

Medición de flujo volumétrico en presas, canales y pozos. Primera edición digital



Edmundo Pedroza González, Cecia Millán Barrera, Víctor Manuel Arroyo Correa,
Víctor Guillermo Mejía Astudillo, Julio Sergio Santana y Ariosto Aguilar Chávez



Editor

Edmundo Pedroza González

Medición de flujo
volumétrico en presas,
canales y pozos

Primera edición digital

IMTA

México, 2016

551.4830287 Pedroza González, Edmundo
P54 Medición de flujo volumétrico empresas, canales y pozos, 1ª. Ed. digital /
Edmundo Pedroza González -- Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del
Agua, 2016.
184 p.
ISBN digital: 978-607-9368-61-6
1. Mediciones hidráulicas 2. Medición de caudales 3. Presas 4. Pozos 5. Centrales
hidroeléctricas 6. Telemetría

Coordinación editorial
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Colección: "Divulgación"

Diseño editorial y coordinación de edición:
Gema Alín Martínez Ocampo

Maquetación:
Muu'k Studio de Diseño y portada

Primera edición digital: Diciembre, 2016

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos
México

www.imta.gob.mx

ISBN digital: 978-607-9368-61-6

Prohibida su reproducción parcial o total, por cualquier medio, mecánico, electrónico, de
fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los editores.

Impreso en México – Printed in Mexico

Índice

Introducción	I
I. El Círculo de la Medición Efectiva (CIME)	3
<i>Edmundo Pedroza González</i>	
1.1. Introducción	3
1.2. ¿Cuándo se aplica el CIME?	4
1.2.1 El CIME en los proyectos	4
1.2.2 El CIME como herramienta de evaluación	4
1.3. Explicación de la propuesta del CIME	4
1.4. Identificación de las necesidades de administración del recurso	5
1.5. Requerimientos de medición	5
1.6. Análisis de la problemática relacionada	6
1.7. Selección del medidor o sistema de medición y especificaciones de colocación	6
1.8. Suministro, colocación y puesta en operación	7
1.9. Recopilación y análisis de información	8
1.10. Satisfacción de las necesidades y requerimientos de medición	8
1.11. Funcionamiento continuo del CIME	8
1.11.1 Cambios en las necesidades de administración del recurso	8
1.11.2 Conclusión de la vida útil de los medidores	9
1.11.3 Mantenimiento periódico y reparaciones	9
1.12. Herramientas para aplicación del CIME	9
1.12.1 Encuesta	9
1.12.2 Evaluación cualitativa y cuantitativa con aplicación a caso de estudio	11
1.12.3 Representación gráfica del CIME con el caso en estudio y resumen de la calificación.	14
1.13. Caso de estudio: La medición de las extracciones en la presa Lázaro Cárdenas “El Palmito”	14
1.13.1 Representación gráfica del CIME con el caso en estudio.	17
2. Medición en Centrales Hidroeléctricas	19
<i>Cecia Millán Barrera</i>	
2.1. Introducción	19
2.2. Energía hidroeléctrica, una de las renovables más desarrollada	20
2.3. Identificación de las necesidades y requerimientos de medición en centrales hidroeléctricas	22
2.4. Requerimientos de medición en el sector hidroeléctrico	25
2.5. Incertidumbre y requisitos de la medición	27
2.6. Métodos de medición directa	28
2.6.1 Método área-velocidad por medio de molinetes	28

2.6.2	Requisitos generales y calibración	30
2.6.3	Uso en estructuras/obras de toma corta	31
2.6.4	Método área-velocidad por medio de molinetes en canales abiertos	31
2.6.5	Método presión-tiempo	35
2.7.	Análisis de la problemática	44
2.7.1	Aplicación de la modelación numérica para determinar la ubicación del sistema de medición	45
2.8.	Conclusiones	53
2.9.	Selección de los sistemas de medición y especificaciones de colocación	54
2.10.	Suministro, instalación y puesta en operación de sistemas de medición de tipo ultrasónico en centrales hidroeléctricas	55
2.10.1	Suministro de elementos del sistema de medición	55
2.10.2	Instalación del sistema de medición	55
2.11.	Recopilación y análisis de información	90
2.11.1	Análisis de Información de la prueba de funcionamiento del equipo	90
2.11.2	Monitoreo de las variables del sistema de monitoreo local	93
2.12.	Satisfacción de las necesidades y requerimientos de medición centrales hidroeléctricas	93
2.13.	Obsolescencia, término de vida útil, mantenimiento e incumplimiento de objetivos de los sistemas de medición en centrales hidroeléctricas	94
	Referencias	95
3.	Medición en presas de almacenamiento	97
	<i>Víctor Manuel Arroyo Correa</i>	
	<i>Víctor Guillermo Mejía Astudillo</i>	
3.1.	Introducción	97
3.2.	Identificación de las necesidades y requerimientos de la medición en presas	99
3.3.	Mayor oportunidad en la recepción, análisis y respaldo de los datos	100
3.4.	Análisis de la problemática de la medición en presas	100
3.4.1	Obra de toma con conducto a presión sin acceso al exterior del tubo	104
3.4.2	Obra de toma con conducto a presión y acceso al exterior del tubo	105
3.4.3	Obra de toma con conducto abierto	106
3.5.	Selección de los sistemas de medición y sitios de colocación en presas	107
3.5.1	Tecnología <i>doppler</i> y tecnología tiempo en tránsito	111
3.5.2	Medidores ultrasónicos para conductos presurizados	113
3.5.3	Medidores ultrasónicos para conductos abiertos	114
3.5.4	Clasificación de arreglos para sensores ultrasónicos en conductos a presión y a superficie libre	116
3.6.	Suministro, colocación y puesta en operación de sistemas de medición en presas	118
3.7.	Recopilación y análisis de información de la medición en presas	119
3.8.	Casos de aplicación de un sistema de medición en presas de almacenamiento.	122
	Referencias	131

4. Introducción a la Metrología en el Contexto de la Medición de Agua	133
<i>Julio Sergio Santana</i>	
4.1. Introducción	133
4.2. Resultado de una medición	136
4.3. Incertidumbre en la medición	141
4.3.1 Fuentes de incertidumbre	142
4.3.2 Clasificación de las fuentes de incertidumbre	143
4.3.3 Cuantificación de la incertidumbre	144
4.3.4 Composición de las contribuciones a la incertidumbre	151
4.3.5 Evaluación de la incertidumbre particular de cada fuente	152
4.3.6 Determinación de la sensibilidad del mensurando a las magnitudes de entrada	153
4.4. Trazabilidad	156
Referencias	159
5. Medición de volúmenes, selección de una técnica	161
<i>Ariosto Aguilar Chávez</i>	
5.1. Introducción	162
5.2. Alcance	162
5.3. Experiencias previas en la medición de gasto	162
5.4. Secuencia de decisión para la selección del equipo de medición	165
5.4.1 Fuente de abastecimiento subterránea	165
5.4.2 Fuente de abastecimiento superficial	165
5.4.3 Aforador de cambio de régimen de cresta delgada triangular (ISO-1438 2008).	167
5.4.4 Aforador de cambio de régimen de garganta (ISO-4359 2013), (ISO-4362 1999).	167
5.4.5 Aforadores ultrasónicos	167
5.5. Determinación de volumen	167
5.6. Conclusiones	168
Referencias	169

Figuras

Figura 1.1	Esquema del CIME.	5
Figura 1.2	CIME de la medición en la presa El Palmito".	17
Figura 2.1	Esquema de la producción de energía hidroeléctrica.	23
Figura 2.2	Dispositivos para estabilizar el flujo en un canal abierto.	32
Figura 2.3	Barra vertical con correntómetros montada sobre una grúa viajera.	33
Figura 2.4	Determinación de las descargas parciales por integración gráfica de las velocidades locales medidas.	34
Figura 2.5	Determinación de la descarga total por integración gráfica de las descargas parciales obtenidas en Figura 2.4.	34
Figura 2.6	Método diferencial de presión-tiempo.	37
Figura 2.7	Método de diagramas separados.	37
Figura 2.8	Método de Diagramas separados comparando con el nivel de agua.	37
Figura 2.9	Esquema de un "diagrama de tiempo - presión" usando un aparato de Gibson.	43
Figura 2.10	Colector que recibe la presión de 4 tomas. Instrumentación del método de Gibson. Urquiza, G. et al. (2007).	44
Figura 2.11	Perfil de velocidades a lo largo del conducto, el puntero indica la posición 1.	49
Figura 2.12	Perfil de velocidades en la ubicación de la opción 2.	50
Figura 2.13	Iluminación de la obra de conducción.	56
Figura 2.14	Colocación de escalones hacia el sitio de instalación.	57
Figura 2.15	Escaleras de acceso al sitio de trabajo.	57
Figura 2.16	Se establece una referencia en plano y de ahí se parte para determinar el Centro del Sistema.	58
Figura 2.17	Punto de localización del Centro del Sistema.	59
Figura 2.18	Del Centro del sistema se mide una la mitad del diámetro hacia aguas arriba y hacia aguas abajo para ubicar el sitio de colocación de los sensores.	59
Figura 2.19	Piezas de andamio sin armar.	60
Figura 2.20	Armado de andamios.	61
Figura 2.21	Andamio terminado y colocado.	61
Figura 2.22	Ubicación de sensores en la pared del conducto por medio de teodolito.	62
Figura 2.23	Colocación de pernos autosoldables al centro de la base del sensor.	63
Figura 2.24	Sensor colocado en el punto determinado.	63
Figura 2.25	Remoción de recubrimiento epóxico como limpieza previa a la aplicación de material de aporte.	64
Figura 2.26	Limpieza mecánica de los elementos de sujeción.	65
Figura 2.27	Precalentamiento previo a la aplicación de material de aporte para soldar elementos.	65

