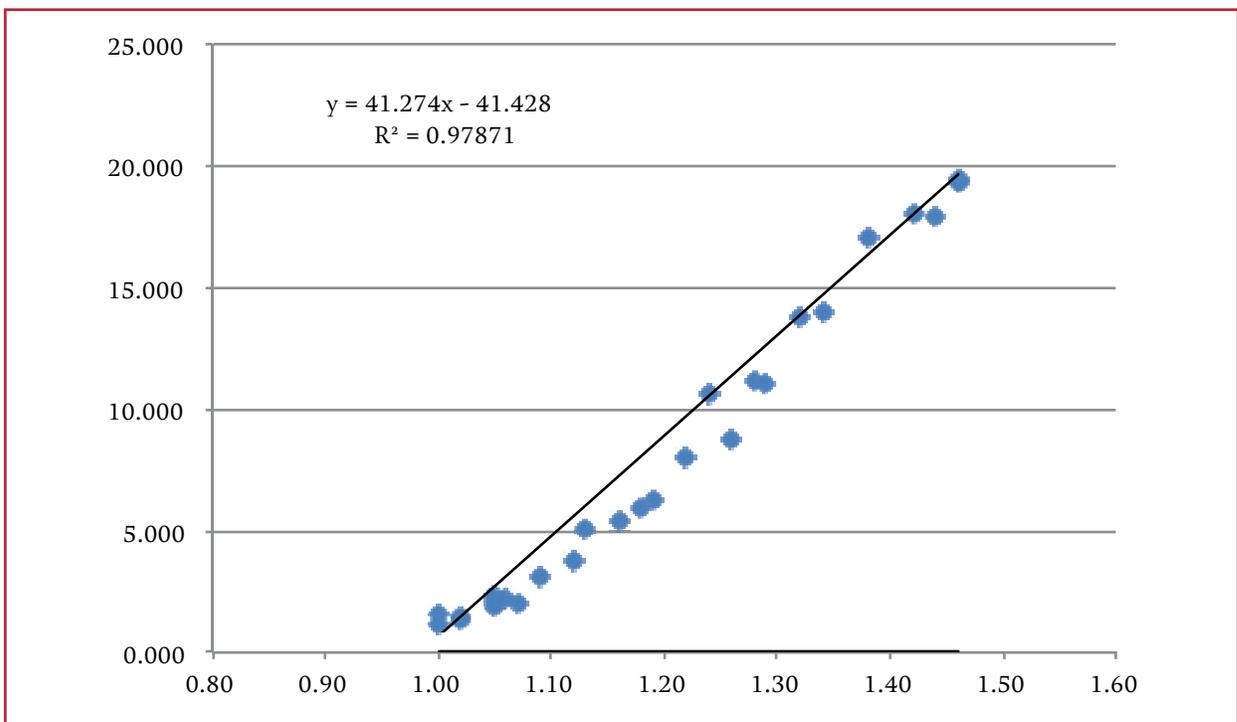


Ilustración 6.29 Ajuste a ecuación logarítmica

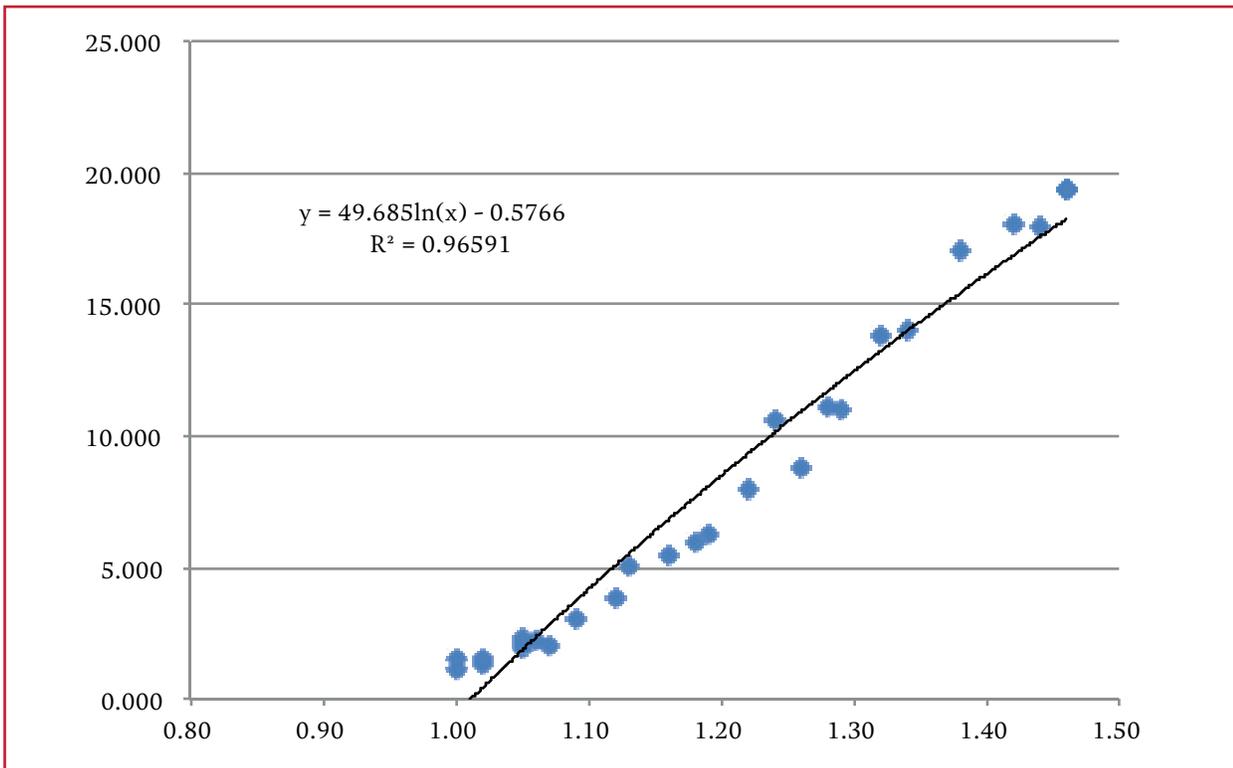


Ilustración 6.30 Ajuste a ecuación de polinómica de orden 2

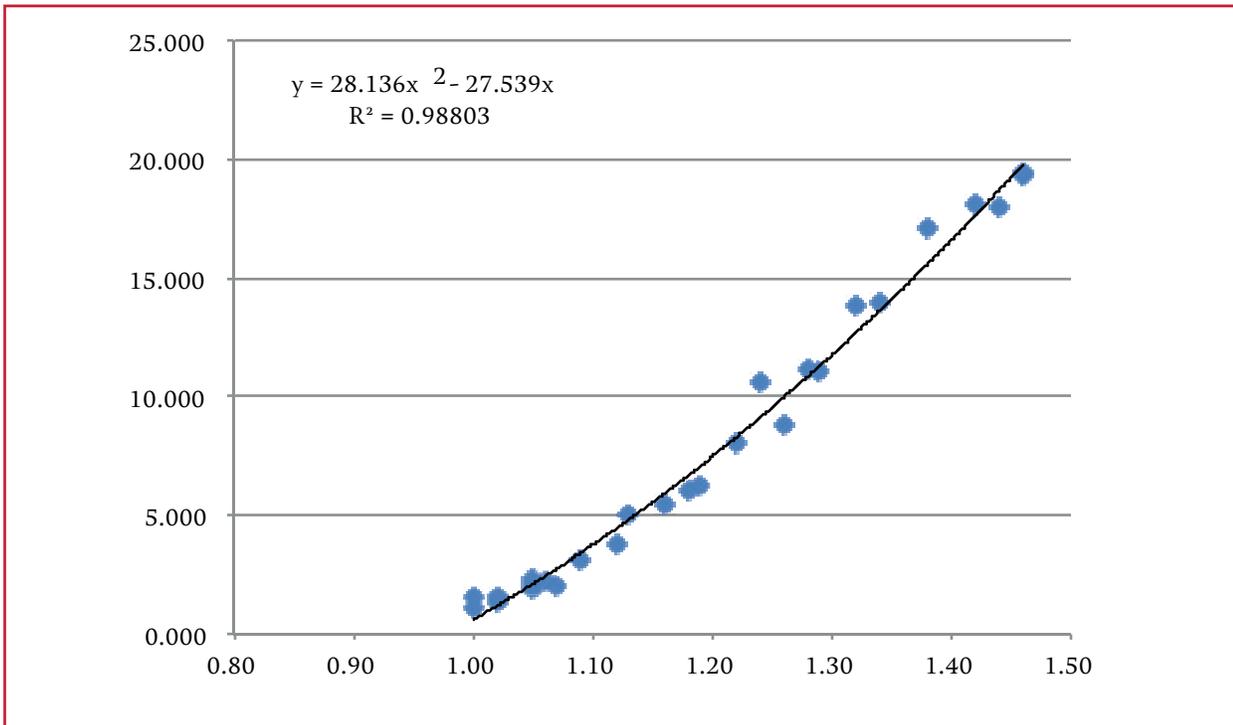


Ilustración 6.31 Ajuste a ecuación de polinómica de orden 3

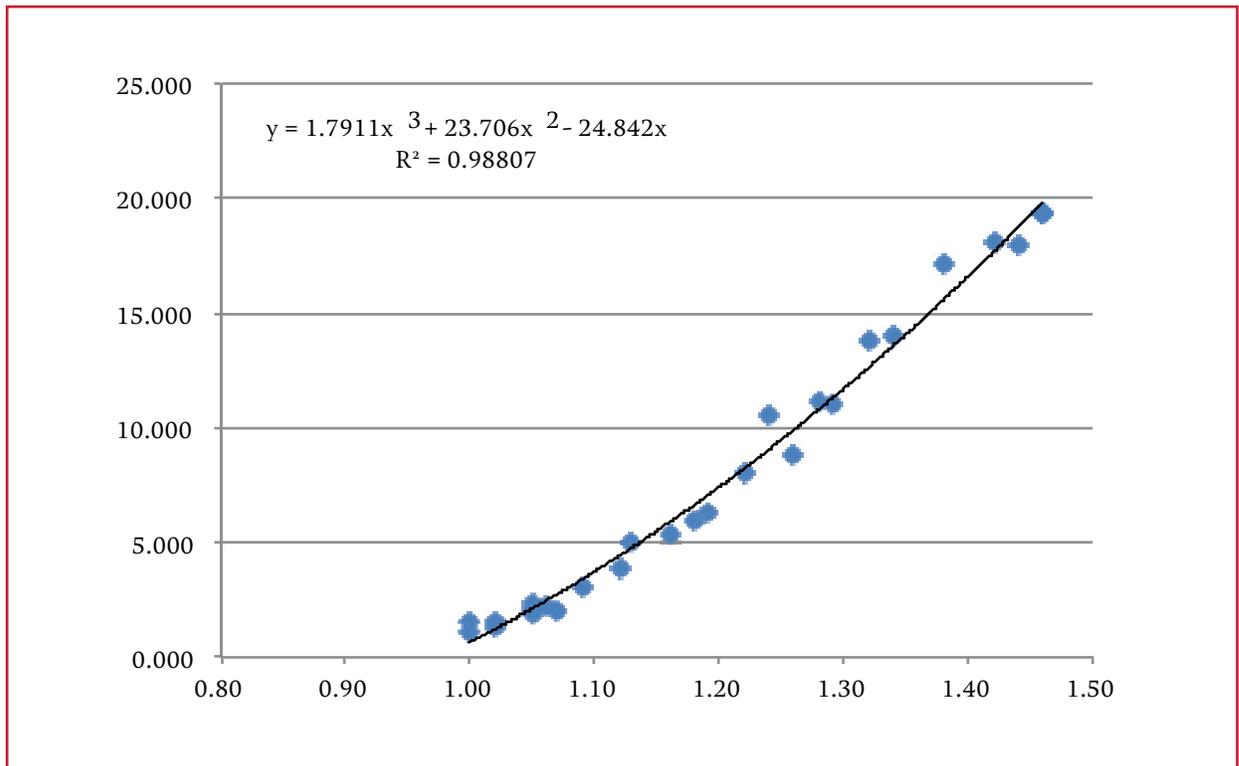
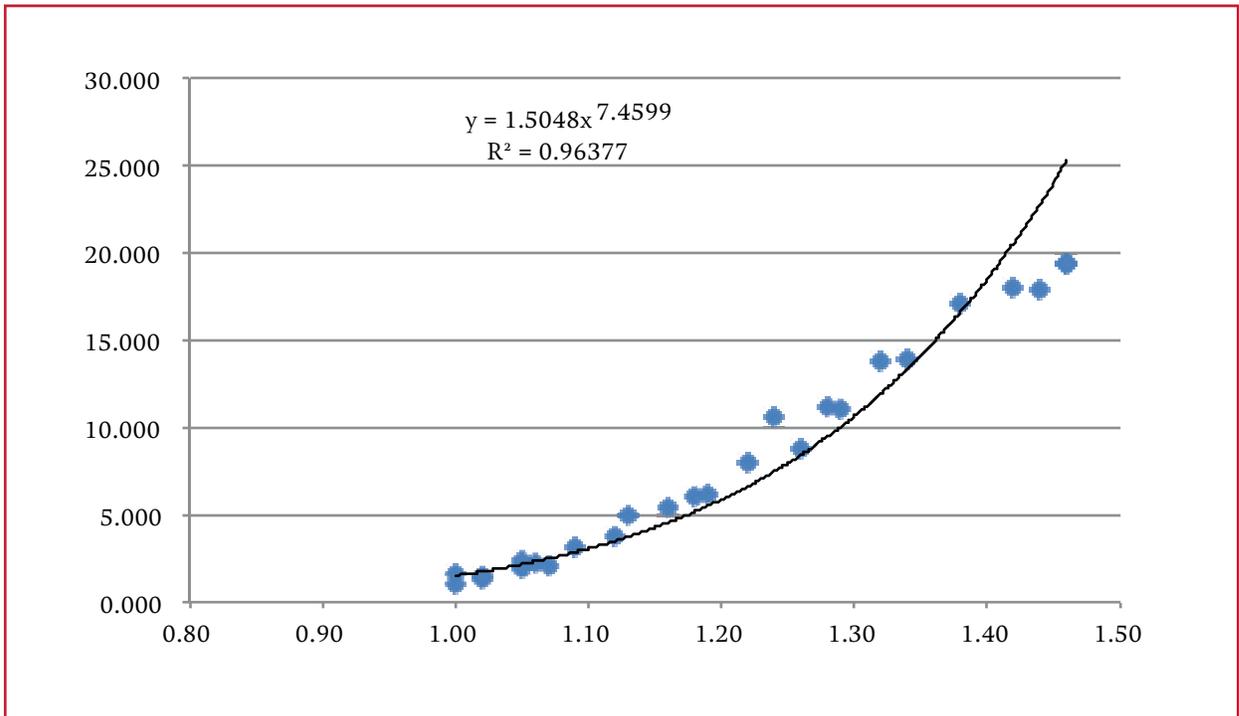


Ilustración 6.32 Ajuste a ecuación potencial





# 7

## MEDIDORES DE PRESIÓN Y NIVEL

### 7.1. MEDIDORES DE PRESIÓN

Los sistemas hidráulicos se sirven de las propiedades de los fluidos para distribuir la fuerza ejercida y aplicarla en lugares específicos. Realizar la medición de la presión en los sistemas de agua es de primordial importancia, es un parámetro tanto de planeación y dimensionamiento de las obras hidráulicas como de control de las mismas; la presión con el que se proporciona el servicio de los sistemas de agua potable a los usuarios; y de evaluación de los propios Organismos u Organizaciones responsables. Conociendo el valor de la presión: alta, baja o nula, los mismos usuarios pueden iniciar solicitudes de acciones procedentes de verificación o corrección.

Este parámetro es un indicador de la calidad del servicio del suministro de agua de los sistemas responsables.

En este apartado se trata de manera general lo relacionado con los conceptos básicos de presión, desde su definición hasta sus principios y aplicaciones.

#### 7.1.1. GENERALIDADES

Debido a la gran movilidad de sus partículas resulta imposible aplicar fuerzas concentradas en un fluido. Cualquier esfuerzo se transmite distribuyéndose ya sea en el volumen o en la superficie.

A los esfuerzos se les denomina de campo y de contacto respectivamente. Los esfuerzos de campo son por ejemplo los provenientes de la acción de la gravedad, inercia, etcétera, siendo proporcionales a la masa del fluido. Los esfuerzos de contacto o de superficie son consecuencia de la acción de cargas contiguas del fluido sobre el volumen considerado o de los cuerpos sólidos que se encuentran en contacto con el fluido.

#### *Definición de presión*

Es la fuerza por unidad de superficie, cuando la fuerza es perpendicular a dicha superficie. Esto es lo que ocurre comúnmente en fluidos confinados.

Se denomina presión promedio ( $P$ ) a la fuerza de superficie ( $\Delta F$ ) que se aplica a un elemento de superficie ( $\Delta S$ ). Se indica por medio de la siguiente relación:

$$P = \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad \text{Ecuación 7.1}$$

### Referencias de presión

La presión se mide con respecto a una referencia o valor patrón, que puede ser el vacío absoluto u otra presión; la referencia común es la presión atmosférica. Según la referencia de presión utilizada se le dan nombres distintos a las medidas (Ver Ilustración 7.1).

### Presión absoluta

Es la presión que soporta un sistema respecto al cero absoluto.

### Presión manométrica

Es la presión referida a la presión atmosférica.

### Presión de vacío

Es la presión referida a la presión atmosférica pero menor que ésta.

### Presión diferencial

Es la diferencia entre dos presiones cualesquiera.

### Presión atmosférica

Es la presión que ejerce la atmósfera sobre la tierra. Al nivel del mar esta es de aproximadamente 760 mm de Hg, 14.7 psi o 101.3 KPa. La presión atmosférica cambia con la altitud, a mayor altitud menor presión atmosférica.

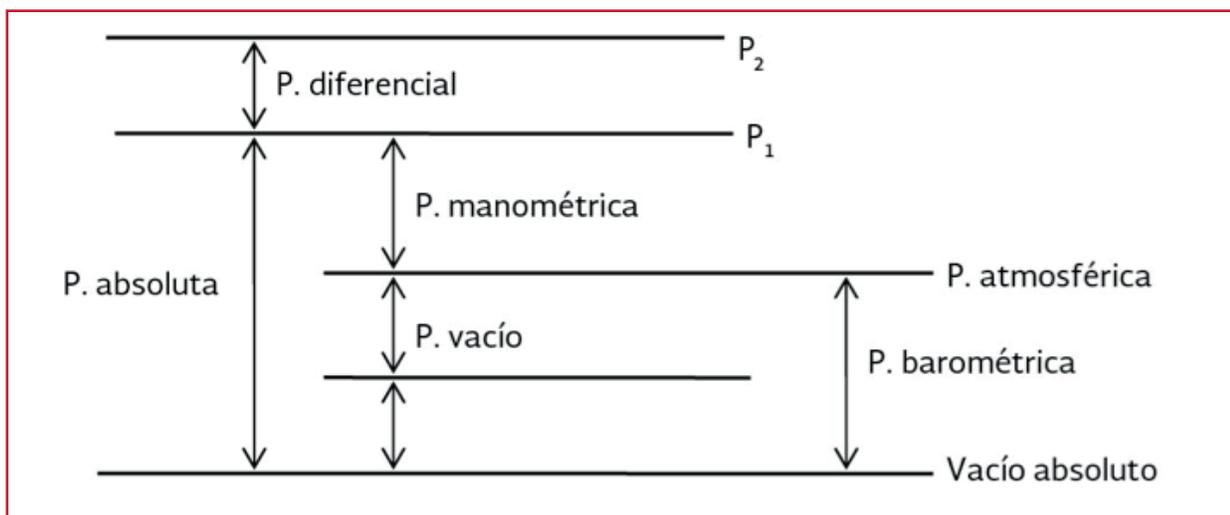
### Presión barométrica

Es la medida de la presión atmosférica local, la cual varía levemente con las condiciones climáticas.

### Unidades de presión

Con base en unidades de FLT, la dimensión de la Presión es  $FL^{-2}$  y sus unidades usuales son: en el sistema CGS dina  $cm^{-2}$ ; en el sistema técnico  $Kg m^{-2}$ ; también son muy utilizadas las unidades  $Kg_f cm^{-2}$ , atmósfera y altura de columna de líquido.

Ilustración 7.1 Referencias y nombres de las medidas de presión



En la actualidad, la comunidad científica internacional ha adoptado el Sistema Internacional de Unidades (SI). Para este sistema, desde 1971 la unidad de presión está dada en newton por metro cuadrado, denominado pascal:  $1 \text{ Pa} = \text{N}/\text{m}^2$  o se puede expresar en unidades base del SI:  $1 \text{ Pa} = \text{m}^{-1} \text{ kg s}^{-2}$ . En el sistema inglés la unidad de presión es  $\text{lb/in}^2$  (psi).

Las unidades de presión expresan una unidad de fuerza sobre unidad de área. La Tabla 7.1 resume los factores de conversión de las unidades de presión más comunes.

## 7.1.2. PRESIÓN EN LOS FLUIDOS

### 7.1.2.1. Fluidos estáticos

En un fluido en reposo o estático la presión en un punto es igual al peso de la columna de líquido por unidad de área. En otras palabras, la presión en un líquido es igual a la altura de la columna de líquido ( $h$ ) por su peso específico ( $\gamma$ ).

$$P = \gamma h \quad \text{Ecuación 7.2}$$

donde:

- $P$  = Presión en un líquido ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
- $h$  = Altura del líquido (m)
- $\gamma$  = Peso específico del líquido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Por tanto, la presión en un líquido es directamente proporcional a la altura del líquido sobre éste. Las unidades de presión expresadas como columna de un líquido provienen de esta propiedad de la presión en los fluidos, por ejemplo  $\text{m H}_2\text{O}$ ,  $\text{cm H}_2\text{O}$ ,  $\text{mm H}_2\text{O}$ ,  $\text{Plg H}_2\text{O}$ ,  $\text{mm Hg}$ ,  $\text{cm Hg}$ ,  $\text{Plg Hg}$ .

### 7.1.2.2. Fluidos en movimiento

En un fluido en movimiento se presentan diversos tipos de presiones.

#### *Presión estática*

Cuando un cuerpo se sumerge en un fluido, éste ejerce una fuerza perpendicular a la superficie del cuerpo en cada punto de la superficie. Se define a esta presión como la fuerza por unidad de área. La presión atmosférica, es un ejemplo de cómo se ejerce en todas las direcciones sobre los cuerpos colocados en la superficie de la tierra debido a la columna de aire sobre ellos.

#### *Presión dinámica*

Es la presión que se produce por el efecto de la velocidad del fluido, ésta se ejerce solamente en la dirección del fluido. En un fluido estático la presión dinámica es cero. La presión dinámica depende de la velocidad y la densidad del fluido.

Tabla 7.1 Conversión de unidades de presión

Presión							
de a	Atmósfera	$\text{kg}/\text{cm}^2$	$\text{lb}/\text{in}^2$	mm de Hg	in de Hg	m de $\text{H}_2\text{O}$	ft de $\text{H}_2\text{O}$
Atmósfera	1.000	1.033	14.7	760	29.921	10.33	33.899
$\text{kg}/\text{cm}^2$	0.968	1.000	14.22	73.58	28.97	9.977	32.81
$\text{lb}/\text{in}^2$	0.068	0.07	1.000	51.816	2.036	0.71	2.307
mm de Hg	0.13	0.136	0.193	1.000	0.039	0.013	0.044
in de Hg	0.033	0.035	0.491	25.4	1.000	0.345	1.133
m de $\text{H}_2\text{O}$	0.096	0.1	1.423	7.37	2.9	1.000	3.284
ft de $\text{H}_2\text{O}$	0.029	0.03	0.43	22.43	0.883	0.304	1.000

### **Presión de estancamiento**

La presión en el punto de estancamiento es mayor que la presión estática al agregar la presión dinámica en ese mismo punto (Ver Ilustración 7.2).

### **Medidores de presión de la columna del líquido**

Es el más simple, directo y exacto de todos los métodos utilizados en la medición de presión. Utilizan el principio de los vasos comunicantes, así como el efecto de la presión de una columna de líquido para indicar el valor de la presión medida.

La columna de líquido, es el instrumento de medición de presión más antiguo, y de los más exactos en los alcances de 500 Pa a 200 kPa. El más conocido de estos instrumentos es el manómetro de tubo en U, aunque existen otras variantes que utilizan el mismo principio.

### **Manómetro de tubo en U**

Este medidor consta de dos tubos transparentes de misma sección transversal que están conectados por su parte inferior, ya sea por un tubo

del mismo material o por un material distinto. La columna de líquido de tipo U es la configuración más popular para la medición de presión, tanto con mercurio, agua y aceites. Dentro del tubo se coloca un líquido de mayor densidad que el fluido del proceso a medir y que no se mezcle con el agua para aire o mercurio por ejemplo (Ilustración 7.3).

Luego se conecta uno de los tubos al proceso ( $P_1$ ) y el otro se deja a la presión de referencia con respecto a la cual se quiere hacer la medición ( $P_2$ )

- La atmósfera para presiones manométricas
  - Si  $P_1 > P_2$  se trata de un manómetro de tubo en U
  - Si  $P_1 < P_2$  se trata de un vacuómetro de tubo en U
- El vacío absoluto para presiones absolutas, corresponde a un barómetro
- Otra presión del proceso para presiones diferenciales.

La medida de presión será directamente proporcional a la diferencia de nivel en los líquidos de los tubos ( $h$ ), según las relaciones:

Ilustración 7.2 Presión de estancamiento

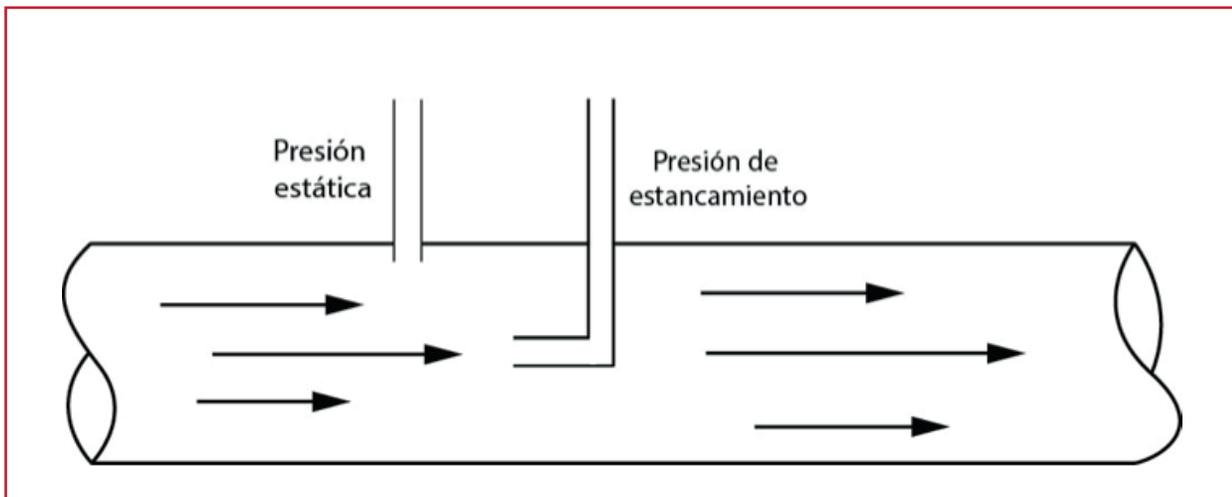
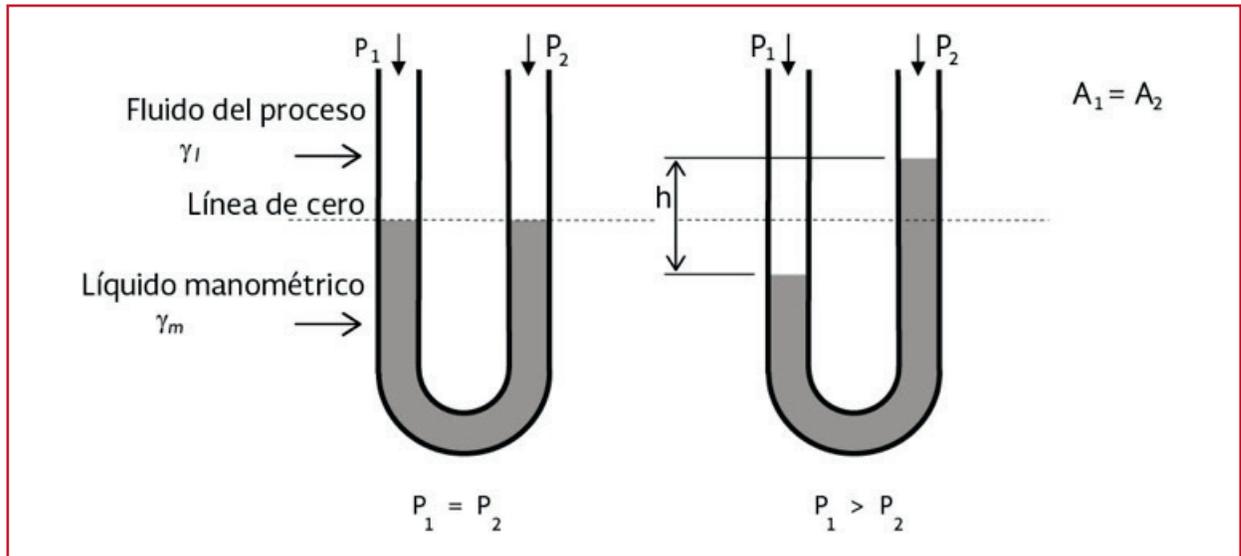


Ilustración 7.3 Manómetro U



Para medida de presión de gases (peso despreciable respecto del líquido manométrico):

$$P_1 - P_2 = \gamma_m h \quad \text{Ecuación 7.3}$$

Para medida de presión en líquidos (peso no despreciable):

$$P_1 - P_2 = (\gamma_m - \gamma_l)h \quad \text{Ecuación 7.4}$$

### Líquidos manométricos

El líquido manométrico se selecciona en función de sus características y del proceso a medir o aplicación. El primer parámetro en esta selección es el rango de presiones por medir, de acuerdo con esto:

Para bajas presiones (0 a 7 KPa  $\approx$  1 psi) se deben usar líquidos inorgánicos de baja densidad.

- Aceites
- Glicerina

Para presiones medianas (0 a 17 KPa  $\approx$  2.5 psi) se puede usar agua.

Para presiones altas (0 a 70 KPa  $\approx$  10 psi) se debe usar mercurio

Los líquidos manométricos más usados son el agua y el mercurio. Tabla 7.2

Al agua se le puede agregar colorante para mejorar la lectura y algún agente para disminuir la tensión superficial.

### Líquidos selladores

En los casos en que el fluido del proceso puede ser corrosivo o mezclable para el líquido manométrico se puede usar un líquido sellador, que permite aislar el proceso del manómetro. Se deberá considerar el peso específico de este líquido.

Tabla 7.2 Ventajas y desventajas del agua y del mercurio

	Ventajas	Desventajas
Agua	Económica No tóxica Insoluble en algunos líquidos (aceites) Densidad menor al mercurio lo que permite mayor sensibilidad	Punto de fusión 0°C Punto de ebullición 100°C Moja las paredes del recipiente Tiene una presión de vapor alta Densidad menor al mercurio permite solo un rango menor
Mercurio	Bajo punto de fusión -39°C Alto punto de ebullición 357°C Baja presión de vapor a temperatura ambiente No moja las paredes del recipiente Insoluble en muchos líquidos comunes	Se amalgama con muchos metales Es costoso Es tóxico

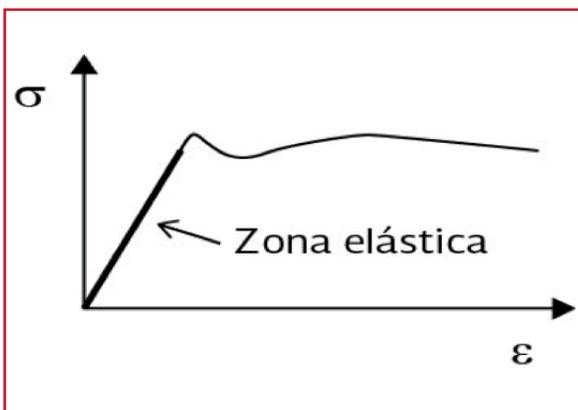
### 7.1.3. SENSORES DE PRESIÓN

Son elementos que transforman la variable presión en un desplazamiento. Se utiliza la propiedad de los materiales de deformarse dentro del rango elástico cuando se someten a un esfuerzo y regresar a su posición cuando cesa el esfuerzo aplicado. Conociendo que en este rango la relación esfuerzo deformación es lineal.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad \text{Ecuación 7.5}$$

Donde E es el módulo de elasticidad, que es una constante que relaciona el esfuerzo con la deformación en la zona elástica (Ilustración 7.4).

Ilustración 7.4 Relación esfuerzo – deformación



Los sensores de presión consisten en elementos de sección delgada que al someterse a una presión se deforman en su rango elástico, deformación que es proporcional a la presión.

Existen principalmente tres tipos de sensores de presión:

- Tubo Bourdon
- Fuelle
- Diafragma

#### 7.1.3.1. Tubo Bourdon

Consiste en un tubo de sección transversal aplanada con un extremo abierto y empotrado y el otro extremo cerrado y libre para el movimiento. Se le da una forma curvada específica al tubo, que varía según el rango de la presión a medir y las características del mismo tubo. De acuerdo a la forma del tubo son las secciones transversales. Se tienen los siguientes tipos de tubo Bourdon (Ilustración 7.5).

En el tubo Bourdon tipo C se forma un arco de más de 180 grados, en el tipo espiral el tubo da más de una vuelta alrededor del eje reduciendo el diámetro en cada vuelta para formar una es-

piral y en el helicoidal el tubo también da más de una vuelta alrededor de su eje pero en vez de reducir el diámetro este se deforma también en la otra dirección para formar un helicoide.

Al aumentar la presión en el interior del tubo éste tiende a enderezarse y producir un desplazamiento en el extremo libre, el cual es proporcional a la presión aplicada. La ley que relaciona este desplazamiento con la presión es compleja debido a la también compleja forma de estos instrumentos, por lo que se emplean ecuaciones empíricas experimentales para éstas relaciones. La linealidad del tubo es de aproximadamente 0.5 por ciento de la deflexión máxima y en muchos casos una desviación máxima del 1 por ciento es permisible. La sensibilidad de

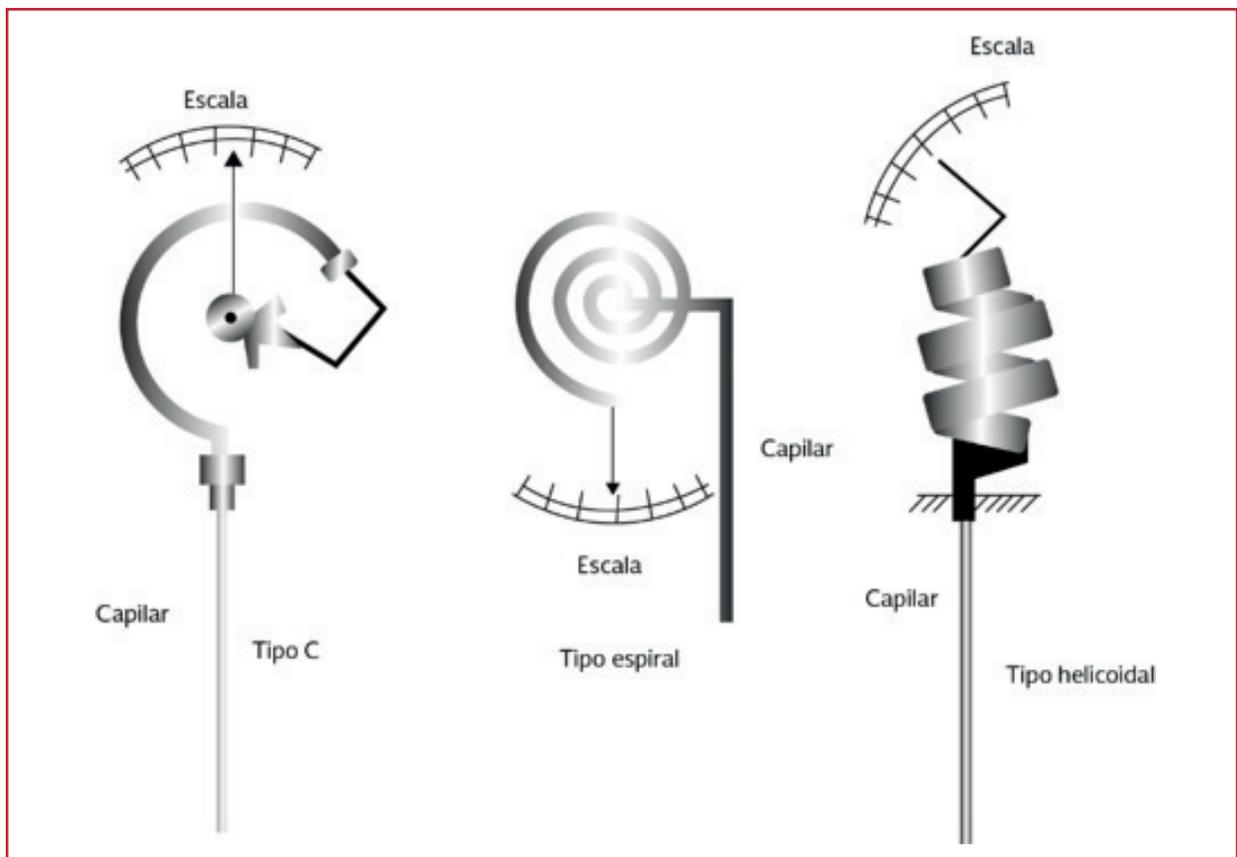
estos instrumentos es excelente obteniéndose respuestas hasta del 0.01 por ciento en algunos de ellos.

**Materiales de construcción de tubos Bourdon**

Grupo 1: Aleaciones endurecidas por deformación

- Latón (Cobre + zinc + estaño o Cobre + zinc)
- Bronce fosforoso (Fósforo + bronce)
- Bronce silicio
- Acero inoxidable austenítico (contenido de cromo 18 por ciento y de níquel 8 por ciento)
- Monel

Ilustración 7.5 Tipos de tubo Bourdon



Son materiales fáciles de trabajar, resisten corrosión. Sirven para medir medianas y bajas presiones:

- Bajas: 0 a 700 KPa ( $\approx$  100 psi)
- Media: 700 a 3 500 KPa ( $\approx$  100 a 500 psi)
- Alta: 3500 a 70 000 KPa ( $\approx$  500 a 10 000 psi)

Grupo 2: Aleaciones endurecidas por precipitación

- Cobre + berilio
- Monel K
- Inconel X

Son más difíciles de trabajar pero permiten la construcción de tubos de gran precisión y resisten muy bien a la corrosión: Se utilizan para medir medias y altas presiones.

Grupo 3: Aleaciones con tratamiento térmico

- Acero ANSI 4130
- Acero ANSI 8630
- Acero ANSI 403
- Acero inoxidable martensítico

La facilidad de trabajo del material es intermedia entre los dos grupos anteriores así como la resistencia a la corrosión. Se utilizan para medir presiones altas.

### ***Rangos de presión***

El rango de presión depende principalmente del material con el cual está fabricado el tubo y puede abarcar valores

- Manómetro: desde 0 a 35 KPa ( $\approx$  5 psi) hasta 0 a 70000 KPa ( $\approx$  10 000 psi)
- Vacuómetro: de -100 a 0 KPa ( $\approx$  -30 a 0 "Hg)

### 7.1.3.2. Diafragma

Consiste en un disco metálico (o no metálico) con corrugaciones circulares concéntricas. Se acopla a una caja por la cual ingresa la presión a medir, el diafragma mide la diferencia de presión existente entre sus dos caras (Ilustración 7.6).

La presión provoca una deflexión en el centro del disco la cual es proporcional a la presión aplicada. Los diafragmas metálicos emplean directamente la característica elástica del material, mientras que los no metálicos tienen por lo general un resorte calibrado cuya fuerza se opone al movimiento.

Los diafragmas se usan por lo general para medir presiones diferenciales bajas o presiones de vacío. La sensibilidad de estos instrumentos suele ser muy grande pudiendo detectar comúnmente valores del 0.01 por ciento de la presión para la cual fue diseñado.

### ***Materiales de construcción para diafragmas***

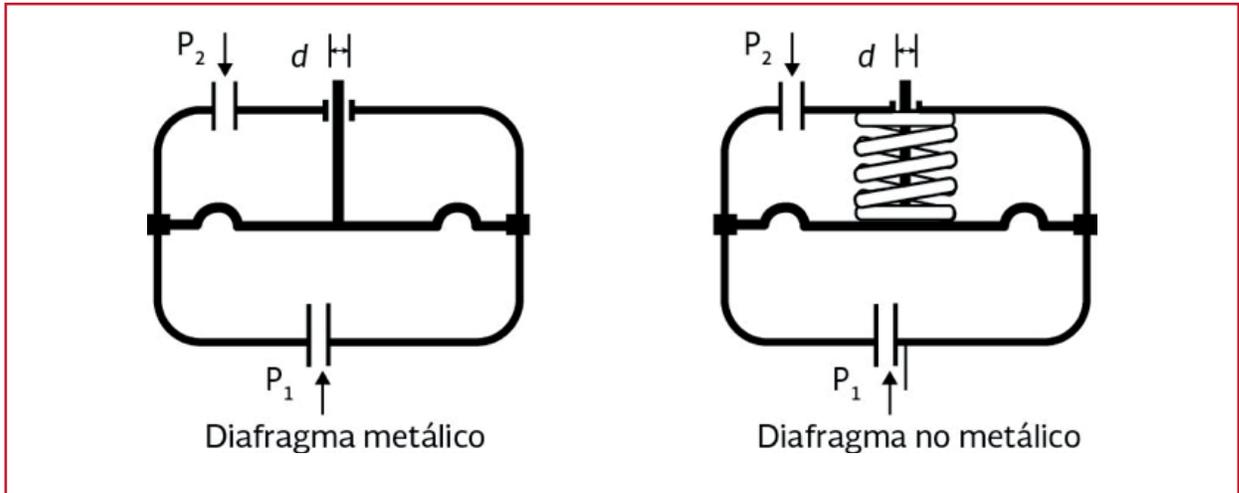
Metálicos

- Latón
- Bronce fosforoso
- Cobre berilio
- Acero inoxidable
- Monel

No metálicos

- Neopreno
- Teflón
- Polietileno
- Cuero

Ilustración 7.6 Diafragmas sensores de presión



Estos resisten mayor corrosión, pero se usan para presiones más bajas.

### Rangos de presión

El rango de presión depende principalmente del material con el cual está fabricado el tubo y puede abarcar valores

- Manómetro: desde 0 a 1.2 KPa ( $\approx 5''$  H<sub>2</sub>O) hasta 0 a 5 500 KPa ( $\approx 800$  psi)
- Vacuómetro: desde -1.2 a 0 KPa hasta -100 a 0 KPa ( $\approx -30$  a 0" Hg)

### 7.1.3.3. Fuelle

Consiste en un tubo de material flexible con uno de sus extremos empotrado y conectado al proceso al cual se le quiere medir la presión; y el otro cerrado y libre de moverse. Para producir flexibilidad en el tubo se le hacen corrugaciones o convoluciones circulares sobre las paredes, para que trabaje como un resorte helicoidal.

Para aumentar el rango de presión por medir o la vida útil del fuelle se coloca un resorte inter-

no o externo al tubo. Estos elementos se usan principalmente para medir bajas presiones. (Ver Ilustración 7.7)

### Materiales de construcción de fuelles

#### Metálicos

- Latón
- Bronce fosforoso
- Monel
- Acero inoxidable

#### No metálicos

- Neopreno
- Teflón
- Polietileno

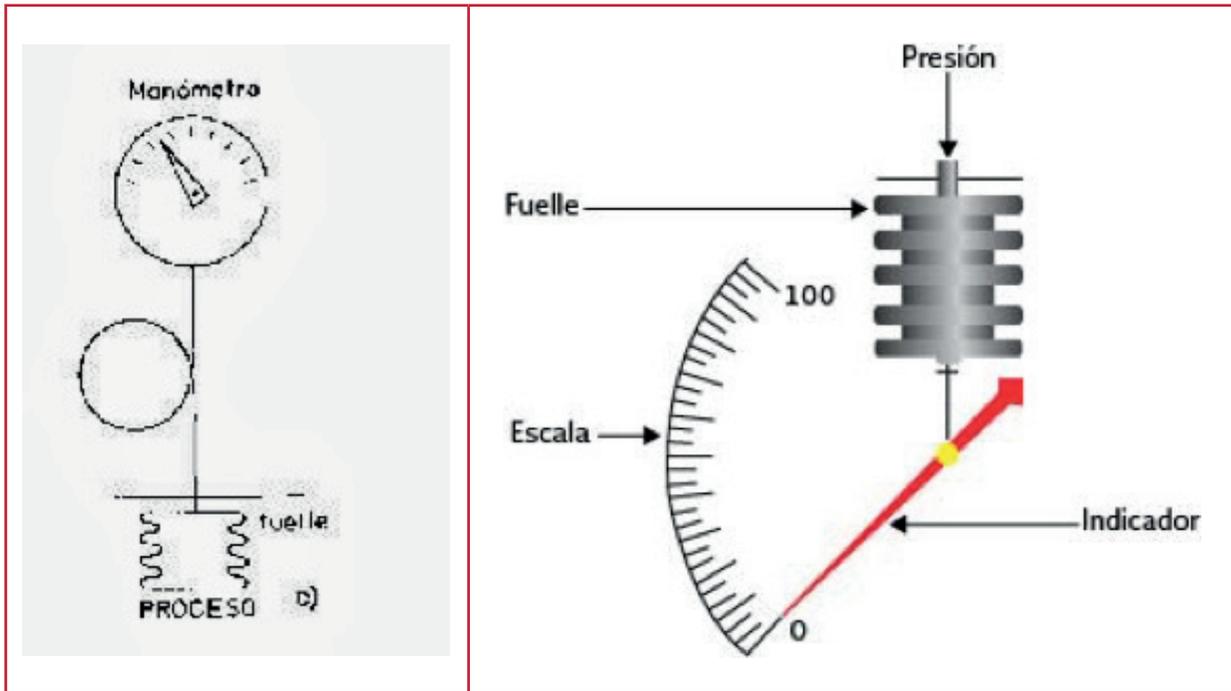
### Rangos de presión

El rango de presión depende principalmente del material con el cual está fabricado el tubo y puede abarcar valores

Manómetro: desde 0 a 0.5 KPa ( $\approx 0.2''$ H<sub>2</sub>O) hasta 0 a 7 000 KPa ( $\approx 1000$  psi)

Vacuómetro: desde -0.5 a 0 KPa hasta -100 a 0 KPa ( $\approx -30$  a 0 Hg)

Ilustración 7.7 Fuelle sensores de presión



#### 7.1.4. MANÓMETROS MECÁNICOS

Los manómetros mecánicos se componen principalmente de los siguientes elementos funcionales (Ilustración 7.8 e Ilustración 7.9).

- Un sensor de presión, tubo de Bourdon, fuelle o diafragma
- Un mecanismo de amplificación: cremallera piñón, mecanismo de cuatro barras u otro
- Un sistema de indicación que consiste en una aguja indicadora sobre una escala calibrada en unidades de presión

#### *Transductores eléctricos de presión*

Los elementos previamente descritos permiten medir presión en el proceso. Sin embargo para procesos industriales se requiere en muchos casos conocer el valor de la medición en una sala de control o en un lugar alejado del proceso. Otras veces se requiere de la medida para la aplicación de una acción de control. Para todo esto se requiere poder comunicar el valor de la variable a otros instrumentos. Una de las formas sencillas para realizar esto es tener una salida eléctrica en el instrumento de medición, para esto se debe utilizar un transductor eléctrico de presión. La función de este elemento es el de transformar el desplazamiento producido por un sensor de presión en una señal eléctrica que se pueda leer (Ilustración 7.10 e Ilustración 7.11). Los tipos más comunes de transductores eléctricos son:

Ilustración 7.8 Esquema del mecanismo Bourdon

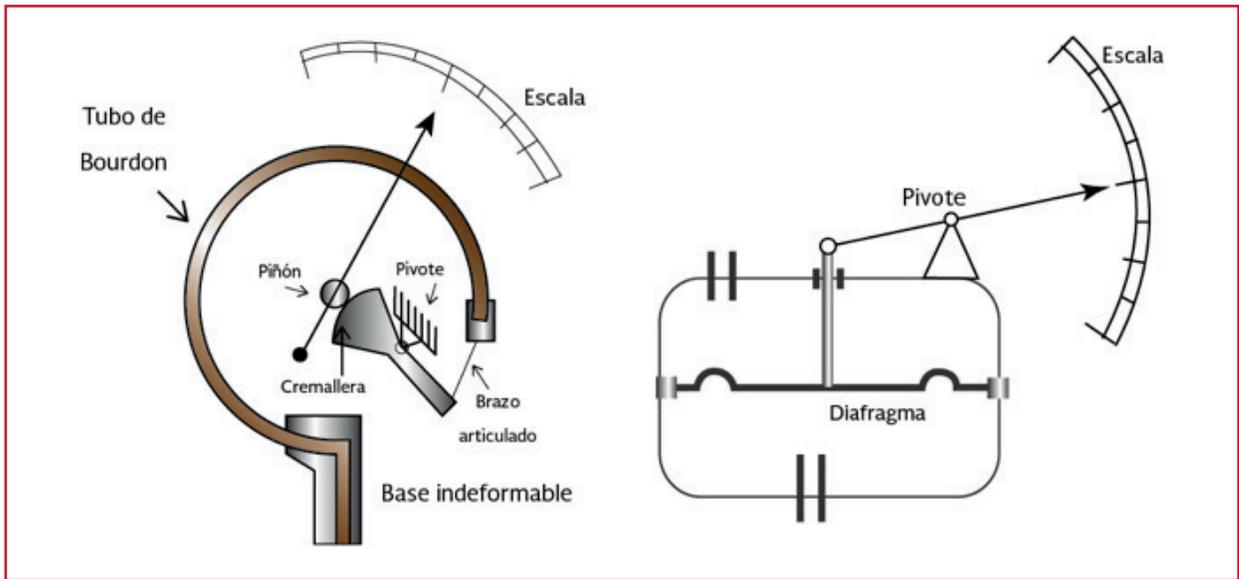


Ilustración 7.9 Instalación de manómetro tipo Bourdon



Ilustración 7.10 Dispositivo y equipos para registrar la presión con celdas



Ilustración 7.11 Conexión de tubo Pitot a la línea a presión



### Transductor resistivo

Este elemento está conformado por un potenciómetro (resistencia variable) en donde la guía móvil (elemento que permite variar la resistencia) está conectada a un sensor de presión (diafragma, fuelle o tubo Bourdon), el desplazamiento producido por el sensor de presión producirá un cambio en la resistencia del potenciómetro. La medida del valor de esta resistencia será por lo tanto proporcional al valor de la presión del proceso, y se puede calcular con la expresión:

Tabla 7.3 Ventajas y desventajas de un Transductor resistivo

Ventajas	Desventajas
Salida alta	Usualmente requiere gran tamaño
Económico	Posee una alta fricción mecánica
Se puede usar con corriente alterna o continua	Tiene una vida limitada
No es necesario amplificar o acoplar impedancias	Es sensible a vibraciones o choques
	Requiere un gran desplazamiento por lo cual el sensor de presión debe ser relativamente grande
	Tiene una baja respuesta a la frecuencia
	Desarrolla altos niveles de ruido con el desgaste
	Es insensible a pequeños movimientos (baja sensibilidad)

### Transductor extensométrico

En este tipo se utiliza un extensómetro o galga extensométrica (Strain gage) para transformar la deformación que se produce sobre un diafragma en una señal eléctrica. El extensómetro es un elemento diseñado para medir deformaciones en materiales sometidos a esfuerzos. Estos están compuestos por varios lazos de un alambre muy fino o por un material semiconductor,

el cual al estirarse produce un cambio en la sección transversal del alambre o en el área transversal del semiconductor. El cambio de sección transversal de este alambre hace que cambie su resistencia eléctrica, este cambio de resistencia será proporcional a la deformación al cual está sometido el extensómetro.

El rango de las galgas extensométricas puede ir entre las 3 pulgadas de columna de agua hasta 1 400 MPa (200 000 psi) y su exactitud varía entre 0.1 por ciento de la amplitud a 0.25 por ciento del valor máximo del rango. Se debe además considerar la posibilidad de un error del 0.25 por ciento después de 6 meses de instalado y un 0.25 por ciento adicional por efecto de temperatura para cada 550 °C de cambio en la temperatura del ambiente donde se encuentra (Tabla 7.4).

Para las galgas de silicio difundido existe la ventaja adicional de poder utilizarse en contacto directo con el proceso y sin mecanismos intermedios para medir presión. Esta conforma en sí misma un sensor de presión.

Tabla 7.4 Ventajas y desventajas de Transductor extensométrico

Ventajas	Desventajas
Alta exactitud	Tienen una señal de salida débil, la cual requiere accesorios de acondicionamiento como puentes.
Miden presiones estáticas y dinámicas	
Pueden excitarse con corriente alterna o continua	Requiere una fuente de alimentación
Baja sensibilidad a choques o vibraciones	Existen limitaciones para medir procesos con altas temperaturas
Resolución continua	
Excelente respuesta a la frecuencia	
Compensación por temperatura fácil	

### Transductor magnético

Utilizan unas bobinas con un núcleo magnético móvil conectado a un sensor de presión, con lo cual al producirse el movimiento del núcleo magnético cambian las características magnéticas del circuito eléctrico. Existen principalmente dos tipos:

- **Transductor magnético de inductancia variable**  
En este caso se mide la inductancia de la bobina que varía en forma proporcional a la porción de núcleo magnético contenido en ella. La precisión es para estos instrumentos del orden de 1 por ciento
- **Transductor magnético por transformador diferencial**  
En este caso el núcleo móvil que está conectado a un sensor de presión se desplaza dentro de un transformador diferencial

Tabla 7.5 Ventajas y desventajas del transductor magnético

Ventajas	Desventajas
Salida alta	Se excitan solo con corriente alterna por lo que el receptor debe funcionar con corriente alterna
Respuesta lineal	
No precisan ajustes críticos en el montaje	Requiere un gran desplazamiento del núcleo magnético
Baja histéresis por no haber roce	Sensible a choques y vibraciones
Construcción robusta	

### Transductor capacitivo

Se basa en la variación de la capacidad de un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de la presión. En este caso la placa móvil suele ser un diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas, con lo cual se

tienen dos condensadores: uno de referencia y uno de capacidad variable. Las dos capacidades se comparan en circuitos osciladores. Como la capacidad es función del ancho del dieléctrico (distancia entre placas) cuando el diafragma se refleja por efecto de la presión, cambia la capacitancia del condensador.

Tabla 7.6 Ventajas y desventajas del transductor capacitivo

Ventajas	Desventajas
Excelente respuesta a la frecuencia	El movimiento de cables de gran longitud origina distorsión y error
Construcción sencilla	
Mide presiones estáticas y dinámicas	Alta impedancia de salida
Costo relativamente bajo	Deben balancearse reactiva y resistivamente
Para pequeños desplazamientos	Sensible a variaciones de temperatura
De resolución continua	El instrumento receptor es grande y complejo

Poco afectado por vibraciones

### Transductor Piezoeléctrico

(Es conveniente acompañar cada tipo de transductor con una imagen)

Cuando ciertos cristales se deforman elásticamente a lo largo de planos específicos de esfuerzos se produce un potencial eléctrico en el cristal. Por lo tanto si se acopla un diafragma a un cristal de características geométricas adecuadas para que este pueda deformarse con la deformación del diafragma, por lo que al producirse la deformación se producirá una corriente eléctrica que será proporcional a la deformación del cristal.

Entre los cristales usados están: el cuarzo, la turmalina, el titanio de bario y las sales de Rochelle. Los cristales naturales como el cuarzo permiten medir variaciones lentas de presión

porque operan a bajas frecuencias, son resistentes a la temperatura y se pueden usar en aplicaciones duras como choques. Los cristales sintéticos como las sales de Rochelle dan una salida mucho mayor para una presión dada pero son incapaces de resistir altos esfuerzos mecánicos sin fracturarse rápidamente. Con estos instrumentos se pueden medir presiones hasta de 70 MPa (10 000 psi).

Tabla 7.7 Ventajas y desventajas del transductor piezométrico

Ventajas	Desventajas
Tamaño pequeño, compacto y ligero	Son sensibles a cambios de temperatura
Muy lineales	No miden presiones estáticas
Alta respuesta a la frecuencia hasta 100000 ciclos/s	Alta impedancia de salida
No requieren frecuente calibración	Cables de conexión largos originan ruido
	Después de un choque severo no retornan rápidamente a la salida de referencia previa
	Su señal de salida es relativamente débil por lo que precisan de amplificadores y acondicionadores de señal que pueden introducir errores de medición

### 7.1.5. MÉTODOS DE PROTECCIÓN DE LOS SENSORES DE MEDICIÓN, CONTRA EFECTOS DESTRUCTIVOS

En la mayoría de los procesos en los que se mide presión el fluido del proceso se conduce al interior del sensor. Sin embargo cuando el fluido se encuentra a altas temperaturas, es corrosivo, está sucio o tiene materiales semisólidos en suspensión por lo tanto se puede aislar el instrumento del proceso. Para ello existen métodos particulares que nos permiten excluir el fluido del elemento de medición y que per-

miten leer aun así la presión del proceso. En algunos casos se puede también proteger los instrumentos con recubrimientos especiales de níquel, cromo o cadmio por ejemplo. Sin embargo, esto puede ser difícil en algunos casos como por ejemplo en el interior de un tubo de Bourdon. Los métodos de protección más comunes son los siguientes:

#### *Sifón de espira simple*

Este método consiste hacer una espira con el tubo de conexión del manómetro al proceso. En esta espira se colocara algún líquido de mayor densidad que el proceso el cual permite el aislamiento del manómetro y el proceso.

Este es muy efectivo para medir presiones de vapor a alta temperatura. En este caso el vapor se condensa en el tubo y forma por sí mismo un sello de agua entre la tubería y el instrumento.

#### *Líquido sellador*

En este caso se usa una cámara cerrada en la cual se coloca un líquido que produce un sello hidráulico entre el instrumento y el proceso. Varias configuraciones son posibles en este caso:

- Cuando el instrumento se coloca por debajo de la toma de presión al proceso el líquido debe tener una densidad mayor a la del fluido del proceso
- Cuando el instrumento se coloca por encima de la toma de presión el líquido sellador deberá tener una densidad menor a la del fluido del proceso o se deberán colocar tubos que sobresalgan del fluido de manera que solo el líquido sellador pueda estar en contacto con el instrumento

Por lo general la cámara debe ser de un área suficientemente grande para que el nivel en el tanque no varíe mucho y no se afecte así la medida de presión por el peso del líquido sellador.

Los líquidos selladores de uso más frecuente son:

- Etileno glicol + agua
- Glicerina + agua
- M-Xileno + Keroseno

Las propiedades deseables de estos líquidos son:

- Bajo punto de fusión o solidificación
- Alto punto de ebullición
- Bajo coeficiente de expansión térmica
- No ser corrosivos

### **Sello volumétrico**

En este caso el medidor de presión se aísla totalmente del proceso mediante un diafragma flexible. El elemento de sello es usualmente de latón o bronce y se rellena el espacio comprendido entre el sello y el instrumento mediante un líquido tal como glicerina o aceite. El diafragma de sello debe ser en este caso totalmente flexible para poder transmitir la presión del proceso al sensor. Con esto se permite un total aislamiento entre el sensor y el proceso y se traslada el problema de corrosión y temperatura a la unidad de sello en donde es más fácil hacer una selección de materiales.

## 7.1.6. MEDICIÓN DE LA PRESIÓN ABSOLUTA

Existen dos formas de medir la presión absoluta de un proceso, la primera denominada mé-

todo indirecto y la segunda con algún método directo.

### **Método indirecto**

La primera forma conocida como método indirecto consiste en medir la presión manométrica y añadirle el valor de la presión atmosférica:

$$P_{ABS} = P_{MAN} + P_{ATM} \quad \text{Ecuación 7.6}$$

Para esto se debe conocer con precisión el valor de la presión atmosférica, esta varía de un lugar a otro según el valor de la altitud y de las condiciones climatológicas. Por ejemplo:

- A nivel del mar esta es de aproximadamente 100 KPa (14.7 Psi)
- En el zócalo de la Ciudad de México es de aproximadamente 77.2 KPa (11.2 Psi)

Si no se conoce la presión atmosférica exacta se pueden cometer errores de hasta 15 KPa (2.1 Psi). Una de las formas más usadas para medir la presión atmosférica con exactitud consiste en calentar agua llevándola a ebullición, y medir esta temperatura. Esta será la temperatura de saturación del agua a una determinada presión, la cual se puede conseguir en las tablas termodinámicas, esta presión será por lo tanto la presión atmosférica local.

### **Métodos directos**

La utilidad principal de estos métodos es la de medir presiones de vacío por debajo de 1 mm de columna de mercurio, que es la presión de vacío más pequeña que se puede medir en campo.

### 7.1.7. REGISTRO DE TRANSITORIOS DE PRESIÓN

Existen en el mercado instrumentos registrados de la presión en conductos que detectan y registran eventos de sobrepresión con lecturas en alta velocidad de 10, 100 y 1000 lecturas por segundo con el software, la memoria y los accesorios de acuerdo con las condiciones de la aplicación.

## 7.2. MEDIDORES DE NIVEL

El nivel del agua es un indicador inmediato de la disponibilidad del recurso y de su condición potencial de peligro para la toma de decisiones y acciones de prevención de posibles desastres, como es el caso de presas o ríos en el caso de niveles altos. En el caso de niveles bajos en fuentes de abastecimiento o tanques de almacenamiento se pueden tomar acciones de racionamiento o de otras medidas no estructurales.

Los medidores o instrumentos de nivel de agua están compuestos por dispositivos generalmente muy simples y, en algunos casos se construyen localmente en las mismas empresas de agua y saneamiento o de servicios de agua. En este campo son diversas las posibilidades: la creatividad y el ingenio producen soluciones muy variadas. En este apartado se describen, las siguientes formas clásicas de medir el nivel del agua:

- Regla limnimétrica
- Tubo piezométrico con visor transparente
- Flotador
- Medidor neumático
- Medidor con resistencia variable
- Medidor con electrodos

En la mayoría de casos, es suficiente la indicación local a una distancia pequeña. En los casos poco comunes en que interesa el registro, se pueden obtener fácilmente los dispositivos necesarios, de los fabricantes de aparatos de instrumentación.

### 7.2.1. REGLA LIMNIMÉTRICA

Se emplea generalmente para medir el nivel de agua en ríos, represas, pozos de succión, cajas de arena y tanques sin cubierta. Proporcionan solo indicación visual (Ilustración 7.12 e Ilustración 7.13).

La regla debe ser de material resistente a la corrosión, y de un color que contraste con los números gravados en su cuerpo; debe fijarse firmemente después de verificar su precisión. Este es el sistema más simple para medir el nivel del agua.

Ilustración 7.12 Regla limnimétrica

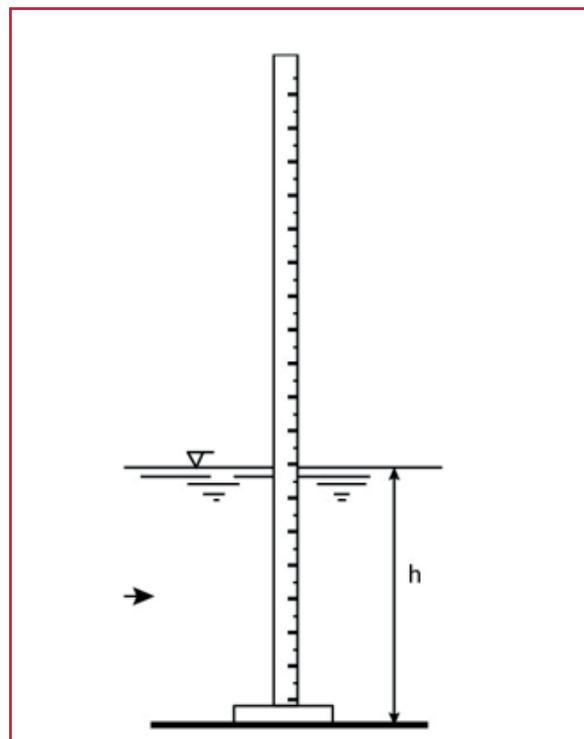


Ilustración 7.13 Escalas de nivel

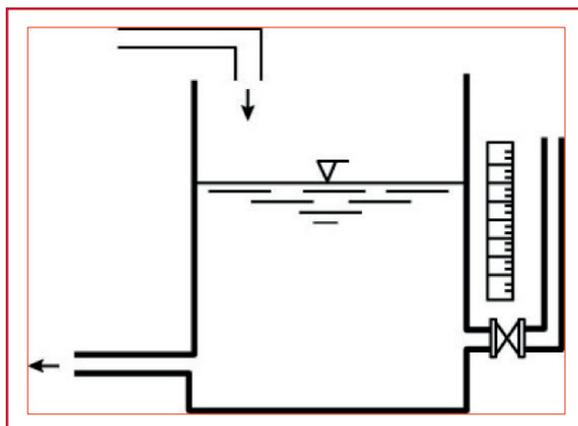


### 7.2.2. TUBO PIEZOMÉTRICO CON VISOR DE NIVEL

Se trata de un tubo de vidrio que se conecta a la pared lateral de tanques abiertos o cerrados, presurizados o no (Ilustración 7.14).

Su diámetro interno debe ser superior a 12 mm para evitar los efectos de la capilaridad.

Ilustración 7.14 Tubo piezométrico con sensor de nivel



### 7.2.3. FLOTADOR

El elemento esencial de un medidor de nivel de agua de este tipo es un flotador, el cual es hecho de material resistente a la corrosión, acoplado a una escala o dispositivo para la transmisión de su movimiento a distancia (Ilustración 7.15). Se emplea normalmente en tanques apoyados, enterrados, semienterrados, y elevados, variando la configuración geométrica del sistema de transmisión de movimiento del flotador o del nivel interior.

La posición de la boya es la que define el nivel del agua; la parte sumergida de la boya debe permanecer prácticamente constante; la variación puede provocar errores de medición, este hecho debe considerarse durante la calibración de la escala.

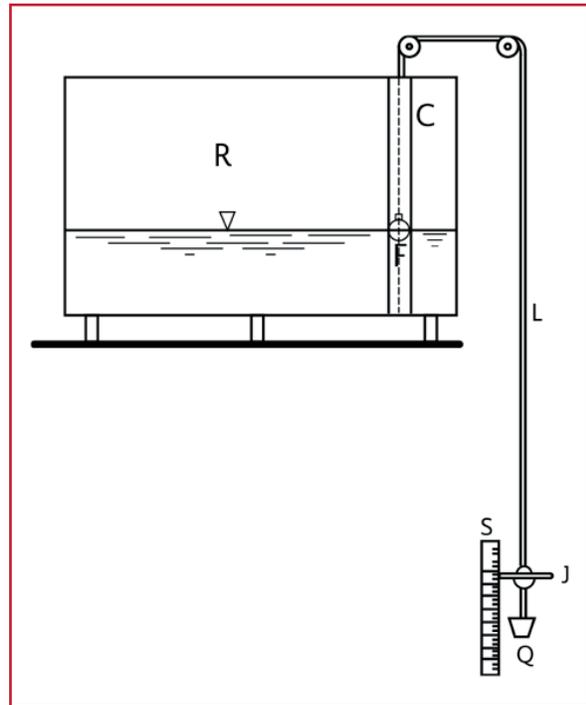
La distancia entre la escala y el flotador no debe exceder de 100 m.

Se puede esperar que la indicación del nivel sea bastante precisa si las dimensiones del flotador han sido bien determinadas y si los elementos mecánicos para transmisión a distancia de los movimientos del flotador han sido bien equilibrados.

Los errores que pueden ocurrir con este tipo de medidor, son los siguientes:

- Cuando no se realiza un mantenimiento adecuado de los componentes móviles del sistema, la fricción entre los elementos que se mueven reduce la sensibilidad del aparato. Para aumentar la fuerza activa, representada por el flotador se deberán utilizar flotadores con diámetros iguales o superiores a 300 mm
- El movimiento de la cuerda que interconecta el flotador con el contrapeso alterará los pesos de los tramos de la cuerda, situados antes y después de las poleas, resultando, como consecuencia, la variación de la línea de agua en el flotador, provocando pequeños errores que tienen que ser tomados en cuenta al diseñar el medidor
- La alteración del peso del flotador, causada por corrosión o infiltración de agua dentro del flotador provocará la variación de su parte sumergida, provocando error en la lectura del nivel de agua del tanque

Ilustración 7.15 Flotador

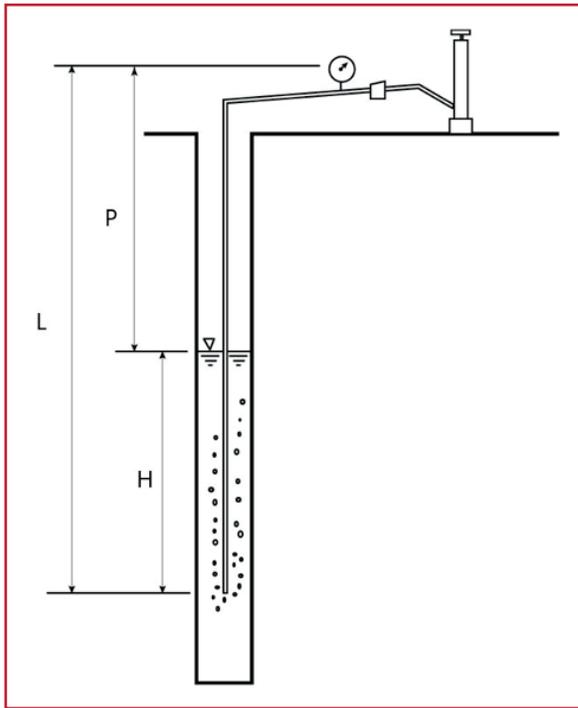


#### 7.2.4. MEDIDOR NEUMÁTICO

Se utiliza para medir el nivel de agua en situaciones de difícil acceso a la misma, por ejemplo: pozos tubulares.

Este medidor consiste en un tubo de diámetro pequeño, abierto en el extremo, sumergido bajo el nivel del agua. Después de introducir aire comprimido al tubo, hasta lograr que se elimine toda el agua que estaba contenida en el mismo, se debe mantener una pequeña y continua alimentación de aire, de forma de garantizar la salida permanente de burbujas por el extremo inferior del tubo (Ilustración 7.16). Una vez observada esa condición, se verificará un equilibrio

Ilustración 7.16 Medidor neumático



entre la presión interna en el tubo y la altura de agua sobre el punto de descarga del aire. Conviene observar que un exceso de caudal de aire ocasionaría un desequilibrio, debido a la pérdida de carga en la tubería.

La presión de equilibrio debe medirse en un manómetro. Esta presión es igual, en metros de columna de agua, a la longitud sumergida del tubo de aire. Conociendo la distancia vertical entre el centro del manómetro y el extremo del tubo de aire, se obtendrá, por diferencia, la profundidad del nivel de agua.

La profundidad  $P$  del nivel de agua se calcula por la expresión:

$$P = L - H \quad \text{Ecuación 7.7}$$

donde:

- $L$  = Profundidad del extremo sumergido del tubo de aire, a partir del centro del manómetro; está dada directamente por la longitud vertical del tubo de aire
- $H$  = Altura de la columna de agua de la parte sumergida del tubo de aire; está dada por la lectura del manómetro

El tubo de aire puede ser de acero, latón, cobre o plástico, de diámetro interno pequeño. Si el tubo fuera colocado en un pozo para uso permanente, el mismo debe ser protegido contra la corrosión y debe ser, de preferencia, continuo; es decir, sin uniones. Se debe observar de la existencia en los demás puntos del sistema, como son: conexiones, manómetro, etc.

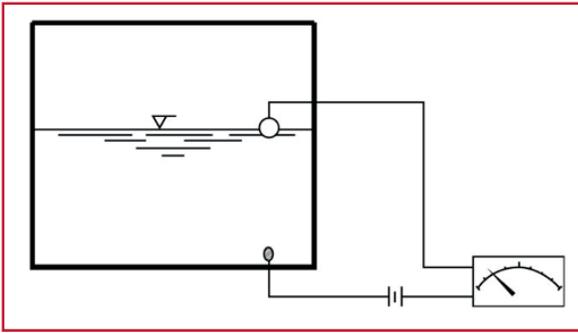
Además, es necesario conocer con exactitud la profundidad que alcanza el extremo de la tubería de aire.

En el caso de medir el nivel de agua durante un ensayo de bombeo, el extremo del tubo de aire debe quedar como mínimo a 3 metros sobre la entrada de agua al sistema de elevación.

#### 7.2.5. MEDIDOR CON RESISTENCIA VARIABLE

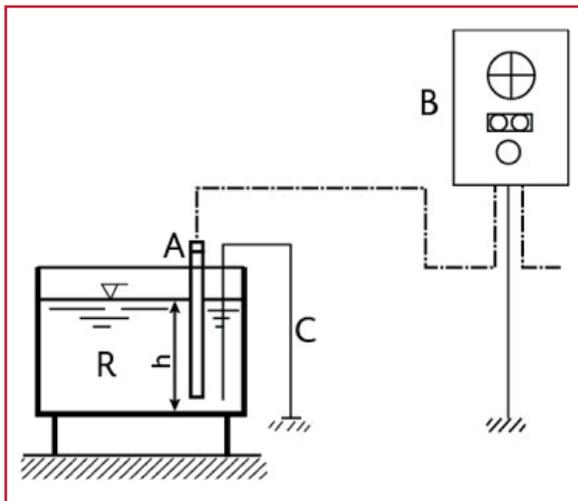
El funcionamiento de estos medidores se basa en la variación de la resistencia eléctrica determinada por el agua, esta variación es función de la altura de la lámina líquida (Ilustración 7.17).

Ilustración 7.17 Medidor de Resistencia Variable



Se puede utilizar otro tipo en que el transmisor es una resistencia de barra A sumergida en el tanque R. La línea de agua varía en la barra en función de la variación del volumen de agua en el tanque (Ilustración 7.18).

Ilustración 7.18 Medidor de Resistencia Variable



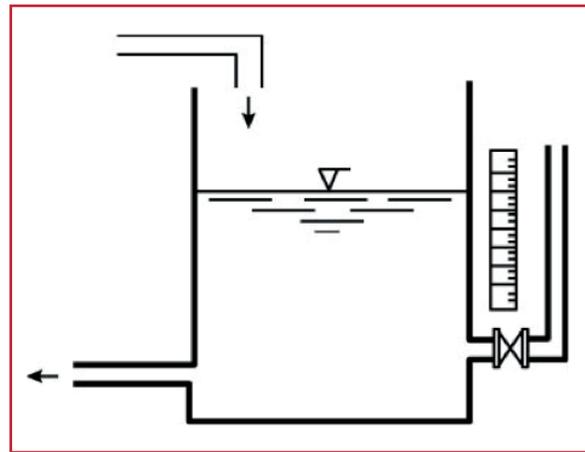
La corriente de operación es transmitida a través de la parte no sumergida de la barra, pasando por el agua y por el hilo conductor C. Por lo tanto, el agua cierra el circuito eléctrico entre la parte no sumergida de la barra y el hilo conductor. Cuando la superficie del agua sube, la resistencia disminuye, aumentando así el valor de la corriente en el circuito de medición y viceversa. Esa corriente es medida en un amperímetro, con una escala cali-

brada en metros de columna de agua o volumen, de acuerdo con lo más conveniente localmente.

## 7.2.6. MEDIDOR CON ELECTRODOS

Se instala una serie de electrodos, a alturas diferentes, en un recipiente conectado lateralmente o en el mismo tanque (Ilustración 7.19), a medida que el nivel del agua sube, los electrodos cierran los circuitos respectivos. Pueden encender lámparas, o también hacer variar la corriente en un amperímetro, contando con escala adecuada la lectura deseada.

Ilustración 7.19 Medidor con electrodos



Para la medición de la profundidad de los niveles estático y dinámico en los pozos profundos de explotación, se utilizan sondas consistentes en un cable enrollado inicialmente en un carrete; se introduce el extremo con punta metálica de mayor peso en el tubo del pozo hasta que hace contacto con el agua cerrando un circuito y se registra una señal en un voltímetro a la vez que se asocia con la profundidad o longitud del cable (Ilustración 7.20).

Ilustración 7.20 Aspectos de la sonda, cable y electrodo





# 8

## SISTEMA DE INFORMACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN

### 8.1. ENTRADAS, PROCESOS Y SALIDAS

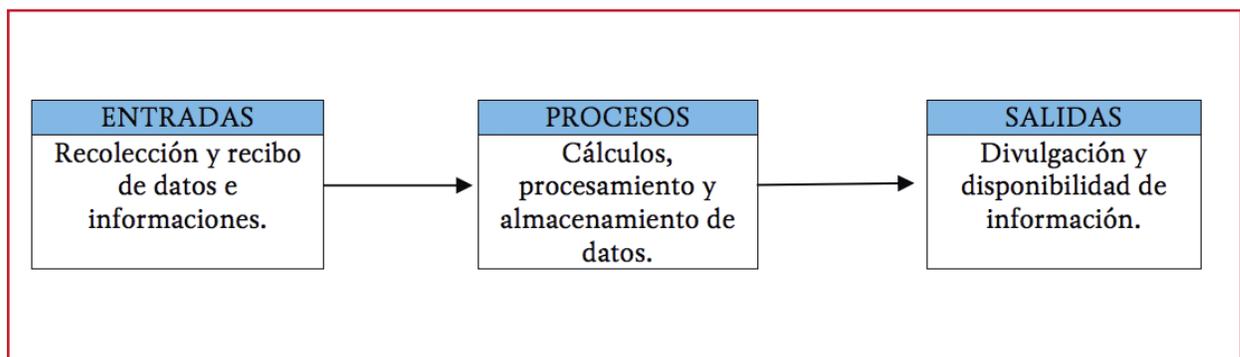
La macromedición como sistema, además de los propios aparatos de medición, incluye un sistema de información para poder cumplir con los objetivos previstos en su implantación, el cual debe formar parte del sistema de información diseñado para el área operacional, para finalmente incorporarse a los sistemas de información del organismo operador.

Tratándose de macromedición se recomienda que primero se defina su sistema de información y luego se instalen los equipos de medición. Esta necesidad es más evidente cuando se trata de la micromedición para determinar

consumos. Cuando se instalan los aparatos de medición previamente se debe establecer el procedimiento de toma de lecturas, las rutas, el periodo de toma, mensual o bimestral, la descarga en un sistema informático para su registro, procesamiento y aplicación de tarifas, etcétera. Volviendo a la macromedición, es común encontrar infraestructura de abastecimiento con medidores instalados, sin contar con el sistema de información formal respectivo.

Un sistema de información de la macromedición consta de las fases de entradas, procesos y salidas. En la Ilustración 8.1 se muestra un diagrama de flujo con las acciones explícitas de las fases de un sistema de información.

Ilustración 8.1 Fases o procesos del sistema de información



### 8.1.1. PLANIFICACIÓN DE LAS ENTRADAS

La frecuencia de la lectura y registro de las variables de flujo consideradas, caudal, presión, nivel y volumen, obedece primeramente a las necesidades de control operacional de la infraestructura de abastecimiento, pero sustentadas en la necesidad primordial de satisfacer las demandas diarias y horarias, mensuales y estacionales en las diferentes zonas de distribución de una ciudad o localidad, tanto actuales como futuras.

Para el control operacional de las variables de flujo (caudal, presión, nivel y volumen), es necesario establecer una planeación de la operación de la infraestructura hidráulica instalada que garantice el abasto y distribución del agua a los consumidores. Para ello, es importante tener identificados los puntos y elementos de control como el abrir o cerrar una válvula para permitir el paso del flujo acorde a las necesidades de consumo, o en su defecto el cierre de la válvula debido a que han sido superadas las variables de abastecimiento (presión, gasto, nivel o volumen) y por seguridad de la red, sea necesario controlar las variables a condiciones más seguras.