Figura 2.28	Medición de temperatura adecuada de precalentamiento.	66
Figura 2.29	Aplicación de material de aporte. Soldaduras para fijar elemento circunferencial de sujeción.	66
Figura 2.30	Limpieza mecánica del material base para colocar pernos autosoldables.	67
Figura 2.31	Material base preparado para colocación de pernos autosoldables.	67
Figura 2.32	Colocación de pernos autosoldables.	68
Figura 2.33	Perno colocado.	68
Figura 2.34	Elemento de sujeción fijado con pernos autosoldables.	69
Figura 2.35	Perforación de barrenos para la fijación de elementos de sujeción en concreto.	69
Figura 2.36	Aplicación de anclaje químico para fijar pernos.	70
Figura 2.37	Colocación de pernos.	70
Figura 2.38	Colocación de elemento de sujeción (ángulo) en concreto.	71
Figura 2.39	Limpieza mecánica anterior a la aplicación de protección anticorrosiva.	72
Figura 2.40	Limpieza con desengrasante antes de la aplicación del epóxico.	72
Figura 2.41	Aplicación de la protección anticorrosiva en el anillo colector de cables.	73
Figura 2.42	Protección de los elementos del sistema de sujeción.	73
Figura 2.43	Medición de espesores del recubrimiento en los elementos.	74
Figura 2.44	El espesor mínimo requerido del recubrimiento es de 16 milésimas de pulgada.	74
Figura 2.45	Prueba de adherencia. Rayado de la superficie a probar.	75
Figura 2.46	Después del rayado de la superficie se procede a adherir una cinta especial para esta prueba.	75
Figura 2.47	Resultados de la prueba de adherencia. En este caso, se concluye que la limpieza mecánica y química, el rayado del metal base, la aplicación del producto y tiempo de secado, fueron adecuados.	76
Figura 2.48	Sensor debidamente colocado.	77
Figura 2.49	Ajuste de la alineación del Sensor.	77
Figura 2.50	Incidencia de rayo láser sobre la cara opuesta de un sensor respecto de otro desde el cual se está verificando la alineación.	78
Figura 2.51	Suministro de cable, dependiendo de la longitud hasta la unidad electrónica, en total en una instalación se pueden usar hasta 1200 m.	79
Figura 2.52	Trabajos preliminares al cableado del sistema.	79
Figura 2.53	Desarrollo del trabajo de cableado.	80
Figura 2.54	Conexión del cable de Señal con el cable del Sensor.	80
Figura 2.55	La conexión anterior se sujeta con un dispositivo que evita que los cables se desconecten por acción de su mismo peso o al ser jalados.	81
Figura 2.56	Vista externa de la conexión de sensor-cable de señal.	81
Figura 2.57	Excitación eléctrica del sensor.	82
Figura 2.58	Lectura del voltaje generado por la señal.	82
Figura 2.59	Perforación del orificio en donde se monta el pasacables mencionado.	83
Figura 2.60	Orificio visto desde el interior del conducto	83
Figura 2.61	Orificio visto desde el exterior del conducto.	84

Figura 2.62	Componentes del sistema para sacar el cableado del conducto.	84
Figura 2.63	Vista interna una vez que el dispositivo es colocado.	85
Figura 2.64	Registro colocado al interior del conducto para evitar que el flujo golpee directamente al dispositivo.	85
Figura 2.65	Vista externa del dispositivo armado e instalado correctamente.	86
Figura 2.66	Sistema totalmente instalado en el interior de un conducto a presión.	86
Figura 2.67	Líneas de señales electrónicas conectadas al medidor.	87
Figura 2.68	Perforación en una tubería del sistema de enfriamiento para instalar un termopar para medir la temperatura del agua.	88
Figura 2.69	Termopar tipo J instalado.	88
Figura 2.70	Sensor para medir el nivel del embalse. El sitio en donde se debe instalar estará lo más aislado posible del oleaje y de la acción del viento, para evitar que la estructura se afloje y pierda la horizontalidad.	89
Figura 2.71	Sensor de nivel tipo ultrasónico para determinar la elevación del espejo de agua del embalse.	89
Figura 2.72	Sensor de nivel tipo ultrasónico para determinar la elevación del espejo de agua del embalse.	90
Figura 2.73	Gráfica de Contribución a la Varianza Total sobre la estimación del gasto.	92
Figura 2.74	Despliegue del Monitoreo de variables relativas al sistema de medición.	93
Figura 3.1	Funcionamiento del sistema de telemedición.	101
Figura 3.2	Obra de toma con tubería a presión a través de cortina de concreto.	101
Figura 3.3	Obra de toma con tiro vertical, túnel a presión y tubería expuesta en túnel.	102
Figura 3.4	Obra de toma con tiro vertical, túnel a presión, galería vertical para compuertas deslizantes y conducto abierto en túnel.	102
Figura 3.5	Obra de toma con galería a presión.	103
Figura 3.6	Obra de toma con tubería parcialmente embebida en la cortina.	103
Figura 3.7	Sensores secos en arreglo "Z".	113
Figura 3.8	Sensores secos en arreglo "V".	113
Figura 3.9	Sensores húmedos intrusivos en arreglo "Z" colocados en el interior del tubo.	113
Figura 3.10	Sensores húmedos de inserción en arreglo "Z" colocados desde el exterior del tubo.	113
Figura 3.11	Sensores húmedos de inserción (tres pares) en arreglo "Z" en carrete bridado.	114
Figura 3.12	Sensores ultrasónicos de tiempo de travesía y ultrasónico de nivel.	114
Figura 3.13	Medidores de flujo con sensores ultrasónicos de efecto doppler y ultrasónicos de nivel.	114
Figura 3.14	Colocación típica de los diferentes sensores en la sección del conducto a superficie libre.	115
Figura 3.15	Elementos para el arreglo de los sensores en conductos a presión y a superficie libre.	117
Figura 3.16	Análisis gráfico de la información.	121
Figura 3.17	Medición del espesor de la tubería	122

Figura 3.18	Soldando las bases para los sensores.	122
Figura 3.19	Base con sensor.	122
Figura 3.20	Vista general de localización.	122
Figura 3.21	Gabinete donde se alojan los componentes electrónicos.	123
Figura 3.22	Unidad electrónica del medidor.	123
Figura 3.23	Cerco de malla ciclónica para protección de celdas solares.	123
Figura 3.24	Vista de antena satelital.	123
Figura 3.25	Sensores en la tubería en arreglo V.	124
Figura 3.26	Vista del sensor con su placa soldada.	124
Figura 3.27	Vista hacia aguas abajo.	124
Figura 3.28	Gabinete principal.	124
Figura 3.29	Inicio de desmonte de la escotilla.	125
Figura 3.30	Tapa de escotilla removida para acceder al interior de la tubería.	125
Figura 3.31	Perforación de la tubería para la salida de los cables de sensores.	125
Figura 3.32	Mediciones preeliminares para ubicación de sensores.	125
Figura 3.33	Instalación de abrazaderas en el interior de la tubería.	126
Figura 3.34	Colocación de la placa base para asentar sensor de velocidad.	126
Figura 3.35	Tubería de PVC para alojar cables de sensores.	126
Figura 3.36	Deflector para proteger tubería de PVC.	126
Figura 3.37	Alineamiento de sensores con rayo láser.	127
Figura 3.38	Vista del desarrollo de tubería de PVC. Se aprecia el par de sensores.	127
Figura 3.39	Otra vista del desarrollo de tubería de PVC en el interior de la tubería.	127
Figura 3.40	Salida del cable de los sensores por el conector.	127
Figura 3.41	Colocación de la escotilla.	128
Figura 3.42	Vista de la unidad electrónica en la caseta de operación.	128
Figura 3.43	Vista de la celda solar y la antena satelital.	128
Figura 3.44	Gabinete que aloja la unidad electrónica en la caseta de operación.	128
Figura 3.45	Vista de la tubería.	129
Figura 3.46	Estructura para realizar las perforaciones.	129
Figura 3.47	Vista de los sensores de inserción.	129
Figura 4.1	Instrumentos de medición cotidianos.	134
Figura 4.2	Determinación indirecta del gasto.	135
Figura 4.3	Medidor de flujo de tipo propela.	136
Figura 4.4	Kilogramo masa: patrón y pesa.	137
Figura 4.5	Errores en la medición.	138
Figura 4.6	Un dinamómetro puede requerir un factor de corrección.	139
Figura 4.7	Determinación del factor de corrección.	140
Figura 4.8	El volumen y el tiempo como magnitudes de entrada para determinar el gasto.	142
Figura 4.9	Influencia de las fuentes de incertidumbre en la determinación del gasto	144
Figura 4.10	Tolerancia en la medición.	145
Figura 4.11	La incertidumbre y el valor verdadero.	146
Figura 4.12	Medición aceptable o inaceptable.	147

Figura 4.13	Cobertura del área de distribución de probabilidades.	148
Figura 4.14	Gráfico de las proporciones de área cubierta bajo la curva de la Figura 4.13 para distintos valores de k .	149
Figura 4.15	Sensibilidad del mensurando a las magnitudes de entrada.	154
Figura 4.16	Combinación de las incertidumbres estándar.	155
Figura 4.17	Un eslabón en la cadena de trazabilidad.	158
Figura 5.1	Secuencia de selección del equipo medición.	166

Cuadros

Cuadro 1.1	Evaluación cualitativa del CIME.	12
Cuadro 1.2	Evaluación cualitativa del CIME. Presa Lázaro Cárdenas.	15
Cuadro 1.3	Resumen de evaluación.	17
Cuadro 2.1	Velocidades extraídas del simulador numérico para verificar: cálculos de gasto, correspondiente a la opción 1 del caso 1.	51
Cuadro 2.2	Velocidades extraídas del simulador numérico para verificar cálculos de gasto, correspondiente a la opción 2 del caso 2.	52
Cuadro 2.3	Resumen de la posición del sistema de medición de acuerdo a la geometría del conducto a presión.	53
Cuadro 2.4	Evaluación de incertidumbre de un sistema instalado.	91
Cuadro 3.1	Sistema de medición en función de la obra de toma.	115
Cuadro 3.2	Información enviada vía satélite y consultada a través de de la Internet.	120
Cuadro 4.1	Error sistemático medio.	140
Cuadro 4.2	Para cálculo de la pendiente de recta ajustada.	141
Cuadro 4.3	Proporciones de área debajo de la curva de la Figura 4.13 para distintos valores de k.	149
Cuadro 4.4	Incertidumbre estándar para distribuciones de probabilidad sencillas.	152
Cuadro 5.1	Métodos de medición de volúmenes y principio físico.	163
Cuadro 5.2	Clasificación entre el tipo de flujo, tipo de conducción y técnica de aforo.	164
Cuadro 5.3	Criterio de toma de muestras para contabilizar el volumen.	168



PRÓLOGO

La dinámica sistémica de nuestro tiempo, impone grandes retos de provocación y adaptación a todos los integrantes de la sociedad. “La única constante es el cambio”, se dice, se escucha y se reacciona. La tecnología es una de las disciplinas que más representa dicha dinámica, incluso es natural suponer que la tecnología es el factor preponderante en la dinámica mencionada.