Sin embargo, si el sistema hidráulico es operado con más de una bomba en serie o interconectado, se debe establecer en la planeación para el control, el registro o monitoreo de las variables de flujo, para decidir en qué momento o bajo qué condiciones se debe apagar un equipo de bombeo de tal manera que se garantice el control operacional y seguridad de la red hidráulica.

Es importante también como parte del control operacional, conocer el sistema hidráulico e identificar el mecanismo de operaciones y con-

trol para los sistemas automatizados o de intervención manual.

En estos usos de la medición la planificación del registro de las entradas debe ser continuo para detectar valores preestablecidos para decidir alguna operación manual o automatizada (en la Ilustración 8.2 se muestra un Pozo con medidor electromagnético de inserción, sensor de presión, válvula con servomotor para control automático, telemetría por radio frecuencia, y vigilancia contra intrusos).

Para el control de pérdidas es importante considerar la variación horaria del suministro y la demanda que se requiere para ello, es necesario contar con información horaria de consumos máximos (caudal y presión) en las líneas primarias y de nivel en los tanques de regulación. Para fines de producción y planeación, los datos requeridos de las variables, principalmente de volumen, en captaciones y zonas de distribución, sectorizadas o no, pueden ser suficientes con una lectura mensual.

En el diseño de distritos hidrométricos se considera la instalación de una estación de medición en la línea que lo alimenta. Asimismo la medición de consumos en los predios con toma domiciliaria. Esto tiene varias ventajas de mejora de control operacional para un mejor servicio, así como de control de pérdidas, tanto físicas como comerciales. Con esta medición de volumen abastecido y de volumen consumido se puede hacer un balance mensual que genere las pérdidas totales por distrito para luego disgregarlas en físicas y comerciales mensuales, y tomar las acciones más adecuadas para reducir y controlar cada una de ellas. Las físicas mediante el control de presiones, principalmente, y las comerciales mediante la identificación de usuarios no registrados, principalmente.

Ilustración 8.2 Pozo instrumentado



Como puede verse, la planificación, tanto del sistema de información como del equipamiento de medición, parte de la identificación de estas necesidades mediante la comunicación con las distintas áreas usuarias de los datos. En esta etapa se definen los puntos de medición, las variables a medir, la frecuencia de toma de lecturas, el registro manual o mediante *data logger*, el tipo de medidor que responda a la necesidad de todas las áreas, y en especial al área operacional de la cual va a depender el sistema de macromedición. Ahora se ve claramente que el primero antecede al segundo. Esta etapa es de suma importancia para proyectar un sistema de macromedición eficiente, que responda a las necesidades de las distintas áreas de un organismo operador: Sistema Operacional, Sistema de Planeación, Sistema Comercial, y otros.

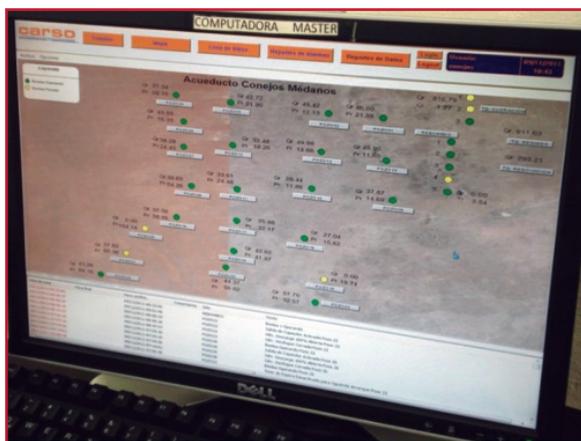
### 8.1.2. FASE DE PROCESOS

Como puede observarse en la Ilustración 8.3, la fase de procesamiento, una vez que se han tomado las lecturas de caudal, presión, nivel y volumen, además de otras variables como pueden ser las eléctricas, lo siguiente es su revisión para verificar que estén dentro de los parámetros normales o de su historial, antes de proceder a generar un comando en el caso de control operacional, o de su procesamiento para preparar informes varios. En el control operacional básicamente lo que se tiene es el monitoreo de las distintas variables, el cual es continuo.

En el primer caso la verificación puede ser automatizada para ordenar una acción también automática mediante actuadores. En el segundo

caso se pueden también generar alertas o reportes de valores fuera de lo normal para verificar si es problema de lectura, del medidor, o de otro tipo. En este último caso por ejemplo, en un distrito hidrométrico cuyo medidor de alimentación marca a cierta hora un caudal instantáneo muy por arriba de lo esperado, puede deberse a la rotura de una tubería.

Ilustración 8.3 Adquisición y procesamiento de datos de flujo, presión y nivel de una batería de pozos profundos



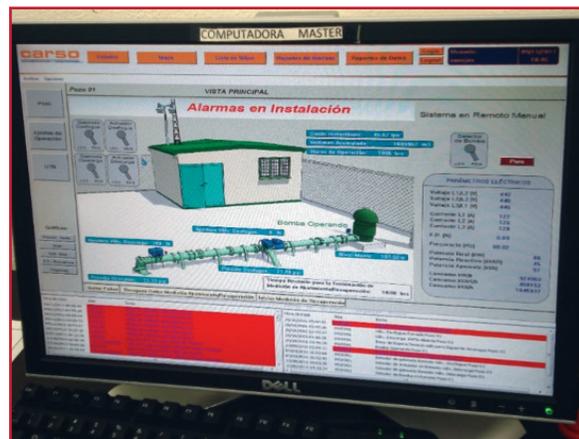
### 8.1.2.1. Adquisición y procesamiento

En organismos operadores pequeños o en desarrollo, la toma de lecturas en medidores puede ser de manera directa para registro manual en formatos en papel. Los organismos operadores medianos pueden contar para el registro de las lecturas, con computadoras, tabletas, terminales portátiles (hand held), etcétera. Sin embargo en organismos operadores desarrollados, los datos se pueden adquirir automáticamente mediante sistemas informáticos denominados sistemas de adquisición y procesamiento de datos. Por ejemplo en una planta de tratamiento de aguas residuales, con varios parámetros a estar monitoreando en sus distintos procesos, incluidos los de calidad, es común y conveniente contar con este tipo de sistemas.

La adquisición de datos o de señales consiste en la toma automática de lecturas en los distintos sensores instalados, consistentes en un conjunto de señales físicas que se convierten en tensiones eléctricas, ambas analógicas, que se digitalizan para su procesamiento en una computadora, a través de una tarjeta de adquisición de datos. Estos sistemas integran diferentes elementos, como transductores, multiplexores, amplificadores, convertidores, analógico digital (A/D) y digital analógico (D/A), un microcontrolador como CPU, software y otros.

Existen en el mercado diversas opciones genéricas para esto, listas para programar el procesamiento de la información digitalizada, y para generar los reportes requeridos. También se pueden hacer desarrollos específicos, a la medida de los requerimientos, como se puede ver en la Ilustración 8.4.

Ilustración 8.4 Presentación de datos instantáneos, eléctricos y de flujo, en tiempo real de un pozo



Los medidores electrónicos de caudal con registrador de datos, integran en su elemento primario (sensor) y elemento secundario (convertidor) varios de los elementos de un sistema de adquisición de datos. Sin duda la transferencia de la información tiene implicaciones de adquisición y tratamiento de datos, que se tratará de

manera aplicada y práctica, dados los alcances de este trabajo que se limitan al uso de equipos y sistemas comerciales.

### 8.1.3. SALIDAS

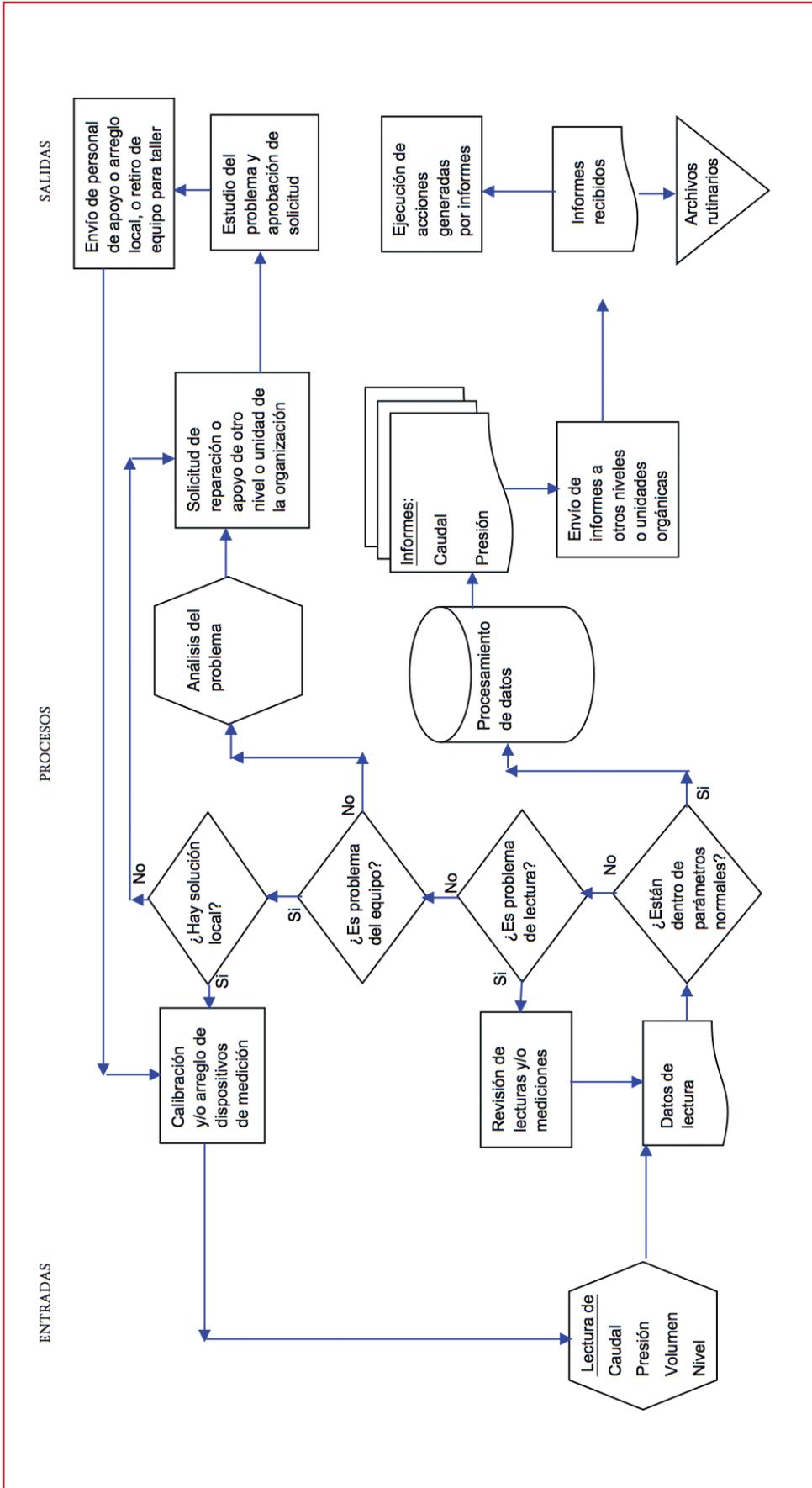
Las salidas son reportes a las distintas áreas, para monitoreo y para ejecución de acciones de manera manual o automática, y también para fines de producción y de planificación. Las acciones pueden ser para su ejecución inmediata, como el paro automático de una bomba; para ejecución en el menor tiempo posible, como la rotura de una tubería de conducción detectada por pérdida de presión; para atención programada, etcétera. Para el control operacional es útil el monitoreo en tiempo real, como puede verse en la Ilustración 8.5. En este caso la adquisición de datos es realizada de manera telemétrica mediante radio frecuencia, para su presentación en un centro de control. En el siguiente apartado se toca el tema de comunicación digital de los ins-

trumentos de medición, que permite la adquisición, transmisión y procesamiento de datos.

En el ejemplo del distrito hidrométrico, si las lecturas fuesen correctas, se tendría que enviar un reporte de inmediato al área responsable de atención a fugas de este tipo, así como el envío de los informes a las distintas áreas interesadas en el organismo operador para su propia toma de decisiones. Esto es lo que se conoce como divulgación de los datos y reportes de medición.

Los reportes mensuales son del interés particular para el área o departamento encargado de la realización de balances de agua y de disgregar las pérdidas en físicas y comerciales, para la atención de las áreas correspondientes. Normalmente estos resultados son polémicos dado que las áreas operacionales y comerciales tratan de defender una postura de menores pérdidas. Por esta razón es importante que los reportes puedan ser revisados y confirmados por el sistema de macromedición.

Ilustración 8.5 Sistema de información de la macromedición



# 9

## COMUNICACIONES Y TELEMETRÍA

### 9.1. COMUNICACIÓN DIGITAL

En cuanto a la aplicación de la macromedición al control operacional de los sistemas de abastecimiento, los comandos de control responden a valores establecidos de variables de flujo, eléctricas y de calidad del agua. En un sistema de abastecimiento con gran cantidad de unidades operacionales el control se vuelve complejo, por lo que su ejecución manual es cara, ineficiente y propensa a cometer errores. Para el operador de una batería de pozos, de una red de distribución, de planta de bombeo, de una planta potabilizadora, o de una planta de tratamiento de aguas residuales, la automatización permite un control operacional más preciso y económico de los procesos que en estas se realizan. De hecho muchos organismos operadores que han automatizado sus procesos mediante sistemas distribuidos de control e instrumentación, han podido constatar el incrementado de sus eficiencias.

Para automatizar el control de los procesos lo primero es determinar los métodos y medios

para la lectura, registro y transmisión de datos de caudal, presión, temperatura, y otras variables como las eléctricas y de calidad del agua. Lo siguiente es definir los equipos reguladores, válvulas con servomotor, posicionadores y válvulas de control remoto que sustituirán a los elementos de control manual.

Para la transmisión de los datos desde los equipos de medición hasta el sistema de automatización y de éste a los actuadores, se sigue empleando la señal analógica 4 - 20mA, aunque carece de la capacidad de trabajo por red. En esta señal 4 mA corresponde al valor inicial y 20 mA al valor del fondo de escala, de modo que el campo de valores totales se comprime en un manejable intervalo de 16 mA. El canal anular de calibración de molinetes del IMTA, cuya automatización de velocidades de arrastre de molinetes mediante variador de frecuencia se hace a través de la salida analógica de 4 a 20 mA del variador, la cual es digitalizada por la tarjeta de adquisición de datos de *LabView* junto con la señal entregada por los molinetes para su procesamiento (ver en Ilustración 9.1).

Ilustración 9.1 Canal anular de calibración de molinetes del IMTA



Las dos principales ventajas de emplear señales de 4-20 mA son: que el sistema resulta intrínsecamente seguro y que es de fácil transmisión por dos hilos. Sin embargo, hay necesidad de mayor capacidad de comunicación y máxima precisión en los equipos de campo, lo cual esta señal no puede manejar con facilidad. Sólo puede transmitir una señal por cada par de hilos, como puede ser el caudal. Por ello la mayoría de los medidores y otros equipos de campo modernos incorporan procesadores que digitalizan la señal analógica procedente del sensor o elemento primario. Las conversiones de señal implican pérdidas de precisión y costos mayores. La transmisión digital de datos no presente este inconveniente.

En la comunicación digital los equipos pueden estar conectados a un mismo cable. Un sistema de señales digital requiere menos cableado incluso aunque transporta un volumen mayor de datos, por lo que los costos de instalación y cableado son menores. Estas ventajas se adaptan a los requisitos que demandan los usuarios de medidores de caudal. Por este motivo, se desa-

rolló un nuevo estándar de integración de señales para los equipos de campo, que culminó en la definición del bus de campo.

Es necesario definir la aplicación para la cual se va a emplear. Las soluciones estandarizadas son el punto de partida para una amplia gama de productos. Como resultado, han surgido diversos estándares: PROFIBUS en Europa y FOUNDATION Fieldbus en América.

Asimismo la tecnología SMART combina la tecnología analógica con las ventajas de la transmisión digital, solapando una señal de comunicación digital a la señal de valor medido a 4-20 mA. El protocolo HART, en sentido, tiene estatus de estándar industrial. En lugar de funcionar como bus de campo, HART trabaja principalmente como interfaz de comunicaciones de equipos de campo inteligentes con finalidades de configuración y diagnóstico. La automatización de procesos presenta tres sistemas de comunicación que compiten más o menos en el mismo nivel:

## 9.2. TELEMETRÍA PARA LA TRANSMISIÓN Y DESPLIEGUE DE DATOS EN TIEMPO REAL

La telemetría es una técnica automatizada de las comunicaciones que permite la medición remota de magnitudes físicas o simplemente en su significado literal es la medición a distancia. Esta técnica utiliza comúnmente transmisión inalámbrica y sirve para monitorear variables ambientales o controlar a distancia un proceso (abrir o cerrar válvulas, etcétera). Por lo tanto, la telemetría simplifica y da rapidez en la adquisición de información de lugares remotos. Para llevar a cabo la telemetría se han desarrollado dispositivos conocidos como módems o UART's (por sus siglas en ingles) que se conectan con diferentes protocolos (i.e. vía RS232) a los equipos de medición para transmitir las variables que se estén midiendo. Las lecturas se envían desde cada dispositivo (modem) a otro que funciona como concentrador o servidor (Ilustración 9.2). El concentrador puede ser una computadora personal en donde se almacena y despliega la información, la cual, si cuenta con Internet esta puede ser fácilmente desplegada en una página

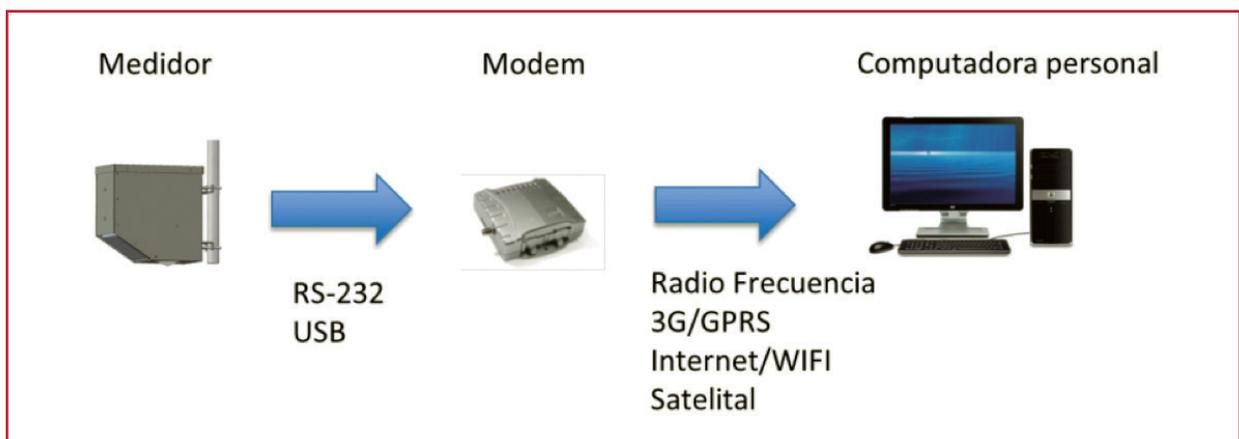
web la cual puede ser consultada desde cualquier dispositivo que esté conectado a la red.

Para la telemetría existen un sinnúmero de herramientas (hardware) para llevarla a cabo. Sin embargo, uno de los problemas para conformar un sistema de telemetría son los protocolos de comunicación para transferir los datos del medidor al modem. El formato más común de transmisión de datos es en ASCII, sin embargo, cada medidor o instrumento puede tener diferente protocolo de comunicación el cual se requiere que sea especificado por el fabricante del equipo de medición.

### 9.2.1. MÓDEM DE TRASMISIÓN DE DATOS

La arquitectura de la telemetría requiere de un modem en cada uno de los extremos que emita o reciba en una frecuencia definida y una antena. Actualmente, existe en el mercado un gran número de módems que dependiendo de las necesidades o requerimientos puede transmitir vía radio frecuencia, bluetooth, celular (3G/GPRS), internet o satelital. El precio de los mismo es

Ilustración 9.2 Diagrama básico de transmisión de datos por telemetría



muy variado por lo tanto se pueden comprar desde el modem más sencillo a bajo costo hasta módems muy robustos, con amplias capacidades de almacenamiento, configuración y opciones de puertos de comunicación pero que tienen un alto costo. Por lo tanto existen un numeroso tipo de módems que aprovechan las diferentes características de la propagación de las ondas de radio y sus respectivas bandas de frecuencia. De aquí que los módems son diseñados para operar en ciertas frecuencias tal como se describe en la Tabla 9.1. Adicional a la frecuencia un factor adicional que se tiene que considerar en la telemetría es el rango de comunicación de los equipos (Ilustración 9.3). La línea de vista es muy importante cuando sea posible (lo que quiere decir que una antena debe ver la otra sin ninguna obstrucción). Aunque esto no es totalmente necesario el hecho de tener línea de vista mejora el funcionamiento y rango de alcance del modem.

### 9.2.2. INTERNET/WIFI/SATELITAL

El internet alámbrico e inalámbrico (WIFI) es una alternativa rápida para la transmisión de datos en lugares donde se cuenta con este servicio. Para la transmisión por internet la configuración más sencilla es que el sensor o medidor tenga un puerto para conexión ethernet y que

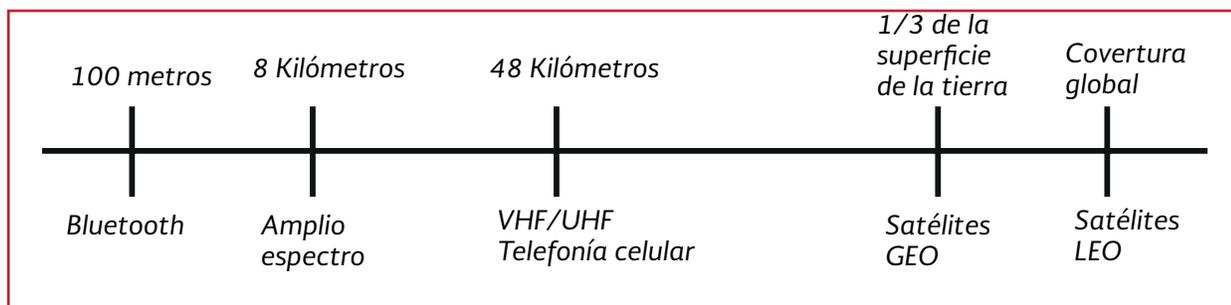
Tabla 9.1 Protocolos de comunicación y frecuencias utilizadas

Protocolo	Frecuencia
Bluetooth	2 400 - 2 483 MHz
Zigbee	868 MHz
	915 MHz
	2 400 MHz
Espectro esparcido (Spread Spectrum)	902 - 928 MHz, 2 400 - 2 483.5 MHz
Wi-Fi (IEEE 802.11 a,b,g)	2 400 MHz, 5 800 MHz
Alta frecuencia (VHF)	30 to 300 MHz
Ultra alta frecuencia (UHF)	300 to 1 000 MHz
GSM (3G/GPRS)	1 850 - 1 990 MHz
	1 710 - 1 840 MHz
GOES Satélite	401.7010 - 402.0985 MHz
Geo-estacionario:	1600 MHz
•Uplink	
•Downlink	
LEO (ORBCOMM) Satellite:	148 - 150.05 MHz
•Uplink	137 - 138 MHz
•Downlink	

por lo tanto nos permita desde una computadora (con internet) tener acceso al medidor y recibir los datos del sistema de medición. Para sitios remotos existe la alternativa de instalar internet satelital que es una de las opciones que se está volviendo más versátil.

La transmisión de datos cada vez se ha vuelto más robusta así como los anchos de banda. Los costos varían dependiendo de su uso en la transmisión de datos. Por lo tanto dependiendo de la cantidad de datos a transmitir dependerá el costo del servicio. El internet satelital no es

Ilustración 9.3 Rango de distancias típicas máximas de transmisión de punto a punto



una opción económica pero bastante viable para la transmisión de datos. En la Ilustración 9.4 se presenta un diagrama de la operación del internet satelital. El medidor o data logger se conecta directamente al modem satelital y, con la respectiva configuración, los datos son incorporados a la red (servidor) en donde son almacenados y desplegados gráficamente. A partir de ahí los datos pueden ser consultados mediante diferentes dispositivos (i.e. celular, pc, etc.). Una de las grandes ventajas de la comunicación a través de internet satelital es que la comunicación puede ser dos vías. Al estar el dispositivo conectado al modem o a la computadora este puede ser verificado y reconfigurado remotamente o en un momento dado reiniciado.

características muy convenientes en ciertas aplicaciones. En el caso de la radio frecuencia la distancia a cubrir con el enlace juega un papel importante en la toma de decisión de los equipos a implementar (radio módems). Asimismo, se debe de considerar la topografía del terreno. La mayoría de los equipos indican una distancia de alcance tanto en exteriores como en interiores. Generalmente, se especifica una distancia máxima de alcance con línea de vista. Al intentar cubrir grandes distancias difícilmente se logra cubrir. Esto se puede mejorar construyendo torres con las cuales se puede dar una gran altura o emplear repetidores, sin embargo, esto incrementa los costos de la telemetría.

### 9.2.3. RADIO FRECUENCIA

Muchos de los sistemas de telemetría emplean Radio Frecuencia (RF) ya que presenta ciertas

La topología a implementar puede ser simple donde el sensor transmite directa y únicamente a un receptor (cliente-servidor) o varios sensores pueden transmitir a un receptor como se muestra en la Ilustración 9.5.

Ilustración 9.4 Diagrama de la operación del internet satelital

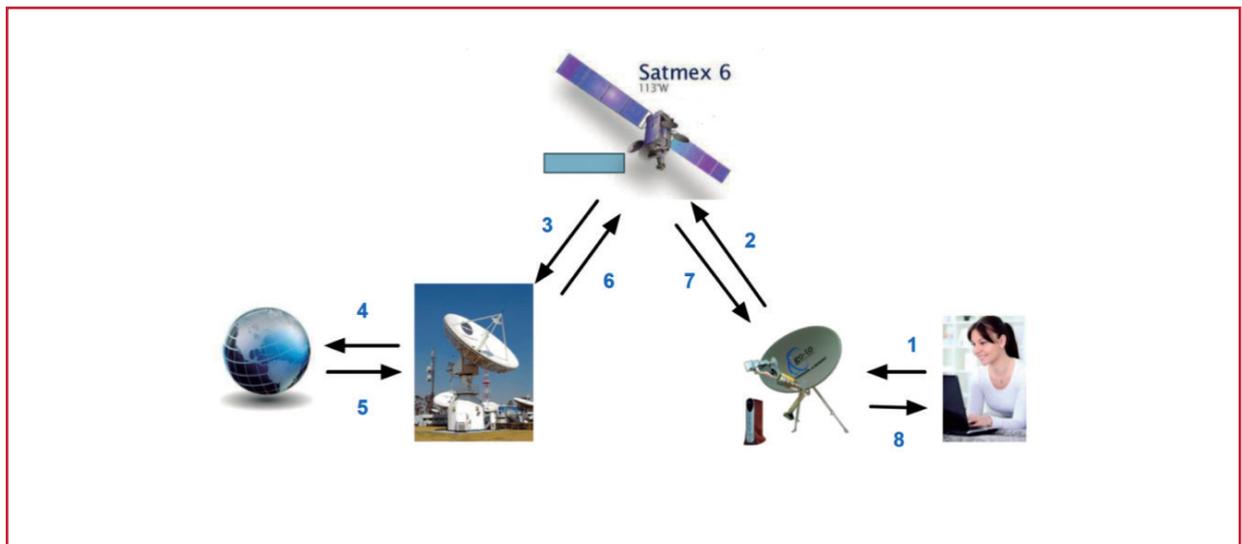
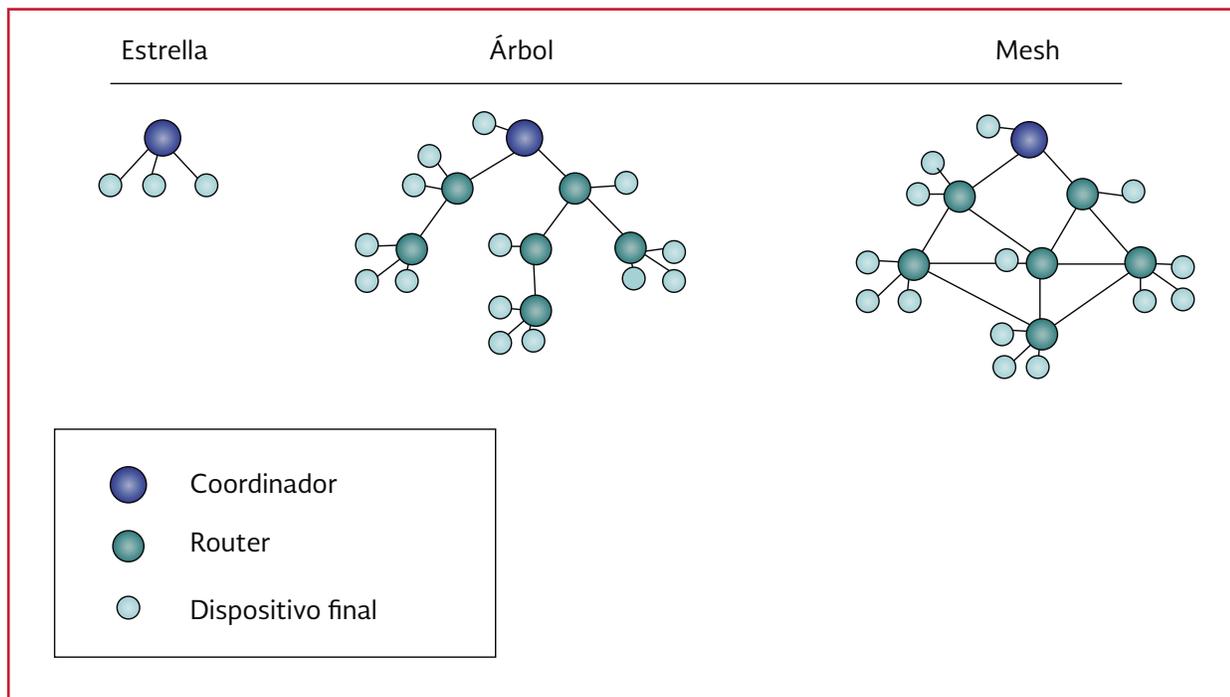


Ilustración 9.5 Diagrama esquemático de las diferentes topologías que se pueden conformar en la transmisión vía radio frecuencia



#### 9.2.4. GPRS/3G

Con la expansión y cobertura de la telefonía celular esta se ha convertido en una herramienta indispensable para la transmisión de datos. La forma más común para comunicarse es vía 3G (tecnología inalámbrica de tercera generación) o GPRS (por sus siglas en inglés). La tecnología 3G y GPRS permiten a un dispositivo estar conectado permanentemente a internet y por lo tanto pueden enviar mensajes instantáneos a un servidor. GPRS permite la transmisión de datos a través de las redes de telefonía móvil y envía datos a una velocidad de hasta 114 Kbps, mientras que, 3G permite velocidades de conexión de hasta 2 Mbps bajo condiciones óptimas.

Para la transmisión de datos vía celular se requiere que el dispositivo de medición se conecte a un modem GPRS vía puerto RS232, USB, etc. Al modem GPRS se le inserta una tarjeta SIM la cual tiene un número de telé-

fono asignado. Para la transmisión de datos se puede contratar un plan de datos mensual o hacer prepagos por el uso de la transmisión de datos. En el caso de la comunicación 3G este consiste de un dispositivo que se conecta al modem vía USB. Una vez configurado el modem contara con servicio de internet y, por lo tanto, los datos pueden ser transmitidos a un servidor en la red.

En la Ilustración 9.6 se muestra un ejemplo de un medidor y la partes de un modem GPRS que está conformado por un microcontrolador Arduino, tarjeta GSM, pantalla de datos, reloj y modulo para tarjeta de memoria. Básicamente, los datos del medidor son leídos por el modem y, mediante el celular, son enviados en tiempos definidos por el usuario a un servidor en donde son almacenados en una base de datos y disponibles en internet. Una vez en la base de datos estos pueden ser graficados y desplegados en una página web.

El costo de un modem GPRS varía dependiendo de las características y capacidades del modem. En el caso particular del modem mostrado en la Ilustración 9.6 este fue integrado para la transmisión de datos del medidor de nivel y velocidad (radar RQ-30). Para esto fue necesario desarrollar un programa e instalarlo en el microcontrolador que interroga y recibe los datos del medidor y posteriormente los envía a un servidor en la red.

### 9.2.5. SATELITAL

Para la transmisión satelital se utilizan satélites con dos tipos de órbita que se conocen como de órbita terrestre baja (LEO por sus siglas en inglés), de órbita terrestre media (MEO) y geostacionarios (GEO) de órbita terrestre más alta.

Los satélites de órbita baja se ubican a relativamente baja altitud entre los 200 a 500 km, los de órbita media entre los 9 000 a los 19 000 km, mientras que los geostacionarios están posicionados a aproximadamente 35 786 km sobre la superficie terrestre. Los satélites de órbita terrestre baja son generalmente utilizados para la comunicación de datos a alta velocidad, monitoreo ambiental y comunicación de dos vías, ver Tabla 9.2. En la parte comercial ORBCOMM es uno de los principales proveedores de servicios satelitales. Cuenta con una red de 31 satélites de órbita baja y provee de comunicación de dos vías en todo el mundo. Los satélites están constantemente en movimiento alrededor de la Tierra para dar redundancia en la red y minimizar problemas de cobertura global (línea de vista) y, por lo tanto, cuentan con una cobertura global (Ver Ilustración 9.7).

Ilustración 9.6 Sistema de medición y componentes del modem GPRS

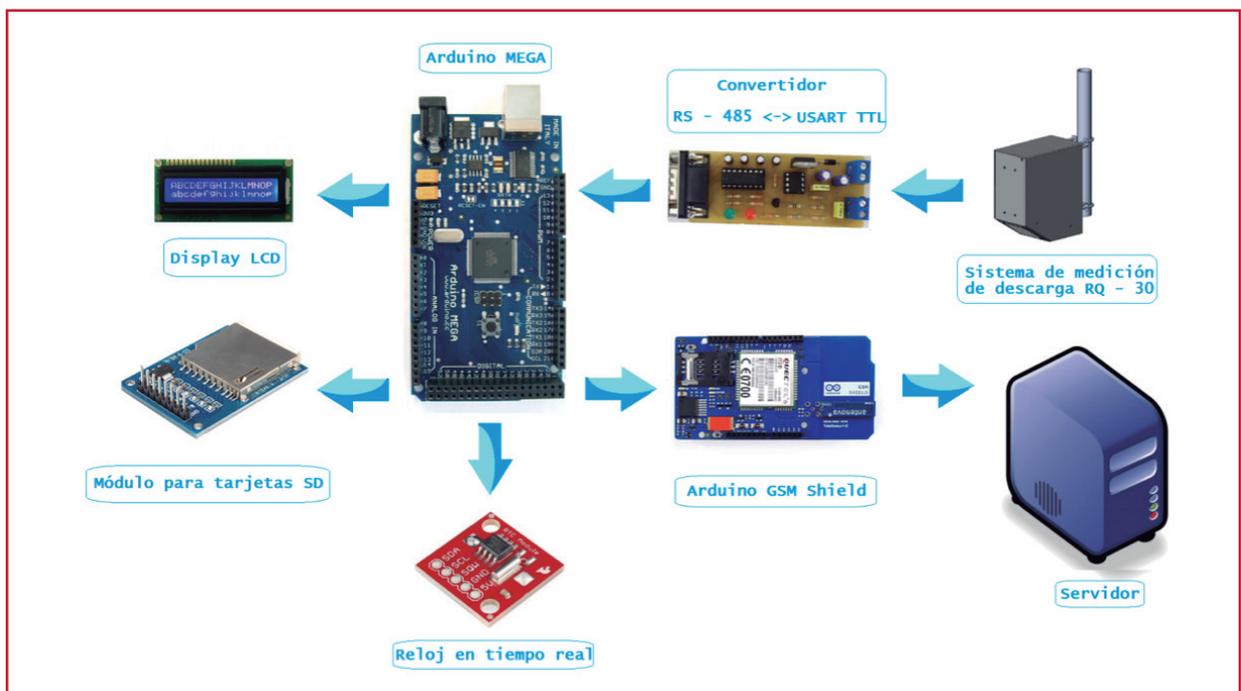
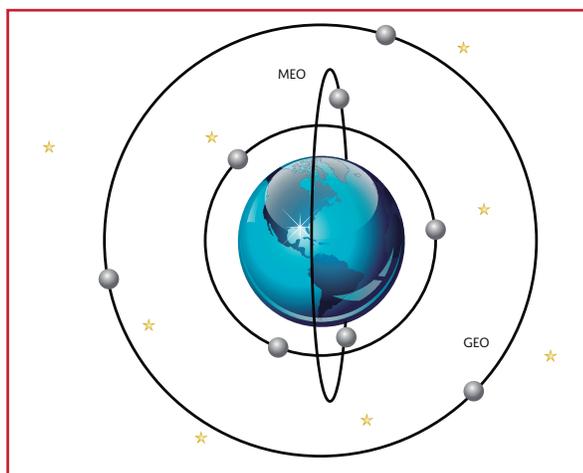


Tabla 9.2 Resumen de los tipos de órbitas, distancias y tiempo de línea de vista

Tipo	LEO	MEO	GEO
Descripción	Órbita terrestre baja	Órbita terrestre media	Órbita terrestre geoestacionaria
Altitud	200 - 500 km	9 600 – 19 000 km	35 786 km
Tiempo de línea de vista	15 min	2-4 h	24 h

Ilustración 9.7 Diagrama de la órbita de satélites (www.inetdaemon.com/tutorials/satellite/orbits)



La telemetría satelital es muy útil para sitios remotos en donde no se cuenta con internet o telefonía celular. Los costos de los módems y servicio mensual son accesibles. Las desventajas sería que la comunicación depende del número de satélites en su red. Por lo tanto, la línea de vista del satélite con el medidor es durante un periodo corto de tiempo (minutos) varias veces durante un día. Generalmente, la comunicación con estos satélites es de una sola vía.

### 9.3. PRUEBAS DE TRANSMISIÓN DE DATOS

El espectro de posibilidades de transmisión de datos en tiempo real es bastante amplio, sin embargo, en algunos casos los precios se incrementan significativamente.

Como parte de los desarrollos de telemetría, en el IMTA se llevó a cabo la implementación de 2 dispositivos (módems) de bajo costo para pruebas de telemetría, con tecnologías Arduino y Raspberry Pi. Ambos dispositivos se implementaron para transmitir a través de celular (3G/GPRS) y se desarrollaron programas de cómputo para leer los datos de un dispositivo o sensor para después transmitirlos a la red (base de datos). Ya en la red, los datos son desplegados en una página web y por lo tanto pueden visualizados en cualquier dispositivo que tenga acceso a internet.

### 9.4. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

La telemetría es una herramienta que cada día se ha vuelto más común para la transmisión de datos en tiempo real. Existen diferentes opciones dependiendo de la ubicación del medidor o estación de monitoreo. Por lo tanto, si el medidor está dentro de la cobertura de internet por cable o WIFI los datos pueden ser transmitidos y enviados directamente a un servidor. Si el medidor está fuera del alcance de la cobertura de internet por cable o WIFI la siguiente alternativa podría ser el transmitir los datos por radio frecuencia o vía celular. En el caso de la radio frecuencia el alcance del receptor/transmisor está determinado por su potencia y por la línea de vista que se tenga entre el transmisor y receptor. Con la

radio frecuencia se pueden abarcar grandes distancias siempre y cuando se incluyan estaciones adicionales (routers) que permitan retransmitir la señal.