La hidrometría como parte de la tecnología, ya sea como insumo, ya sea como producto, no puede ni debe estar ajena a los cambios; y en este marco es que se presenta esta primera edición electrónica del documento “Medición de Flujo Volumétrico en Presas, Canales y Pozos”. A continuación se presentan y explican los cambios, correcciones y mejoras de cada uno de los capítulos de esta edición.

La propuesta del Círculo de la Medición Efectiva (CIME), presentada en la edición anterior, se planteaba como una herramienta de evaluación de la calidad y la eficiencia de un proyecto de medición. En esta primera edición electrónica se proponen herramientas simples para la aplicación de la propuesta. Esencialmente se propone realizar una encuesta y recopilar información del proyecto de medición. Posteriormente y con base en la encuesta y en el material recopilado, se propone evaluar cualitativamente el grado de satisfacción de la necesidad que genera la medición; y para enriquecer la evaluación, se recomienda calificar cada una de las acciones y planes del CIME con la intención de contar con indicadores que muestren qué partes del CIME se realizaron correctamente y si es el caso, qué partes no. Las evaluaciones se realizan con el apoyo de sencillas tablas y un sistema de calificaciones igualmente simple. Finalmente se considera conveniente adaptar el esquema gráfico del CIME de acuerdo al caso en estudio; y precisamente, la propuesta se ejemplifica con un caso de estudio relacionado con la medición de las extracciones en una presa de almacenamiento.

En lo que respecta al capítulo dos cuyo tema es la medición en centrales hidroeléctricas, se adicionaron los métodos de medición directa considerados como métodos primarios y por tanto de referencia, dado que no requieren calibración. En la edición pasada se incluyeron métodos secundarios e incluso emergentes como la medición con equipos ultrasónicos, pero aunque se han logrado resultados aceptables no están considerados como métodos primarios.

En este capítulo dos se incluyen dos métodos directos: (a) el de *área-velocidad* que se puede implementar en canales abiertos o conductos cerrados tales como canales de descarga, obras de desvío con geometrías regulares y aún en pozos de oscilación; y (b) el método de *presión-tiempo* que es específico para medir caudales en conductos presurizados. Se considera que con la inclusión de estos dos subtemas se complementan los métodos y técnicas de medición en centrales hidroeléctricas.

El capítulo 3, referente a la medición de caudales en las extracciones de presas de almacenamiento, se modificó para incorporar el caso de los sensores que siendo del tipo inserción, son colocados desde el interior de la tubería; así mismo, se incorpora la clasificación de arreglos para sensores ultrasónicos sugerida por los fabricantes de estos equipos.

Otro capítulo modificado fue el capítulo cuatro: se mejoró la redacción y se corrigieron problemas en la estructura del capítulo. La calidad y cantidad de las ilustraciones tuvo un notable incremento para dar mejor soporte a los textos. En el asunto de la determinación del factor de corrección, se introdujo un mejor procedimiento basado en una regresión lineal. Para la determinación de la cobertura de área de la curva de densidad de probabilidades, en el caso del cálculo de incertidumbres, se amplió el rango de valores de k y se introdujo un gráfico que permite determinar valores continuos de k o del área cubierta. Finalmente se simplificaron algunas notas al pie de página para evitar confusiones en los lectores.

El capítulo cinco es un aporte no incluido en la edición anterior. Primeramente debe mencionarse que en la Ley de Aguas Nacionales se establece la obligatoriedad de la medición de las extracciones en los aprovechamientos de aguas nacionales. Por otro lado, el proceso de dicha medición debe estar referenciado en Normas Oficiales Mexicanas y en Normas Mexicanas. Con esta perspectiva jurídica, en el capítulo se indican algunos de los aspectos principales que deben considerarse en el desarrollo e implementación de un proyecto de norma para la medición de flujo. Se pretende empoderar técnicamente tanto a los usuarios como a la autoridad del agua, para dar certidumbre a los resultados de la medición.

1

EL CÍRCULO DE LA MEDICIÓN EFECTIVA (CIME)

Edmundo Pedroza González
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

1.1. INTRODUCCIÓN

La medición de gasto o caudal no es un fin en sí mismo, es una acción que se realiza con fines ajenos a la medición misma. Se mide para conocer la cantidad de agua que pasa por un cierto sitio porque se tiene una necesidad para hacerlo. Muchos y muy diversos son los motivos por los cuales se emprende el ejercicio de medir; por ejemplo, se requiere cobrar el agua que se entrega, o bien, se necesita medir la cantidad de agua extraída a una presa para dosificar extracción.

Por otro lado, medir es una cosa, pero saber qué tan bien o mal se hace, es otra. Si se establece que el acto de medir es un medio para lograr un fin superior, entonces se mide bien si se cumple con el fin que motivó la medición. Pero si el motivo de la medición no está suficientemente claro no será sencillo determinar si se cumple o no.

De la reflexión anterior surge la primera recomendación: para evaluar la calidad de la medición, se debe establecer, como premisa, la claridad en la intención de medir, sus delimitaciones concretas y sus alcances reales y factibles.

Supóngase el caso del establecimiento adecuado de la intención de medir y supóngase también la revisión del grado de cumplimiento de tal intención. El resultado será uno de los siguientes: (a) cumplimiento total; (b) cumplimiento parcial; (c) cumplimiento mínimo y (d) incumplimiento. Sea cual fuere el resultado, será importante saber por qué fue así.

De esta segunda reflexión surge la segunda recomendación: para saber sobre las causas de una buena o mala calidad de la medición, es necesario revisar todos los aspectos previos y actuales relacionados con el acto de medir.

Esa así como surge la propuesta: El Círculo de la Medición Efectiva, en lo subsecuente: CIME.

1.2. ¿CUÁNDO SE APLICA EL CIME?

La metodología se puede aplicar en dos momentos muy importantes del proceso de medición. Es muy conveniente que se considere al momento de realizar un proyecto de medición o también cuando ya se tenga un proyecto realizado. En seguida se menciona la importancia de cada aspecto.

1.2.1 El CIME en los proyectos

Es altamente provechoso considerar esta metodología al momento de realizar el proyecto. De esta manera se asegurará que la calidad de la medición y sus resultados serán los mejores, asegurando que

cada etapa y cada diseño o decisión sean de la mayor utilidad.

1.2.2 El CIME como herramienta de evaluación

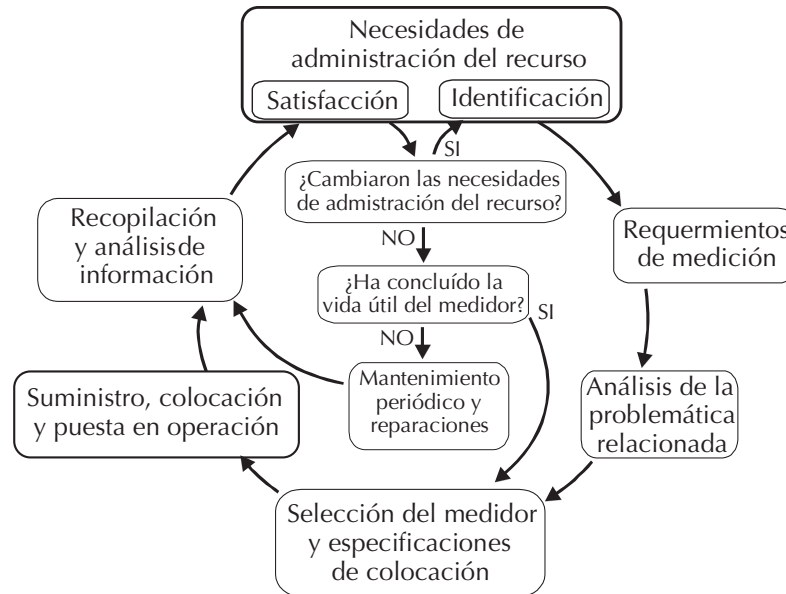
Así mismo, resulta interesante averiguar la efectividad de proyectos de medición ya realizados, ya sean redes de medidores o bien sistemas de medición. Ello para evaluar la pertinencia de la colocación de los medidores, el cuidado que se haya tenido en cada una de las etapas o bien, el grado de cumplimiento o incumplimiento de las necesidades que generaron la acción de medir.