Para sitios remotos donde no se cuenta con cobertura de internet o telefonía las alternativas más viables son las satelitales. Para esto se están utilizando los satélites de órbita baja (LEO) los cuales permiten enviar datos del medidor a una estación satelital terrena y de ahí a la red. La transmisión dependerá del paso de los satélites y de que estos estén a línea de vista con la antena del modem satelital. Por lo tanto la transmisión no siempre es en tiempo real. En contraste con el internet satelital que utiliza satélites de órbita alta geoestacionarios (GEO) lo que permite que este en comunicación las 24 horas. De aquí que un sistema con internet satelital permite que la información se tenga en tiempo real además de que la comunicación es de dos vías y por lo tanto el dispositivo de medición puede ser reconfigurado o reiniciado remotamente. Los cos-

tos de transmisión de datos en ambos casos son similares, sin embargo, el potencial para otras aplicaciones es mayor con el internet satelital.

Independiente del sistema que se elija se requiere de un mantenimiento periódico de todo el sistema. Tanto de la revisión de los sensores del medidor de que esté operando normalmente así como de la de la revisión y mantenimiento del modem. Asimismo, otra de las partes importante en la telemetría es el mantenimiento de la base de datos y la revisión continua del despliegue de la información para que esté disponible a los usuarios que la requieran.

Como parte de las pruebas de telemetría que se llevaron a cabo en el IMTA, con base en las tecnologías Arduino y Raspberry Pi, se mostró que se puede implementar un sistema de telemetría de datos y ser desplegados en una página web. Los resultados fueron satisfactorios y robustos; son una alternativa de solución para implementar sistemas de telemetría de bajo costo.



# 10

## MACROMEDICIÓN

### 10.1. IMPORTANCIA DE LA MACROMEDICIÓN

La macromedición es el elemento fundamental para medir y registrar los volúmenes de agua que se extraen u obtienen de una fuente de abastecimiento, ya sea subterránea (acuífero-pozo profundo) o superficial (río, presa, lago, etc.). El objetivo fundamental es conocer los caudales realmente extraídos de acuerdo a los volúmenes concesionados y de esta manera conocer la cantidad de agua producida y determinar la eficiencia global como producto de la eficiencia física y la eficiencia comercial.

La macromedición es el conjunto de elementos y actividades permanentes destinadas a la obtención, procesamiento, análisis y difusión de los datos de operación relacionados con los flujos, volúmenes, presiones y niveles en los sistemas de abastecimiento de agua potable. Esta información se debe registrar con la mayor precisión o exactitud posible durante la medición de estos volúmenes de agua, porque de ello depende una importante diferencia en la valoración de los datos de operación de un organismo operador, razón por la cual, es primordial y necesario que se tengan instalados los macromedidores en cada fuente de abastecimiento, para cuantificar

la cantidad de agua producida y entregada para el abastecimiento al usuario.

Por lo antes expuesto, debe ser obligatorio y conveniente el tener un equipo de macromedición de caudal para cumplir con la legislación vigente y como consecuencia contar siempre con información actual, adecuada y confiable, que nos permita realizar una mejor operación del sistema de agua potable y ofrecer un mejor servicio a los usuarios que se atiendan con calidad y en cantidad.

El contar con la instalación de este tipo de equipos de medición, obtenemos varios beneficios, entre los cuales podemos mencionar; la medición de volúmenes versus volúmenes concesionados, los cuales se convierten en el indicador en porcentaje sobre el conocimiento del volumen total de agua que estamos aprovechando, esta medición nos puede ayudar a inferir como se puede ahorrar y disminuir el pago de derechos al considerar volúmenes reales y no los concesionados. Otro beneficio que podemos obtener con la medición del caudal extraído, es el balance hidráulico de la red de agua potable, este tipo de información es fundamental para realizar la modelación hidráulica del sistema, debido a que se puede llevar a cabo un estricto

control de presiones que evite fugas ocasionadas por altas presiones en las líneas de conducción y operar presiones adecuadas en la toma domiciliaria con la que se garantice un servicio de calidad durante el abastecimiento a los usuarios. Asimismo, el balance hidráulico también nos permite determinar las necesidades de regulación en la prestación del servicio del agua a través de una buena operación de los tanques de almacenamiento o de regulación, o mediante la instalación de accesorios como válvulas reguladoras de presión y variadores de velocidad e inclusive diseñar y elaborar un programa de sectorización de redes (ver Ilustración 10.1). Con estas acciones se puede lograr una mejor

distribución de caudales con tendencia a ofrecer un servicio continuo a una mayor área de población. Por lo consiguiente, el contar con un balance hidráulico y con un programa de medición continuo facilita llevar a cabo un monitoreo de diferentes parámetros que contribuyen a la toma de decisiones de manera oportuna, en especial en la detección y reparación de fugas, así como también en la detección y reparación de fallas en los equipos de extracción y dispositivos de regulación, con los cuales se garantiza el uso eficiente del agua, la eficiencia energética, la optimización de los recursos humanos, recursos materiales y recursos financieros del organismo operador de agua.

Ilustración 10.1 Sectorización de una red de agua potable por medio del balance hidráulico



## 10.2. TIPO DE MACROMEDIDORES

Los macromedidores están diseñados para realizar trabajos en sistemas de operación en condiciones duras y caudales altos con una mínima pérdida de carga, normalmente estos medidores son especificados en aplicaciones industriales, distribución de agua, obras hidráulicas, medición de agua y en sistemas agrícolas. En México se puede disponer de tres tipos diferentes de mecanismos en los macromedidores para contabilizar el caudal que pasa por ellos, estos tipos son:

- Medidores de velocidad
- Medidores ultrasónicos
- Medidores electromagnéticos

### 10.2.1. MEDIDORES DE VELOCIDAD

Son de tipo turbina o de tipo propela, las principales características de funcionamiento de estos medidores es que son accionados por medio de una turbina o propela según el tipo del que se trate, ambos tipos de medidor se accionan dependiendo del volumen o caudal circulante que fluya giran los álabes y de acuerdo al número de vueltas resultantes que éstos den se contabiliza el volumen o caudal que pasa a través del medidor, también se caracterizan por tener alta confiabilidad y exactitud en el funcionamiento por medio de una turbina o propela plástica que gira de manera proporcional a la velocidad del flujo, la propela está instalada en el centro del flujo lo cual permite mayor exactitud en la medición, ver Ilustración 10.2. En el caso de la turbina está colocada a lo ancho de la circunferencia del tubo en forma de aspas de un ventilador, ver Ilustración 10.3. En ambas ilustraciones se

puede observar el funcionamiento del medidor de propela y de turbina, así como su mecanismo y diferencias de cada tecnología.

Entre las principales ventajas que tiene estos medidores como parte de su funcionamiento se pueden considerar las siguientes:

#### **Ventajas:**

- Configuración estándar con preparación para lectura remota sin tener que cambiar el registro o desmontar el medidor. Es posible instalar un pulsador para lectura remota según la necesidad. Se pueden adquirir totalmente equipados y cableados para lectura remota si así se decide
- El diseño permite el uso confiable del medidor en altos caudales sin desgaste de los componentes
- Registro seco, cerrado y sellado herméticamente, es antiempañante
- El movimiento del registro por transmisión magnética se mantiene aislado del agua
- Posibilidad de instalación en cualquier posición, Horizontal, Vertical o intermedia en cualquier ángulo
- Fácil mantenimiento por medio del desarme de la tapa metálica con la unidad de medición, en una sola unidad
- Contador de cifras grandes y fáciles de leer

Para obtener un funcionamiento óptimo con las ventajas antes mencionadas, es necesario asegurarse de que las condiciones de trabajos, dimensiones y pesos y datos de operación, sean las que a continuación se describen:

Ilustración 10.2 Macromedidor tipo propela

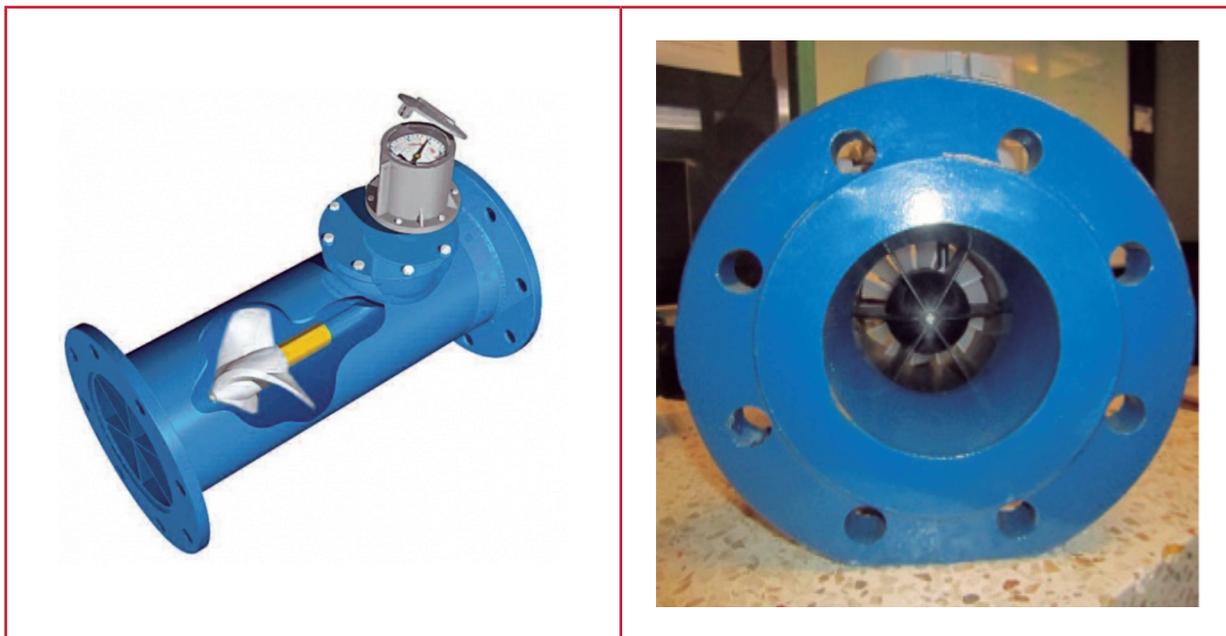


Ilustración 10.3 Macromedidor tipo turbina



Condiciones de trabajo:

- Temperatura máxima 50°C
- Posibilidad de trabajo de alto rendimiento a altos caudales con baja pérdida de carga
- Presión de trabajo hasta 16 bar
- El medidor está diseñado para medición en líneas totalmente llenas de agua
- En la instalación se cumplirán los siguientes requisitos: El largo del tubo recto a la entrada del medidor será 5 veces el diámetro del mismo. El largo

del tubo recto a la salida será 3 veces el diámetro del medidor

Ilustración 10.4 Esquema para la Tabla 10.1 y la Tabla 10.2

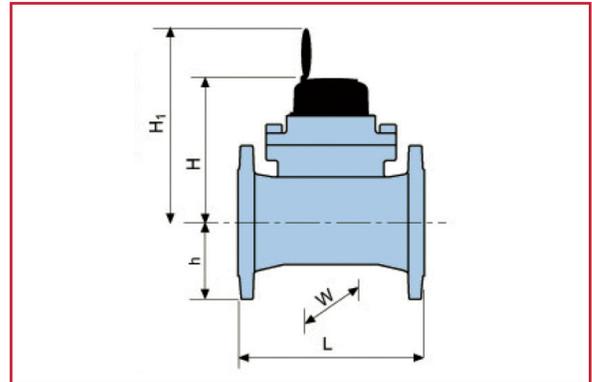


Tabla 10.1 Dimensiones y pesos

Diámetro nominal DN	in	1½"	2"		2½"	3"	4"	5"	6"	8"	10"	12"	16"	20"
	mm	40	50	50	65	80	100	125	150	200	250	300	400	500
			ISO	ANSI/BSTD										
L – Longitud (mm)	260	200	310	200	225	250	250	300	350	450	500	500	500	500
H – Altura (mm)	268	275	270	285	2953	304	318	366	393	512	534	669	765	
H <sub>1</sub> – Altura (mm)	338	345	340	355	65	374	388	463	463	582	604	739	835	
h – Altura (mm)	68	75	70	85	95	104	1182	162	162	194	216	304	355	
W – Ancho (mm)	160	170	160	190	200	230	90	340	340	395	445	600	700	
Peso (kg)	13	12	15	14	16	19	20	52	52	105	120	187	256	

Tabla 10.2 Datos de Operación

Diámetro nominal DN	In	1½"	2"	2½"	3"	4"	5"	6"	8"	10"	12"	16"	20"
	mm	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	400	500
Q <sub>n</sub> – Caudal nominal (ISO 4064) (m <sup>3</sup> /h)		10	15	25	40	60	100	150	250	400	600	1,000	1,500
Q <sub>p</sub> – Caudal Máximo continuo (m <sup>3</sup> /h)		20	30	30	60	100	160	180	300	600	1,000	1,500	3,000
Q <sub>max</sub> – Caudal Máximo Q <sub>máx</sub> (ISO 4064) (m <sup>3</sup> /h)		20	30	50	80	120	200	300	500	800	1,200	2,000	3,000
Caudal Máximo instantáneo (m <sup>3</sup> /h)		30	50	80	120	200	250	300	500	800	1,500	2,500	4,000
Q <sub>t</sub> – Caudal de Transición Q <sub>t</sub> (+-2%) (m <sup>3</sup> /h)		3	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	300
Q <sub>min</sub> – Caudal Mínimo Q <sub>min</sub> (+-5%) (ISO 4064) (m <sup>3</sup> /h)		0.7	0.70	0.75	0.2	1.8	3	4.5	7.5	12	18	30	40
Caudal Δd = 0.1 Bar (m <sup>3</sup> /h)		30	40	55	60	90	120	300	500	850	1,500	3,000	5,000
Lectura Máxima (m <sup>3</sup> )					1,000,000				10,000,000			100,000,000	
Lectura Mínima (l)					1				10			100	

### 10.2.2. MEDIDOR ULTRASÓNICO DE FLUJO O CAUDAL

El término ultrasonido es por las ondas sonoras a frecuencias más altas que las que quedan dentro del alcance del oído humano, es decir, a frecuencias superiores a los 18 Khz aproximadamente. Las fugas de agua generalmente se encuentran entre 120-800 Khz.

Las ondas ultrasónicas obedecen a las mismas leyes básicas del movimiento ondulatorio de las ondas sonoras de frecuencias más bajas. Sin embargo, tienen las siguientes ventajas:

- Las ondas de frecuencia más altas tienen longitudes de onda más corta, lo cual significa que la difracción en torno a un obstáculo de dimensiones determinadas se reduce en forma correspondiente. Por lo tanto, es más fácil dirigir y enfocar un haz de ultrasonido
- Las ondas ultrasónicas pueden atravesar sin dificultad las paredes metálicas de tubo y recipientes. Esto quiere decir, que el sistema de medición entero puede montarse en el exterior de un fluido. Esto es muy importante con fluidos hostiles, o sea aquellos con propiedades corrosivas, radioactivas, explosivas o inflamables. Tampoco existe la posibilidad de que ocurra obstrucción con fluidos sucios o pastas aguadas

El principio de funcionamiento del medidor es a través del registro de altos niveles de señales ultrasónicas, las cuales se transmiten a través del caudal o volumen que pasa por el medidor. Se toman mediciones de la velocidad de la onda cada 5 segundos. Por lo tanto, conociendo el área del conducto y el tiempo que pasa entre onda y onda, se puede determinar el caudal por medio de la expresión:

$$\text{Caudal} = \text{velocidad} (\text{tiempo}) \quad \text{Ecuación 7.8}$$

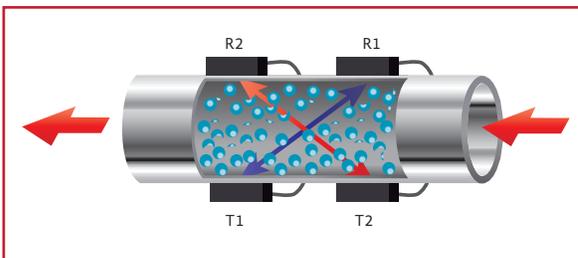
Los medidores de flujo ultrasónicos de tiempo (*transit time*) están basados en el principio de que el tiempo de tránsito de una señal acústica a lo largo de una trayectoria conocida es constante y solo puede ser alterada por la velocidad del fluido en que se desplaza.

Los medidores de flujo ultrasónicos son alimentados eléctricamente y por su principio de funcionamiento se le denomina como tiempo en tránsito. Consiste en medir la diferencia entre el tiempo que le toma a dos señales atravesar una misma distancia, pero en sentido contrario utilizando como medio un fluido. Si el caudal del fluido es nulo, los tiempos serán iguales, pero cuando hay flujo los tiempos serán diferentes, ya que las velocidades de las señales serán afectadas por la del fluido cuyo caudal se desea determinar; esta diferencia de tiempo más el conocimiento sobre la geometría de la tubería y la velocidad del sonido en el medio permiten evaluar la velocidad del fluido o el caudal, ver de Ilustración 10.5 a la Ilustración 10.7.

Ilustración 10.5 Medidor ultrasónico con sensores y registrador externo independientes



Ilustración 10.6 Funcionamiento de los sensores de señal



Los medidores acústicos de flujo fueron desarrollados con base en dos principios:

- El tiempo de tránsito de una señal acústica es mayor en dirección aguas arriba que en dirección aguas abajo
- Que estos tiempos de tránsito pueden ser medidos con precisión

Los medidores de flujo ultrasónico de tiempo en tránsito son instrumentos cuyo objetivo es la medición del caudal a través de la cuantificación de la velocidad de flujo. Se trata de un medidor indirecto del caudal y puede aplicarse tanto en conductos libres como a presión utilizando diferentes accesorios. Sin embargo, los equipos ultrasónicos se aplican principalmente en conductos bajo presión, aunque existen variantes para ser utilizados en superficie libre.

Ilustración 10.7 Medidor ultrasónico con sensores y registrador electrónico integrados



El equipo ultrasónico es sencillo y práctico, debido a que su instalación es sencilla y se puede aplicar en cualquier punto del sistema hidráulico, además, permite medir el flujo sin tener que detener la operación de la línea.

Actualmente, la tecnología de los medidores ultrasónicos ha evolucionado pasando de la colocación de los sensores por la parte externa sobre la tubería para la transmisión de la señal acústica o sonora, a la manufactura de medidores ultrasónicos en carrete con los sensores instalados de manera permanente para su colocación en una línea de conducción desde 2" (pulgadas) hasta 12" (pulgadas) con cuerpo de hierro fundido; ver Ilustración 10.8, de 1 1/2" a 2" (pulgadas) con cuerpo de polímero o plástico Ilustración 10.9 y de 2" a 8" (pulgadas) con cuerpo de acero inoxidable Ilustración 10.10.

Ilustración 10.8 Medidor de agua ultrasónico-cuerpo de hierro fundido



Ilustración 10.10 Medidor ultrasónico-cuerpo de acero inoxidable



### **Principios de la medición**

Imagínese una corriente en sentido normal y otra corriente en contra. La corriente en sentido normal requiere de mucho menos tiempo para llegar a la otra orilla. Las ondas ultrasónicas se comportan exactamente de la misma manera. La onda sónica que fluye con la corriente lo hace a mayor velocidad que la onda en dirección contra la corriente. Los tiempos de cruce TAB (tiempo que requiere las ondas ultrasónicas para atravesar desde el sensor A hasta el sensor B) y TBA (desde el sensor B hasta el sensor A) se miden continuamente. La diferencia en los tiempos (TBA-TAB) es directamente proporcio-

Ilustración 10.9 Medidor ultrasónico-cuerpo de polímero



nal a la media de la velocidad del flujo ( $V_m$ ) del fluido. La tasa de flujo es el resultado de la velocidad multiplicada por el área de la sección de la tubería del flujo.

### **Características**

- Excelente estabilidad y fiabilidad a largo plazo
- Contenido mecánico rígido - IP68
- Bidireccional - incluye salidas bidireccionales
- Formatos de datos flexibles, incluyendo direcciones de flujo, caudales y volúmenes
- Pronto para lectura remota
- LCD de multi línea
- Unidades de volumen y de flujo son programables
- Protección EMI / RFI

### **Principales ventajas de los medidores ultrasónicos**

- Son fáciles de transportar
- Su instalación es rápida y sencilla
- Se instalan en cualquier tipo de tubería
- Son equipos de alta precisión, independientemente del perfil de velocidad, magnitud del flujo y temperatura del fluido

- Son bidireccionales, capaces de medir el flujo en ambas direcciones
- Son no-intrusivos, por lo que los transductores no deben estar en contacto con el flujo
- El equipo no utiliza pares móviles y es muy fácil de utilizar

### 10.2.3. MEDIDORES ELECTROMAGNÉTICOS

Se pueden encontrar en dos tipos de presentaciones, un tipo es llamado medidor de “Inserción” el cual consiste de una cabeza que hace la función de sensor electromagnética instalada en el extremo de una varilla de soporte, puede ser instalado de manera permanente o puede ser utilizado de manera portátil para sensar en diferentes puntos de las líneas de conducción, ver Ilustración 10.11. Esta cabeza sensora puede instalarse en las tuberías existentes sin necesidad de grandes excavaciones ni alteraciones de las tuberías asociadas a los medidores de paso total. Se puede instalar sin interrumpir el suministro de agua, para desmontar con facilidad las calibraciones e inspecciones periódicas. Este tipo de medidor está diseñado para instalarse en las tuberías existentes mediante una pequeña toma con válvula. Por lo general, la cabeza sensora se instala en la línea central de la tubería, aunque también puede ubicarse en una posición crítica (el punto de la velocidad media) a una distancia

de 1/8 del diámetro de la tubería desde la pared. Con estas acciones se facilita una medición local precisa de la velocidad del agua y una buena medición del volumen del caudal, siempre que el perfil de caudal esté completamente lleno. Si el perfil no está completamente, se puede recurrir a un desplazamiento transversal de la tubería, lo que permitirá obtener una medición exacta del volumen del caudal en redes no idóneas.

Entre las características fundamentales cabe destacar el amplio rango de caudal con la mínima velocidad medida (muy por debajo de la que se puede detectar con una turbina de inserción o con dispositivos de presión diferencial), una precisión mejorada como resultado de la ausencia de piezas móviles y de escaso mantenimiento.

Este tipo de medidores es perfecto para una instalación permanente para controlar el caudal de agua potable. Por otra parte, si se colocan varias tomas en las tuberías de suministro, puede ser utilizado como una herramienta de sondeo portátil para asistir en la construcción de un modelo de red preciso, localizar fugas y verificar el funcionamiento de los medidores de paso total instalados. La elevada sensibilidad de facilita el desplazamiento transversal por la tubería para determinar el perfil de caudal y poder así identificar problemas hidráulicos en sistemas complejos, o bien garantizar la máxima precisión que se haya instalado en un punto inadecuado.

Ilustración 10.11 Medidor electromagnético de inserción



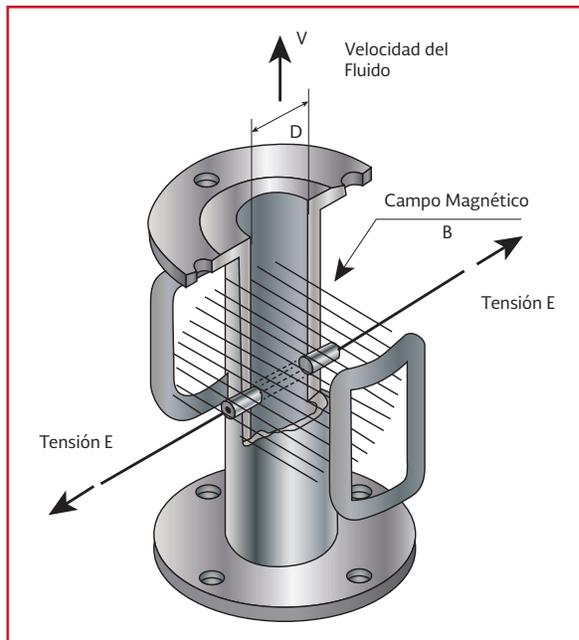
El otro tipo de estos medidores están conformados por un tubo metálico donde se encuentran instalados los sensores y las bobinas para sensar el paso del flujo del agua, ver Ilustración 10.12, el cual generalmente es de acero inoxidable o aluminio, ya que las propiedades magnéticas de estos materiales son bajas, recubierto con neopreno, plástico, teflón, cerámica o cualquier material no magnético y no conductor, el principio de su funcionamiento es con base en la Ley de Inducción de Faraday cuando un fluido conduc-

tor pasa a través de un campo magnético en el sensor. Primero se genera un campo magnético pulsante y la señal de voltaje producida por el flujo en movimiento a través del campo magnético es convertida en unidades de caudal directamente proporcionales al caudal del líquido que pasa a través del campo magnético existente dentro de un medidor, ver Ilustración 10.13, se genera un voltaje, este voltaje es directamente proporcional a la velocidad promedio del flujo lo que el transductor contabiliza y despliega en pantalla.

Ilustración 10.12 Medidores electromagnéticos



Ilustración 10.13 Ejemplo de campo magnético para sen-  
sar el flujo



Cuando se conoce el diámetro interno del sensor de flujo, el volumen es calculado por el Convertidor. El voltaje electromagnético inducido entre los electrodos se iguala a:

$$E = L(B)(V) \quad \text{Ecuación 10.1}$$

donde:

- $E$  = Voltaje electromagnético inducido
- $L$  = Diámetro del sensor de flujo
- $B$  = Fuerza del campo magnético
- $V$  = Velocidad del flujo

El voltaje  $E$  es medido y consecuentemente convertido a un flujo volumétrico, para conocer y registrar los volúmenes de agua que están pasando por el medidor. La señal que toma el medidor electromagnético lo hace a través de sensores, después se procesa e integra la información para su posterior visualización y sintonización. Los datos obtenidos pueden ser enviados a distan-

cia a través de internet, teléfono celular, línea telefónica convencional o radio, o también puede desarrollarse un sistema híbrido que pueda combinar varios de los dispositivos de comunicación. Asimismo, los datos también pueden ser enviados por computadora fija o portátil para el análisis de la información y la emisión de reportes o para su configuración para emitir alarmas.

Entre las principales ventajas se encuentran:

- No posee partes móviles en contacto con el agua
- Para su instalación requiere una pequeña longitud de tramo recto aguas arriba
- La pérdida de carga es despreciable
- El error de medición es entre  $\frac{1}{4} - \frac{1}{2} \%$
- Puede manejar líquidos con sólidos en suspensión
- La instalación es muy sencilla

### 10.3. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

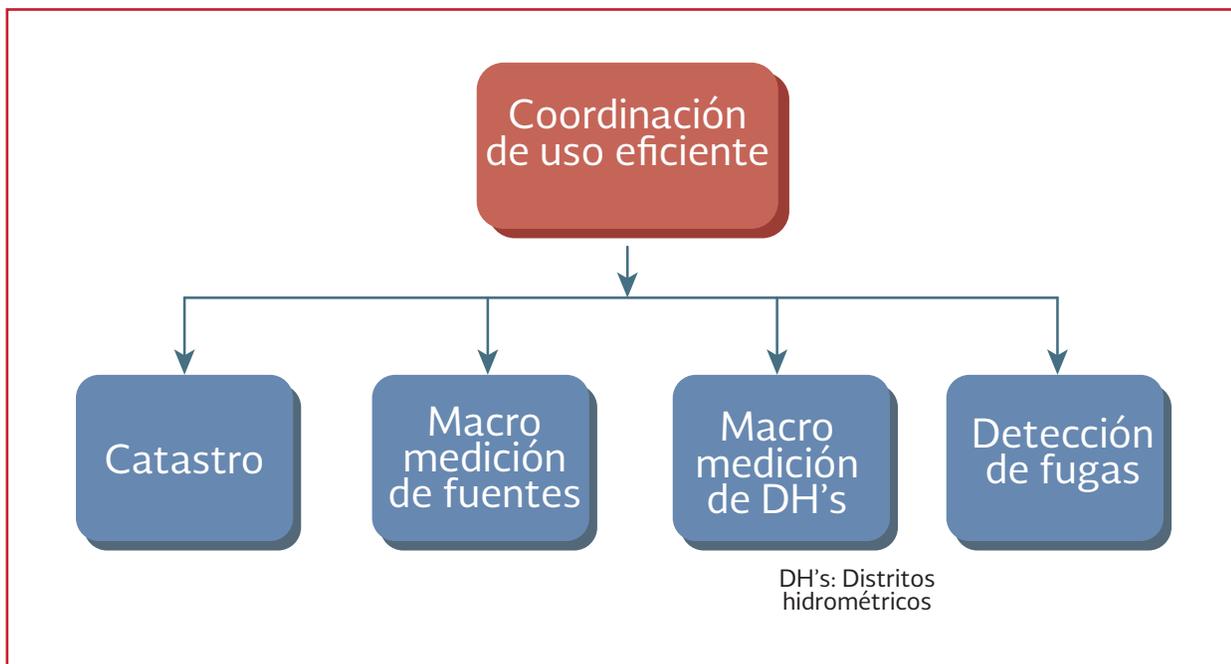
Como estrategia principal es necesario contar y establecer un sistema de macromedición en el organismo operador con un subsistema de información, el cual sea responsable de registrar y llevar a cabo el control del funcionamiento y operación de todos los equipos de medición que se encuentren instalados o se planee instalar en los distritos hidrométricos (DH's) y formen parte de la infraestructura hidráulica de abastecimiento para la extracción, conducción y distribución del agua a la población, para ello, se debe definir y crear una estructura organizacional que atienda todas las actividades que se vayan a realizar de acuerdo a las características técnicas, operativas y administrativas del organismo operador.

Por lo consiguiente, se recomienda realizar un diagnóstico completo sobre las necesidades, la definición de acciones, perfil de personal y vínculos con otras áreas operativas y administrativas del organismo operador, así como también identificar con qué recursos físicos se cuenta, tales como; oficinas, vehículos, equipos portátiles de medición, planeación del sistema de medición a corto, mediano y largo plazo, recursos financieros para el alcance de las metas y el inventario del equipo de trabajo que cumpla con las funciones actuales de macromedición, el programa de mantenimiento, la sectorización de redes de distribución y en su caso, si la operación es manual organizar las brigadas de trabajo, o si la operación de la infraestructura hidráulica esta automatizada y controlada por un sistema de telemetría revisar y actualizar el sistema informático comercial apropiado para la operación.

En la Ilustración 10.14 se presenta como ejemplo la ubicación del sistema de macromedición como parte de la estructura organizacional vigente de un organismo operador. En este caso la estructura organizacional incluye las áreas de catastro, detección de fugas y macromedición en fuentes de abastecimiento y distritos hidrométricos.

Se tomó como referencia la estructura organizacional de la Ilustración 10.14 para realizar un estudio de diagnóstico sobre las necesidades de operación y planeación de las áreas de macromedición, llegando a identificar la problemática y necesidades importantes de todos los aspectos que intervienen, tales como; los recursos humanos, físicos, materiales, financieros, de planeación, administración y control, para un buen funcionamiento de la macromedición en la extracción, abastecimiento y distribución del agua en la población a cargo de un organismo operador, tal y como se describen a continuación.

Ilustración 10.14 Ejemplo de la ubicación actual del sistema de macromedición en la estructura organizacional



**Recursos humanos:**

- a) El equipo de trabajo está constituido por un encargado que nominalmente es el responsable también del sistema de radiocomunicación. Para el desempeño de estas actividades es apoyado por tres personas para el cumplimiento de las funciones del sistema de macromedición
- b) El horario de trabajo para todo el personal es de 8:00 A.M. a 14:00 P.M, por lo que las horas-hombre efectivas disponibles estaban limitadas al personal descrito y a este horario, para todas las tareas que implica la operación y mantenimiento del sistema de macromedición, con los recursos físicos disponibles que posteriormente se describen
- c) Se concluyó que el personal actual es insuficiente para realizar de forma adecuada el total de las tareas y funciones del sistema de información de la macromedición, considerando que las estaciones del sistema distrital de distribución también debían ser operadas y mantenidas por este personal

**Capacitación:**

- a) El encargado del sistema de macromedición tiene la carrera de Ingeniero Electricista y desde el año 2004 se había integrado y habilitado a las funciones de macromedición. Tuvo acceso a cursos, pláticas y conferencias periódicas en el campo de la medición, por lo que estaba actualizado y competente para el cargo
- b) Los ayudantes solamente cuentan con capacidades prácticas para la toma de lecturas en los medidores permanentes y para el uso de los medidores portátiles, electromagnético de inserción y ultrasónico de tiempo en tránsito

- c) Para la ejecución de tareas hasta ese momento no realizadas de un sistema de información de la macromedición y que era necesario hacer, se detectaron oportunidades de mejora en capacitación para el equipo actual y para el que se iba a instalar

**Recursos físicos:**

- a) El equipo de trabajo podía contar eventualmente con un solo vehículo para hacer los recorridos de toma de lecturas y demás tareas de la macromedición
- b) La oficina de macromedición y de radiocomunicación, que funcionaba también como taller, tenía cupo sólo para el encargado, por lo que los tres ayudantes se ubican físicamente en otras áreas
- c) Se contaba con dos equipos portátiles de medición, pero se carecía de equipo de procesamiento

**Administración, planeación y control:**

- a) No se cuenta con los registros sistemáticos, de reportes impresos y firmados de medición, así como los digitales, lo cual evidencia la falta de un sistema formal de información que permita validar, procesar, respaldar y divulgar los datos y reportes de medición
- b) Se carece de manuales de procedimientos en los que se especifique la operación diaria, rutinas, lecturas, telemetría, servicios a los medidores, frecuencia de toma de datos, procesamiento, tipo de reportes, divulgación (Web, Email, impresos, etc.), usos para control operacional, para balances volumétricos, etcétera

### **Recursos financieros:**

- a) Según puede deducirse de las conclusiones arriba enunciadas, principalmente sobre los recursos físicos limitados, así como del hecho de que del total de estaciones de medición existentes en el sistema distrital de distribución, estaban operando menos del 50%, los recursos financieros para mantener en funcionamiento el sistema de macromedición fueron insuficientes, aunque lo anterior no todo era a causa de la falta de estos recursos
- b) Los recursos financieros son necesarios para la compra de refacciones y accesorios para el mantenimiento de los equipos de medición y para el mantenimiento en general de las estaciones, en los aspectos mecánico (fontanería), eléctrico y de obra civil. Es común encontrar medidores electromagnéticos y ultrasónicos fuera de servicio debido a que no se especificó la protección ambiental apropiada. Lo más recomendable es considerar IP68 para que los medidores puedan soportar probables inundaciones. Pero también se pueden encontrar medidores mecánicos fuera de operación debido a incrustaciones y a otras causas
- c) Los recursos financieros limitados tienen que ver en parte con la estructura organizacional del organismo operador y su tamaño en personal (empleados por cada mil tomas registradas). Es muy importante considerarlo para adecuar el sistema de macromedición a las nuevas necesidades. Es conveniente especificar sistemas y equipos robustos, con poco mantenimiento

### **Necesidades de personal**

En la Tabla 10.3 se presenta la estimación del personal necesario para operar y mantener el sistema de macromedición del organismo operador, conforme a las actividades previstas en un sistema de información de macromedición y a las cantidades específicas de trabajo del organismo, y según también el perfil mínimo requerido.

Se distinguen 4 perfiles requeridos:

#### **Perfil de bachiller: 4**

Perfil con estudios mínimos de bachiller para las actividades 1 a la 3 de la Tabla 10.3, consistentes en toma de lecturas en estaciones permanentes y mediciones con equipo portátil en no permanentes. El personal necesario para hacer el volumen de trabajo mensual en dos días se estima que es de 4. Actualmente se tienen 3 personas para este trabajo. Se puede cubrir esta demanda con apoyo temporal del perfil siguiente. Por otra parte, una vez pasados los dos días de demanda pico, estas personas tendrán mucho tiempo disponible, que se puede aprovechar para apoyar los perfiles que se indican en los incisos 3 y 4 siguientes. Para lograr los rendimientos deseados se requiere equipar a este personal con transportes ligeros como son motocicletas, trimotos y cuatrimotos

#### **Perfil de técnico en informática: 1**

Perfil con estudios mínimos de técnico en informática para realizar las actividades de la 4 a la 6 de la Tabla 10.3, consistentes en captura y procesamiento de datos de medición, divulgación de repor-

tes de medición, resguardo de archivos, manejo de bases de datos, etcétera. Personal necesario para hacer el volumen de trabajo mensual: 1. Se estima que tendrá tiempo sobrante, por lo que se podrá aprovechar para apoyar la demanda pico de dos días de fuerza de trabajo en las actividades 1 a la 3

Perfil de Ingeniero en Electrónica: 1

Perfil con estudios de Ingeniero en Electrónica o cualquier otra ingeniería, siempre que tenga experiencia en aspectos de macromedición y metrología, comunicaciones, telemetría y sistemas SCADA. Esto para realizar las actividades 7, 8, 9, de la Tabla 10.3 consistentes en calibración de medidores, mantenimiento correctivo y preventivo, administración del mantenimiento de los equipos, montaje y desmontaje de equipos, conexiones eléctricas y electrónicas, manejo de planos de circuitos eléctricos y electrónicos, etcétera. El personal necesario para estas actividades es 1, pero requerirá el apoyo de uno o dos del perfil de bachiller, que tendrán tiempo sobrante

Perfil de cualquier ingeniería con experiencia en macromedición y agua potable: 1

Este perfil se requiere para la actividad 10 de la Tabla 10.3 para llevar la dirección del sistema de macromedición del organismo operador, así como hacer la gestión y vinculación con otros niveles y unidades orgánicas. El volumen de trabajo demandado por este puesto se estima

en 9 jornadas por mes, por lo que siendo el responsable actual Ing. Electricista, con experiencia en el organismo operador en el área de radiocomunicación de más de 10 años, y en macromedición desde el año 2004, bien pudiera hacerse cargo de estas actividades, y además de las del perfil anterior, de manera que al equipo actual de trabajo se agregue sólo el perfil del técnico en informática

Una definición más precisa de las necesidades de personal requeriría de otras técnicas como es el estudio de tiempos y movimientos. De ninguna manera se debe propiciar el crecimiento de la plantilla laboral del organismo operador.

En conclusión del diagnóstico realizado e identificando las necesidades mencionadas anteriormente, se recomienda replantear la estructura organizacional en la que se ubique a la macromedición estratégicamente donde se considere a todas las áreas que requieren más de la información que ésta genere. En el corto plazo es evidente que el sistema operacional en las sub áreas de planeación y control de la operación está en primer lugar, ya que entre otros objetivos tiene el de investigar y analizar los programas de abastecimiento a las zonas de presión, incluida la continuidad del servicio, los caudales y presiones medias de suministro, para coadyuvar al control de pérdidas y en general a optimizar la operación y sus costos (Ilustración 10.15).

Tabla 10.3 Determinación de personal necesario para el sistema de macromedición, según las actividades indicadas y las cantidades estimadas a realizar mensualmente, y el perfil requerido

No.	Actividades	Unidad	Cantidad	Jornadas/ estación	Jornadas	Perfil	Observaciones
1	Toma de lecturas en estaciones permanentes con data logger de la infraestructura primaria.	Estación	103	0.04	4.12		Bloque de actividades 1,2, y 3.
2	Mediciones con equipo portátil en estaciones no permanentes de la infraestructura primaria.	Estación	23	0.125	2.875	1. Bachillerato	Esta actividad puede hacerse después de la 1 y la 3.
3	Toma de lecturas en estaciones permanentes de permanentes de distritos hidrométricos	Estación	132	0.033	4.4		La 1 y la 3 se deben hacer en no más de 2 días, es decir con 4 personas.
4	Captura y procesamiento de datos	Estación	258	0.017	4.3		Bloque de actividades 4,5 y 6.
5	Divulgación de reportes	Reporte	20	0.01	0.2	2. Téc. o Lic. en Informática, o Ing. en Sistemas	
6	Resguardo, depuración y administración de archivos, impresos y digitales de reportes y registros de medición.	Archivos	278	0.017	4.6		Entre otras acciones adicionales, debe depurar y programar la base de datos.
7	Calibración y o arreglo de equipos de medición	Equipos	10	0.2	2.0		Bloque de actividades 7,8 y 9.
8	Ejecución de servicios de mantenimiento preventivo en estaciones de medición	Equipos	258	0.08	19.8	3. Ing. en Electrónica u otra Ingeniería	Experiencia en metrología
9	Administración del mantenimiento en estaciones de medición.	Estación	258	0.017	4.3		También en telemetría y Scada
10	Dirección y supervisión del sistema de macromedición, validación de lecturas, gestión y vinculación con otros niveles y unidades orgánicas del SMAPA, incluyendo solicitudes de apoyo de reparación.	Gestión	90	0.1	9.0	4. Cualquier Ingeniería	Experiencia en medición y agua potable.