1.3. EXPLICACIÓN DE LA PROPUESTA DEL CIME

El CIME es una metodología para la revisión de todos los aspectos de la medición, desde la intención de medir, hasta el cumplimiento de dicha intención, pasando por todos los pasos y acciones necesarias para lograrlo. La idea es que se tenga una herramienta objetiva para evaluar la calidad de la medición, particularmente en proyectos que involucran un gran número de medidores o bien, sistemas de medición donde se tienen varios componentes además del medidor en sí. En ambos casos el común denominador es el alto costo, por lo cual resulta conveniente planear adecuadamente el proyecto de medición o verificar de manera clara y objetiva si se cumplieron las expectativas por las cuales se mide en proyectos ya realizados.

Para explicar el CIME se presenta el esquema de la Figura 1.1.

Figura 1.1 Esquema del CIME.



1.4. IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DE ADMINISTRACIÓN DEL RECURSO

En general los objetivos que se persiguen al medir tienen relación con el uso eficiente del agua, el cobro o la sustentabilidad de las fuentes de abastecimiento. El análisis de cada uno de estos aspectos conducirá a la detección de las necesidades de la administración del agua. Lo que se debe revisar en esta etapa es la claridad, ya que la ausencia o insuficiencia de claridad en la identificación de la necesidad, pondrá en grave riesgo la eficacia de la medición, inclusive podrá conducir a la falta de ella. Si las necesidades de medición y de sus requeri-

mientos no son definidos con suficiente claridad, no se medirá bien, en el sentido de que los resultados de la medición se relacionarán poco o nada con la intención del porqué de la medición.

1.5. REQUERIMIENTOS DE MEDICIÓN

Una vez que se ha establecido la necesidad de medir, se debe pasar a la identificación de los requerimientos que surgirán naturalmente una vez que se sabe para qué medir. Se debe tener la respuesta a preguntas tales como:

- ¿Qué rango de gastos se deben medir?
- ¿Se requiere la información escrita o en archivos?

- ¿Con qué frecuencia se requiere la información?
- ¿Es suficiente con tener la información junto al medidor o se requiere enviar a oficinas?
- ¿Qué unidades son más convenientes?

Estas preguntas son únicamente ejemplos, otras muchas podrán surgir. Mientras más preguntas se tengan y su consecuente respuesta, será más conveniente.

1.6. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA RELACIONADA

En la mayoría de los casos se tienen problemas relacionados no directamente con la medición sino con la forma de llevarla a la práctica. Por ejemplo, en las presas de almacenamiento y generación se tiene comúnmente la problemática de que no se tienen sitios idóneos para realizar una medición de calidad o son de difícil acceso. En los canales de riego es frecuente la problemática de vandalismo; en los pozos agrícolas no se tienen trenes de descarga lo suficientemente grandes para respetar los tramos rectos necesarios para los medidores; en las plantas de tratamiento se tienen problemáticas de sólidos flotantes en el flujo o cuando el afluente viene de una zona industrial el agua es muy corrosiva. En otras ocasiones, tanto en presas como en canales y pozos, el agua tiene muchos sólidos en suspensión o en pozos el agua en ocasiones es caliente; o por otro lado, las velocidades son muy altas o muy bajas o no se tienen patrones o perfiles de velocidad adecuados.

Es así que en la mayoría de los casos se tendrá una problemática adicional relacionada que se debe analizar detalladamente para evitar el uso de medidores que fallarán, no por alguna característica propia del medidor, sino por las condiciones y características del sitio de colocación.

1.7. SELECCIÓN DEL MEDIDOR O SISTEMA DE MEDICIÓN Y ESPECIFICACIONES DE COLOCACIÓN

Encontrar la mejor coincidencia entre los requerimientos de medición, la problemática relacionada y la oferta de medidores en el mercado, se convierte en la esencia de esta etapa. Los requerimientos de medición imponen cierta calidad en el acto de medir para cumplir con dichos requerimientos. Un dispositivo de medición deberá contar con atributos tales que cumpla con los requerimientos y que supere la problemática relacionada. En esta etapa se debe revisar la oferta de dispositivos y técnicas que se tienen y que cumplen o cubren los requerimientos, para tener una medición de calidad.

Cada uno de los problemas encontrados para llevar a cabo una medición de calidad debe solventarse por medio de la adecuada selección de los mencionados dispositivos, técnicas y sitios de medición. Esto redundará en la identificación del tipo, marca, modelo e inclusive precio de los medidores, de sus componentes y accesorios. Se debe deci-

dir; por ejemplo y entre otros muchos aspectos, si el medidor será de efecto doppler o tiempo de travesía; o si se colocará dentro de los tubos o canales o bien fuera de ellos. Se decide si se debe construir una caseta especial, si la unidad electrónica se colocará junto a las válvulas, en la casa de máquinas o en el cuarto de control. Se define si se usarán taquetes expansivos o químicos; el tipo de protección, la forma de colocar los sensores o transductores. En el caso de pozos agrícolas se sabe ahora si el medidor será de turbina, propela o electromagnético.

Es común que el resultado de esta etapa sea un proyecto formal de tipo ejecutivo o informativo que contenga planos, croquis, catálogos, análisis de costos, especificaciones y todo el detalle necesario para que los medidores, sistemas y conjuntos de medición queden instalados adecuadamente.

También debe incluirse en los proyectos y su documentación, aspectos de tipo informativo para la capacitación del personal que operará los medidores y instrucciones de mantenimiento.

1.8. SUMINISTRO, COLOCACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN

Cuando se compran medidores y sus insumos y accesorios, se debe recibir lo que se solicitó, se debe tener garantía de calidad en los medidores y sus componentes. Si es necesario se deben solici-

tar certificados y pruebas de calibraciones y cumplimiento de estándares normalizados.

También se debe poner gran atención y especial cuidado a la correcta colocación de cada una de las partes de los medidores. Un medidor de buena calidad no medirá bien si no se coloca correctamente. Es por ello imprescindible la verificación de la colocación de cada uno de todos los componentes de los medidores de acuerdo a los planos y recomendaciones de colocación.

Cuando se termina la instalación de todos los componentes es importante la verificación de su correcto funcionamiento. Recuérdese nuevamente cada uno de los requerimientos de medición reconocidos en la primera parte del círculo. Si se requiere que la medición se entregue en m^3/s o en l/s se debe revisar dicho aspecto; o si se pidió que se entreguen los datos de gasto y volumen, el medidor debe ser capaz de hacerlo; o por ejemplo se debe observar que el medidor funcione para velocidades altas o bajas. De esta manera se cumple con el funcionamiento correcto del medidor y sus componentes.

Una actividad fundamental es la capacitación del personal encargado de la operación o vigilancia de los medidores, inclusive al personal que esté relacionado o cercano a los medidores. Recuérdese que ningún medidor ni maquinaria o instrumentación tiene un funcionamiento autónomo al grado de no requerir la presencia de personas que lo revisen y vigilen su funcionamiento.

1.9. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

En esta parte es necesario observar nuevamente los requerimientos de medición porque ellos serán el vehículo para satisfacer las necesidades de la administración del recurso. Es decir, ya se determinó, por ejemplo, que se requiere la información cada tres meses y se diseñó un formato para ir apuntando la información, y dicha información se usará para satisfacer la necesidad de administración del recurso. La información debe llegar a donde se requiera, a la persona adecuada y en la presentación correcta. Esta etapa se completará de esta manera si se cumple con lo indicado, si ello no ocurre, se habrá tenido un error de planeación o diseño en las etapas iniciales o el medidor o sistema de medición o alguno de sus componentes y desempeño no realizan su labor adecuadamente, debido a que no seleccionó un medidor adecuado. Todo lo anterior tendrá un enfoque parecido pero se aplica de manera diferente si está en una etapa de diseño o en una etapa de evaluación.

1.10. SATISFACCIÓN DE LAS NECESIDADES Y REQUERIMIENTOS DE MEDICIÓN

Si todas las actividades del círculo se han realizado adecuadamente se estará en posibilidades de cerrar el círculo. Como se aprecia en la Figura 1.1, la

satisfacción y la identificación de las necesidades de administración forman partes separadas de una misma situación, de hecho es exactamente lo mismo, simplemente que una parte es la necesidad y otra el satisfactor de dicha necesidad. El círculo se cerrará solamente si se lleva a cabo la acción concreta por la que se generó la necesidad de medir. Si el dato se requiere para fines de cobro, dicho dato debe llegar a las oficinas de cobranza y solamente cuando el pago se realice se habrá cerrado el círculo, de otra manera no se puede considerar que se ha tenido éxito.

1.11. FUNCIONAMIENTO CONTINUO DEL CIME

Tampoco puede considerarse una medición efectiva si el círculo se “cierra” una sola vez. Como puede observarse en la Figura 1.1, se tiene un ciclo más pequeño que debe también seguirse. Este círculo más pequeño es el que debe realizarse permanentemente. Se debe revisar lo siguiente.

1.11.1 Cambios en las necesidades de administración del recurso

Es posible que después de un tiempo de funcionamiento ininterrumpido, mismo que debiera ser más bien largo, las necesidades de administración de recurso tengan modificaciones. Puede ser que la misma actividad de administración –cobro, control de la explotación, calidad del agua, etcétera–

haya logrado un equilibrio o una mejora en alguna situación crítica o grave de la disponibilidad del recurso y las necesidades de administración se vean de alguna manera menos rígidas o estrictas y pueda llevarse una administración más relajada. O bien, puede ser lo contrario, las medidas llevadas a cabo no han logrado la intención o el objetivo superior de la administración del recurso. En este caso, como lo indica el esquema, será menester revisar las nuevas necesidades de administración y dejarlos nuevamente bien claros para que las subsecuentes partes del círculo tengan facilidad para llevarse a cabo.

Se debe revisar nuevamente si también se genera una problemática relacionada diferente a la que ya se había detectado. Es posible también en función de lo anterior; que se deba cambiar o modificar el dispositivo, el método o el principio de medición; o bien alguna de las partes del medidor a de alguno de los componentes del conjunto o sistema de medición.