Ilustración 10.15 Interacción de la planeación y control con los demás subsistemas operacionales



Por lo anterior es recomendable que el subsistema de macromedición se ubique dentro del sistema operativo, coadyuvando con información a otras áreas y programas del organismo operador, como puede ser el sistema de planeación, el sistema comercial, y en su caso al programa de uso eficiente del agua.

En cuanto al personal necesario para operar a este subsistema, líneas arriba se ha definido en cuanto a cantidad y perfiles necesarios.

### **Recursos físicos**

Respecto a los recursos no disponibles, los requerimientos mínimos para la operatividad del sistema de macromedición son los siguientes:

1. Una oficina adecuada para el personal especificado
2. Dos equipos portátiles de medición de caudal adicionales

3. Dos medidores digitales de presión con *data logger*
4. Dos medidores ultrasónicos de nivel con *data logger*
5. Cuatro motocicletas, trimotos o cuatrimotos para la transportación del personal a las diferentes estaciones de medición para la toma de lecturas
6. Stock mínimo de refacciones

Para la buena operación del personal en la toma de lecturas es conveniente establecer las rutas de cada uno.

### **Administración**

En aspectos administrativos es indispensable contar con recursos financieros necesarios para la adquisición de refacciones, realizar calibraciones externas, y otros gastos que requiera la operación del subsistema. En ese sentido se debe procurar un presupuesto anual para su operación.

### ***Esquemas de procesamiento de información***

Las actividades específicas que conlleva el procesamiento de información generada por la macromedición, están supeditadas a la infraestructura y equipamiento del sistema de abastecimiento. Por lo que respecta a la infraestructura primaria, en la Tabla 10.4 se muestra el sistema de captación y producción del organismo operador del ejemplo.

### ***Procedimientos de ejecución de actividades***

Es necesaria la elaboración de los procedimientos para la ejecución de las funciones de

macromedición de manera sistemática y formal, incluyendo la evaluación de desempeño del personal.

### ***Mantenimiento de macromedidores y su administración***

Se deben determinar y codificar los servicios de mantenimiento en los macromedidores y llevar a cabo la administración de este mantenimiento, ya sea preventivo, correctivo y predictivo. Lo más conveniente es realizar la administración mediante algún software comercial apropiado.

Tabla 10.4 Formato para la determinación del volumen mensual y anual captado en el sistema

<b>Obras de captación activas</b>					
<b>Volúmen mensual o anual captado</b>					
<b>1. Ciudad del agua</b>			<b>2.1 Santo Domingo (bombeo a líneas de 20 y 24")</b>		
<b>Q (L/s)</b>	<b>T (días)</b>	<b>Volumen</b>	<b>Q (L/s)</b>	<b>T (días)</b>	<b>Volumen</b>
500	0	0	155	0	0
1 000	365	31 536 000	310	365	9 776 160
1 500	0	0	465	0	0
2 000	0	0	620	0	0
	Subtotal	31 536 000	775	0	0
			7 bombas	Subtotal	9 776 160
<b>2.2 Santo Domingo (bombeo a líneas de 36")</b>			<b>3. La Barcaza-Grijalva</b>		
<b>Q (L/s)</b>	<b>T (días)</b>	<b>Volumen</b>	<b>Q (L/s)</b>	<b>T (días)</b>	<b>Volumen</b>
200	0	0	160	0	0
400	365	12 614 400	320	0	0
600	0	0	480	0	0
800	0	0	640	0	0
5 bombas, 1 reserva	Subtotal	12 614 400	5 bombas, reserva 2 y 1	Subtotal	0
<b>4.1 Galería La Chacona (año 2004, a la baja)</b>			<b>4.2 Pozo La Chacona (bombeo a línea de 4")</b>		
<b>Q (L/s)</b>	<b>T (días)</b>	<b>Volumen</b>	<b>Q (L/s)</b>	<b>T (días)</b>	<b>Volumen</b>
54	365	1 702 944	5	365	157,680
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
	Subtotal	1 702 944	Bombeo	Subtotal	157 680
<b>5. Galería San Agustín (Plan de Ayala, bombeo a línea de 6")</b>			<b>6.1 Pozo Rancho Viejo (bombeo a línea de 10")</b>		
<b>Q (L/s)</b>	<b>T (días)</b>	<b>Volumen</b>	<b>Q (L/s)</b>	<b>T (días)</b>	<b>Volumen</b>
18	365	567 648	25	365	788 400
0	100	0	0	0	0
0	100	0	0	0	0
0	65	0	0	0	0
Bombeo	Subtotal	567 648	Bombeo	Subtotal	788 400
<b>6.2 Pozo Rancho Viejo (bombeo a línea de 8")</b>					
<b>Q (L/s)</b>	<b>T (días)</b>	<b>Volumen</b>			
235	365	741 096			
0	0	0			
0	0	0			
0	0	0			
Bombeo	Subtotal	741 096			
			Total m <sup>3</sup>		
			57 884 328		



# 11

## MICROMEDICIÓN

### 11.1. IMPORTANCIA DE LA MICROMEDICIÓN

La micromedición forma parte del sistema integral de medición de consumos, tiene por objetivo determinar los derechos del servicio medido de agua potable a través del volumen consumido periódicamente por los usuarios que cuentan con una toma domiciliaria, esta información es fundamental para llevar un buen registro en el padrón de usuarios, conocer el histórico por mes sobre los consumos realizados por cada usuario y determinar cuál debe ser el cobro equitativo de acuerdo al volumen consumido en metros cúbicos (m<sup>3</sup>) durante el periodo registrado, con base en lo establecido en el plan tarifario que el organismo operador tenga autorizado aplicar para la población correspondiente. Con el funcionamiento de un servicio medido en la prestación de los servicios de agua por ende también se logra que los usuarios lleven a cabo un mejor uso del agua, su cuidado, distribución acorde a sus necesidades y como consecuencia le permite al organismo operador tener una mejor distribución del agua dentro de las cantidades disponibles para la dotación per cápita/día proyectados conforme a su infraestructura hidráulica y capacidad en la prestación del servicio a la comunidad.

La instalación de micromedidores en la toma domiciliaria de cada usuario, representa una inversión importante para cada prestador del servicio, por ello, para realizar la selección del tipo de medidor a instalar se debe efectuar dentro de un entorno de costo-beneficio. Considerando los factores esenciales como son; la calidad del agua; temperatura del lugar (bajo cero o máxima sobre cero); la presión hidráulica de trabajo en la red de distribución; el arreglo hidráulico para el suministro; tipo o calidad del servicio (intermitente o continuo) y el nivel socioeconómico de la población.

Se recomienda como una estrategia fundamental antes de llevar a cabo la instalación de medidores, se realice un estudio-diagnóstico sobre las necesidades de medición, la viabilidad de su aplicación, la definición de una línea base con datos e información real (administrativa y de campo) que permita mejorar e incrementar las eficiencias para que no sea solo tomado como una aplicación comercial y la rentabilidad de la inversión con base en el servicio cobro-pago, proyectado a corto, mediano y largo plazo.

Por lo consiguiente, el sistema integral de medición debe estar acorde a un Plan Maestro de Medición que contemple la integración del control y

registros de la macromedición en las fuentes de abastecimiento y en los sectores de distribución y a la micromedición en la toma domiciliaria de cada usuario (ver Ilustración 11.1), para conocer y realizar un balance hidráulico que coadyuve a determinar la eficiencia física, comercial y global, como indicador principal del funcionamiento hidráulico de la red de agua potable, agua residual y agua residual tratada, con la finalidad de identificar dónde estamos y que acciones debemos llevar a cabo para mejorar e incrementar las eficiencias en el organismo operador.

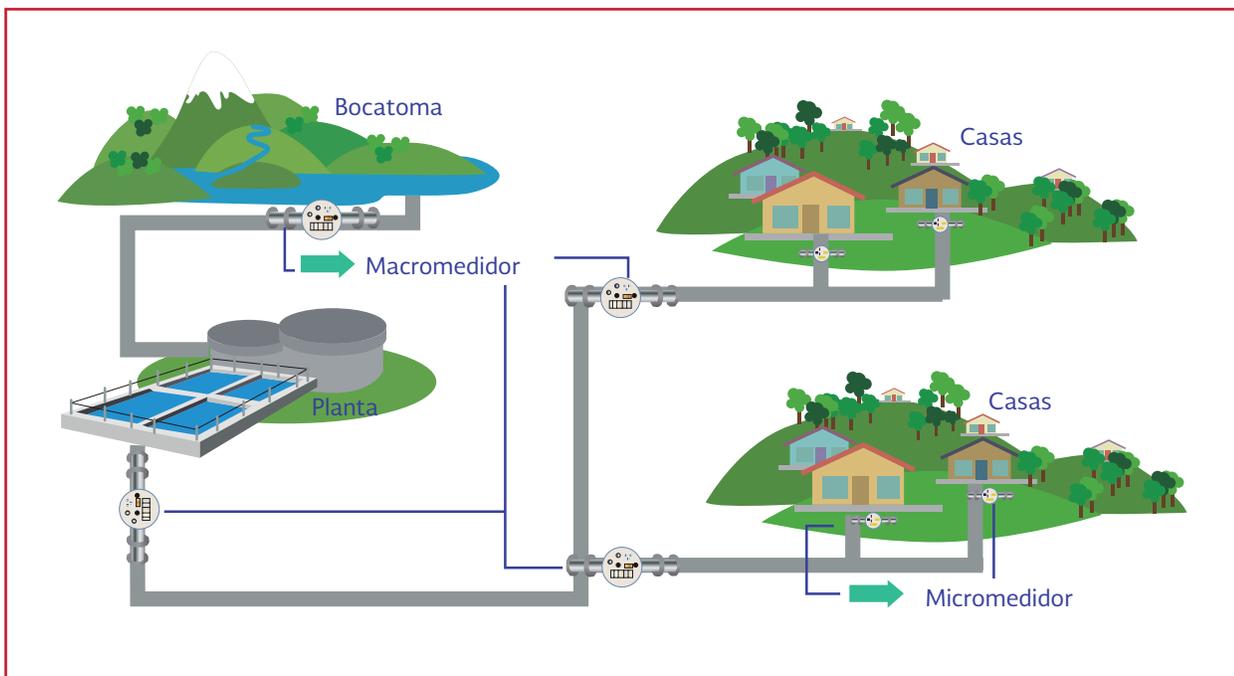
La micromedición; es la actividad que se lleva a cabo para la medición y control del caudal, cuyo diámetro de alimentación y descarga se encuentran entre 0.5 y 1 pulgadas (es decir entre 15 y 25 mm). Los micromedidores están diseñados básicamente para ser instalados en cada toma domiciliaria de acuerdo a la clasificación que en el padrón de usuarios este registrada, por ejemplo; pueden ser de uso doméstico popular, doméstico residencial, de uso público, en locales

comerciales (pequeños, medianos o grandes) y en toma industriales.

Con la micromedición se tiene la ventaja de tener el conocimiento de la cantidad de agua que se esté consumiendo por cada tipo de usuario de acuerdo a la clasificación que este registrada en el padrón de usuarios, al mismo tiempo también permite realizar una mejor administración, operación y mantenimiento del sistema de abastecimiento y distribución del agua, para que a su vez con esta información se pueda realizar un análisis, planeación y proyección de volúmenes que permita establecer una aproximación de los consumos hacia una demanda futura.

Por lo general, en todos los estudios que se han realizado a nivel nacional sobre consumos de agua potable en zonas urbanas, cuando no se encuentra un medidor instalado que registre los volúmenes de agua que se utilizan, se ha detectado que el consumo por usuario es por lo menos el doble o más de lo que normalmente se

Ilustración 11.1 Plan maestro para la macro y micromedición



consume, que cuando si se tiene el control del registro de los volúmenes porque si se cuenta con el medidor instalado.

Sin embargo, cuando el consumo se determina por medición, el usuario se beneficia, porque puede regular su consumo de acuerdo con la cantidad de agua que está dispuesto a pagar, asimismo, los sistemas de abastecimiento de agua potable también se benefician porque disponen de un caudal mayor que les permite incrementar su capacidad de volúmenes de agua para atender a más clientes, lo que trae como consecuencia un beneficio económico porque los organismos operadores de agua o empresas prestadoras de servicios que poseen una concesión tienen más posibilidades de recuperar los costos de operación, administración y mantenimiento derivados de la prestación del servicio y con estos recursos, estar en posibilidades de programar el gasto de inversión para una nueva infraestructura hidráulica, mejorar la existente con tecnología de punta o rehabilitar la existente.

El objetivo de diseñar y realizar un estudio de planeación es para identificar las utilidades al trabajar y aplicar un sistema de micromedición para el control y registro de consumos durante el suministro de agua potable, por ello, es importante conocer las diferentes tecnologías existentes para la realización de estas actividades y poder seleccionar la que mejor se apegue a las necesidades de funcionamiento y tipo de infraestructura hidráulica con la que tenga instalada el organismo operador en la prestación de los servicios de agua a la población.

A continuación se hace un análisis de las bondades por cada tipo de tecnología de micromedición, que puede ser empleada para el registro de consumos en una toma domiciliaria.

## 11.2. TIPO DE MEDIDORES

### 11.2.1. DEFINICIÓN DE MEDIDOR

Éste se define como un dispositivo que mide el caudal de agua que pasa a través de una tubería, los medidores pueden ser de accionamiento mecánico o electrónico para realizar el registro o contabilidad del volumen de agua que se esté consumiendo.

De acuerdo con la norma NOM-012-SCFI-1994, se define a los medidores como instrumentos de medición que determinan continuamente el volumen de agua que fluye por estos y emplean un proceso mecánico directo que implica el uso de cámaras volumétricas de paredes móviles o la acción de la velocidad del agua en la rotación de una parte móvil.

Los medidores empleados en los sistemas de agua potable, para el domicilio, se diferencia entre sí, por los diferentes principios que han adoptado sus fabricantes en cuanto a diseño y combinación de sus partes. Esto es, el medidor de acuerdo con su mecanismo de medición, puede ser volumétrico o de velocidad. Para ello, en la NOM-012-SCFI-1994 se clasifican de acuerdo a su mecanismo de funcionamiento.

- **Medidor de chorro múltiple.** Medidor de velocidad que consiste de un rotor de turbina que gira alrededor de su eje perpendicularmente al flujo de agua en el interior del medidor, en el que el chorro se divide e incide en varios puntos de la periferia del rotor
- **Medidor de chorro único.** Medidor de velocidad que consiste de un rotor de turbina que gira alrededor de su eje, perpendicularmente al flujo de agua en el interior del medidor, en el que el chorro incide en un solo punto de la periferia del rotor
- **Medidor tipo hélice.** Medidor de velocidad que consiste de un rotor de álabes helicoidales que gira alrededor del eje del flujo, que se presenta en el interior del medidor
- **Medidor tipo velocidad.** Dispositivo conectado a un conducto cerrado que consiste de un elemento móvil que deriva su velocidad de movimiento directamente de la velocidad del flujo de agua. El movimiento del elemento móvil es transmitido mecánicamente o por otros medios al dispositivo indicador que totaliza el volumen de agua que ha pasado por el medidor
- **Medidor volumétrico.** Dispositivo conectado a un conducto cerrado, que consiste de una cámara de volumen conocido y un mecanismo operado por el flujo de agua donde esta cámara es sucesivamente llenada y descargada. El movimiento de un elemento móvil es transmitido mecánicamente, o por otros medios, a un contador que registra el número de los volúmenes que pasan a

través del dispositivo indicador, que totaliza el volumen de agua que ha pasado por el medidor

Debido a que los medidores son instalados sobre el cuadro de la toma domiciliaria, es importante que reúna las siguientes características:

- Trabajar bajo el régimen de presiones estáticas y dinámicas existentes, en cualquier punto del sistema de distribución donde se encuentre instalado y funcionando
- Tener el libre paso del agua con todos los gastos que sucedan en la respectiva conexión, sin que se tengan pérdidas de carga que puedan ocasionar restricciones importantes de la demanda
- Ser resistentes al paso del agua en todos los gastos de operación, durante su funcionamiento en la toma domiciliaria correspondiente, sin que se afecten o alteren su propiedad mecánica y metroológica
- El medidor debe cuantificar o aforar la cantidad de agua que pase en cualquier momento, por su área de registro
- Registrar en metros cúbicos (m<sup>3</sup>) por hora las cantidades de los aforos que se produzcan, de acuerdo a la designación (N) del medidor
- Acumular los registros sucesivos o históricos de cada mes, de modo que la diferencia entre las lecturas leídas u obtenidas en dos periodos distintos, dé el valor correspondiente al consumo total acumulado en el lapso de tiempo transcurrido

Asimismo, como parte principal de la composición de un medidor para su adecuado funcionamiento, se conforma de tres secciones básicamente:

1. Dispositivo de medida: Este elemento se debe encontrar siempre en contacto con el agua, su función consiste en contabilizar o medir el agua con base en su movimiento, de acuerdo con los principios y diseño que determinan el tipo de medidor
2. La transmisión: Se conforma por un conjunto de engranes mecánicos accionados por el dispositivo de medida. Su función consiste en transmitir en forma numérica la cantidad de revoluciones, que sea proporcional al dato de consumo de acuerdo con el movimiento realizado por el dispositivo de medida
3. Registrador: Es un mecanismo conformado con manecillas que se mueven circularmente sobre una escala graduada, por cada movimiento que realicen van registrando el volumen que pasa por el medidor, acumulando los consumos que se registran a través de los engranes mecánicos de transmisión

### 11.3. MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO POR TIPO DE MEDIDOR

#### 11.3.1. MEDIDORES DE CHORRO ÚNICO

Dispositivos compuestos por un rotor de turbina que gira alrededor de un eje perpendicular al flujo de agua en un medidor (Ver Ilustración 11.2), se denomina chorro único si el chorro hace contacto con la periferia del rotor en un solo lugar.

El medidor de chorro único, su principio de funcionamiento se basa en el movimiento del agua sobre un rotor con una única entrada en forma de un sólo chorro tangencialmente dirigido. El movimiento de la turbina se transmite magnéticamente al registro donde se realiza la lectura, esta se realiza por agujas, tambores numerados, de esfera transparente y resistente al maltrato.

El medidor posee estrella para verificación electrónica en el banco de pruebas, tiene una sólida y robusta construcción lo que permite su uso en múltiples aplicaciones, especialmente en el uso de cuantificación del consumo doméstico.

Ilustración 11.2 Medidores de velocidad tipo chorro único



Sus principales características y beneficios son:

- Posee una capsula de registro sellada herméticamente
- Esfera seca, que impide el empañamiento y el ensuciamiento por aguas duras o ferroginosas
- Por su diseño, es posible reparar el medidor y cambiar piezas internas (ejemplo: rotor, registro)
- Transmisión magnética
- Calibración externa
- Baja pérdida de carga
- Cuerpo resistente a la corrosión
- Registro orientable (360°)
- Rotor y registro fabricado con plásticos especiales de alto impacto, ejes de acero inoxidable y Tungsteno
- Detector de fugas

Las condiciones de Trabajo para su funcionamiento son:

- Temperatura del agua hasta 50°C
- Instalación horizontal
- Presión: PN 10

### 11.3.2. MEDIDORES DE CHORRO MÚLTIPLE

Dispositivos compuestos por un rotor de turbina que gira alrededor de un eje perpendicular al flujo de agua en un medidor. El chorro hace contacto con diferentes puntos alrededor de la periferia del rotor.

Es un medidor de velocidad, que al pasar el agua por la cámara de medición hace girar una turbina, este movimiento se transmite magnéticamente al registro que convierte este movimiento en la cantidad de agua que pasó por el medidor, registrándola.

La entrada del agua a la cámara de medición se realiza por varias entradas lo que producen el efecto de “chorro múltiple” (ver Ilustración 11.3), su sólido y robusto diseño le permiten operar en los sistemas más adversos y puede o no estar pre-equipado para emisión de pulsos para lectura remota.

Sus principales características son:

Ilustración 11.3 Medidor de velocidad de chorro múltiple



- Resistente cuerpo en Nylon reforzado.
- Registro sellado herméticamente
- Accionamiento magnético
- Protección contra influencias magnéticas externas
- Características constantes de curva de flujo y exactitud
- Filtro de entrada
- Detector de fugas
- Calibración externa
- Mínima fricción sobre los rodamientos de la turbina
- Vidrio de alta resistencia a las ralladuras
- Opción. Válvula interna anti retorno

Las condiciones de operación para su óptimo funcionamiento son:

- Temperatura Max. 50°C
- Presión Max. PN-10

La diferencia entre el chorro único y chorro múltiple, radica en que el primero tiene solamente un orificio de entrada y uno de salida; en cambio, el chorro múltiple trabaja con base en

múltiples orificios tanto en la entrada como en la salida del agua.

## 11.4. MEDIDOR VOLUMÉTRICO

Se pueden encontrar dos tipos de medidores volumétricos: los de pistón oscilante y disco nutatorio, en material de bronce, plástico, de registro mecánico o electrónico.

**Pistón Oscilante:** consiste de un pistón hueco montado excéntricamente dentro de un cilindro, el cilindro y el pistón tienen la misma longitud, pero el pistón, tiene un diámetro más pequeño que el cilindro. El pistón, cuando está en funcionamiento, oscila alrededor de un puente divisor, que separa la entrada de la salida de líquido. Al comienzo de un ciclo el líquido entra al medidor a través de la puerta de entrada, forzando al pistón a moverse alrededor del cilindro hasta que el líquido delante del pistón es forzado a salir a través de la puerta de salida, quedando el dispositivo listo para comenzar otro ciclo, ver Ilustración 11.4, Ilustración 11.5 e Ilustración 11.6.

Ilustración 11.4 Medidor volumétrico tipo pistón oscilante

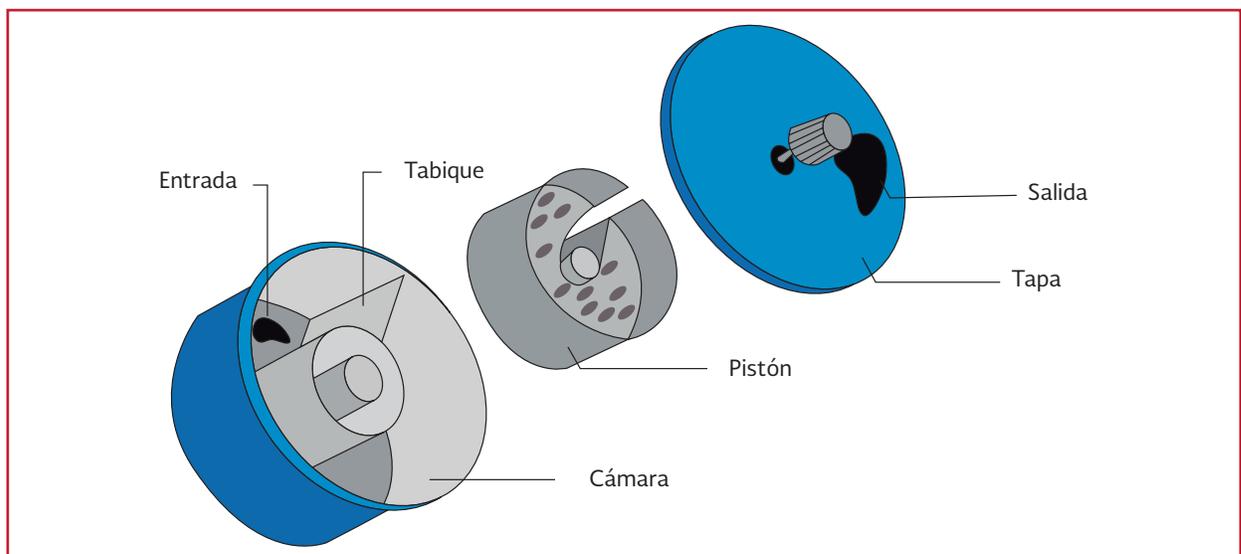


Ilustración 11.5 Funcionamiento del medidor volumétrico tipo pistón oscilante



Ilustración 11.6 Medidores volumétricos de pistón oscilante



Disco nutatorio: Es un disco plano o cónico, que adquiere un movimiento nutativo (cambiante) dentro de una cámara motor formada por dos conos invertidos y un sector esférico, ver Ilustración 11.7, barriendo completamente el volu-

men de ella en cada cambio o nutación. El eje en su extremo superior adquiere un movimiento circular tal que, en una rotación de él, equivale una nutación del disco y por tanto el volumen completo de la cámara, ver Ilustración 11.8.

Ilustración 11.7 Medidor volumétrico disco nutativo-componentes

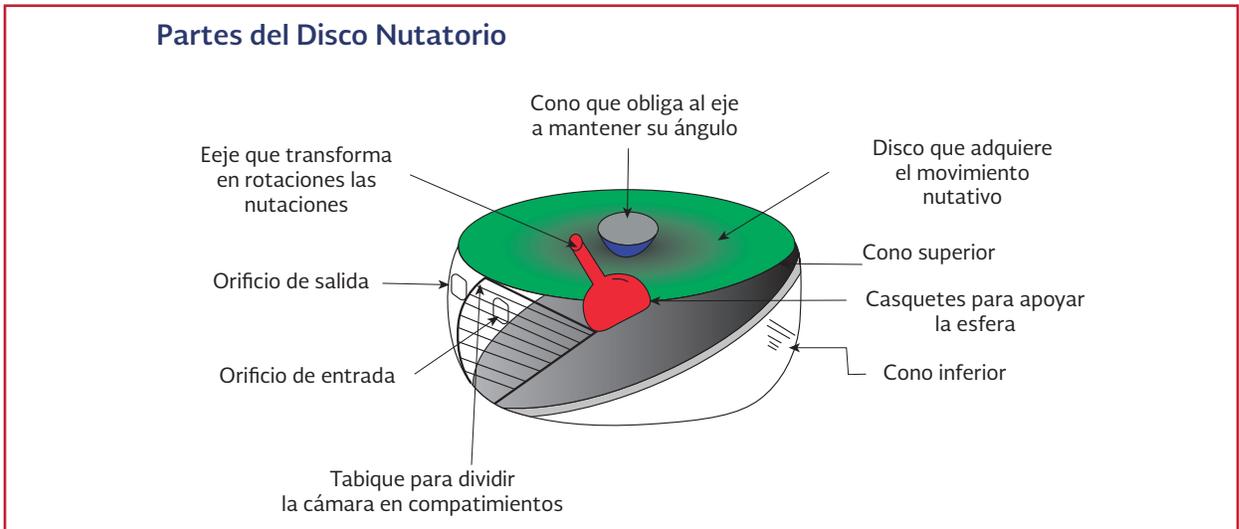
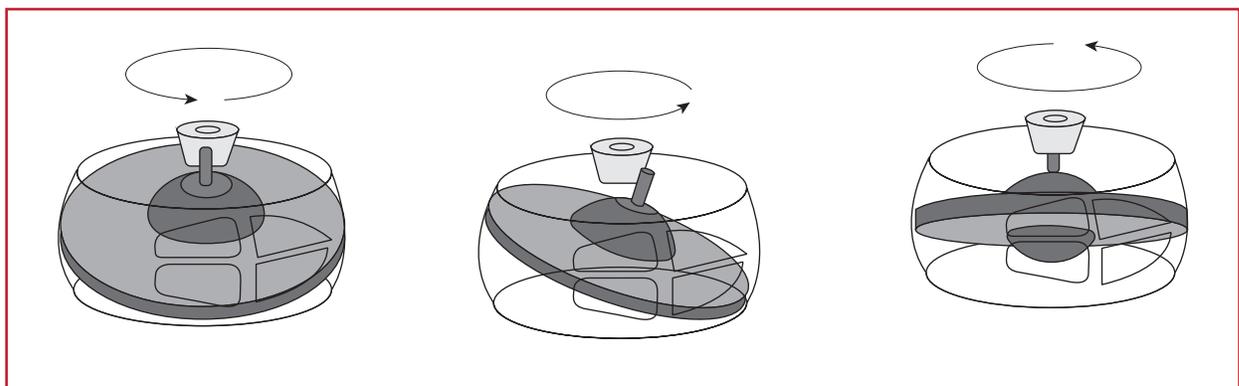


Ilustración 11.8 Medidor volumétrico tipo disco nutativo Medidor electromagnético



## 11.5. MEDIDOR ELECTROMECAÁNICO

El medidor electromagnético se caracteriza por tener el funcionamiento con base en la ley de inducción electromagnética de Faraday, cuando un flujo conductor se desplazan a través de un campo magnético existente dentro de un medidor se genera un voltaje, este voltaje es directamente proporcional a la velocidad promedio del flujo, por lo que el voltaje inducido ( $E$ ) es generado en el conductor.

El voltaje inducido se puede calcular de acuerdo con la siguiente ecuación:

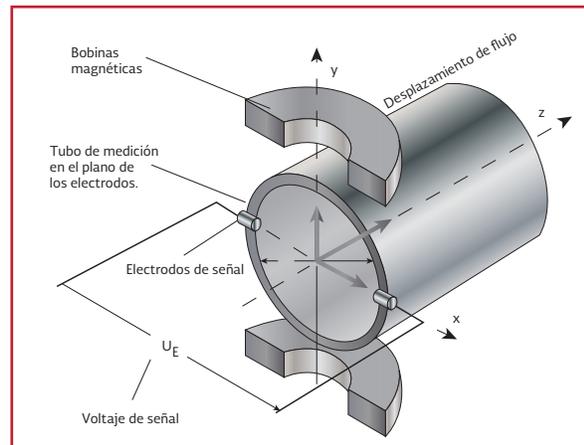
$$E = k B D v \quad \text{Ecuación 11.1}$$

donde:

- $E$  = Fuerza electromotriz en voltios
- $K$  = Constante característica
- $B$  = Densidad del flujo magnético en tesla
- $D$  = Diámetro interior del tubo en metros
- $v$  = Velocidad media del conductor en la dirección de los ejes de la sección del poste, en m/s

Si se conoce el diámetro del tubo metálico, el medidor magnético calcula el caudal que se desplaza por la tubería. Este tipo de tubo donde se encuentra el campo magnético del medidor, normalmente es de acero inoxidable o aluminio, debido a que las propiedades magnéticas de estos materiales son bajas, están recubiertas de neopreno, plástico, teflón, cerámica o cualquier material no magnético y no conductivo.

Ilustración 11.9 Principio de operación del medidor electromagnético



Cuando el fluido pasa a través del campo magnético de forma perpendicular a la dirección del flujo, los conductores eléctricos generaran un voltaje en proporción a la velocidad media (flujo volumétrico). Por lo tanto, el fluido que se está midiendo, debe alcanzar el mínimo de conductividad. Las señales de voltaje que son inducidas al paso del agua inmediatamente son detectadas a través de dos postes, los cuales están directamente conectados con el líquido. Por lo tanto, estas señales son transmitidas a un amplificador mediante un conector y finalmente se convierte en una señal unificada de salida.

Estructura:

1. El diseño está formado por dos cavidades que separan la sección eléctrica de los cables terminales de conexión
2. La interferencia electromagnética de la fuente de energía es ultra baja, lo cual permite que el medidor electromagnético se pueda adaptar a un amplio rango de tensiones

3. El LCD de alta definición para iluminación trasera, puede operar en un amplio rango de temperaturas
4. Salida a puerto de comunicación digital.
5. El medidor de flujo electromagnético puede medir el flujo bidireccional y calcular el valor acumulativo del flujo para las dos direcciones

- de obtener un nivel de repetición de  $\pm 0.1$  por ciento si se necesita
4. Temperatura de ambiente:  $-20^{\circ}$  a  $+60^{\circ}$
5. Nivel de humedad en el ambiente de trabajo: 5 a 95 por ciento RH
6. Valor nominal de la tensión: 80 V a 264 V AC
7. Frecuencia de red: 47Hz a 63Hz
8. Conductividad del fluido:  $> 5\mu\text{s/cm}$

#### Parámetros Técnicos:

1. El medidor de flujo electromagnético se caracteriza por su capacidad de respuesta rápida y su excelente estabilidad (En la Ilustración 11.10 se muestra un medidor electromagnético domiciliario)
2. Su nivel de precisión es, normalmente,  $\pm 0.5$  o  $\pm 1.0$  por ciento, y para requerimientos especiales se puede instalar y trabajar con medidores de flujo de alta precisión que oscilan entre el  $\pm 0.25$  por ciento de precisión
3. En general el nivel de repetición es de  $\pm 0.2$  o  $\pm 0.3$  por ciento, también se pue-

#### Ventajas:

- No posee partes móviles en contacto con el agua
- Para su instalación requiere una pequeña longitud de tramo recto aguas arriba
- Pérdida de carga despreciable
- Error de medición de  $\pm 0.5 - \pm 1.0$  por ciento
- Puede medir el flujo con sólidos en suspensión
- Esfera seca electrónica para el registro del flujo

Ilustración 11.10 Medidor electromagnético domiciliario



Por último, es importante señalar que como medida de confiabilidad en el tipo de tecnología de micromedición que se seleccione para su instalación en la toma domiciliaria, se debe exigir la curva de calibración donde se muestre el error de medición o exactitud del medidor, elaborada por un laboratorio de pruebas acreditado ante la entidad mexicana de acreditación.

## 11.6. EL SISTEMA COMERCIAL

El sistema comercial de un organismo operador tiene la responsabilidad de organizar, estructurar y ofrecer todos los servicios que pueden proporcionarle al usuario mediante la integración de un catálogo, que incluya los precios y tarifas por cada tipo de servicio y establecer el mecanismo de facturación y cobranza, para ello, es necesario contar con un padrón de usuarios actualizado para poder llevar a cabo el control, seguimiento y administración de las cuentas de cada usuario. Una herramienta estratégica que coadyuva a las actividades del área comercial, es el contar con un Sistema de Medición de Consumos mediante la instalación de micromedidores en cada toma domiciliaria de los usuarios y con la interrelación de este Sistema con todas las actividades que integran el sistema comercial se obtienen mejores resultados para tomar decisiones con oportunidad en cuanto a la mejora de la recaudación y control de gasto de operación para la gestión comercial integral que a su vez, es parte fundamental en los estudios para la selección, evaluación, instalación, adquisición y dimensionamiento de nuevos micromedidores; atendiendo de manera oportuna el mantenimiento preventivo y correctivo, así como, la sustitución de los mismos, cuando así se requiera.

Por otro lado, el contar con un buen sistema de medición domiciliario nos facilita conocer y saber cuál es la situación sobre la eficiencia física del sistema, comparando el total de los metros cúbicos facturados del total de usuarios registrados en el Padrón, contra el volumen de agua extraído de los pozos que integran nuestras fuentes de abastecimiento.

La implementación de este proceso de trabajo, nos ofrece ventajas en beneficio, tanto del usuario como del recurso hídrico, tales como: el uso racional y la conservación del agua, ya que la estructuración tarifaria está diseñada para penalizar los consumos elevados con un precio unitario más elevado por cada metro cúbico (m<sup>3</sup>) consumido y asegurar homogeneidad del servicio para todos nuestros usuarios.

Por ello, es importante implementar un sistema de medición que nos permita conocer los consumos de cada usuario, mes por mes y la proporción de los volúmenes que utilizan para calcular las cantidades disponibles por zona o sector y garantizar el abastecimiento a la población.

### 11.6.1. SUBSISTEMA DE MEDICIÓN DE CONSUMOS

El consumo de agua está en función del uso que se le da dependiendo el tipo de toma; por ejemplo: tenemos uso agrícola, industrial y urbano, en todos los casos se debe contar con equipos instalados que registren y midan las cantidades de agua que se utilizan durante el periodo establecido (por mes o bimestre). Para el caso de las zonas urbanas, se realiza un control y seguimiento de los consumos de agua doméstica que es consumida por cada usuario mediante la micromedición,

la práctica de la cuantificación de los consumos nos permite racionalizar el uso y las cantidades propiciando una mejor administración del abastecimiento, su planeación y operación.

Cuando se elaboran los estudios y proyectos para la construcción o ampliación de un sistema de abastecimiento, se determinan las demandas con base en dotaciones especificadas según condiciones de tipo climático y socioeconómico. Sin embargo, en las localidades que no cuentan con un sistema adecuado de medición de los consumos, normalmente las dotaciones y las demandas de proyecto son sobrepasadas antes de lo planeado, junto con la capacidad de la infraestructura para el abastecimiento.

Una ventaja muy importante para la operación del sistema de agua potable, es que con la medición se logra obtener el equilibrio de presiones en la red de distribución. Sin embargo, como se indica en el libro de *Mejora de la Eficiencia Comercial* del MAPAS, las funciones del Sistema Comercial y del Sistema Operacional están interrelacionadas de manera muy cercana y las acciones que se tomen en cualquiera de estos sistemas impactan para bien o para mal directamente en uno o en el otro. En este sentido las acciones que se decidan realizar se deben comunicar entre ambos sistemas para tomar las medidas correspondientes y hacer las preparaciones que convengan, de manera que se garantice el beneficio para ambas.

Pero como también se ha dicho, la medición de consumos no son sólo los equipos con los que se registran las lecturas, es un subsistema con una organización adecuada para que sus funciones se lleven a cabo de manera eficaz y eficiente, desde la buena planeación, selección, instalación, ope-

ración y mantenimiento de los aparatos, hasta el establecimiento de rutas de lectura, la toma de lecturas manual o automatizada, su descarga, análisis de datos y aplicación correcta de tarifas.

Para que un sistema de medición de consumos sea una herramienta de alto valor en el fortalecimiento del Organismo Operador y poder alcanzar su autosuficiencia económica, deberá contar con los siguientes puntos de apoyo:

- Un Padrón de Usuarios confiable
- Micro-medidores domiciliarios bien dimensionados y debidamente instalados bajo la normatividad vigente
- Personal honesto y capacitado para leer mensual o bimestralmente los volúmenes registrados en los medidores
- Un laboratorio de medidores operado por personal capacitado, con la finalidad de administrarlo adecuadamente y mantener todos los medidores en las condiciones óptimas de su funcionamiento hidráulico
- Un servicio de facturación y cobro que permita, con base en las lecturas de consumos, el cobro correcto de los mismos
- Un plan tarifario adecuado a la localidad, aplicado a los consumos

## 11.6.2. SISTEMAS INFORMÁTICOS PARA EL SISTEMA COMERCIAL

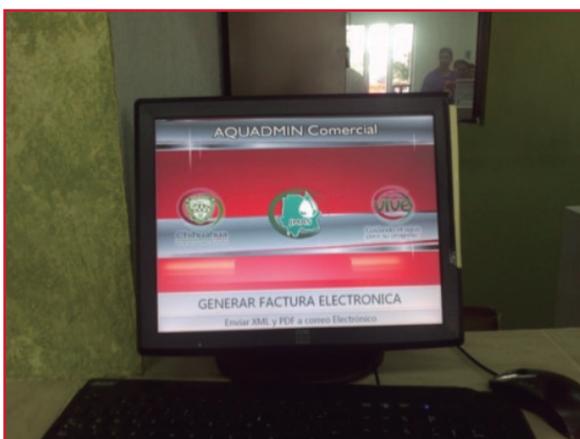
Para el buen funcionamiento del sistema comercial y sus subsistemas, se requiere tener instalado un sistema informático para el manejo de la información que se genera en sus operación, ver Ilustración 11.11, incluyendo la base de datos del padrón de usuarios y su actualización debido a las diversas actividades de comercialización de

los servicios, los números de cuenta, el registro de los consumos periódicos provenientes de las lecturas realizadas en los aparatos de medición de los usuarios, el análisis y tratamiento de los datos para la aplicación de la tarifa correspondiente con base en la clasificación de usuarios para la emisión de la facturación, la contabilidad de los pagos recibidos, los adeudos vencidos, los rezagos acumulados e históricos, etcétera.

La operación de los subsistemas del sistema comercial gira alrededor del sistema informático comercial, incluyendo el de medición de consumos, por lo que es fundamental su eficiencia y seguridad, porque finalmente implica manejo de recursos económicos e ingresos para los organismos operadores. Pero incluso pueden contener módulos para el manejo de información de compras, contabilidad y otras acciones del Sistema Administrativo de los organismos operadores.