1.11.2 Conclusión de la vida útil de los medidores

Si el medidor o alguna de las partes del conjunto o sistema de medición, concluye su vida útil se deberá considerar su reemplazo y colocar un medidor de características similares ya que no han cambiado las necesidades de administración del recurso. Si el medidor sigue funcionando y las necesidades no han cambiado, entonces se debe continuar operando el medidor; recopilando la información

y analizándola para cumplir ininterrumpidamente con el CIME.

1.11.3 Mantenimiento periódico y reparaciones

La acción de mantenimiento implica evitar al máximo las reparaciones y alargar el tiempo en el cual el medidor tendrá un desempeño aceptable. Los medidores y todos sus componentes son materiales que se degradan, que se gastan o *intemperizan*. El mantenimiento es imprescindible, se debe inspeccionar cada parte y cada componente y detectar desgastes, frotamientos, calentamientos y proceder a corregirlos antes de que dicha parte o componente falle.

1.12. HERRAMIENTAS PARA APLICACIÓN DEL CIME

Para la aplicación de la propuesta se han diseñado algunas herramientas: (a) una encuesta; (b) la evaluación cualitativa y cuantitativa y (c) una representación gráfica del CIME.

1.12.1 Encuesta

La encuesta es resultado de preguntas surgidas de cada etapa del CIME. Se recomienda visitar los sitios donde se pretenda aplicar la propuesta y conversar con los encargados de cada parte del medidor o del sistema de medición. Se puede escribir lo que las personas vayan contestando o se puede

grabar la conversación y después seleccionar la información más relevante. También es recomendable recolectar información adicional como planos, croquis esquemas, manuales de usuario y toda la información potencialmente útil.

Las siguientes pueden ser las preguntas pero se pueden ampliar o modificar:

A. Identificación de las necesidades de administración del recurso que originaron la medición

Describa el requerimiento o necesidad específica que motivó la medición

B. Requerimientos de medición

¿Qué error de medición se debe aceptar?

¿Qué rango se va a medir?

¿Qué resolución se requiere?

¿Se requiere la información escrita o en archivos?

¿Con qué frecuencia se requiere la información?

¿Es suficiente con tener la información junto al medidor o se requiere enviar a oficinas?

¿Qué unidades son más convenientes?

C. Análisis de la problemática relacionada

¿Qué problemática se tuvo para colocar los instrumentos?

Inexistencia de sitios idóneos para colocación de instrumentos

Difícil acceso

Condiciones inadecuadas para colocar los componentes

Temperatura inadecuada

Sólidos en suspensión,

Insuficiencia de tramos rectos

Velocidad muy alta o muy baja

Complejidad en su operación (explicar)

Vandalismo

Otro (definir)

D. Selección del medidor o sistema de medición y especificaciones de colocación

D1. Descripción del medidor seleccionado

Tipo

Marca

Modelo

Explicación de su funcionamiento

Descripción completa de sus componentes

D2. Descripción de la forma o manera de colocar el medidor

¿Quién colocó el medidor y sus componentes?

¿Se tuvo proyecto ejecutivo?

¿Se respetó alguna norma o estándar?

¿Fue necesario calibrar el medidor?

(Anexar esquemas, planos, explicaciones, croquis, catálogos, análisis de costos, manuales de operación o cualquier elemento pertinente)

E. Suministro, colocación y puesta en operación

¿Se tuvo algún proceso de licitación para el suministro?

¿Se solicitó algún certificado de calidad (por ejemplo ISO)?

¿Se solicitaron certificados de calibración?

F. Revisión del proceso de colocación

¿Se realizaron procesos de verificación del buen funcionamiento del medidor y de sus componentes?

¿Se compararon los resultados con algún medidor?

¿Qué resultados se tuvieron?

¿Se capacitó personal para la operación y mantenimiento del medidor?

G. Recopilación y análisis de información

¿Se recopiló la información de acuerdo a como se determinó al inicio?

¿Se realiza algún tipo de análisis a la información?
(en caso afirmativo, describir)

H. Satisfacción de las necesidades y requerimientos de medición

¿Se considera que se cubren satisfactoriamente las necesidades que originaron la medición?

Explicar las razones de cualquier respuesta

I. Cambios en las necesidades de administración del recurso

¿Han cambiado las necesidades que originaron la medición?

En caso afirmativo, explique dichos cambios e indique si se vieron afectadas la demás etapas del círculo

J. Conclusión de la vida útil de los medidores

¿Ha concluido la vida útil del medidor?

En caso afirmativo indique si se ha cambiado e indique si se siguen cubriendo los requerimientos de medición

K. Mantenimiento periódico y reparaciones

¿Se da mantenimiento al medidor?

En caso afirmativo, indique quién realiza los mantenimientos

¿Se ha descompuesto?

En caso afirmativo describa las fallas y su correspondiente reparación.

1.12.2 Evaluación cualitativa y cuantitativa

En cualquier evaluación es conveniente contar con indicadores que eviten o minimicen la subjetividad de la evaluación. En el caso del CIME se proponen dos tipo de evaluación, una cualitativa y la otra cuantitativa.

La evaluación cualitativa se aplica únicamente a la calificación que se otorga al grado de satisfacción de la necesidad que generó la medición y podrá ser una de las siguientes: (a) totalmente; (b) parcialmente; (c) mínimamente y (d) no se cumplió. Para otorgar una calificación se deberá comparar el texto que describe el intento de satisfacción de la necesidad con el texto de la necesidad que genera la medición y analizando ambos se deberá emitir un juicio. Se puede utilizar el Cuadro 1.1. En el caso de estudio se ejemplifica lo anterior.

El resultado de la evaluación cualitativa indica si con el proyecto de medición, el sistema de medición o el medidor, se logró satisfacer la

Descripción de la necesidad de medición	Descripción del resultado de la medición

Calificación del grado de satisfacción de la necesidad de medición:

() Totalmente

() Parcialmente

() Mínimamente

() No se cumplió

se remite nuevamente a las preguntas y respuestas de la encuesta y al cumplimiento de los requisitos o las expectativas. Para realizar la evaluación se utilizan los cuadros siguientes. Para su llenado se debe investigar en las preguntas de la encuesta y en la información recabada.

Aspecto	Requerimiento	Solución	Puntuación
Error de medición máximo aceptable			
Rango de gastos a medir			
Frecuencia de medición			
Lugar de presentación de los datos			
Unidades de medición			
Otro(s) (Definir)			
Instrucciones: Indique el requerimiento y si la solución satisface dicho requerimiento otorgue un punto y viceversa. Por ejemplo, si el error máximo aceptable es 10% y el medidor tiene un error de 2%, se otorga un punto. Es aceptable la opción de “No aplica” en cuyo caso no se otorga puntuación.		Puntos obtenidos (PO)	
		Puntos máximo a obtener (PM)	
		Calificación (C=PO/PM)	

Problemática relacionada

Problema	Respuesta (SÍ/NO)	Solución	Puntuación
Acceso complicado al sitio de colocación del medidor			
Condiciones inadecuadas para colocar los medidores			
Temperatura inadecuada			
Problemas de sólidos en suspensión			
Velocidad muy alta o muy baja			
Vandalismo			
Otro(s) (Definir)			
Instrucciones: Indique el requerimiento y si la solución satisface dicho requerimiento otorgue un punto y viceversa. Por ejemplo, si hay vandalismo y se ponen protecciones, se otorga un punto. Es aceptable la opción de "No aplica" en cuyo caso no se otorga puntuación.		Puntos obtenidos (PO)	
		Puntos máximo a obtener (PM)	
		Calificación (C=PO/PM)	

Selección y suministro

Aspecto		Respuesta (SÍ/NO)	Puntuación
Selección del tipo de medidor y sus componentes por parte de expertos			
Existencia de proyecto ejecutivo o similar			
Respeto de norma, estándar o similar			
Licitación para el suministro			
Certificados de calidad tipo ISO o similar			
Certificados o pruebas de calibración			
Otro(s) (Definir)			
Instrucciones: La respuesta positiva otorga un punto. Es aceptable la opción de “No aplica” en cuyo caso no se otorga puntuación.	Puntos obtenidos (PO)		
	Puntos máximo a obtener (PM)		
	Calificación (C=PO/PM)		

Colocación y puesta en operación

Aspecto		Respuesta (SÍ/NO)	Puntuación
Colocación del medidor y sus componentes por parte de expertos			
Verificación de correcto funcionamiento de medidor y sus componentes			
Resultados aceptables en comparación con otro medidor			
Capacitación a personal de operación			
Otro(s) (Definir)			
Instrucciones: La respuesta positiva otorga un punto. Es aceptable la opción de "No aplica" en cuyo caso no se otorga puntuación.	Puntos obtenidos (PO)		
	Puntos máximo a obtener (PM)		
	Calificación (C=PO/PM)		

Funcionamiento continuo del CIME

Aspecto	Respuesta (SÍ/NO)	Puntuación
Modificaciones al CIME en caso de cambio de necesidades que originaron la medición		
Cambio del medidor en el caso de conclusión de su vida útil		
Mantenimiento preventivo al medidor y sus componentes		
Reparación del medidor y sus componentes en caso de falla		
Otro(s) (Definir)		
Instrucciones: La respuesta positiva otorga un punto. Es aceptable la opción de "No aplica" en cuyo caso no se otorga puntuación.	Puntos obtenidos (PO)	
	Puntos máximo a obtener (PM)	
	Calificación (C=PO/PM)	

1.12.3 Representación gráfica del círculo con el caso en estudio y resumen de la calificación.

Es muy conveniente modificar el esquema gráfico del CIME indicando en cada componente la manera en que se cubrió el requisito o cómo se cumplió con la expectativa. En el caso en estudio siguiente se muestra un ejemplo.

el estado mexicano de Durango; dentro de este estado la presa se ubica al norte y al centro del mismo. Durante varios años se percibía una pérdida de agua ya que los balances entre la cantidad de agua extraída y el agua recibida en la presa de aguas abajo, indicaba una disminución de la misma. Para descartar una posible medición inadecuada en la salida de la presa "El Palmito" se colocó un medidor ultrasónico de tiempo de travesía. En seguida se presenta un ejemplo del CIME aplicado a dicha presa.