Con relación al sistema de medición de consumos, el sistema informático debe estar debida-

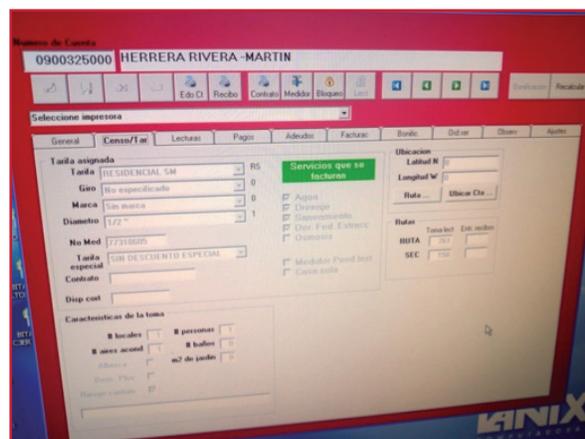
Ilustración 11.11 Sistema informático del área comercial



mente implementado y preparado para la recepción de las lecturas periódicas de consumos en los medidores de los usuarios, mediante diversas opciones, en función de las diferentes posibilidades tecnológicas de medición, ver Ilustración 11.12, como las siguientes:

- Captura manual de consumos tomados en aparatos de medición
- Descarga de terminales remotas
- Recepción remota en tiempo real al momento de la toma de la toma de lecturas y registro manual en las terminales remotas, mediante servicio telefónico
- Mediante telemetría de aparatos de medición de altos consumidores, con red fija
- Descarga de terminales remotas con recolección mediante vehículo en marcha
- Manejo de información de prepago

Ilustración 11.12 Sistema informático del área comercial para la recepción de lecturas



## 11.7. PÉRDIDAS FÍSICAS Y COMERCIALES

Las pérdidas físicas son todos aquellos volúmenes de agua que se pierden por diferentes causas desde los puntos de producción hasta el punto final o de consumo. Así como también, son aquellas que no llegan al consumidor, perdiéndose en los componentes y etapas del sistema de abastecimiento al de disposición del recurso por el usuario final.

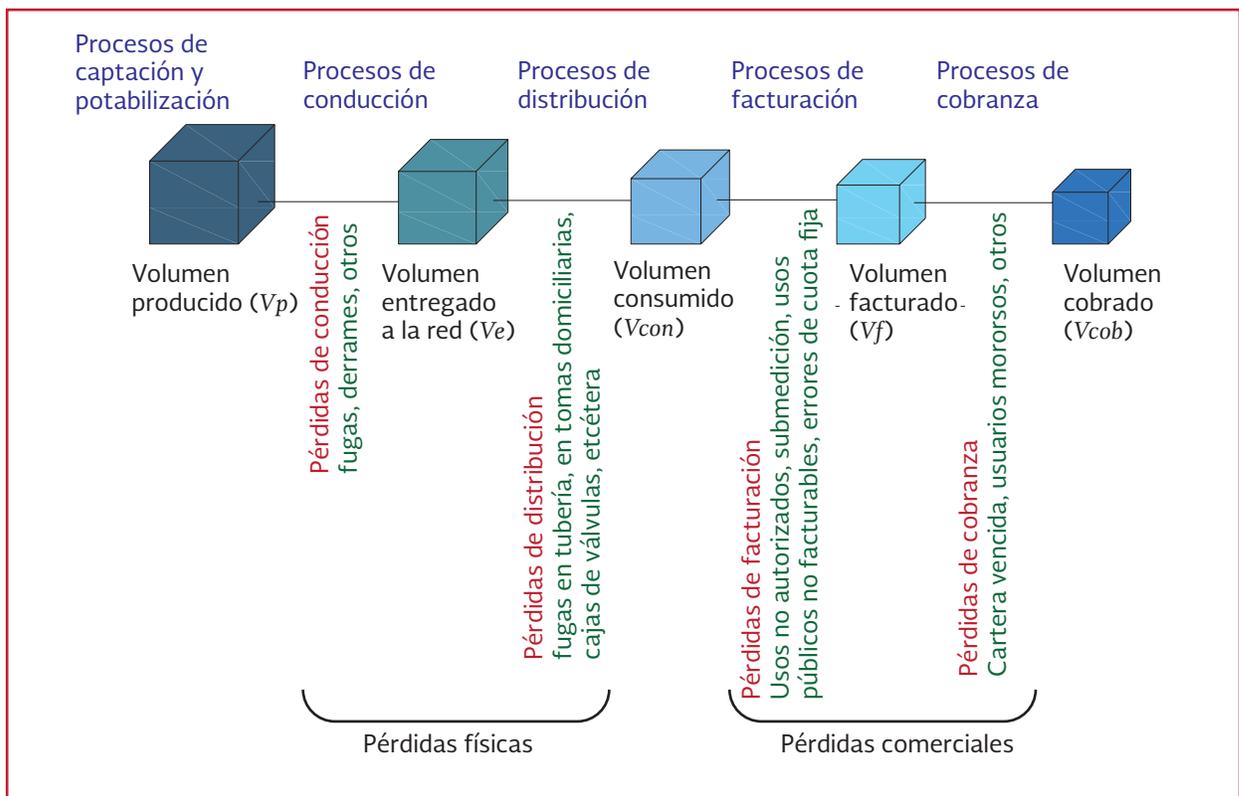
En la Ilustración 11.14 se muestra un esquema de los procesos de abastecimiento, operacionales y comerciales y cómo los volúmenes de agua van disminuyendo debido a las pérdidas de agua en cada uno de ellos. Las pérdidas asociadas a los procesos operacionales son conocidas como pérdidas físicas y más recientemente como pér-

didadas reales. Existen otros tipos de pérdidas que están asociadas a los procesos comerciales y se les ha denominado como pérdidas comerciales o como perdidas aparentes. Es muy difícil separar con exactitud unas de otras y generalmente causa polémica y diferencia de opinión entre los encargados del sistema comercial y operacional de los organismos operadores.

### 11.7.1. PÉRDIDAS RELACIONADAS CON LA MEDICIÓN DE CONSUMOS

Dentro de las perdidas comerciales, como se observa en Ilustración 11.13, se pueden distinguir las pérdidas de facturación, entre las que se encuentran las asociadas a la medición de consumos y a la falta de aparato de medición.

Ilustración 11.13 Procesos operacionales y comerciales y sus pérdidas volumétricas



Por otro lado, encontramos también otro tipo de pérdidas en los predios con toma domiciliaria registrada atribuidas a diferentes acciones, tales como del siguiente tipo:

- Desperdicios en la toma domiciliaria que no tienen instalado el aparato de medición (errores de cuota fija)
- Desperdicios en toma domiciliaria con medidor, en los que no se toman las lecturas en los periodos correspondientes
- Pérdidas por submedición debido a la falta de mantenimiento de los medidores
- Pérdidas por submedición debido a sobredimensionamiento de los aparatos
- Pérdidas por submedición debido al uso de cisternas con amplia superficie y control de llenado mediante válvula de flotador
- Pérdidas por toma oculta adicional a la registrada

## 11.8. BENEFICIOS DE LA MEDICIÓN DE CONSUMOS

Los beneficios serán mayores si hay una buena comunicación entre los responsables del Sistema Comercial y del Sistema Operacional, recordando que sus acciones impactan para bien o para mal tanto para uno como en el otro. Por lo tanto, los planes y proyectos de medición se deben revisar conjuntamente, para que en su caso se hagan las preparaciones necesarias que convengan, de manera que se garantice el beneficio para ambas áreas y como consecuencia de estas acciones se obtenga el incremento de la eficiencia global. En este aspecto es muy importante considerar cómo es la continuidad del

servicio en las zonas con proyectos de medición de consumos.

La planeación de las acciones de incremento de la cobertura de micromedición se debe analizar para cada caso de manera conjunta entre las áreas comerciales y operacionales, ya que por ejemplo; la instalación generalizada de medidores de consumo puede generar ahorros en el consumo por parte de los usuarios, lo cual es algo deseado, pero a la vez también se busca incrementar las presiones en las redes. Es decir que esta acción debería ser acompañada de una acción operacional, como la del control de presiones, de la misma manera las acciones operacionales deben comunicarse al área comercial, ya que también le impactarán, por ejemplo, algún cambio en la continuidad del servicio.

Por lo consiguiente, de todas las acciones que se tomen y se lleven a cabo, se podrán obtener beneficios en diferentes áreas del organismo operador y otras beneficiarán al usuario, en todos los casos se podrán cuantificar para un mejor control, seguimiento y aprovechamiento de las actividades comerciales y operacionales en la prestación de los servicios de agua, por ello, se hace la descripción siguiente:

### ***Beneficios técnicos de la medición de consumos***

- Se induce al ahorro del agua que se consume y a la reducción de desperdicios
- Control de consumos y equilibrio de presiones en la red de distribución, para mayor certidumbre del control operacional
- Mejor administración del abastecimiento, su planeación y operación
- La vida útil de la infraestructura de abastecimiento se conserva conforme a

- lo planificado y proyectado
- Permite el balance de agua junto con la macromedición
- Obtención de las demandas de los diferentes tipos de usuarios y sus consumos unitarios
- Ayuda a prestar el servicio a un mayor número de usuarios con la misma cantidad de agua producida
- Mejor gestión de las fuentes de abastecimiento
- Los tanques de regulación recuperan su función, dejando de ser sólo unidades de paso

#### ***Beneficios financieros***

- Mayores ingresos por la medición y facturación del agua consumida
- Se liberan volúmenes para la comercialización
- Menores tiempo operación de estaciones bombeo que descargan en tanques de regulación, y por tanto reducción de costos
- Los usuarios con medición de consumos cuidan que ningún vecino pueda tomar agua de su conexión domiciliaria

#### ***Beneficios sociales***

- Cobro justo conforme al volumen consumido

- El control de consumos y equilibrio de presiones permite atender a todos los usuarios

#### ***Beneficios económicos***

- La reducción de consumos permite postergar inversiones en nuevas obras de captación y conducción

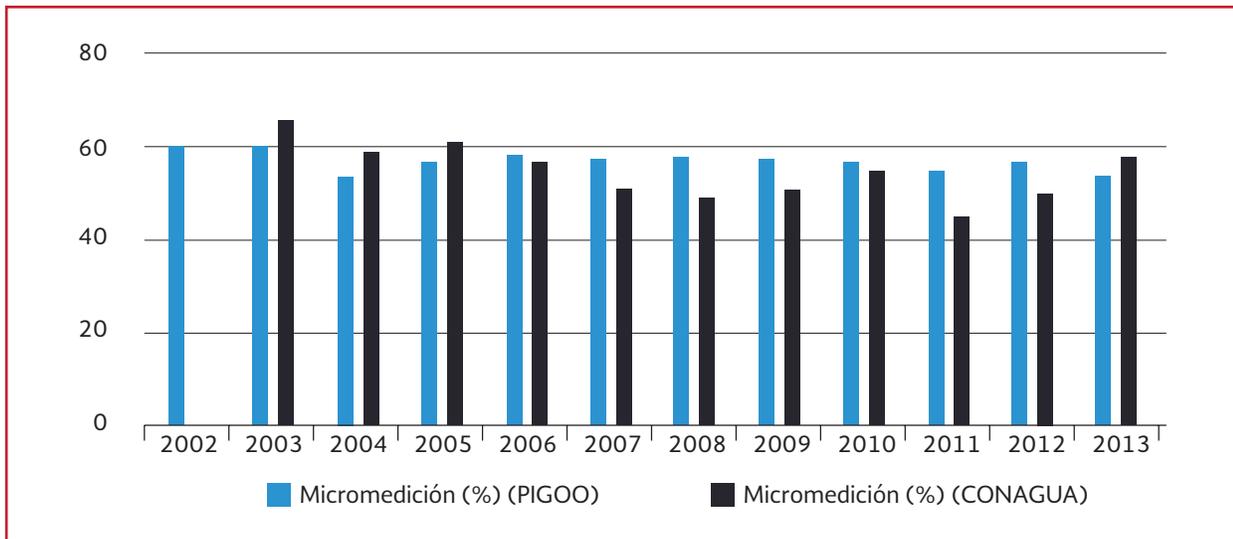
## **11.9. ESTATUS DE LA MEDICIÓN DE CONSUMOS**

### **11.9.1. COBERTURAS Y PROBLEMÁTICA PARA SU INCREMENTO**

Al 2013 las coberturas promedio de medición de consumos a nivel nacional estaban por abajo del 60 por ciento, aunque por otro lado, como se observa en la Ilustración 11.15, en los últimos cuatro años se nota una tendencia a la alza. Esto debido a los diferentes programas federalizados y de otro tipo que apoyan acciones como estas. Sin embargo, todavía se observa un déficit del 40 por ciento que impide la obtención de todos los beneficios que significa la medición total de consumos.

Aunque a nivel de organismo operador hay ciudades con una cobertura casi del 100 por ciento, pero existen otras que por diversos problemas no les ha sido posible alcanzarlo.

Ilustración 11.14 Cobertura promedio de medición de consumos (PIGOO, 2015)



Entre las causas más importantes de la insuficiente medición de consumos se tienen las de tipo financiero, social, económico, técnico y otros, como son las siguientes:

- Falta de recursos y de acceso al financiamiento de programas federalizados
- Bajas tarifas que no hacen atractiva la medición
- Robo de aparatos de medición
- Reincidencia en impedir su correcta operación por parte de los usuarios para que el medidor no registre
- La no aceptación por parte de los usuarios al medidor
- Inseguridad para los lecturistas
- No se registran las lecturas de consumos por falta de lecturistas o por otra razón
- La calidad del agua en ocasiones provoca que se reduzca la vida útil de los aparatos, como son las incrustaciones generadas por el fierro y manganeso en el agua distribuida, o la presencia de arenillas que pueden obstruir y detener el funcionamiento de los aparatos
- El servicio tandeado que ocasiona el flujo de aire en los aparatos
- Altas presiones que afectan el funcionamiento del medidor
- Deficiencias en la organización del subsistema de medición de consumos, como falta de capacitación, personal insuficiente, administración y mantenimiento insuficientes del parque de medidores, falta de taller y banco de medidores, otros

En los planes y proyectos para incrementar la cobertura de medición de consumos se deben considerar aspectos como los anteriores, como se puede ver, junto con el personal del área operacional.

### 11.9.2. ASPECTOS LEGALES SOBRE LA MEDICIÓN DE CONSUMOS

En general las leyes del agua de las entidades federativas establecen la medición de consumos obligatoria para los usuarios de los organismos operadores de agua potable. En los predios que no se encuentre instalado el medidor o mientras éstos no se instalen, se especifica que los pagos se deben efectuar con base en las cuotas fijas previamente determinadas. Asimismo, también establecen la suspensión o la restricción del servicio para aquellos usuarios que a los dos o tres meses que hayan dejado de cubrir el pago por la prestación de los servicios.

Otro aspecto importante que se incluye en estas leyes con el objeto de hacer más racional el consumo de agua, es que los usuarios deban utilizar aparatos ahorradores y que los organismos operadores fomente la cultura del agua.

Por otra parte, la legislación establece que las tarifas propicien la autosuficiencia financiera de los prestadores de los servicios públicos, la racionalización del consumo y que las tarifas medias de equilibrio sean suficientes para cubrir los costos de operación, mantenimiento y administración, rehabilitación y mejoramiento de la infraestructura, así como la amortización de las inversiones realizadas, los gastos financieros de los pasivos y las inversiones necesarias para la expansión de la infraestructura.

En general las leyes estatales del agua coinciden en que los usuarios cuiden que no se deterioren o destruyan los aparatos medidores, por la que deberán ser protegidos contra robo, manipulaciones indebidas y toda posible causa de deterioro.

De lo anterior se concluye que hay la conciencia generalizada de la necesidad de medir los consumos y aplicar tarifas de equilibrio para alcanzar la autosuficiencia financiera y el uso eficiente del agua. Esto acompañado de otras acciones de eficiencia comercial y eficiencia física, así como de eficiencia energética. Consultar los libros de *Mejora de Eficiencia Comercial, Mejora de Eficiencia Física y Pruebas, puesta en servicio, operación y mantenimiento de Equipo y materiales electromecánicos* del MAPAS.

Por otra parte estudios económicos concluyen que el consumo de agua debe ser medido en su totalidad, y que la fijación de sus precios considerando los costos marginales debe ser la recomendación predeterminada para las autoridades del agua y tomadores de decisiones (Chambouleyron, 2004).

### 11.9.3. DERECHO HUMANO AL AGUA Y LA MEDICIÓN DE CONSUMOS

La reforma al artículo 4 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que consagró el derecho humano al agua, adicionó un párrafo en el que se establece que: “Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines” (DOF, 8 de febrero del 2012).

Tabla 11.1 Elementos para la elaboración de planes y políticas, y ejecución de acciones de los grandes núcleos urbanos (López, R. et al, 2014)

<b>Marco institucional</b>	Reformas legales coherentes para mejor gestión integrada del agua, respuesta a desastres y colaboración internacional
	Incentivos institucionales transparente
	Organismos con autonomía operativa y presupuestal, y con incentivos al desempeño
<b>Marco tecnológico</b>	Telemetría, eliminación de fugas, potabilización, nuevas fuentes de abastecimiento y medición del agua
	Equilibrio en la relación energía-medio ambiente
<b>Marco operativo administrativo</b>	Operación de negocios en la distribución del agua, conservando su naturaleza pública
	Horizonte de planeación a 10 años
	Garantía de abastecimiento estable de agua saludable y de mejor sabor
	Base de conocimiento robusta. Información precisa sobre el padrón de usuarios, sistemas de captación y sistemas de distribución
	Base de recaudación solvente, superior o igual al presupuesto requerido para operar
	Buenas relaciones con los usuarios: tiempos de respuesta menores a 48 horas. Atención a la creciente demanda de servicios
	Reforzar la base administrativa y operativa con tecnología y recursos humanos calificados.
	Mantenimiento de la infraestructura de distribución, drenaje y saneamiento

Con relación al marco institucional, la micromedición contribuye a la transparencia de los ingresos de los Organismos Operadores, se justifican apropiadamente los apoyos e incentivos recibidos y se establece una relación de gobernabilidad entre los prestadores del servicio de agua potable y los diferentes niveles de gobierno.

Con relación al marco tecnológico, la micromedición contribuye a establecer los requerimientos tecnológicos para la explotación de nuevas fuentes de abastecimiento, una buena planeación sienta las bases para la construcción de un ambiente saludable y equilibrar la relación energía-medio ambiente. Se establece una relación de gobernabilidad entre los prestadores del servicio de agua potable y las instituciones de investigación y educación superior.

Con relación al marco operativo administrativo, la micromedición contribuye a establecer una base de conocimiento robusta sobre el padrón de usuarios y el sistema de distribución. Sin perder su naturaleza pública, la prestación del servicio

puede tener la orientación de negocios para operar con reglas claras de conservación de la infraestructura y nuevas inversiones. Asimismo, la micromedición contribuye en el diseño de un plan tarifario correspondiente con la calidad del servicio recibido. Se establece una relación de gobernabilidad entre los prestadores del servicio de agua potable, el sector privado y los usuarios (López, R. et. al., (2014).

### 11.10. USUARIOS, CONSUMOS, DEMANDAS Y DIMENSIONAMIENTO DE MEDIDORES

El usuario es el consumidor final de toda la cadena de la prestación del servicio del agua desde la extracción, conducción, abastecimiento y distribución del agua en la población, los consumos que se realicen en cada toma domiciliaria deben ser cuantificados y registrados a través del micromedidor para conocer los volúmenes que la población esté demandando, calcular los volú-

menes que se requieren por periodo de corte que se realice para su abastecimiento y planeación futura. Con esta información se debe proceder a la determinación de la capacidad adecuada de los aparatos de medición para cada usuario en función de la variación de sus consumos, máximos, mínimos, promedios que registre y de almacenamiento al interior de los predios, controlados por válvulas de flotador. Es importante destacar que la variación de los consumos depende de varios factores como; la clasificación de usuarios (domésticos, comerciales, industriales y públicos), zona del país por tipo de clima, la época del año, entre otros. Estos elementos de operación y los factores de consumos constituyen la base principal para seleccionar, instalar y operar un sistema de micromedición para la cuantificación de consumos de agua potable en la población con la infraestructura instalada, así como también considerar las necesidades y posibilidades para la instalación de equipos de medición de consumos a corto, mediano y largo plazo, por situaciones futuras tales como:

- a) Nuevas zonas habitacionales, comerciales, industriales, edificios públicos, y otros
- b) Zonas existentes como las anteriores con servicio, pero con déficits de aparatos de medición (cuota fija)
- c) Zonas mencionadas, con necesidades de sustitución de aparatos de medición por antigüedad, mal dimensionamiento, tipo inadecuado por calidad del agua y continuidad del servicio, cambio de tecnología y otros
- d) Relocalización

De acuerdo con las posibilidades anteriores se dispondrá de elementos para determinar la capacidad requerida de los aparatos de medición.

Uno de estos elementos, principalmente para zonas nuevas (inciso a), son los datos tabulados disponibles de consumos según la clasificación de usuarios, periodo del año y zona del país por el tipo de clima, así como de la clase socioeconómica para los usuarios domésticos. Con estos datos se proyectan consumos y demandas, de los cuales depende el dimensionamiento de los aparatos. Se recomienda ver en el libro de *Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado* del MAPAS.

Otro de los elementos muy importante y fundamental es realizar estudios de consumos en campo. Principalmente para zonas con servicio pero con déficit parcial o total de aparatos de medición, es decir con la denominada cuota fija.

Para los altos consumidores, además de la capacidad de los aparatos, es conveniente determinar el tipo de tecnología de medición más adecuada para su atención y facturación periódica, así como para su monitoreo, ya que significan la mayor parte de los ingresos para los organismos operadores. Son generalmente usuarios no domésticos, por lo que además facturan con tarifas más altas.

Respecto a la predicción de la demanda de agua por consumo doméstico en función del ingreso, la relación entre el producto interno bruto per cápita basado en la paridad del poder de compra (Gross Domestic Product Purchasing power parity) y el uso del agua per cápita por día, por país, el incremento del uso doméstico se acompaña de la condición económica, hasta cierto nivel económico. Arriba de ese nivel la demanda de agua no tiene relación con la economía, y algunos países con más altos niveles de producto interno bruto, tienen menores demandas de agua.

Es decir, que si la economía de un país está por debajo de un cierto nivel, los factores económicos son los más importantes para la predicción, y que si su economía crece por arriba de cierto nivel, se tiene que hacer un análisis de forma dividida por cada actividad doméstica: descarga de inodoro, baño, regadera, lavandería, cocina y otros, (Otaki et al, 2003).

Tomando como referencia los datos de operación, consumos, tipo de clima por zona en el país y la clasificación del usuario, con la finalidad de observar y analizar los comportamientos de demandas y consumos, para determinar si se cuenta con la disponibilidad de los volúmenes que se requieren para abastecer y distribuir equitativamente a los usuarios sus necesidades.

### 11.11. NORMATIVA DE MEDIDORES DE CONSUMO

En nuestro país se ha venido trabajando desde 1992 en la legislación de los medidores que registran los consumos de agua acorde al tipo de tecnología mundial que se emplea en los países desarrollados y de esta manera tecnificar en México el abastecimiento y distribución del agua. Para ello, se ha tomado como referencia básica la norma internacional ISO 4064 la cual establece la “Medición del flujo de agua en conductos cerrados-medición de agua potable fría y caliente-Especificaciones”, a través de una norma elaborada en México conocida como Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCFI-1994 “Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos-Medidores para agua potable fría-Especificaciones”, esta norma se elaboró y publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) con base en lo establecido en la

Ley Federal Sobre Metrología y Normalización (LFMN).

Por lo tanto, para cualquier definición técnica, clasificación o tipo de medidores, selección de uso, instalación, comportamiento metrológico y operación de este tipo de medidores de agua en el sistema hidráulico de un organismo operador, se recomienda consultar la citada NOM debido a que es la que aplica como cumplimiento obligatorio en México conforme a lo señalado en la LFMN.

Es importante destacar que el cumplimiento y seguimiento en el cumplimiento de esta NOM, se hace mediante la verificación de las pruebas metrológicas, dimensionales y de funcionamiento técnico-operativo especificadas en la citada NOM, a través de un laboratorio de pruebas acreditado por la entidad mexicana de acreditación en México, el cual emite un informe donde se menciona cual es el resultado que se obtuvo por modelo y tipo de medidor. Posteriormente, si el resultado es favorable se gestiona el certificado de cumplimiento con la NOM y el registro ante la Secretaría de Economía a través de la Dirección General de Normas (DGN) para su comercialización en nuestro país.

Las pruebas que se establecen en la NOM-012-SCFI-1994 para evaluar el cumplimiento obligatorio de los medidores, están especificadas para su aplicación sólo en laboratorio de pruebas acreditado. Sin embargo, se recomienda que de ser necesario también se realice la práctica de las pruebas de campo in situ, principalmente la prueba de exactitud o error de medición para conocer el comportamiento del medidor y sea semejante su funcionamiento al que se haya presentado en el informe de pruebas del laboratorio

acreditado. Ver Numeral 11.10.5 “Calibración de medidores”. Las pruebas se deben realizar mediante una medida volumétrica certificada conforme a lo establecido en la NOM-042-SCFI-1997. Los modelos de este tipo de medidores deben contar con la aprobación vigente de la Dirección General de Normas, de la Secretaría de Economía.

## 11.12. POSIBILIDADES DE LECTURA EN MEDIDORES MECÁNICOS

Estos medidores, como se describe en la NOM-012-SCFI-1994, pueden disponer de varias posibilidades para la lectura de consumo, según se explica a continuación:

### ***Dispositivo indicador para lectura directa***

Conforme a la norma, el dispositivo indicador debe proporcionar una lectura visual fácil, confiable y legible del volumen de agua medido, el cual debe ser expresado en metros cúbicos y el símbolo de la unidad [m<sup>3</sup>] debe aparecer en el cuadrante o en la cercanía inmediata de la indicación digital. Asimismo, el dispositivo indicador de transmisión tipo magnética puede incluir elementos adicionales para pruebas de verificación y calibración por medio de otros métodos, por ejemplo automáticos.

### ***Sistema de salida remota***

Con base en la misma norma, los medidores pueden estar equipados con sistemas de salida remota que permitan que el medidor sea leído a distancia del lugar donde se encuentre instalado. Estos deben garantizar que la lectura obtenida a distancia coincida con la lectura de registro

al momento de la lectura medida en sitio. Al respecto se especifican los siguientes elementos: salida remota, enlace de transmisión y dispositivos de lectura.

La misma norma indica que la adición de un dispositivo de salida remota a un medidor para agua, no debe alterar su funcionamiento metrológico y que puede ser incorporado dentro del cuerpo o dentro del dispositivo indicador, o puede ser fijado externamente. En este último caso debe estar provisto con dispositivos y sellos protectores. En todo caso puede ser un dispositivo electrónico independiente de registro y transmisión.

### ***Medidores de prepago***

Existen medidores de tipo volumétrico y de velocidad con elementos electrónicos incorporados, no sólo para lectura remota, de toque o mediante vehículo en marcha, sino también con tarjeta de prepago.

El principio de funcionamiento de este tipo de medidores mecánicos con dispositivo electrónico para tarjeta de prepago, ofrecen para algunos usuarios ciertas ventajas. Una de las más importantes sería la de prescindir de lecturistas y notificadores de recibos de pago y adicionalmente con ello la eliminación de los errores de registro de lectura que esos procedimientos conllevan. Los fabricantes y distribuidores los comercializan junto con el software necesario para su control y administración.

Por otra parte, tienen el reto de su aceptación por parte de los usuarios, entre otras razones por su costo si tiene que ser cubierto por ellos. Pero también como cualquier otro medidor está sujeto a situaciones de calidad del agua y

de continuidad del servicio, así como a posible vandalismo.

### 11.12.1. MEDIDORES ULTRASÓNICOS Y ELECTROMAGNÉTICOS, SEGÚN ISO 4064-1 2014

Por otra parte, además de los medidores mecánicos existen en el mercado medidores de consumo de agua potable en general, con otros principios de medición, como el ultrasónico y el electromagnético, ambos tipos actualmente no tienen el mismo alcance en la NOM-012-SCFI-1994 vigente como para los modelos de medidores mecánicos, siempre y cuando solo se refieran a este tipo de medidores con base en el uso de sensores externos, porque actualmente este tipo de medidores ya se están ofreciendo a los usuarios fabricados de la misma manera que los mecánicos, ver Ilustración 11.15 e Ilustración 11.16, como tecnología de punta, es decir los sensores y campo magnético ya están instalados en carrete o tubo y la instalación en líneas de conducción o toma domiciliaria es semejante a los medidores de velocidad o volumétricos. Por lo tanto, si se habla de medidores ultrasónicos o electromagnéticos con sensores externos solo se puede aplicar la NOM-012-SCFI-1994 para las pruebas de funcionamiento metrológicas (error de medición o exactitud), mientras se lleva a cabo la actualización de la NOM-012-SCFI-1994. Pero si se trata de medidores ultrasónicos y electromagnéticos fabricados en carrete o tubo, si se le debe aplicar la NOM-012-SCFI-1994 como a los de velocidad o volumétricos debido a que su manufactura,

dimensiones, componentes y funcionamiento es semejante.

Asimismo, cuando sea necesario se recomienda consultar y aplicar la norma ISO 4064, debido a que tiene una amplia aplicación a los medidores de agua basados en principios eléctricos o electrónicos y a medidores basados en principios mecánicos que incorporan dispositivos electrónicos, usados para medir el flujo real de agua potable de agua fría y caliente. Esta misma norma ISO también contempla la aplicación a los dispositivos electrónicos auxiliares.

Como puede observarse, esta norma internacional, a diferencia de la nacional, además de incluir en sus especificaciones a los medidores indicados, aplica también a medidores para agua potable caliente.

Actualmente para fines de consumo en diámetros para la medición domiciliaria, los medidores ultrasónicos y electromagnéticos son relativamente nuevos y están en etapa de introducción, al menos en el mercado nacional (Ilustración 11.15 e Ilustración 11.16). Además de contar con salida de pulsos para lectura remota, tienen la ventaja de no tener elementos internos que obstruyan el flujo, lo cual es muy importante por la calidad del agua que puede ocasionar incrustaciones o contener arenillas, que detienen o paran el funcionamiento de los medidores mecánicos y en cuanto a la exactitud o error de medición, se puede decir que son más precisos y de mejor comportamiento, solo que la desventaja por ahora es que los costos son mayores que los convencionales y al igual que los demás están expuestos al posible vandalismo.

Ilustración 11.15 Medidores ultrasónicos domiciliarios



Ilustración 11.16 Medidores ultrasónicos domiciliarios



### 11.13. SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE MEDIDORES DE CONSUMO

Con respecto a los medidores mecánicos, volumétricos de pistón oscilante o disco nutativo y de velocidad tipo turbina o propela, se debe recordar que los primeros generalmente caen

en la clase “C” aunque también algunos llegan a comportarse como Clase “B”, lo que significa que los Clase “C” su gasto mínimo ( $q_{min}$ ) es de 15 L/h, obteniendo un mayor rango de medición. Asimismo, para los medidores de velocidad tipo turbina o propela generalmente son clase “B”, registrando un gasto mínimo  $q_{min}$  de 30 L/h. Ver en Tabla 11.2 y Tabla 11.3 de la NOM-012-SCFI-1994.

Tabla 11.2 Clasificación de los medidores de acuerdo a los valores de  $q_{min}$  y  $q_t$

Clase	$q_{min}$		$q_t$	
	Para $n < 15$	Para $N \geq 15$	Para $N < 15$	Para $n \geq 15$
A	0.04 N	0.08 N	0.10 N	0.30 N
B	0.02 N	0.03 N	0.08 N	0.20 N
C	0.01 N	0.015 N	0.015 N	0.015 N
J	Ver NOM	Ver NOM	Ver NOM	Ver NOM

Fuente: NOM-012-SCFI-1994

Tabla 11.3 Clasificación de los medidores de acuerdo a los valores de  $q_{mín}$  y  $q_t$

Tamaño del medidor	Capacidad máxima de operación	Máxima pérdida de presión a la capacidad máxima de operación	Máximo flujo recomendado para operación continua	Flujo mínimo de operación**	Límites normales de flujo prueba**
mm	m <sup>3</sup> /h	(kPa)	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
(13)	(3.4)	(103)	(1.7)	(0.06)	(0.2-3.4)
(13 x 19)	(3.4)	(103)	(1.7)	(0.06)	(0.2-3.4)
(15)	(4.5)	(103)	(2.3)	(0.06)	(0.2-4.5)
(15 x 19)	(4.5)	(103)	(2.3)	(0.06)	(0.2-4.5)
(19)	(6.8)	(103)	(3.4)	(0.11)	(0.5-6.8)
(25)	(11.4)	(103)	(5.7)	(0.17)	(0.7-11.4)
(38)	(22.7)	(103)	(11.3)	(0.34)	(1.1-22.7)
(51)	(36.3)	(103)	(18.2)	(0.45)	(1.8-36.3)

\*\* Véase inciso 5.13.1 de la NOM-012-SCFI-1994

Fuente: NOM-012-SCFI-1994.

Los medidores clase “C” tienen una mejor capacidad para medir flujos menores a los que puede medir el de clase “B”. Sin embargo, son más delicados y para que funcionen adecuadamente se requiere una buena calidad del agua y que esté libre de arenillas. En ese sentido el de tipo turbina es más resistente a este tipo de impurezas, sin que ello quiera decir que no se pueda ver afectado por las condiciones mencionadas.

Conforme a lo anterior, para la selección del tipo de medidor aplica lo indicado en 4.5.1 (Consideraciones generales de selección) de este Libro, con especial cuidado en:

- Las características físico químicas del agua
- Los caudales de consumo
- Las presiones de operación
- La máxima pérdida de carga admisible
- La precisión requerida
- El costo del agua, entre otros factores

La selección debe hacerse de modo que el rango de medición del aparato coincida lo más real posible con el de trabajo de la toma domiciliaria en la cual será instalado y considerando las caracte-

terísticas del tipo de medidor. Es importante por ejemplo que los medidores tengan la capacidad para medir:

- Las fugas en las instalaciones domiciliarias defectuosas
- El caudal de alimentación de una cisterna cuya entrada sea controlada por una válvula-flotador

### 11.13.1. ESTUDIOS DE CONSUMOS EN CAMPO

Con relación a la selección de medidores para usuarios con servicio en zonas habitacionales, comerciales, industriales y de edificios públicos, se recomienda realizar un estudio de consumos que permita conocer el comportamiento y variaciones de flujo en las conexiones domiciliarias en cuestión. Esto a través de un muestreo en usuarios domésticos y si se trata de altos consumidores hacerlo al 100 por ciento.

Las experiencias nacionales e internacionales recomiendan realizar un estudio de la variación de los consumos de las conexiones domiciliarias, evaluar los medidores en laboratorio y realizar un

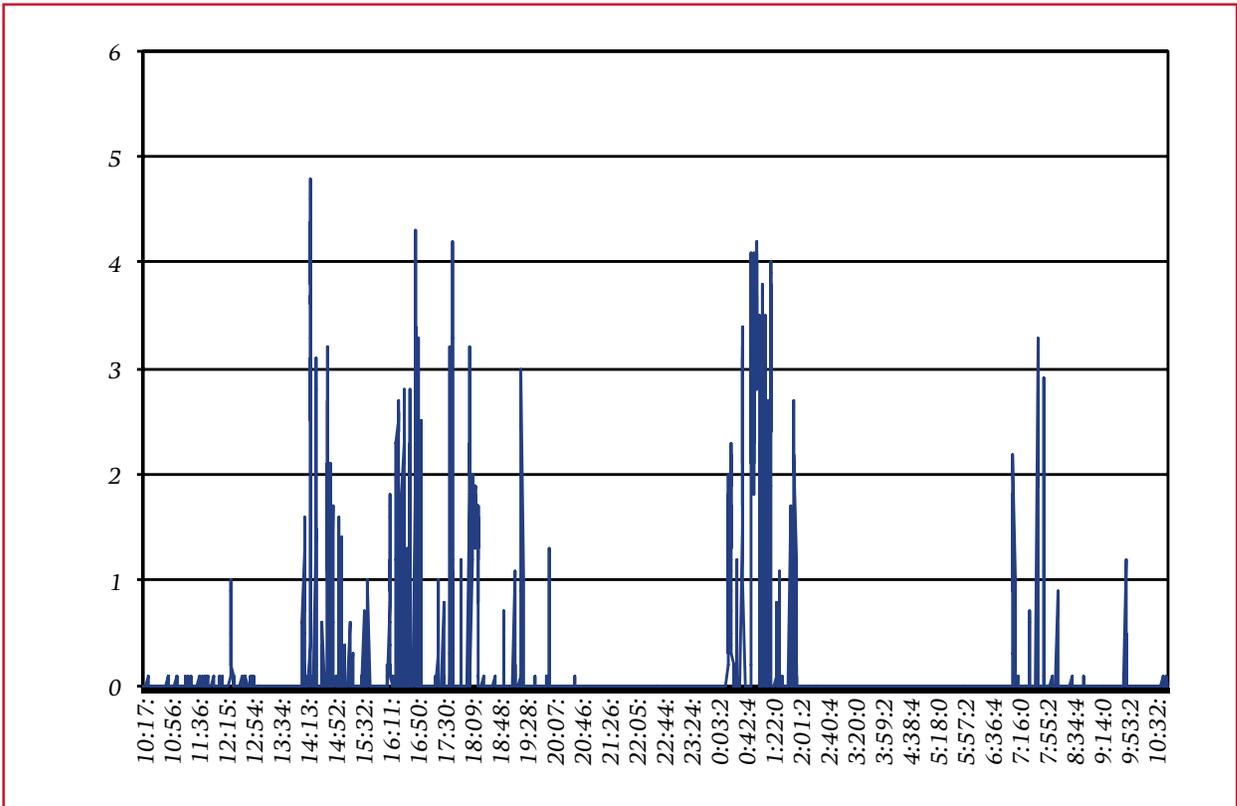
análisis comparativo de ambos resultados. Asimismo, evaluar los medidores en campo, bajo condiciones no controladas como se hace en el laboratorio. En la Ilustración 11.17 e Ilustración 11.18, se muestran ejemplos de la realización de este tipo de

estudios utilizando medidores nuevos, equipados con sensor magnético de impulsos y registradores. Estos estudios permiten determinar el comportamiento real instantáneo de la demanda doméstica de agua potable.

Ilustración 11.17 Investigación de la variación de consumos en tomas domiciliarias existentes (Alcocer-yamanaka, 2007)



Ilustración 11.18 Gráfica de investigación de consumos con características estocásticas de la demanda (Alcocer-yamanaka, 2007)



### 11.13.2. DIMENSIONAMIENTO DE MEDIDORES

El dimensionamiento de un medidor consiste en determinar la capacidad adecuada del aparato que se instalará en una conexión en particular, nueva o existente, de manera que su rango de medición coincida como ya se dijo lo mejor posible con el de consumo. Esto es, determinar la designación del medidor,  $N$  [ $m^3/h$ ], que corresponde al gasto permanente ( $qp$ ) al cual se requiere que el medidor opere de manera satisfactoria bajo condiciones de flujo estable o intermitente. Las pérdidas por submedición ocurren principalmente cuando se instalan medidores con  $q_{min}$  mayor al caudal predominante en la toma en cuestión.

Al sobredimensionar un medidor, se consigue que buena parte del consumo se dé por debajo del límite inferior de exactitud (caudal mínimo), donde no está garantizada la precisión del mismo. Los medidores mecánicos grandes tienen una mayor inercia y en los caudales pequeños no tienen fuerza suficiente para mover la turbina.

En el caso contrario, es decir, que se instale un medidor con sobrecarga, el aparato falla rápidamente. Además del problema de pérdida de carga exagerada que podrá limitar de manera indebida el consumo.

Es frecuente en México que en los predios se haga uso de cisternas y tinacos dotados de válvulas de flotador, con una amplia superficie de agua en las cisternas, que hace que las conexiones y sus medidores trabajen con caudales bajos cuando estos almacenamientos están por llenarse, con las consecuentes de altas pérdidas comerciales por submedición.

Normalmente el dimensionamiento se realiza considerando que los muebles hidrosanitarios se alimentan directamente de la red, de manera que el medidor no tenga una alta pérdida de presión cuando se utilizan simultáneamente varios puntos de consumo. Sin embargo, como se comentó, en la mayoría de los predios se usan cisternas y tinacos con válvula de flotador, con caudales de consumo casi siempre bajos, por lo que es importante instalar un medidor que los registre con precisión.