1.13. CASO DE ESTUDIO: LA MEDICIÓN DE LAS EXTRACCIONES EN LA PRESA LÁZARO CÁRDENAS "EL PALMITO"

La presa Lázaro Cárdenas, también llamada "El Palmito" se ubica hacia el norte y oeste de país en

Cuadro 1.2 Evaluación cualitativa del CIME. Presa Lázaro Cárdenas.

Descripción de la necesidad de medición	Descripción del resultado de la medición
Se tiene la impresión de que el agua se “pierde” entre la presa El Palmito y la presa Zarco.	El agua no se pierde. Las condiciones inadecuadas de la medición con molinete sobre estiman el gasto de extracción, el agua “perdida” en realidad nunca salió de la presa.
Calificación del grado de satisfacción de la necesidad de medición: (X) Totalmente () Parcialmente () Mínimamente () No se cumplió	

Requerimientos de medición

Aspecto	Requerimiento	Solución	Puntuación
Error de medición máximo aceptable	2%	0.5%	1
Rango de gastos a medir	65 a 105 m³/s	+ 200 m³/s	1
Frecuencia de medición	Permanente	Permanente	1
Lugar de presentación de los datos	En oficinas	Sitio web	1
Unidades de medición	m³/s	m³/s	1
Otro(s) (Definir)			
Instrucciones: Indique el requerimiento y si la solución satisface dicho requerimiento otorgue un punto y viceversa. Por ejemplo, si el error máximo aceptable es 10% y el medidor tiene un error de 2%, se otorga un punto. Es aceptable la opción de “No aplica” en cuyo caso no se otorga puntuación.	Puntos obtenidos (PO)		5
	Puntos máximo a obtener (PM)		5
	Calificación (C=PO/PM)		1

Problemática relacionada

Problema	Respuesta (SÍ/NO)	Solución	Puntuación
Acceso complicado al sitio de colocación del medidor	Sí	Colocación de sensores en el interior de los tubos presurizados	1
Condiciones inadecuadas para colocar los medidores	Sí	Uso de estrategias sofisticadas de colocación	1
Temperatura inadecuada	No	No aplica	
Problemas de sólidos en suspensión	No	No aplica	
Velocidad muy alta o muy baja	No	No aplica	
Vandalismo	No	No aplica	
Otro(s) (Definir)			
Instrucciones: Indique el requerimiento y si la solución satisface dicho requerimiento otorgue un punto y viceversa. Por ejemplo, si hay vandalismo y se ponen protecciones, se otorga un punto. Es aceptable la opción de “No aplica” en cuyo caso no se otorga puntuación.	Puntos obtenidos (PO)		2
	Puntos máximo a obtener (PM)		2
	Calificación (C=PO/PM)		1

Selección y suministro

Aspecto	Respuesta (SÍ/NO)	Puntuación
Selección del tipo de medidor y sus componentes por parte de expertos	Sí	1
Existencia de proyecto ejecutivo o similar	Sí	1
Respeto de norma, estándar o similar	Sí	1
Licitación para el suministro	No aplica	
Certificados de calidad tipo ISO o similar	No aplica	
Certificados o pruebas de calibración	No aplica	
Otro(s) (Definir)		
Instrucciones: La respuesta positiva otorga un punto. Es aceptable la opción de "No aplica" en cuyo caso no se otorga puntuación.	Puntos obtenidos (PO)	3
	Puntos máximo a obtener (PM)	3
	Calificación (C=PO/PM)	1

Colocación, puesta en operación y recopilación de información

Aspecto	Respuesta (SÍ/NO)	Puntuación
Colocación del medidor y sus componentes por parte de expertos	Sí	1
Verificación de correcto funcionamiento de medidor y sus componentes	Sí	1
Resultados aceptables en comparación con otro medidor	No aplica	
Capacitación a personal de operación	Sí	1
Recopilación de información de acuerdo al requerimiento	No	0
Análisis de información	Sí	1
Otro(s) (Definir)		
Instrucciones: La respuesta positiva otorga un punto. Es aceptable la opción de "No aplica" en cuyo caso no se otorga puntuación.	Puntos obtenidos (PO)	2
	Puntos máximo a obtener (PM)	3
	Calificación (C=PO/PM)	0.67

Funcionamiento continuo del CIME

Aspecto	Respuesta (SÍ/NO)	Puntuación
Modificaciones al CIME en caso de cambio de necesidades que originaron la medición	No aplica	
Cambio del medidor en el caso de conclusión de su vida útil	No	0
Mantenimiento preventivo al medidor y sus componentes	Sí	1
Reparación del medidor y sus componentes en caso de falla	Si	1
Otro(s) (Definir)		
Instrucciones: La respuesta positiva otorga un punto. Es aceptable la opción de "No aplica" en cuyo caso no se otorga puntuación.	Puntos obtenidos (PO)	2
	Puntos máximo a obtener (PM)	3
	Calificación (C=PO/PM)	0.67

Cómo puede observarse, se satisface la necesidad que originó la medición. Pero no se tiene una calificación perfecta debido a que no se ha atendido el término de la vida útil del medidor y no se recopila la información como se planeaba dado que no se le da mantenimiento al sitio web. En lugar de esto, el personal de operación de la presa, lee la pantalla del medidor y reporta vía telefónica la información a oficinas; lo cual origina que no se cumpla la permanencia de la medición requerida inicialmente.

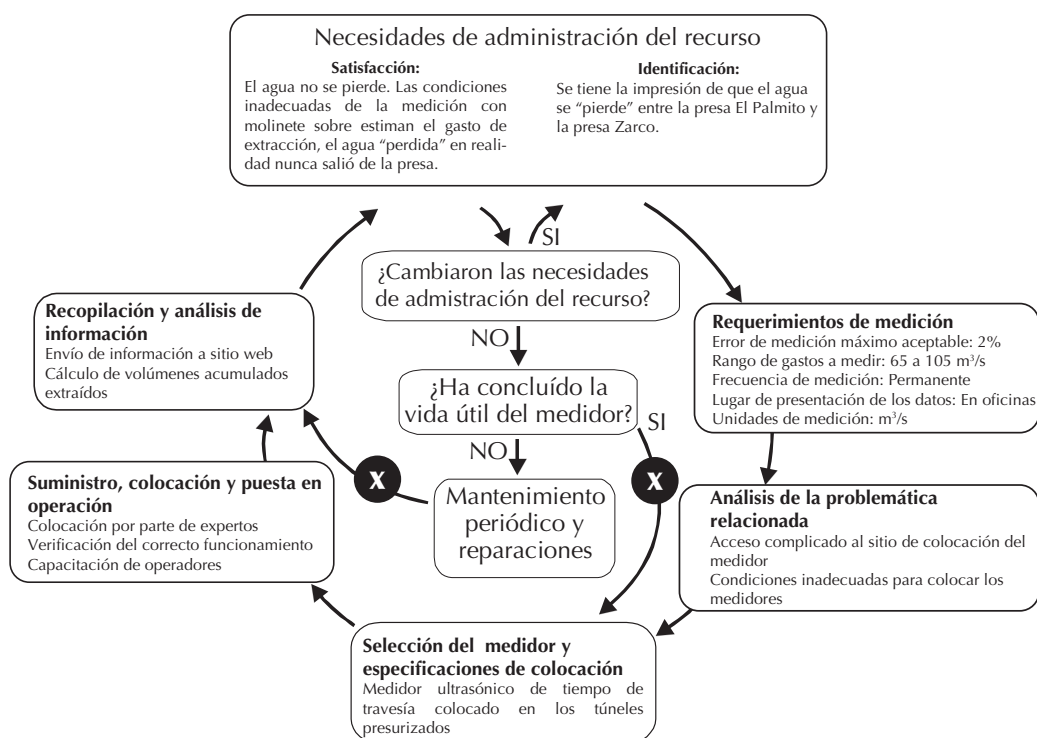
1.13.1 Representación gráfica del CIME con el caso en estudio

Es muy conveniente modificar el esquema gráfico del CIME indicando en cada componente la manera en que se cubrió el requisito o cómo se cumplió con la expectativa. En el caso en estudio siguiente se muestra un ejemplo.

Cuadro 1.3 Resumen de evaluación.

Cumplimiento de la necesidad original de medición	Totalmente
Puntos máximos posibles	16
Puntos obtenidos	14
Calificación final	0.87

Figura 1.2 CIME de la medición en la presa El Palmito”.





2

MEDICIÓN EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Cecia Millán Barrera
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

2.1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de la energía siempre ha sido esencial para la humanidad que cada vez demanda más recursos energéticos para cubrir sus necesidades de consumo y bienestar. Las fuentes renovables que provienen de fuentes inagotables como el sol y no emiten gases de efecto invernadero, entre otros beneficios, son una de las piezas claves en la construcción de un sistema de desarrollo sustentable. Dentro de estas energías renovables se encuentra la energía hidroeléctrica, como principal aliado en la generación de energía limpia.

El actual sistema energético a nivel mundial está basado en la generación de energía a partir de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón mineral y el gas. La generación de energía a partir de estas materias primas está siendo replanteada por varias razones: son recursos limitados que se encuentran en puntos concretos del planeta, su uso a gran escala está provocando graves efectos sobre el medio ambiente y salud de los seres humanos, y se están agotando las reservas naturales comprometiendo el futuro de las nuevas generaciones.

2.2. ENERGÍA HIDROELÉCTRICA, UNA DE LAS RENOVABLES MÁS DESARROLLADA

El índice de consumo mundial de energía comercial es miles de veces inferior a los flujos de energía que la Tierra recibe del Sol. La energía hidroeléctrica, que indirectamente proviene de la energía solar, comparte las ventajas de ser autóctona, limpia e inagotable como el resto de las energías renovables.

La producción anual media de la energía hidroeléctrica a nivel mundial es de 2 600 TWh, lo que representa aproximadamente el 19% del total de la energía eléctrica producida. La potencia hidroeléctrica instalada en todo el mundo asciende a 700 GW.

A gran escala esta fuente de energía tiene un campo de expansión limitado, ya que en los países más desarrollados la mayoría de los ríos importantes ya cuentan con una o varias centrales.

OBRA CIVIL EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Las Centrales Hidroeléctricas están condicionadas por las peculiaridades y características que presente el lugar donde se ubican, como por ejemplo la topografía del terreno. Según el emplazamiento de la Central Hidroeléctrica se realiza la siguiente clasificación general:

Central de agua fluyente: Captan una parte del caudal del río, lo trasladan hacia la Central y una vez utilizado, se devuelve al río.

Centrales a pie de presa. Se sitúan debajo de los embalses destinados a usos hidroeléctricos o a otros usos, aprovechando el desnivel creado por la propia presa.

Centrales en canal de riego o de abastecimiento. Se distinguen dos tipos de Centrales dentro de este grupo:

Aquellas que utilizan el desnivel existente en el propio canal. Mediante la instalación de una tubería forzada, paralela a la vía rápida del canal de riego, se conduce el agua hasta la Central, devolviéndola posteriormente a su curso normal en canal.

Aquellas que aprovechan el desnivel existente entre el canal y el curso de un río cercano. La Central se instala cercana al río y se turbinan las aguas excedentes en el canal.

La obra civil engloba las infraestructuras e instalaciones necesarias para derivar, conducir y restituir el agua turbinada, así como para albergar los equipos electromecánicos y el sistema eléctrico general y de control.

Diques y Presas. La obra que se lleva a cabo para provocar una retención en el cauce de un río puede ser de dos tipos:

Diques. Muro transversal al curso del río, de poca altura, que provoca un remanso de agua sin producir una elevación notable del nivel. Su objetivo es desviar parte del caudal del río hacia la obra de toma de la Central. Aquella parte que no es derivada vierte por el vertedor y sigue su curso normal por el río.

Los Diques pueden construirse de concreto, ladrillos, escollera o tierra. Resiste al agua por su propio peso, aunque en los diques de tierra y escollera se suele colocar un anclaje al terreno con el fin de aumentar su estabilidad.

Presas. En este caso el muro que retiene el agua tiene una altura considerable y provoca una elevación notoria del nivel del río mediante la creación de un embalse. En función del tamaño de éste se pueden regular las aportaciones. Hay varios tipos de Presas según la forma de contrarrestar el empuje hidrostático:

Cortinas de contrafuertes o bóvedas. Las presas de contrafuertes tienen una pared que soporta el agua y una serie de contrafuertes o pilares, de forma triangular, que sujetan la pared y transmiten la carga del agua a la base. Estas presas precisan de un 35 a un 50% del concreto que necesitaría una de gravedad de tamaño similar. Hay varios tipos de presa de contrafuertes: los más comunes son de planchas uniformes y de bóvedas múltiples. En las de planchas uniformes el elemento que contiene el agua es un conjunto de planchas que cubren la

superficie entre los contrafuertes. En las de bóvedas múltiples, estas permiten que los contrafuertes estén más espaciados.

A pesar del ahorro de concreto, las presas de contrafuertes no son siempre más económicas que las de gravedad. El costo de las complicadas estructuras para forjar el concreto y la instalación de refuerzos de acero suele equivaler al ahorro en materiales de construcción. Pero este tipo de presa es necesario en terrenos poco estables.

Cortinas de gravedad. Aquéllas que contrarrestan el empuje del agua con su propio peso, por lo que se confía su estabilidad también en el esfuerzo del terreno sobre el que se asienta.

Cortinas de gravedad de tierra o escollera. Suelen tener una gran base y poca altura. No utilizan concreto y están constituidas normalmente por los materiales propios del terreno donde se asienta.

Cortina de gravedad propiamente dicha: Se construye de concreto y el terreno que la sujeta debe ser consistente.

Cortina en arco. En este caso el esfuerzo del empuje del agua se transmite hacia las laderas del valle o cañón, de ahí que su forma implique cierta curvatura. La convexidad que forma la presa está vuelta hacia el embalse. Suele situarse en cañones angostos con laderas rocosas de buena calidad.

Vertedores, compuertas y válvulas. Todas las Centrales Hidroeléctricas disponen de dispositivos que permiten el paso del agua desde el embalse hasta el cauce del río, aguas abajo, para evitar el peligro que podrían ocasionar las avenidas. Estas pueden provocar una subida del nivel del agua en el embalse que sobrepase el máximo permitido. En estos casos es necesario poder evacuar el agua sobrante sin necesidad de que pase por la Central. Las compuertas y válvulas son aquellos elementos que permiten regular y controlar los niveles del embalse. Existen distintas posibilidades de desagüe:

Vertedores de Superficie: Pueden disponer de diferentes tipos de compuertas, que permiten mantener totalmente cerrado el paso del agua, abierto parcialmente o abierto total. Según la técnica que se emplea se distinguen:

Compuertas verticales: El elemento de cierre es un tablero de chapa reforzada que se sube y baja verticalmente guiado por unas ranuras en los pilares adyacentes. Cuando el empuje que ejerce el agua en el embalse sobre la compuerta es grande, las guías sufren un fuerte rozamiento, en este caso se utilizan “compuertas vagón”, cuyos bordes verticales están provistos de ruedas con rodamientos que se apoyan en ambos carriles.

Compuertas radiales: Consisten en una estructura metálica con una superficie de forma cilíndrica que gira alrededor de un eje al que está unido través de brazos radiales. La apertura se realiza con un movimiento hacia arriba.

Compuertas de Sector. Su forma es similar a las compuertas radiales pero el movimiento de apertura es de arriba hacia abajo, dejando libre el paso para que el agua se vierta por encima de la compuerta.

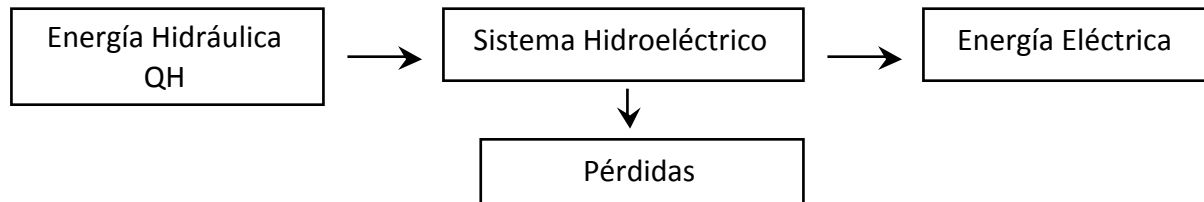
Compuertas basculantes. Llamadas también clapeas, formadas por un tablero articulado en su arista de aguas arriba que puede abatirse dando paso al agua. Estas compuertas se abren automáticamente por un diferencial de presión aguas arriba y se cierran cuando el nivel aguas abajo supera el nivel aguas arriba o cuando el nivel aguas arriba alcance el nivel deseado de almacenamiento.

Los desagües de fondo o medio fondo utilizan válvulas y las compuertas como elementos de cierre. Las válvulas se emplean en instalaciones con caudales moderados o medios, pueden ser de aguja, mariposa, compuerta o de chorro hueco.

2.3. IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES Y REQUERIMIENTOS DE MEDICIÓN EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Un sistema hidroeléctrico transforma la energía hidráulica de un volumen de agua situado a cierta altura, en energía eléctrica.

Figura 2.1 Esquema de la producción de energía hidroeléctrica.



La potencia eléctrica que se obtiene en una Central es directamente proporcional a la altura del salto de agua y al gasto instalado (en este documento gasto se entiende como el paso de una unidad de volumen de agua por unidad de tiempo). Estas magnitudes son fundamentales a la hora de evaluar la eficiencia de la unidad generadora.

Se denomina gasto instalado o turbinado de una Central al caudal total que absorberán todas las turbinas instaladas en su funcionamiento normal (suma de los caudales nominales de todas las turbinas) este caudal no puede ser ni el caudal máximo registrado en el lugar ni el caudal mínimo. En el primer caso el rendimiento de la Central sería bajo al funcionar las turbinas durante mucho tiempo lejos del régimen nominal que generalmente es el de máximo rendimiento; siendo además mayor el costo de una central con equipo sobredimensionado; en el segundo caso quedaría sin utilizarse durante mucho tiempo gran parte del caudal disponible.

La función de una central hidroeléctrica es utilizar la energía potencial del agua almacenada y convertirla, primero en energía mecánica y luego en

eléctrica. El agua es retenida por medio de presas y luego es conducida por túneles y conductos de alta presión hacia lugares más bajos, al llegar a la planta generadora, el agua lleva ya una enorme cantidad de energía, la que se aprovecha para hacer girar turbinas que accionan el alternador y produce la corriente eléctrica. Dependiendo de la magnitud de caída: alta, mediana o baja se utilizan turbinas Pelton, Francis o Kaplan respectivamente.

Un sistema hidroeléctrico debe tener la **máxima eficiencia**, para lo cual es necesario tomar en cuenta:

- Qué la Carga H que representa la altura sobre el nivel del mar sea utilizado en una o más Centrales aguas abajo. En la realidad actual, cuando la energía es costosa, es necesario aprovechar toda la caída de potencial de un cauce.
- Qué las eficiencias de las obras de toma y de conducción sea máxima.
- Qué la eficiencia de la conversión de la turbina que convierte la energía hidráulica en mecánica sea óptima.