### 11.14. INSTALACIÓN

La norma mexicana (NMX) que establece cuales deben ser los requisitos para la parte de instalación de medidores de consumo es la NMX-CH-001/2-SCFI-1993, “Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos-medidores para agua potable fría-parte 2: requisitos de instalación”. Esta norma establece criterios de selección, conexiones asociadas, instalación, requisitos especiales y puesta en operación para asegurar una medición exacta, constante y confiable. Se aplica a medidores para agua de varias clases metrológicas que pueden funcionar a gastos permanentes entre  $0.6 m^3/h$  y  $4\ 000 m^3/h$ , soportando una presión de trabajo máxima admisible igual o mayor a  $1\ MPa$  ( $10\ bar$ ) y una temperatura máxima de  $30\ ^\circ C$ .

En cuanto a los criterios de selección, conforme a los descritos en el apartado anterior, específica el tipo, clase metrológica y dimensiones de los medidores para agua, se determinan de acuerdo a las condiciones de operación de la instalación, tomando en cuenta entre otros los siguientes parámetros:

- La presión real de operación del agua en la toma
- Pérdida de presión aceptable a través del medidor
- Los gastos previstos; los relativos  $q_{min}$ ,  $q_p$  y  $q_s$  del medidor, compatibles con las condiciones de gasto estimado de instalaciones
- Compatibilidad del tipo de medidor con las condiciones de instalación.

#### 11.14.1. ACCESORIOS PARA LA INSTALACIÓN

Conforme a la norma mexicana NMX-CH-001/2-SCFI-1993 la instalación de medidores para agua debe incluir:

Aguas arriba del medidor

- Una válvula de paso
- Mantener un tramo de tubería recto, libre de accesorios cuya longitud mínima sea equivalente a ocho diámetros de la tubería de la toma
- Un medio de precintado entre el medidor y la línea de entrada de agua, para detectar cualquier movimiento no autorizado del medidor

Aguas abajo del medidor

- Un dispositivo de longitud ajustable, que permita instalar y retirar fácilmente el medidor
- Un tramo de tubería recto, libre de accesorios cuya longitud mínima sea equivalente a seis diámetros de la tubería de la toma
- Si se requiere, un dispositivo que incluya una válvula de drenado, que pueda

utilizarse para supervisar la presión y muestreo del agua

- Una válvula check para evitar el flujo reversible y golpe de ariete

Para todos los medidores deben instalarse una válvula de paso. En caso de que exista retorno de agua caliente se debe instalar una válvula de retención (*check*).

#### 11.14.2. INSTALACIÓN

La norma mexicana NMX-CH-001/2-SCFI-1993 establece que el medidor y sus accesorios deben instalarse lo más próximo al paramento interior del predio para que sea fácilmente accesible su lectura, su mantenimiento y retiro para desarmar el mecanismo en el mismo lugar si es necesario.

El sitio de instalación debe tener una iluminación adecuada; el piso debe ser adecuado, seguro y alejado de cualquier instalación eléctrica. Asimismo, en todos los casos debe evitarse la contaminación del agua en la zona de instalación del medidor. Se recomienda que tenga protección ambiental IP68, por posible inundación del aparato, principalmente si su registro es de banqueta (Ilustración 11.19).

Por otra parte, el medidor debe estar protegido contra daños ocasionados por golpes o vibraciones inducidos por agentes externos. No debe estar sujeto a esfuerzos causados por tuberías y conexiones. Si es necesario, debe montarse sobre una cimentación. Las tuberías aguas arriba y aguas abajo del medidor, deben anclarse para asegurar que la instalación no pueda ser desplazada bajo el empuje del agua.

Ilustración 11.19 Instalación de medidor en registro de banqueta



Conforme la norma mexicana antes citada, el medidor y la zona de instalación deben ser protegidas contra daños ocasionados por fenómenos de la naturaleza, la posición del medidor debe ser la adecuada a su tipo. El medidor y el cuadro de instalación no deben formar parte de una tierra eléctrica. Se deben tomar precauciones para disminuir o evitar daños al medidor por condiciones hidráulicas desfavorables (cavitación y golpes de ariete). Se debe asegurar que la cámara de medición siempre debe estar llena de agua.

Para medidores tipo hélice o propoela la norma establece que son sensibles a turbulencias del flujo aguas arriba, lo cual causa grandes errores y desgaste prematuro. Estas pueden ser: distorsión del perfil de velocidad y remolinos. La primera es causada típicamente por una obstrucción que bloquea parcialmente la tubería y puede ser minimizada fácilmente. Los remolinos son causados principalmente por dos o más codos en diferentes planos o algún otro accesorio. Este efecto puede ser controlado asegurando una longitud de tubería recta aguas arriba del medidor o mediante la instalación de un dispositivo directriz.

### 11.14.3. PRIMERA OPERACIÓN DE MEDIDORES

La NMX-CH-001/2-1993-SCFI establece que antes de instalar el medidor, la tubería de alimentación de agua debe lavarse para remover arrastres y limpiar el filtro. Después de la colocación del medidor debe purgarse la instalación hidráulica y verificar que el medidor funciona correctamente para quede listo para la operación normal y registro de lecturas en los periodos establecidos por el organismo operador.

### 11.14.4. LA TOMA DOMICILIARIA

Se le llama toma domiciliaria a la instalación que se deriva de la tubería de la red de distribución de agua y que termina dentro del predio del usuario. Ésta está constituida por dos elementos básicos, que son el ramal y el cuadro.

El Ramal, es la parte que tiene como función la conducción del agua de la tubería de la red de distribución hacia la instalación hidráulica intra domiciliaria. Comienza en el acoplamiento con la tubería de la red y termina en el codo interior del primer tubo vertical del cuadro. Las partes por las que el ramal está conformado son: abrazadera, válvula de inserción, tubería flexible, llave de banqueta, tubería rígida, conectores y niples, ver Ilustración 11.20.

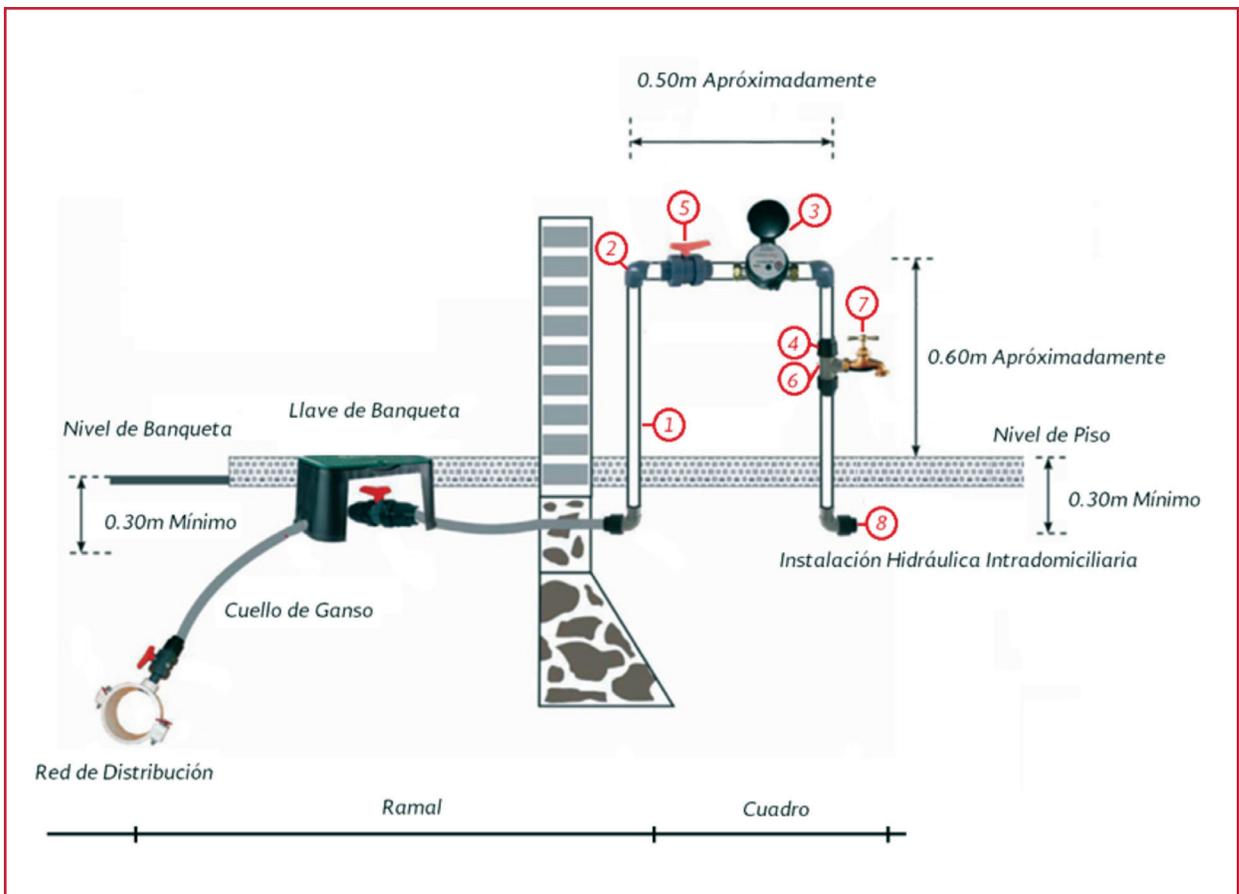
El Cuadro, es la parte que tiene como función el permitir la instalación del medidor, la válvula de globo y la llave de manguera. El cuadro está construido de un material llamado Fo.Go o cobre rígido. Sus dimensiones promedio son de 0.60 cm. de altura y 0.50 cm. de largo. El cuadro está formado por: tubos rígidos, codos, medidor, adapta-

dores, válvula de globo, tee, llave de manguera y tapón al final de la toma, ver Ilustración 11.20.

En el mercado, se encuentran dos tipos de toma domiciliaria, que son las urbanas y las rurales, teniendo como diferencia entre ellas el número y tipo de componentes que las integran, como es el caso de la llave de banqueta, la de inserción y el medidor de agua.

Para seleccionar el tipo de toma que se requiere, es necesario analizar factores como agresividad del suelo, condiciones hidráulicas de funcionamiento, resistencia mecánica contra congelación, fuerzas externas, vibraciones, fatiga y presión, hidráulica, capacidad de flujo, conexiones y accesorios, flexibilidad y métodos y costos de instalación.

Ilustración 11.20 Toma domiciliaria, ramal y cuadro



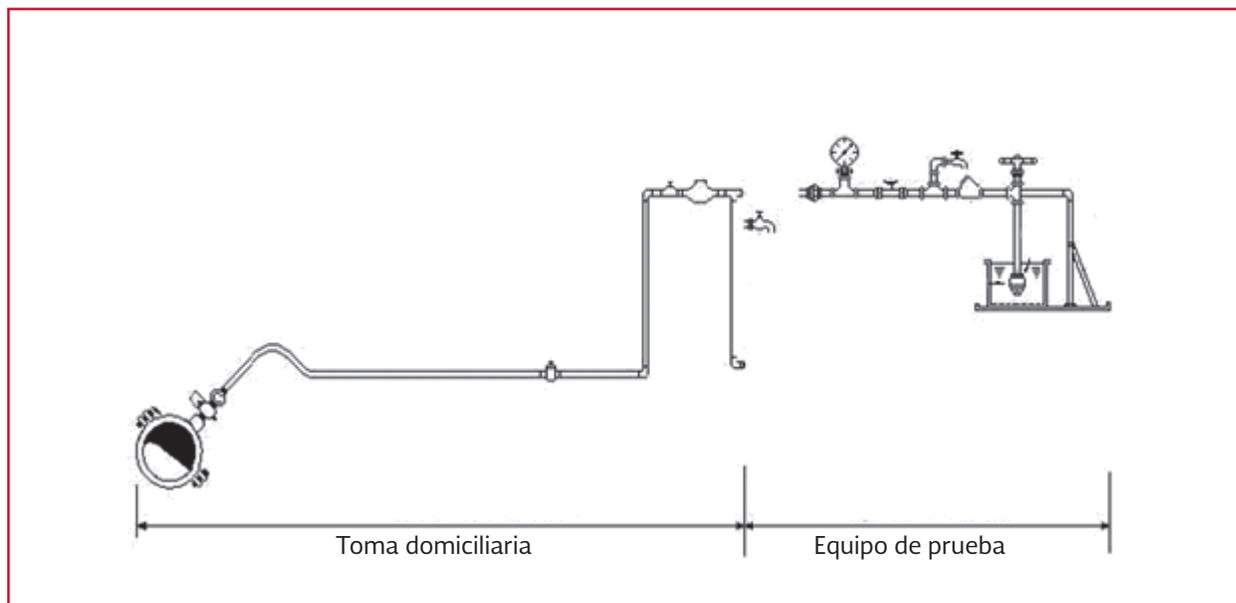
Como se puede observar, en la Ilustración 11.24, el medidor forma parte del cuadro de la toma domiciliaria, por lo que es importante referirlo también a esta instalación. Al respecto existe la Norma Oficial Mexicana NOM-001-CONAGUA-2011, “Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba”, donde se pueden consultar las especificaciones de instalación, pruebas de campo de hermeticidad, tipo de materiales para su instalación y su funcionamiento, ver Ilustración 11.21.

### 11.15. ORGANIZACIÓN DEL SUBSISTEMA DE MEDICIÓN DE CONSUMOS

Para llevar a cabo sus funciones el subsistema de medición de consumos debe estar integrado por los siguientes elementos:

- Personal capacitado: letrados, notificados, supervisores, instaladores, personal de oficina, entre otros
- Sistema de información de la micromedición (que es parte de todo el Sistema Comercial)
- Parque de micromedidores instalados y funcionando normalmente
- Procedimientos: para instalación de medidores, toma de lecturas, rutas para la toma de lecturas, para alta y baja de medidores, para prueba de medidores en laboratorio o banco, para prueba de medidores en campo, para inspección de medidores en campo y de toma lecturas, para mantenimiento de medidores, etcétera
- Normas de referencia
- Oficinas
- Equipo de oficina
- Equipo de campo: terminales remotas (*hand helds*) para toma y registro de lec-

Ilustración 11.21 Esquema de prueba de toma domiciliaria. (NOM-001-CONAGUA-2011)



turas, equipo para prueba de errores de medición en campo

- Vehículos
- Talleres
- Banco de medidores

Es conveniente que los trabajadores de campo puedan obtener una certificación de competencias laborales, a cargo del *Consejo Nacional de Normalización y Certificación de Competencias Laborales* (CONOCER). En especial en el estándar EC0140 *Cuantificación del consumo de agua potable con medición*. Según este documento, se describe el desempeño de un lectorista, desde la preparación de su ruta de atención al servicio, de las herramientas, materiales y equipo hasta el registro de lecturas de los medidores, para ofertar un servicio con las características de calidad que requiere el mercado. También establece los conocimientos teóricos básicos con los que debe contar un lectorista para realizar su trabajo, así como las actitudes relevantes en su desempeño. La certificación del personal garantiza que el personal dedicado a estas actividades demuestre sus capacidades, habilidades y destrezas en el desempeño de la función que se le encomiende y con ello, se disminuyan y eviten los errores en la toma de lecturas de los medidores, así como también en los registros que se asienten en la base de datos del padrón de usuarios para el control de la cuenta de cada usuario.

#### 11.15.1. TIPO DE LECTURAS DE MEDIDORES

##### ***Lectura directa***

Aplica para medidores no equipados para lectura remota y requiere que los lectoristas lean en la caratula del medidor el volumen actual

para anotarlo en una libreta o registrarlo en una terminal remota (*hand held*), previamente cargada con los datos de cada ruta asignada a los lectoristas. En este caso hay la posibilidad de que cada lectura sea enviada por la terminal remota al sistema informático, de acuerdo al tipo de contrato con la compañía telefónica. De esta manera se puede dar seguimiento a los lectoristas al mismo tiempo porque automáticamente el sistema verifica la consistencia de la lectura y en el caso que no sea correcta la lectura manda una alerta para que sea verificada nuevamente.

La otra alternativa es que al final de su ruta el lectorista descarga los datos en el sistema. La Ilustración 11.22 un ejemplo de terminal remota (*hand held*) para toma de lecturas.

Los rendimientos en este tipo de toma de lecturas pueden ser de hasta 300 por día, dependiendo de factores como el clima, separación de predios, inseguridad, etcétera. Por esta razón en el momento de la lectura se debe registrar una nota de la situación encontrada, que puede incluso impedir la toma de la lectura, ver en la Ilustración 11.23 ejemplo de toma de lecturas y registro de anotaciones.

Una tercera opción es que el lectorista lleva consigo una impresora térmica para que una vez tomada la lectura imprima el recibo de pago, evitando una segunda vuelta de entrega de un notificador. Pero el riesgo es la toma de lecturas equivocadas, voluntaria o involuntariamente, ver Ilustración 11.24.

Esta opción con uso de *hand helds* está siendo muy usada en el país, ya que además de modernizar la toma de lecturas e impresión de recibos en sitio, o bien la transmisión remota o descarga de información recabada en las rutas, permite

Ilustración 11.22 Terminal remota (*hand held*) para toma y registro de lecturas de consumo en medidores



Ilustración 11.23 Ejemplo de proceso de toma de lectura con *hand held*

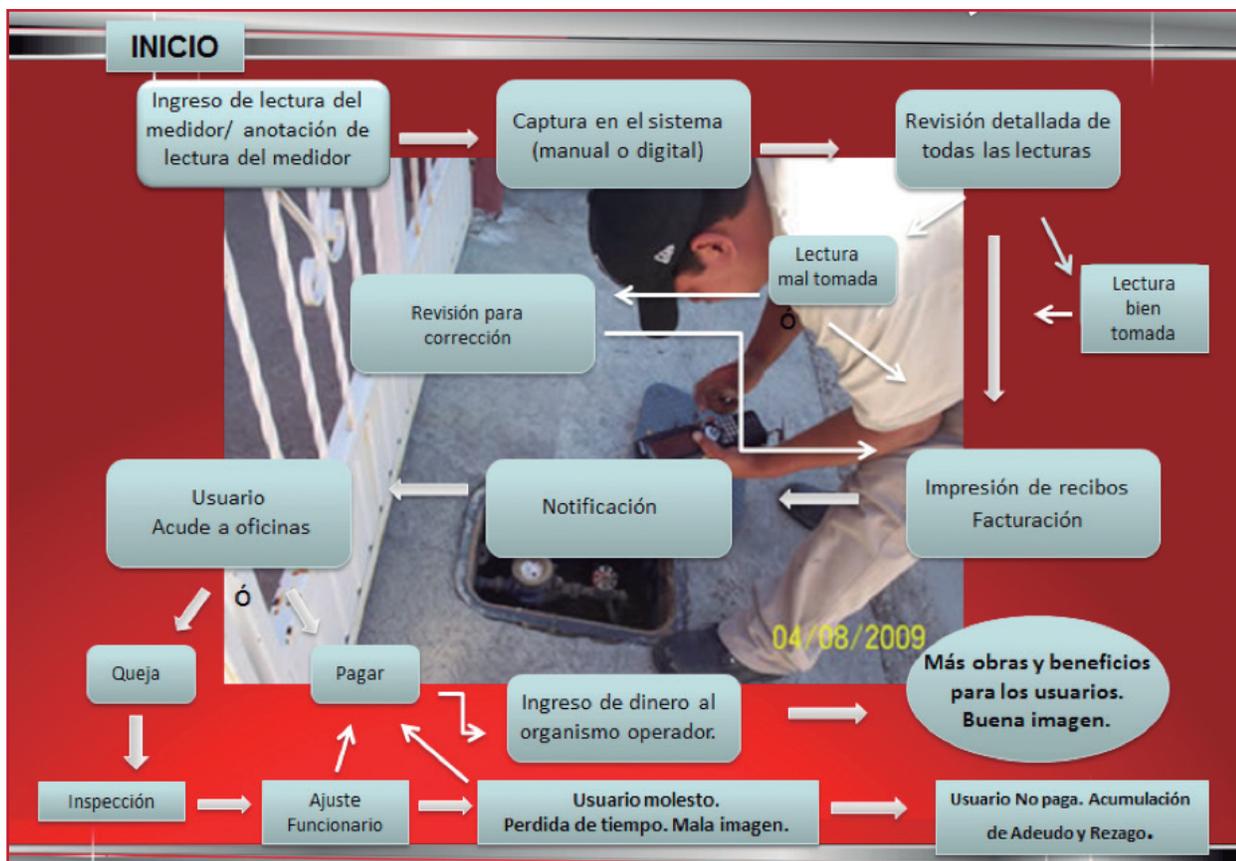


Ilustración 11.24 Otro tipo de *hand held* con impresora



que los letristas estén al tanto de los medidores de consumo. La toma de lecturas en libretas y descarga manual en el sistema informático está quedando cada vez más fuera de uso. Además está sujeta a cometer más errores en descarga de información.

#### ***Lectura remota de toque***

Los aparatos de medición equipados con sistemas de salida remota que permitan que el medidor sea leído con equipo recolector de toque conteniendo los datos de la ruta de lecturas. Con este sistema se evitan errores en la toma de lecturas y su descarga al sistema informático. Generalmente los proveedores ofrecen el sistema completo: medidores, equipo recolector de datos, software para procesamiento, y otros accesorios.

#### ***Lectura remota con vehículo en marcha***

Es similar al anterior sistema, pero con la ventaja de tomar las lecturas remotamente con vehículo en marcha con el equipo recolector, mediante

comunicación de radio frecuencia. Esto permite altos rendimientos en la toma de lecturas.

#### ***Red fija***

Esta opción permite la lectura remota y la transmisión de datos directamente del medidor al sistema de oficinas centrales. Generalmente se usa para altos consumidores a los cuales además se les puede monitorear en tiempo real. La comunicación puede ser por radio frecuencia o de otro tipo. Sin embargo la tecnología en medidores, de banda ancha, software y demás permitirá gradualmente su aplicación para todo tipo de usuarios.

Esta opción, de telemetría tanto en medidores del área operacional como de consumos, permitirá en el corto o mediano plazo la lectura simultánea de la producción y el consumo, con lo cual se podrán realizar balances más precisos y por tanto atender de manera más eficiente las pérdidas físicas y comerciales.

#### ***Tarjeta de prepago***

En esta opción los proveedores ofrecen el sistema completo: medidores, software, accesorios y demás elementos para su operación. Ofrece grandes ventajas, ya que elimina la necesidad de letristas y equipos de recolección de datos. El usuario toma esa función mediante el uso de la tarjeta. Asimismo permite incrementar la facturación y la cobranza.

Una de las desventajas es la aceptación social, ya que además puede afectar el derecho humano al agua, a menos que se establezca una estrategia operativa al respecto. En todo caso se debe evaluar la factibilidad de las zonas en las que convenga su instalación.

### 11.15.2. MEDICIÓN DE ALTOS CONSUMIDORES

Este tipo de usuarios requiere de rutas de lecturas especiales, así como de facturación. Incluso el uso de lecturas remotas mediante red fija o de otro tipo. Sus consumos y sus tarifas significan los mayores ingresos de los organismos operadores, como es el caso de las zonas hoteleras en los destinos turísticos de México. Lo recomendable es monitorear sus consumos.

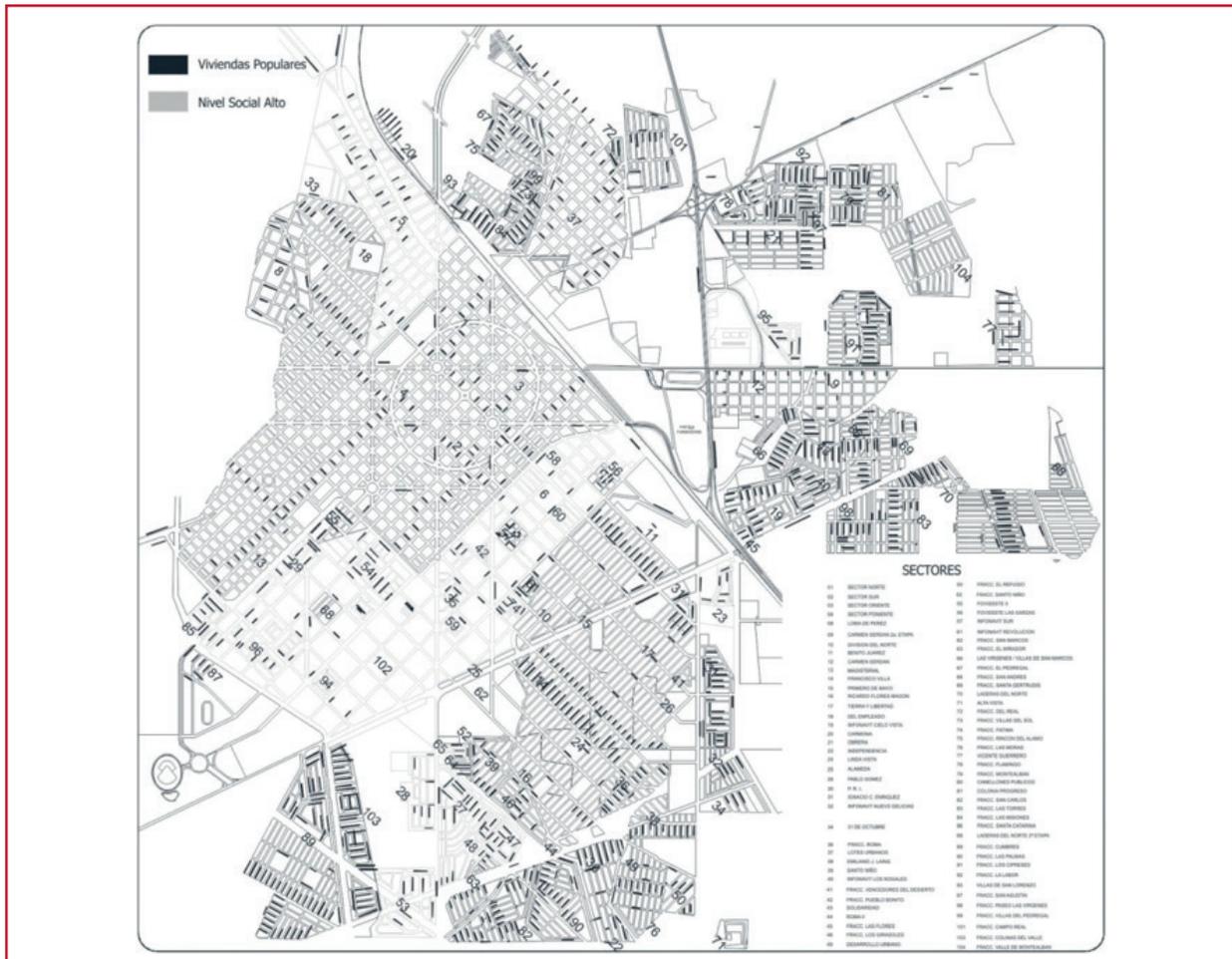
Tanto en este tipo de usuarios, se deben realizar estadísticas de consumos, incluyendo histogramas para identificar los rangos de consumo y el número o porcentaje de tomas

domiciliarias correspondiente a cada uno de ellos. Asimismo los ingresos respectivos por cada rango. Esta es una de las ventajas de la micromedición.

### 11.15.3. RUTAS

Las rutas son los medidores de los usuarios los que un lectorista puede tomar lecturas en un día de trabajo. Estas deben de ser bien planificadas para tener buenos rendimientos. Entre otros aspectos se debe evitar que en el trazado de estas el lectorista pase dos veces por el mismo predio. La Ilustración 11.25 es un ejemplo de sectores comerciales para toma de lecturas.

Ilustración 11.25 Ejemplo de sectores comerciales



#### 11.15.4. PARQUE DE MEDIDORES

El parque de medidores del subsistema de medición de consumos, debe ante todo estar soportado por la base de datos del Sistema Informático Comercial, que de preferencia debe contar con un módulo en el que se pueda administrar su operación y su mantenimiento y en el que se puedan generar ordenes de mantenimiento preventivo y correctivo, así como generar reportes mensuales y anuales de diferente tipo, incluyendo los costos. Asimismo, programas de incremento de cobertura, reemplazo, reubicación, modernización, etcétera.

La información básica del parque de medidores es la identificación:

- Usuarios
  - Totales
- Número de medidor
  - Marca
  - Modelo
  - Diámetro
  - Cuenta
  - Fecha de instalación
  - Historia (registra cambios al historial de localización del medidor)
  - Instalados
  - Dañados
  - Investigados (verificados en campo)
  - Probados ( banco de micromedidores)
  - En prueba
  - En reparación
  - Reparados
  - Desmantelados
  - Retirados
  - Nuevos Desechados
  - Tránsito
  - Ubicación:
  - Taller
  - Almacén

La actualización del estatus de los medidores debe ser suministrada por los lecturistas y personal que realiza aforos de campo, incluyendo su identificación y funcionamiento.

#### 11.15.5. CALIBRACIÓN DE MEDIDORES

Todos los equipos de medición empleados en las fuentes de extracción de agua superficial o subterránea para abastecimiento y distribución a una red de agua potable, deben estar calibrados antes de su instalación, para garantizar una buena medición del volumen de agua que se produce o se consume por los usuarios, respectivamente. Para ello, se debe exigir al proveedor de los equipos que cuando entregue cada uno de estos aparatos se anexe la curva de calibración de comportamiento de acuerdo al modelo y tipo del medidor seleccionado, para que el personal del organismo operador conozca el funcionamiento típico del equipo, el cual será la referencia para las lecturas obtenidas en el tiempo de operación determinado; cada 12 o cada 24 horas en fuentes de extracción y cada 20 o 45 días en consumos domiciliarios de acuerdo al periodo de corte del organismo operador.

Es importante resaltar que cada proveedor obtiene una certificación del tipo y modelo del medidor para poder comercializarlo en nuestro país, por lo consiguiente, esa certificación es con base en una verificación en un laboratorio de pruebas acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), Ilustración 11.26. En este sentido, el laboratorio de pruebas acreditado emite un informe de todas las pruebas realiza-

das al modelo y tipo de medidor con base en la NOM-012-SCFI-1994, del cual el usuario puede y debe solicitar una copia del informe para su análisis y conocimiento del funcionamiento del medidor; en particular, de la curva de comportamiento real que se obtuvo durante su verificación en el laboratorio de pruebas ( $q_{min}$ ,  $q_{max}$  y  $q_t$ ) y conocer el porcentaje de error de medición que tiene el medidor al registrar los gastos antes mencionados, previo a obtener la certificación, aprobación y autorización del modelo y tipo del medidor del que se trate a cargo de la Secretaría de Economía.

Ilustración 11.26 Banco de pruebas de medidores del IMTA



Por lo anterior, se recomienda a todos los usuarios de equipos de medición que exijan la calibración de los aparatos seleccionados, tomando como referencia la definición de la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización (LFMN) en su Artículo 3° fracción II que a la letra dice:

*Calibración: es el conjunto de operaciones que tiene por finalidad determinar los errores de un instrumento para medir y de ser necesario, otras características metrológicas.* (Ley Federal Sobre

Metrología y Normalización, Artículo 3° fracc. II, Secretaría de Economía).

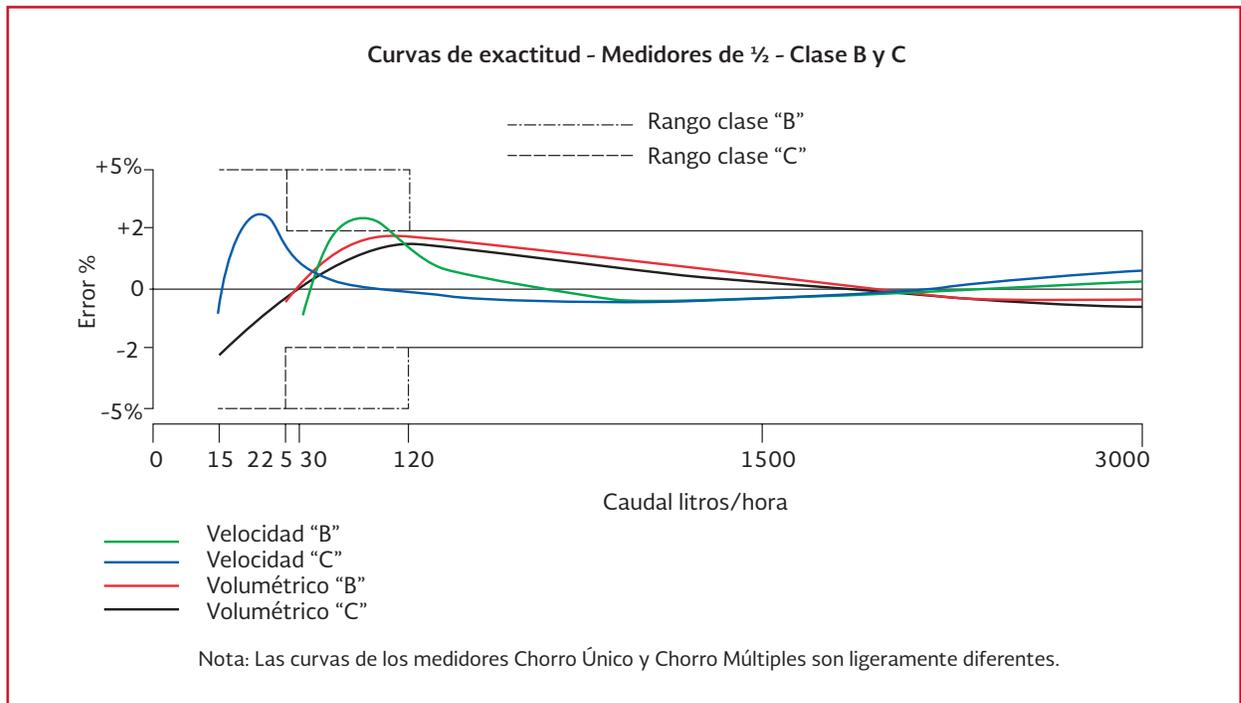
Así como también la curva de comportamiento con base en las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCFI-1994 “Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos-Medidores para agua potable fría-Especificaciones”, cuyo objetivo “Establece la terminología, las características técnicas, las características metrológicas y la pérdida de presión de medidores para agua potable fría”. Ilustración 11.27.

Es muy importante conocer la calibración de un medidor, porque de esta manera observamos en la curva de comportamiento cual es el porcentaje de error que tiene el equipo y si está funcionando dentro de los parámetros permitidos en la NOM-012-SCFI-1994, los cuales son para el campo inferior  $q_{min}$  de  $\pm 5$  por ciento y para el campo superior  $q_t$  y  $q_{max}$  de  $\pm 2$  por ciento, ver Ilustración 11.27.

Asimismo, también podemos conocer la exactitud en el comportamiento de acuerdo a la sensibilidad del medidor para detectar el paso del agua a un flujo muy pequeño, esta característica es la que permite corroborar la clase metrológica del medidor (Clase “A”; Clase “B” o Clase “C”) y donde podemos observar por qué seleccionar el tipo de medidor (velocidad o volumétrico) y la clase que más se apegue a las necesidades que se tengan en el organismo operador, ver Ilustración 11.27.

Por otro lado, como no es muy común que los organismos operadores cuenten con una banco de pruebas acreditado ante la EMA con el cual puedan llevar a cabo la calibración de los medidores, se recomienda que puedan instru-

Ilustración 11.27 Curva de comportamiento típico de un medidor de agua



mentar un procedimiento con un recipiente aforado con base en la NOM-042-SCFI-1997 "Instrumentos de medición - medidas volumétricas metálicas con cuello graduado para líquidos con capacidades de 5 l, 10 l y 20 l", para poder realizar la calibración de un medidor mediante el aforo volumétrico y obtener la curva de comportamiento con pruebas de campo y conocer el funcionamiento del medidor con respecto al volumen que registra durante el periodo de consumo por parte del usuario. Ilustración 11.28.

Ilustración 11.28 Proceso de prueba con la medida volumétrica captando el volumen que pasa por el medidor





## CONCLUSIONES DEL LIBRO

Este libro conjunta las técnicas medición de las variables de flujo, caudal, presión y nivel, denominada macromedición, para fines de producción, operación, control de pérdidas y otros fines, con las de medición de consumos denominada micromedición, para fines del cobro de derechos por los servicios prestados, parte del sistema comercial de los organismos operadores de agua potable.

Se establecen los objetivos generales de la macro y micro medición, y se describen los conceptos básicos de instrumentación y metrología de flujo, necesarios para el personal a cargo de estos sistemas de medición. Así por ejemplo los conceptos de elemento primario y elemento secundario, calibración, sensibilidad, rango, y otros, de suma importancia para poder seleccionar correctamente el medidor adecuado a cada punto de medición requerido.

En cuanto a la macromedición se presenta la clasificación general de medidores y sistemas de medición de caudal, tanto en conductos a presión como en flujo a superficie libre. Se presenta asimismo la sub división de ambos casos, y se describen los criterios para la selección, instalación, operación, mantenimiento y verificación, con el fin de disponer en todo momento con los sistemas de medición cumpliendo su cometido de generar información para los fines mencionados.

Se describen los sistemas de medición de consumos y sus beneficios, como es el ahorro del agua que se consume y la reducción de desperdicios, equilibrio de presiones en la red de distribución para mayor certidumbre del control operacional, mejor administración del abastecimiento, su planeación y operación, balance de agua junto con la macromedición, cobro justo conforme al volumen consumido, etcétera.

Se presentan también los sistemas de información para la macromedición y la micromedición, y se aclara que es imprescindible contar con ellos antes que los aparatos de medición. Esta necesidad se ve muy clara en la micromedición, pues no tendría sentido tomar lecturas sin contar con un sistema informático, por sencillo que fuera, en el cual descargar y procesar la información para emitir facturas, cobrar, y administrar los procesos de medición,

facturación y cobranza. Igual se necesita antes el sistema de información para la macromedición.

Se hace hincapié en que la “macromedición” y la “micromedición” no son sólo los aparatos, sino que son sistemas que además implican una organización con personal para su operación y mantenimiento, pues instalar aparatos sin el personal capacitado, espacios, vehículos, sistemas de información, y otros recursos, para realizar las funciones de medición, registro, procesamiento y divulgación de la información, no producirá los resultados deseados.

Este libro presenta las tecnologías modernas de macro y micro medición, incluyendo medidores domiciliarios de tipo ultrasónico y electromagnético. Incluye también en este sentido un capítulo de telemetría, pues la modernización y automatización ha mostrado que redundan en mayores eficiencias globales en los organismos operadores.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alcocer-Yamanaka, V. H. (2007). *Flujo estocástico y transporte en redes de distribución de agua potable*. Tesis de Doctorado. México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Alegre, H., et. al. (2003), “Performance indicators for water supply services”, second edition, Efficient operation and management of urban water system specialist group, International Water association.
- Bonola, I. et. al. (2011), “Comportamiento de medidores ante flujo de agua con sedimentos: Diseño experimental y pruebas”. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Constructora e Impulsora Tollocan. Revista Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México/abril-junio 2011. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Chambouleyron, A. “Optimal Water Metering and Pricing”, *Water Resources Management* 18: 305–319, 2004, © 2004 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- Hueb, J. Augusto; Gonzaga, César Filho; Ávila, F. Javier, 1985, “Macromedición”, Manual DTIAPA No. 9 CEPIS, Lima.
- Jean-François DULHOSTE, “Medición de presión”, Escuela de Ingeniería Mecánica ULA (Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela).
- Lambert, A. O. (2002), “International Report: Water losses management and techniques”, *Water Science and Technology: Water Supply* Vol. 2 No. 4 pp 1-20, UK.
- López-Antón, D. y Gala-Trallero, S.; 2012; “Red inalámbrica para instrumentación de procesos”. Proyecto Final de Carrera. Universitat Politècnica de Catalunya.
- López, R. et. al. (2014), “La Micro Medición del Agua como Instrumento de Gobernabilidad a Largo Plazo para Grandes Núcleos Urbanos”. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México, Octubre 2014.
- Martínez. P. et al; 2004; “DISEÑO POR COMPUTADORA DE AFORADORES DE GARGANTA LARGA”; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Otaki, Y. et. al., “Residential water demand analysis by household activities”, *The University of Tokyo, Graduate School of Interdisciplinary Information Studies*, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan (Yurina@iii.u-tokyo.ac.jp).
- Tamari, Serge; 2008; “Introducción al uso de equipos acústicos basados en el efecto doppler para aforar en canales”; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Zuñiga-López, V.; 2005; “Redes de Transmisión de datos”. Monografía. Universidad Autónoma de Estado de Hidalgo.
- International Standard ISO 8363-1986 “Liquid flow measurement in open channels—General guidelines for the selection of methods”



# TABLA DE CONVERSIONES DE UNIDADES DE MEDIDA

Sigla	Significado	Sigla	Significado
mg	miligramo	kg/m <sup>3</sup>	kilogramo por metro cúbico
g	gramo	l/s	litros por segundo
kg	kilogramo	m <sup>3</sup> /d	metros cúbicos por día
mm	milímetro	Sm <sup>3</sup> /h	condiciones estándar de metro cúbico por hora
cm	centímetro	Scfm	condiciones estándar de pies cúbicos por minuto
m	metro	°C	grados Celsius
ml	mililitro	psia	libra-fuerza por pulgada cuadrada absoluta
l	litro	cm/s	centímetro por segundo
m <sup>3</sup>	metro cúbico	m/s	metro por segundo
s	segundo	HP	caballo de fuerza (medida de energía)
h	hora	kW	kilowatt
d	día	UNT	unidades nefelométricas de turbiedad
mg/l	miligramo por litro		

## Longitud

Sistema métrico	Sistema Inglés	Siglas
1 milímetro (mm)	0.03	in
1 centímetro (cm) = 10 mm	0.39	in
1 metro (m) = 100 cm	1.09	yd
1 kilómetro (km) = 1 000 m	0.62	mi
<b>Sistema Inglés</b>	<b>Sistema métrico</b>	
1 pulgada (in)	2.54	cm
1 pie (ft) = 12 pulgadas	0.30	m
1 yarda (yd) = 3 pies	0.91	m
1 milla (mi) = 1 760 yardas	1.60	km
1 milla náutica (nmi) = 2 025.4 yardas	1.85	km

## Superficie

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm <sup>2</sup> = 100 mm <sup>2</sup>	0.15	in <sup>2</sup>
1 m <sup>2</sup> = 10 000 cm <sup>2</sup>	1.19	yd <sup>2</sup>
1 hectárea (ha) = 10 000 m <sup>2</sup>	2.47	acres
1 km <sup>2</sup> = 100 ha	0.38	mi <sup>2</sup>
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in <sup>2</sup>	6.45	cm <sup>2</sup>
1 ft <sup>2</sup> = 144 in <sup>2</sup>	0.09	m <sup>2</sup>
1 yd <sup>2</sup> = 9 ft <sup>2</sup>	0.83	m <sup>2</sup>
1 acre = 4 840 yd <sup>2</sup>	4 046.90	m <sup>2</sup>
1 milla <sup>2</sup> = 640 acres	2.59	km <sup>2</sup>

## Volumen/capacidad

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm <sup>3</sup>	0.06	in <sup>3</sup>
1 dm <sup>3</sup> = 1 000 cm <sup>3</sup>	0.03	ft <sup>3</sup>
1 m <sup>3</sup> = 1 000 dm <sup>3</sup>	1.30	yd <sup>3</sup>
1 litro (L) = 1 dm <sup>3</sup>	1.76	pintas
1 hectolitro (hL) = 100 L	21.99	galones
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in <sup>3</sup>	16.38	cm <sup>3</sup>
1 ft <sup>3</sup> = 1 728 in <sup>3</sup>	0.02	m <sup>3</sup>
1 onza fluida EUA = 1.0408 onzas fluidas RU	29.57	mL
1 pinta (16 onzas fluidas) = 0.8327 pintas RU	0.47	L
1 galón EUA = 0.8327 galones RU	3.78	L

## Masa/peso

Sistema métrico	Sistema inglés	
1 miligramo (mg)	0.0154	grano
1 gramo (g) = 1 000 mg	0.0353	onza
1 kilogramo (kg) = 1 000 g	2.2046	libras
1 tonelada (t) = 1000 kg	0.9842	toneladas larga
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 onza (oz) = 437.5 granos	28.35	g
1 libra (lb) = 16 oz	0.4536	kg
1 stone = 14 lb	6.3503	kg
1 hundredweight (cwt) = 112 lb	50.802	kg
1 tonelada larga = 20 cwt	1.016	t

## Temperatura

$$^{\circ}C = \frac{5}{9}(^{\circ}F - 32)$$

$$^{\circ}F = \frac{9}{5}(^{\circ}C) + 32$$

Otros sistemas de unidades		Multiplicado por	Sistema Internacional de Unidades (SI)	
Unidad	Símbolo	Factor de conversión	Se convierte a	
<b>Longitud</b>				
Pie	pie, ft.,'	0.30	metro	m
Pulgada	plg, in,"	25.40	milímetro	mm
<b>Presión/esfuerzo</b>				
Kilogramo fuerza/cm <sup>2</sup>	kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	98 066.50	pascal	Pa
Libra/pulgada <sup>2</sup>	lb/ plg <sup>2</sup> , PSI	6 894.76	pascal	Pa
atmósfera técnica	at	98 066.50	pascal	Pa
metro de agua	m H <sub>2</sub> O (mca)	9 806.65	pascal	Pa
mm de mercurio	mm Hg	133.32	pascal	Pa
bar	bar	100 000.00	pascal	Pa
<b>Fuerza/ peso</b>				
kilogramo fuerza	kg <sub>f</sub>	9.80	newton	N
<b>Masa</b>				
libra	lb	0.45	kilogramo	kg
onza	oz	28.30	gramo	g
<b>Peso volumétrico</b>				
kilogramo fuerza/m <sup>3</sup>	kg <sub>f</sub> /m <sup>3</sup>	9.80	N/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>
libra /ft <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>	157.08	N/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>
<b>Potencia</b>				
caballo de potencia	CP, HP	745.69	watt	W
caballo de vapor	CV	735.00	watt	W
<b>Viscosidad dinámica</b>				
poise	μ	0.01	pascal segundo	Pa s
<b>Viscosidad cinemática</b>				
viscosidad cinemática	v	1	stoke	m <sup>2</sup> /s (St)
<b>Energía/ Cantidad de calor</b>				
caloría	cal	4.18	joule	J
unidad térmica británica	BTU	1 055.06	joule	J
<b>Temperatura</b>				
grado Celsius	°C	tk=tc + 273.15	grado Kelvin	K

Nota: El valor de la aceleración de la gravedad aceptado internacionalmente es de 9.80665 m/s<sup>2</sup>

Longitud								
de / a	mm	cm	m	km	mi	milla náutica (nmi)	ft	in
mm	1.000	0.100	0.001					
cm	10000	1.000	0.010				0.033	0.394
m	1 000.000	100.000	1.000	0.001			3.281	39.370
km			0.001	1.000	0.621	0.540	3 280.83	0.039
mi			1 609.347	1.609	1.000	0.869	5 280.000	
nmi			1 852.000	1.852	1.151	1.000	6 076.115	
ft		30.480	0.305				1.000	12.000
in	25.400	2.540	0.025				0.083	1.000

Superficie								
de / a	cm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	ha	mi <sup>2</sup>	acre	ft <sup>2</sup>	in <sup>2</sup>
cm <sup>2</sup>	1.00						0.001	0.155
m <sup>2</sup>	10 000.00	1.00					10.764	1 550.003
km <sup>2</sup>			1.000	100.000	0.386	247.097		
ha		10 000.00	0.010	1.000	0.004	2.471		
mi <sup>2</sup>			2.590	259.000	1.000	640.000		
acre		4 047.00	0.004	0.405	0.002	1.000		
ft <sup>2</sup>	929.03	0.09					1.000	0.007
in <sup>2</sup>	6.45						144.000	1.000

Volumen								
de / a	cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	L	ft <sup>3</sup>	gal. EUA	acre-ft	in <sup>3</sup>	yd <sup>3</sup>
cm <sup>3</sup>	1.000		0.001				0.061	
m <sup>3</sup>		1.000	1 000.000	35.314	264.200			1.307
L	1 000.000	0.001	1.000	0.035	0.264		61.023	
ft <sup>3</sup>		0.028	28.317	1.000	7.481			0.037
gal. EUA		0.004	3.785	0.134	1.000		230.974	
acre-ft		1 233.490				1.000		
in <sup>3</sup>	16.387		0.016		0.004		1.000	
Yd <sup>3</sup>		0.765		27.000				1.000

Gasto								
de / a	l/s	cm <sup>3</sup> /s	gal/día	gal/min	l/min	m <sup>3</sup> /día	m <sup>3</sup> /h	ft <sup>3</sup> /s
l/s	1.000	1 000.000		15.851	60.000	86.400	3.600	0.035
cm <sup>3</sup> /s	0.001	1.000	22.825	0.016	0.060	0.083		
gal/día		0.044	1.000			0.004		
gal/min	0.063	63.089	1 440.000	1.000	0.000	5.451	0.227	0.002
l/min	0.017	16.667	0.000	0.264	1.000	1.440	0.060	
m <sup>3</sup> /día	0.012	11.570	264.550	0.183	0.694	1.000	0.042	
m <sup>3</sup> /h	0.278		6 340.152	4.403	16.667	24.000	1.000	0.010
ft <sup>3</sup> /s	28.316			448.831	1 698.960	2 446.590	101.941	1.000

Eficiencia de pozo			
de	a	gal/min/pie	l/s/m
gal/min/pie		1.000	0.206
l/s/m		4.840	1.000

Permeabilidad							
de	a	cm/s	gal/día/Pie <sup>2</sup>	millones gal/día/acre	m/día	pie/s	Darcy
cm/s		1.000	21 204.78		864.000	0.033	
gal/día/pie <sup>2</sup>			1.000		0.041		0.055
millón gal/día/acre				1.000	0.935		
m/día		0.001	24.543	1.069	1.000		1.351
pie/s		30.480			26 334.72	1.000	
Darcy			18.200		0.740		1.000

Peso									
de	a	grano	gramo	kilogramo	libra	onza	tonelada corta	tonelada larga	tonelada métrica
Grano (gr)		1.000	0.065						
Gramo (g)		15.432	1.000	0.001	0.002				
Kilogramo (kg)			1 000.000	1.000	2.205	35.273			0.001
Libra (lb)			453.592	0.454	1.000	16.000			
Onza (oz)		437.500	28.350			1.000			
t corta				907.180	2 000.000		1.000		0.907
t larga				1 016.000	2 240.000		1.119	1.000	1.016
t métrica				1 000.000	2 205.000		1.101	0.986	1.000

Potencia									
de	a	CV	HP	kW	W	ft lb/s	kg m/s	BTU/s	kcal/s
CV		1.000	0.986	0.736	735.500	542.500	75.000	0.697	0.176
HP		1.014	1.000	0.746	745.700	550.000	76.040	0.706	0.178
kW		1.360	1.341	1.000	1 000.000	737.600	101.980	0.948	0.239
W				0.001	1.000	0.738	0.102		
ft lb/s					1.356	1.000	0.138	0.001	
kg m/s		0.013	0.013	0.009	9.806	7.233	1.000	0.009	0.002
BTU/s		1.434	1.415	1.055	1 055.000	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal/s		5.692	5.614	4.186	4 186.000	3 088.000	426.900	3.968	1.000

Presión								
de	a	atmósfera	Kg/cm <sup>2</sup>	lb/in <sup>2</sup>	mm de Hg	in de Hg	m de H <sub>2</sub> O	ft de H <sub>2</sub> O
atmósfera		1.000	1.033	14.696	760.000	29.921	10.330	33.899
kg/cm <sup>2</sup>		0.968	1.000	14.220	735.560	28.970	10.000	32.810
lb/in <sup>2</sup>		0.068	0.070	1.000	51.816	2.036	0.710	2.307
mm de Hg		0.001	0.001	0.019	1.000	0.039	0.013	0.044
in de Hg		0.033	0.035	0.491	25.400	1.000	0.345	1.133
m de agua		0.096	0.100	1.422	73.560	2.896	1.000	3.281
ft de agua		0.029	0.030	0.433	22.430	0.883	0.304	1.000

Energía									
de	a	CV hora	HP hora	kW hora	J	ft.lb	kgm	BTU	kcal
CV hora		1.000	0.986	0.736				2 510.000	632.500
HP hora		1.014	1.000	0.746				2 545.000	641.200
kW hora		1.360	1.341	1.000				3 413.000	860.000
J					1.000	0.738	0.102		
ft.lb					1.356	1.000	0.138		
kgm					9.806	7.233	1.000		
BTU					1 054.900	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal					4 186.000	3 087.000	426.900	426.900	1.000

Transmisividad				
de	a	cm <sup>2</sup> /s	gal/día/pie	m <sup>2</sup> /día
cm <sup>2</sup> /s		1.000	695.694	8.640
gal/día/ft		0.001	1.000	0.012
m <sup>2</sup> /día		0.116	80.520	1.000

Conversión de pies y pulgadas, a metros												
ft, in/m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.000	0.025	0.051	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.279
1	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584
2	0.610	0.635	0.660	0.686	0.711	0.737	0.762	0.787	0.813	0.838	0.864	0.889
3	0.914	0.940	0.965	0.991	1.016	1.041	1.067	1.092	1.176	1.143	1.168	1.194
4	1.219	1.245	1.270	1.295	1.321	1.346	1.372	1.397	1.422	1.448	1.473	1.499
5	1.524	1.549	1.575	1.600	1.626	1.651	1.676	1.702	1.727	1.753	1.778	1.803
6	1.829	1.854	1.880	1.905	1.930	1.956	1.981	2.007	2.032	2.057	2.083	2.108
7	2.134	2.159	2.184	2.210	2.235	2.261	2.286	2.311	2.337	2.362	2.388	2.413
8	2.438	2.464	2.489	2.515	2.540	2.565	2.591	2.616	2.642	2.667	2.692	2.718
9	2.743	2.769	2.794	2.819	2.845	2.870	2.896	2.921	2.946	2.972	2.997	3.023
10	3.048	3.073	3.099	3.124	3.150	3.175	3.200	3.226	3.251	3.277	3.302	3.327
11	3.353	3.378	3.404	3.429	3.454	3.480	3.505	3.531	3.556	3.581	3.607	3.632
12	3.658	3.683	3.708	3.734	3.759	3.785	3.810	3.835	3.861	3.886	3.912	3.937
13	3.962	3.988	4.013	4.039	4.064	4.089	4.115	4.140	4.166	4.191	4.216	4.242
14	4.267	4.293	4.318	4.343	4.369	4.394	4.420	4.445	4.470	4.496	4.521	4.547
15	4.572	4.597	4.623	4.648	4.674	4.699	4.724	4.750	4.775	4.801	4.826	4.851
16	4.877	4.902	4.928	4.953	4.978	5.004	5.029	5.055	5.080	5.105	5.131	5.156
17	5.182	5.207	5.232	5.258	5.283	5.309	5.334	5.359	5.385	5.410	5.436	5.461
18	5.486	5.512	5.537	5.563	5.588	5.613	5.639	5.664	5.690	5.715	5.740	5.766
19	5.791	5.817	5.842	5.867	5.893	5.918	5.944	5.969	5.994	6.020	6.045	6.071
20	6.096	6.121	6.147	6.172	6.198	6.223	6.248	6.274	6.299	6.325	6.350	6.375
21	6.401	6.426	6.452	6.477	6.502	6.528	6.553	6.579	6.604	6.629	6.655	6.680
22	6.706	6.731	6.756	6.782	6.807	6.833	6.858	6.883	6.909	6.934	6.960	6.985
23	7.010	7.036	7.061	7.087	7.112	7.137	7.163	7.188	7.214	7.239	7.264	7.290
24	7.315	7.341	7.366	7.391	7.417	7.442	7.468	7.493	7.518	7.544	7.569	7.595
25	7.620	7.645	7.671	7.696	7.722	7.747	7.772	7.798	7.823	7.849	7.874	7.899
26	7.925	7.950	7.976	8.001	8.026	8.052	8.077	8.103	8.128	8.153	8.179	8.204
27	8.230	8.255	8.280	8.306	8.331	8.357	8.382	8.407	8.433	8.458	8.484	8.509
28	8.534	8.560	8.585	8.611	8.636	8.661	8.687	8.712	8.738	8.763	8.788	8.814
29	8.839	8.865	8.890	8.915	8.941	8.966	8.992	9.017	9.042	9.068	9.093	9.119
30	9.144	9.169	9.195	9.220	9.246	9.271	9.296	9.322	9.347	9.373	9.398	9.423
31	9.449	9.474	9.500	9.525	9.550	9.576	9.601	9.627	9.652	9.677	9.703	9.728
32	9.754	9.779	9.804	9.830	9.855	9.881	9.906	9.931	9.957	9.982	10.008	10.033
33	10.058	10.084	10.109	10.135	10.160	10.185	10.211	10.236	10.262	10.287	10.312	10.338
34	10.363	10.389	10.414	10.439	10.465	10.490	10.516	10.541	10.566	10.592	10.617	10.643
35	10.668	10.693	10.719	10.744	10.770	10.795	10.820	10.846	10.871	10.897	10.922	10.947

La segunda columna es la conversión de pies a metros; las siguientes columnas son la conversión de pulgadas a metros que se suman a la anterior conversión.

Tabla de conversión de pulgadas a milímetros								
Pulgadas	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
0	0	3.175	6.35	9.525	12.7	15.875	19.05	22.225
1	25.4	28.575	31.75	34.925	38.1	41.275	44.45	47.625
2	50.8	53.975	57.15	60.325	63.5	66.675	69.85	73.025
3	76.2	79.375	82.55	85.725	88.9	92.075	95.25	98.425
4	101.6	104.775	107.95	111.125	114.3	117.475	120.65	123.825
5	127.0	130.175	133.35	136.525	139.7	142.875	146.05	149.225
6	152.4	155.575	158.75	161.925	165.1	168.275	171.45	174.625
7	177.8	180.975	184.15	187.325	190.5	193.675	196.85	200.025
8	203.2	206.375	209.55	212.725	215.9	219.075	222.25	225.425
9	228.6	231.775	234.95	238.125	241.3	244.475	247.65	250.825
10	254.0	257.175	260.35	263.525	266.7	269.875	273.05	276.225
11	279.4	282.575	285.75	288.925	292.1	295.275	298.45	301.625
12	304.8	307.975	311.15	314.325	317.5	320.675	323.85	327.025
13	330.2	333.375	336.55	339.725	342.9	346.075	349.25	352.425
14	355.6	358.775	361.95	365.125	368.3	371.475	374.65	377.825
15	381.0	384.175	387.35	390.525	393.7	396.875	400.05	403.225
16	406.4	409.575	412.75	415.925	419.1	422.275	425.45	428.625
17	431.8	434.975	438.15	441.325	444.5	447.675	450.85	454.025
18	457.2	460.375	463.55	466.725	469.9	473.075	476.25	479.425
19	482.6	485.775	488.95	492.125	495.3	498.475	501.65	504.825
20	508.0	511.175	514.35	517.525	520.7	523.875	527.05	530.225
21	533.4	536.575	539.75	542.925	546.1	549.275	552.45	555.625
22	558.8	561.975	565.15	568.325	571.5	574.675	577.85	581.025
23	584.2	587.375	590.55	593.725	596.9	600.075	603.25	606.425
24	609.6	612.775	615.95	619.125	622.3	625.475	628.65	631.825
25	635.0	638.175	641.35	644.525	647.7	650.875	654.05	657.225
26	660.4	663.575	666.75	669.925	673.1	676.275	679.45	682.625
27	685.8	688.975	692.15	695.325	698.5	701.675	704.85	708.025
28	711.2	714.375	717.55	720.725	723.9	727.075	730.25	733.425
29	736.6	739.775	742.95	746.125	749.3	752.475	755.65	758.825
30	762.0	765.175	768.35	771.525	774.7	777.875	781.05	784.225

Fórmulas generales para la conversión de los diferentes sistemas

Centígrados a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F}=9/5^{\circ}\text{C}+32$
Fahrenheit a Centígrados	$^{\circ}\text{C}=5/9 (^{\circ}\text{F}-32)$
Réaumur a Centígrados	$^{\circ}\text{C}=5/4 ^{\circ}\text{R}$
Fahrenheit a Réaumur	$^{\circ}\text{R}=4/9 (^{\circ}\text{F}-32)$
Réaumur a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F}=(9/4^{\circ}\text{R})+32$
Celsius a Kelvin	$^{\circ}\text{K}=273.15+^{\circ}\text{C}$
Fahrenheit a Rankine	$^{\circ}\text{Ra}=459.67+^{\circ}\text{F}$
Rankine a Kelvin	$^{\circ}\text{K}=5/9^{\circ}\text{Ra}$

Factores químicos de conversión					
	A	B	C	D	E
Constituyentes	epm a ppm	ppm a epm	epm a gpg	gpg a epm	ppm a ppm CaCO <sub>3</sub>
calcio Ca <sup>+2</sup>	20.04	0.04991	1.1719	0.8533	2.4970
hierro Fe <sup>+2</sup>	27.92	0.03582	1.6327	0.6125	1.7923
magnesio Mg <sup>+2</sup>	12.16	0.08224	0.7111	1.4063	4.1151
potasio K <sup>+1</sup>	39.10	0.02558	2.2865	0.4373	1.2798
sodio Na <sup>+1</sup>	23.00	0.04348	1.3450	0.7435	2.1756
bicarbonato (HCO <sub>3</sub> ) <sup>-1</sup>	61.01	0.01639	3.5678	0.2803	0.8202
carbonato (CO <sub>3</sub> ) <sup>-2</sup>	30.00	0.03333	1.7544	0.5700	1.6680
cloro (Cl) <sup>-1</sup>	35.46	0.02820	2.0737	0.4822	1.4112
hidróxido (OH) <sup>-1</sup>	17.07	0.05879	0.9947	1.0053	2.9263
nitrito (NO <sub>2</sub> ) <sup>-1</sup>	62.01	0.01613	3.6263	0.2758	0.8070
fosfato (PO <sub>4</sub> ) <sup>-3</sup>	31.67	0.03158	1.8520	0.5400	1.5800
sulfato (SO <sub>4</sub> ) <sup>-2</sup>	48.04	0.02082	2.8094	0.3559	1.0416
bicarbonato de calcio Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	805.00	0.01234	4.7398	0.2120	0.6174
carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	50.04	0.01998	2.9263	0.3417	1.0000
cloruro de calcio (CaCl <sub>2</sub> )	55.50	0.01802	3.2456	0.3081	0.9016
hidróxido de calcio Ca(OH) <sub>2</sub>	37.05	0.02699	2.1667	0.4615	1.3506
sulfato de calcio (CaSO <sub>4</sub> )	68.07	0.01469	3.9807	0.2512	0.7351
bicarbonato férrico Fe(HCO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	88.93	0.01124	5.2006	0.1923	0.5627
carbonato férrico Fe <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	57.92	0.01727	3.3871	0.2951	0.8640
sulfato férrico Fe <sub>2</sub> (CO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	75.96	0.01316	4.4421	0.2251	0.6588
bicarbonato magnésico Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	73.17	0.01367	4.2789	0.2337	0.6839
carbonato magnésico (MgCO <sub>3</sub> )	42.16	1.02372	2.4655	0.4056	1.1869
cloruro de magnesio (MgCl <sub>2</sub> )	47.62	0.02100	2.7848	0.3591	1.0508
hidróxido de magnesio Mg(OH) <sub>2</sub>	29.17	0.03428	1.7058	0.5862	1.7155
sulfato de magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	60.20	0.01661	3.5202	0.2841	0.6312

epm = equivalentes por millón

ppm = partes por millón

gpg = granos por galón

p.p.m. CaCO<sub>3</sub> = partes por millón de carbonato de calcio



# ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Esquema de monitoreo de variables de flujo en los procesos de abastecimiento.	7
Ilustración 2.1 Elementos activos de un instrumento de medición (Doebelin, 1980)	9
Ilustración 2.2 Cadena de trazabilidad (Metrología Abreviada, 2008)	13
Ilustración 2.3 Patrón Nacional de Flujo Volumétrico de Líquidos (CENAM, 2008)	14
Ilustración 2.4 Ejemplo de respuesta de un instrumento de primer orden a una función escalonada de entrada	17
Ilustración 3.1 Arreglo experimental para evaluación de medidores con flujo de agua con sedimentos	22
Ilustración 4.1 Ejemplo de curva de errores de un medidor clase B, en los campos inferior y superior, con prueba de tres puntos	27
Ilustración 4.2 Protección contra heladas en múltiple de descarga de pozo profundo con medidor de velocidad, en la JMAS Aldama, Chihuahua	28
Ilustración 4.3 Protección contra heladas en múltiple de descarga de pozo profundo con medidor de electromagnético, en la JMAS Juárez, Chihuahua	28
Ilustración 4.4 Medidor volumétrico empleado como medidor patrón para evaluar medidores de consumo	29
Ilustración 4.5 Ejemplo de pérdida de carga ocasionada por los medidores de velocidad	30
Ilustración 4.6 Medidores de turbina tipo Woltman: vertical y horizontal	31
Ilustración 4.7 Medidor de propela con carrete bridado	31
Ilustración 4.8 Consideraciones para una instalación adecuada	32
Ilustración 4.9 Venturi largo	33
Ilustración 4.10 Pérdida de carga para medidores deprimógenos. (Cepis, 1985)	34
Ilustración 4.11 Tubo de Pitot con manómetro diferencial (Tubo U) y líquido manométrico para lectura de carga de velocidad	35
Ilustración 4.12 Equipo portátil de medición de flujo ultrasónico de tiempo en tránsito	36
Ilustración 4.13 Medidor electromagnético de carrete con bridas para instalación permanente	37
Ilustración 4.14 Ejemplo de elemento secundario de medidor ultrasónico	37
Ilustración 4.15 Medidor electromagnético portátil inserción	38
Ilustración 4.16 Elemento secundario o convertidor del medidor electromagnético portátil	38
Ilustración 4.17 Variación de la exactitud de los medidores con la antigüedad (Guibentif, 2006)	40
Ilustración 5.1 Perfiles de la cresta de los vertedores de pared delgada	46
Ilustración 5.2 Ejemplo de vertedor rectangular a base de placa de acero	46
Ilustración 5.3 Esquema de vertedor rectangular	47
Ilustración 5.4 Vertedor triangular	47
Ilustración 5.5 Ejemplo de vertedor triangular	47
Ilustración 5.6 Ejemplo de diseño de Vertedor Sutro	49
Ilustración 5.7 Placas vertedoras puestas en sitio	50
Ilustración 5.8 Inspección dimensional de vertedores	50

Ilustración 5.9 Montaje de vertedores Sutro	51
Ilustración 5.10 Uno de los vertedores en operación	51
Ilustración 5.11 Proceso de Medición en múltiple de descarga con medidor ultrasónico	51
Ilustración 5.12 Escala provisional para medir la carga sobre la cresta de los vertedores	51
Ilustración 5.13 Comparativa entre caudales medidos en vertedor Sutro y medidor ultrasónico instalado en tubería aguas arriba de la descarga en canal	52
Ilustración 5.14 Tipos de vertedores de cresta ancha	53
Ilustración 5.15 Instalación de canaleta Parshall en una planta de tratamiento de aguas residuales	53
Ilustración 5.16 Diseño estandarizado de la canaleta Parshall	54
Ilustración 5.17 Aforador Parshall de 25.4 mm de ancho de garganta	59
Ilustración 5.18 Aforador Parshall de 50.8 mm de ancho de garganta	59
Ilustración 5.19 Aforador Parshall de 76.2 mm de ancho de garganta	59
Ilustración 5.20 Aforador Parshall de 152.4 mm de ancho de garganta	60
Ilustración 5.21 Aforador Parshall de 228.6 mm de ancho de garganta	60
Ilustración 5.22 Aforador Parshall de 0.3048 m hasta 2.4384 m de ancho de garganta	60
Ilustración 5.23 Aforador Parshall de 3.048 m hasta 15.24 m de ancho de garganta	62
Ilustración 5.24 Aforador de garganta larga (Martínez et. al., 2004)	64
Ilustración 6.1 División en franjas de la sección transversal de una corriente	69
Ilustración 6.2 Molinete Gurley Tipo Price No. 622	70
Ilustración 6.3 Variación de la velocidad en la sección transversal y en una vista lateral vertical de la corriente	71
Ilustración 6.4 Izquierda pasarela para aforo, derecha sistema cable canastilla	72
Ilustración 6.5 Corrección por desviación de la vertical	72
Ilustración 6.6 Flotador semisumergido de corcho lastrado	77
Ilustración 6.7 Limnómetro o escala	79
Ilustración 6.8 Limnógrafo convencional, de flotador contrapeso y papel	79
Ilustración 6.9 Pozo Tranquilizador para limnógrafo	80
Ilustración 6.10 Sistemas automáticos de limnógrafo con flotador contrapeso y registrador electrónico	81
Ilustración 6.11 Unidad de sensor de nivel por burbujeo	82
Ilustración 6.12 Sistema de Radar para determinar nivel de superficie libre	83
Ilustración 6.13 Esquema del principio del efecto Doppler	84
Ilustración 6.14 Esquema del funcionamiento de un sensor acústico basado en el efecto Doppler	85
Ilustración 6.15 Orientación de los equipos Doppler móviles	87
Ilustración 6.16 Orientación de los equipos Doppler fijos	88
Ilustración 6.17 Partes de un canal donde los equipos Doppler pueden medir la velocidad del agua	90
Ilustración 6.18 Los equipos Doppler para aforar son equipos que cuentan con múltiples sensores	91
Ilustración 6.19 Equipo de tipo VD y forma de sujetarlo	92
Ilustración 6.20 Perfil vertical de velocidad generado por un PD y forma de recuperar los datos en tiempo real	95
Ilustración 6.21 Formas de aforar con un PD: (a-b) Modo "estacionario" y (c-d) Modo "dinámico"	96
Ilustración 6.22 Algunas formas de controlar la posición de un PD en un canal	100

Ilustración 6.23 Un equipo AD debe calibrarse en sitio	102
Ilustración 6.24 Caseta de protección de ADL, escalerilla y base de concreto de AD	106
Ilustración 6.25 Pantalla de Ms Excel® con datos capturados e inicio de gráfico	106
Ilustración 6.26 Gráfico de datos con la opción de “agregar línea de tendencia”	107
Ilustración 6.27 Ventana de “Formato de línea de tendencia”	107
Ilustración 6.28 Regresión lineal	107
Ilustración 6.29 Ajuste a ecuación logarítmica	108
Ilustración 6.30 Ajuste a ecuación de polinómica de orden 2	108
Ilustración 6.31 Ajuste a ecuación de polinómica de orden 3	109
Ilustración 6.32 Ajuste a ecuación potencial	109
Ilustración 7.1 Referencias y nombres de las medidas de presión	112
Ilustración 7.2 Presión de estancamiento	114
Ilustración 7.3 Manómetro U	115
Ilustración 7.4 Relación esfuerzo – deformación	116
Ilustración 7.5 Tipos de tubo Bourdon	117
Ilustración 7.6 Diafragmas sensores de presión	119
Ilustración 7.7 Fuelles sensores de presión	120
Ilustración 7.8 Esquema del mecanismo Bourdon	121
Ilustración 7.9 Instalación de manómetro tipo Bourdon	121
Ilustración 7.10 Dispositivo y equipos para registrar la presión con celdas	121
Ilustración 7.11 Conexión de tubo Pitot a la línea a presión	121
Ilustración 7.12 Regla limnimétrica	126
Ilustración 7.13 Escalas de nivel	127
Ilustración 7.14 Tubo piezométrico con sensor de nivel	127
Ilustración 7.15 Flotador	128
Ilustración 7.16 Medidor neumático	129
Ilustración 7.17 Medidor de Resistencia Variable	130
Ilustración 7.18 Medidor de Resistencia Variable	130
Ilustración 7.19 Medidor con electrodos	130
Ilustración 7.20 Aspectos de la sonda, cable y electrodo	131
Ilustración 8.1 Fases o procesos del sistema de información	133
Ilustración 8.2 Pozo instrumentado	135
Ilustración 8.3 Adquisición y procesamiento de datos de flujo, presión y nivel de una batería de pozos profundos	136
Ilustración 8.4 Presentación de datos instantáneos, eléctricos y de flujo, en tiempo real de un pozo	136
Ilustración 8.5 Sistema de información de la macromedición	138
Ilustración 9.1 Canal anular de calibración de molinetes del IMTA	140
Ilustración 9.2 Diagrama básico de transmisión de datos por telemetría	141
Ilustración 9.3 Rango de distancias típicas máximas de transmisión de punto a punto	142
Ilustración 9.4 Diagrama de la operación del internet satelital	143

Ilustración 9.5 Diagrama esquemático de las diferentes topologías que se pueden conformar en la transmisión vía radio frecuencia	144
Ilustración 9.6 Sistema de medición y componentes del modem GPRS	145
Ilustración 9.7 Diagrama de la órbita de satélites ( <a href="http://www.inetdaemon.com/tutorials/satellite/orbits">www.inetdaemon.com/tutorials/satellite/orbits</a> )	146
Ilustración 10.1 Sectorización de una red de agua potable por medio del balance hidráulico	150
Ilustración 10.2 Macromedidor tipo propela	152
Ilustración 10.3 Macromedidor tipo turbina	152
Ilustración 10.4 Esquema para la Tabla 10.1 y la Tabla 10.2	153
Ilustración 10.5 Medidor ultrasónico con sensores y registrador externo independientes	155
Ilustración 10.6 Funcionamiento de los sensores de señal	155
Ilustración 10.7 Medidor ultrasónico con sensores y registrador electrónico integrados	155
Ilustración 10.8 Medidor de agua ultrasónico-cuerpo de hierro fundido	156
Ilustración 10.9 Medidor ultrasónico-cuerpo de polímero	156
Ilustración 10.10 Medidor ultrasónico-cuerpo de acero inoxidable	156
Ilustración 10.11 Medidor electromagnético de inserción	158
Ilustración 10.12 Medidores electromagnéticos	158
Ilustración 10.13 Ejemplo de campo magnético para sensar el flujo	159
Ilustración 10.14 Ejemplo de la ubicación actual del sistema de macromedición en la estructura organizacional	160
Ilustración 10.15 Interacción de la planeación y control con los demás subsistemas operacionales	165
Ilustración 11.1 Plan maestro para la macro y micromedición	170
Ilustración 11.2 Medidores de velocidad tipo chorro único	173
Ilustración 11.3 Medidor de velocidad de chorro múltiple	174
Ilustración 11.4 Medidor volumétrico tipo pistón oscilante	175
Ilustración 11.5 Funcionamiento del medidor volumétrico tipo pistón oscilante	176
Ilustración 11.6 Medidores volumétricos de pistón oscilante	176
Ilustración 11.7 Medidor volumétrico disco nutativo-componentes	177
Ilustración 11.8 Medidor volumétrico tipo disco nutativo Medidor electromagnético	177
Ilustración 11.9 Principio de operación del medidor electromagnético	178
Ilustración 11.10 Medidor electromagnético domiciliario	179
Ilustración 11.11 Sistema informático del área comercial	182
Ilustración 11.12 Sistema informático del área comercial para la recepción de lecturas	182
Ilustración 11.13 Procesos operacionales y comerciales y sus pérdidas volumétricas	183
Ilustración 11.14 Cobertura promedio de medición de consumos (PIGOO, 2015)	186
Ilustración 11.15 Medidores ultrasónicos domiciliarios	193
Ilustración 11.16 Medidores ultrasónicos domiciliarios	193
Ilustración 11.17 Investigación de la variación de consumos en tomas domiciliarias existentes (Alcocer-yamanaka, 2007)	195
Ilustración 11.18 Gráfica de investigación de consumos con características estocásticas de la demanda (Alcocer-yamanaka, 2007)	195
Ilustración 11.19 Instalación de medidor en registro de banqueta	198

Ilustración 11.20 Toma domiciliaria, ramal y cuadro	199
Ilustración 11.21 Esquema de prueba de toma domiciliaria. (NOM-001-CONAGUA-2011)	200
Ilustración 11.22 Terminal remota ( <i>hand held</i> ) para toma y registro de lecturas de consumo en medidores	202
Ilustración 11.23 Ejemplo de proceso de toma de lectura con <i>hand held</i>	202
Ilustración 11.24 Otro tipo de <i>hand held</i> con impresora	203
Ilustración 11.25 Ejemplo de sectores comerciales	204
Ilustración 11.26 Banco de pruebas de medidores del IMTA	206
Ilustración 11.27 Curva de comportamiento típico de un medidor de agua	207
Ilustración 11.28 Proceso de prueba con la medida volumétrica captando el volumen que pasa por el medidor	207



# TABLAS

Tabla 1.1 Medidores para agua con conexiones roscadas de entrada y salida. Designación, tamaño y dimensiones	2
Tabla 1.2 Medidores para agua con bridas de entrada y salida Designación, tamaño y dimensiones	3
Tabla 3.1 Clasificación general de principales equipos y sistemas para medir flujo de agua a presión y a superficie libre	20
Tabla 3.2 Características de medidores para flujo a presión (Miller, 1989)	21
Tabla 3.3 Características de métodos de medición de flujo en canales	23
Tabla 4.1 Clasificación de los medidores de acuerdo a los valores de $q_{min}$ y $q_t$	25
Tabla 4.2 Gasto mínimo ( $q_{min}$ ), gasto de transición ( $q_t$ ), gasto permanente ( $q_p$ ) y gasto de sobrecarga ( $q_s$ ) para medidores Clase B y Clase C, de 1.5 m <sup>3</sup> /h	26
Tabla 4.3 Agrupación de factores y características para la selección de medidores de flujo	39
Tabla 5.1 Coordenadas de parte curva del Sutro	49
Tabla 5.2 Escala-gastos de parte curva del Sutro	50
Tabla 5.3 Dimensiones del aforador Parshall en función del ancho de garganta W, (Pedroza, 2001)	57
Tabla 5.4 Valores de Cp y n de la Ecuación 5.8 para diferentes anchos de garganta (W), Pedroza G. (2001)	58
Tabla 5.5 Factor de multiplicación del gasto del gasto de corrección en función del ancho de garganta	58
Tabla 6.1 Separación de sondeo en función del ancho de la corriente	68
Tabla 6.2 Factor de corrección en función del ángulo	73
Tabla 6.3 Formato de registro de aforo con molinete	75
Tabla 6.4 Clasificación de los equipos acústicos basados en el efecto Doppler que se usan para aforar en canales	85
Tabla 6.5 Comparación entre la tecnología VD y el aforo con molinete desde una varilla	92
Tabla 6.6 Comparación entre la tecnología PD y el aforo con molinete desde un escandallo	97
Tabla 6.7 Comparación entre la tecnología ADL y la tecnología ATT (Aforador de Tiempo de Travesía)	103
Tabla 6.8 Datos escala gasto de aforos en el río Suchiapa, Chiapas	106
Tabla 7.1 Conversión de unidades de presión	113
Tabla 7.2 Ventajas y desventajas del agua y del mercurio	116
Tabla 7.3 Ventajas y desventajas de un Transductor resistivo	122
Tabla 7.4 Ventajas y desventajas de Transductor extensométrico	122
Tabla 7.5 Ventajas y desventajas del transductor magnético	123
Tabla 7.6 Ventajas y desventajas del transductor capacitivo	123
Tabla 7.7 Ventajas y desventajas del transductor piezométrico	124
Tabla 9.1 Protocolos de comunicación y frecuencias utilizadas	142
Tabla 9.2 Resumen de los tipos de órbitas, distancias y tiempo de línea de vista	146
Tabla 10.1 Dimensiones y pesos	153
Tabla 10.2 Datos de Operación	153

Tabla 10.3 Determinación de personal necesario para el sistema de macromedición, según las actividades indicadas y las cantidades estimadas a realizar mensualmente, y el perfil requerido	164
Tabla 10.4 Formato para la determinación del volumen mensual y anual captado en el sistema	167
Tabla 11.1 Elementos para la elaboración de planes y políticas, y ejecución de acciones de los grandes núcleos urbanos (López, R. et al, 2014)	188
Tabla 11.2 Clasificación de los medidores de acuerdo a los valores de $q_{mín}$ y $q_t$	193
Tabla 11.3 Clasificación de los medidores de acuerdo a los valores de $q_{mín}$ y $q_t$	194