- d) Qué la eficiencia del generador eléctrico que transforma la energía mecánica en eléctrica también lo sea.
- e) Finalmente, la eficiencia de la transmisión eléctrica desde el punto de generación hasta los puntos de consumo debe ser optimizada.

Es en este contexto en que la medición del gasto en Centrales Hidráulicas tiene su mayor importancia, ya que evaluar la eficiencia de las máquinas hidráulicas incluye la evaluación de la potencia mecánica y la potencia hidráulica:

$$\eta = \frac{P}{Ph} \quad (2.1)$$

A su vez, la potencia hidráulica se evalúa como: $(P_h = E(\rho Q) \pm \rho P_h)$ lo cual como se aprecia incluye la evaluación del gasto turbinado Q , la potencia mecánica se evalúa como $[P = Pa + Pb + Pc + Pd + Pe - Pf]$ y de la velocidad de rotación (n). Donde:

- P_a = Potencia eléctrica
- P_b = Pérdidas mecánicas y eléctricas
- P_c = Pérdidas en el generador
- P_d = Pérdidas en elementos de rotación
- P_e = Potencia suministrada a cualquier máquina acoplada
- P_f = Potencia eléctrica equipos auxiliares

Por lo tanto, para la producción de energía como por cuestiones ambientales, mejorar la producción de energía por unidad de medida en cada uno de los elementos del sistema de producción de energía es prioritario.

Por otro lado, en virtud de la emisión de la Ley de Contribución de Mejoras por Obras Hidráulicas en el año de 1990 que establece las mejoras por obras públicas federales de infraestructura hidráulica a las que se refiere dicha ley son las que permiten usar, aprovechar, explotar, distribuir o descargar aguas nacionales, sean superficiales o del subsuelo, así como la reparación, terminación, ampliación y modernización de las mismas. El Artículo 2 **establece que los sujetos obligados** al pago de la contribución de mejoras establecidas en esta ley, son las personas físicas o morales que se benefician en forma directa por las obras públicas federales de infraestructura hidráulica construidas en los términos del artículo anterior. Se entiende que las personas se benefician en forma directa de las obras públicas federales, cuando pueden usar, aprovechar, explotar, distribuir o descargar aguas nacionales, al utilizarse dichas obras.

Mientras que el Artículo 6 establece la manera en que se determina la contribución de mejoras por el uso de agua, de acuerdo al tipo de obras: ya sean hidroagrícolas u obras hidráulicas, en el apartado II se establece la manera en que se hará el pago de contribuciones por generación hidroeléctrica:

“...II.-Tratándose de otro tipo de obras hidráulicas, se determinarán los montos de contribución a pagar por el conjunto de contribuyentes, dividiendo el valor recuperable de la obra entre el número de semestres que comprende el plazo máximo legal, o en su caso, el plazo otorgado a los usuarios.

El monto de la contribución determinada, se actualizará por el transcurso del tiempo y con motivo de los cambios de precios en el país, para lo cual se aplicará el factor de actualización a las cantidades que se deban actualizar ...”

Mientras que en el artículo 7 se establece como determinar el monto a pagar dependiendo del tipo de obra, en este caso se lee:

“...II.-Tratándose de acueductos o sistemas de suministro de agua en bloque realizados exclusivamente con inversión federal, el monto de la contribución obtenida en el artículo anterior se dividirá entre la capacidad de suministro del sistema, **medida en metros cúbicos por segundo**, y el cociente obtenido se multiplicará por el volumen asignado o concesionado por la Comisión Nacional del Agua a cada usuario del sistema, **medido en metros cúbicos por segundo** y el resultado será el **monto de la contribución** a cargo de cada contribuyente..

La Comisión Nacional del Agua revisará anualmente las bases para determinar la contribución a que se refiere este artículo, modificando en su caso, el monto de la contribución a cargo de los usuarios en la medida en que se modifique la cobertura de usuarios de los sistemas hidráulicos conforme lo permitan las capacidades máximas de suministro de las obras públicas federales de infraestructura hidráulica.

En el caso de obras públicas federales de infraestructura hidráulica que total o parcialmente se uti-

lizan para beneficio en la generación hidroeléctrica de entidades de la administración pública, para la prestación de servicios públicos de electricidad el monto de la contribución a que se refiere la presente Ley se determinará, en sustitución de lo previsto en este artículo, mediante el procedimiento que se desprende de aplicar el 25% a los ingresos que se perciban por el suministro o venta de los kilowatts/hora generados como consecuencia de dichas obras. En el caso de que la obra sea exclusivamente para generación hidroeléctrica, el pago se hará como se establece en la fracción II del artículo anterior...”

En lo dicho anteriormente resulta clara la importancia de la medición del agua en el sector hidroeléctrico no sólo por cuestiones de hacer más eficiente la producción de energía eléctrica sino por los costos de uso de agua que en el caso de México se pagan a la Comisión Nacional de Agua

2.4. REQUERIMIENTOS DE MEDICIÓN EN EL SECTOR HIDROELÉCTRICO

Cuantificar la eficiencia real de un equipo hidráulico está en relación directa a cuantificar en forma más exacta el gasto turbinado, es así que, entre más exacta sea la medición del gasto turbinado más real será la eficiencia obtenida, es por ello, que los requerimientos de medición son más altos que en la medición de gastos en obras hidroagrícolas.

La norma IEC-60041 establece que cuando se adquiere una turbina hidráulica, ésta debe contar con garantías de funcionamiento, cubriendo al menos la potencia, gasto turbinado, eficiencia, velocidad máxima de rotación instantánea, presión mínima/máxima instantánea y embalamiento máximo en estado estacionario. Las pruebas de aceptación en máquinas hidráulicas tienen el propósito de comparar el funcionamiento hidráulico alcanzado por éstas y las garantías entregadas por el proveedor. Estas incluyen la evaluación de los valores absolutos de la energía hidráulica específica, gasto turbinado, potencia mecánica, velocidad de rotación y eficiencia.

En la literatura se aconseja que dado que la medición de caudales en Centrales Hidroeléctricas se puede ser llevar a cabo con la exactitud deseada solamente cuando los requisitos del método seleccionado se satisfagan, entonces las partes involucradas deben seleccionar el(los) método(s) a ser usado en las pruebas de aceptación de común acuerdo e incluso que debiera ser prevista antes, en la etapa de diseño de la planta, ya que en ocasiones proveerlo en las etapas posteriores o finales puede hacer que el sistema de medición sea muy caro o aún que no se pueda instalar:

De acuerdo al estándar IEC-60041, la selección del método de descarga puede influir en la organización y duración de las pruebas, a su vez algo que pudiera afectar la selección del método es:

- Limitaciones impuestas por el diseño de la central;
- Costo de la instalación y equipo especial;
- Restricciones debidas a las condiciones de operación de la planta, por ejemplo, el drenaje del sistema, carga constante o gasto de operación, etc.

La misma norma establece que las pruebas de aceptación del caudal se deben llevar a cabo usando un método absoluto, aun cuando se puede recurrir a métodos relativos (pruebas índice) con las cuales se puede obtener valiosa información adicional para la planta relacionada con las garantías, eficiencia, funcionamiento, operación y optimización.

También considera que solamente el método de área-velocidad por medio de molinetes o tubos de Pitot, y en cierta medida el método acústico (cuando se usan varias trayectorias) proporcionan información de los patrones de flujo en la sección.

Los métodos relativos o métodos secundarios se usan para obtener valores relativos del caudal, si antes son calibrados in situ mediante la comparación con métodos absolutos.

En este documento se ampliarán los métodos de medición en Centrales Hidroeléctricas a la medición con molinetes y el método de presión-tiempo conocido como de Gibson y al método acústico, los primeros porque son ampliamente usados y validados mientras que el último incorpora de

manera más completa los recientes desarrollos en electrónica aplicados a la medición.

2.5. INCERTIDUMBRE Y REQUISITOS DE LA MEDICIÓN

Los valores reales de las incertidumbres sistemáticas y aleatorias deberán ser evaluados tomando en cuenta las condiciones enteras del sistema de medición y las de operación. De hecho, más adelante se presenta una metodología propuesta por (Tamari, 2007) en la que se analiza detalladamente cada concepto de la medición asociado a las incertidumbres mencionadas al inicio del párrafo.

En general, los valores reportados en la literatura de la incertidumbre sistemática se pueden tomar como una guía. La medición de las dos principales variables: gasto volumétrico y eficiencia, se lleva a cabo cuando el equipo es instalado por el proveedor y éste debe entregar las garantías mencionadas anteriormente para lo cual se llevan pruebas de aceptación o también, después de alguna modificación en el diseño o de alguna reparación. Después que las turbinas operan durante cierto tiempo, las curvas de eficiencia del equipo pierden vigencia por lo que el gasto se infiere a través de las curvas de eficiencia-gasto obtenidas mediante métodos relativos como el Winter-Kennedy o Gibson. Este último requiere aparatos particularmente buenos y un equipo técnico especializado, para realizar ensayos, comprobar y

estimar las incertidumbres en los resultados. En condiciones adecuadas se puede considerar que tiene una incertidumbre total de $\pm 1.8\%$ a $\pm 2.3\%$ si lleva a cabo de manera tradicional y de $\pm 1.5\%$ a $\pm 2\%$ si se usan métodos numéricos y equipos de adquisición y procedimientos de datos, en ambos casos con un nivel de confianza de 95%.

Los métodos secundarios, pueden ser considerados como parte de la recepción de la Central sólo cuando estén calibrados por un método primario. Si se llegan a utilizar, la incertidumbre total del método de calibración viene a ser la incertidumbre sistemática de este tipo de medición, razón por la cual la incertidumbre de estos métodos es más alta del 2.3%.

Lo más nuevo en instrumentación en Centrales Hidroeléctricas incluye la medición ultrasónica, aunque la norma IEC-60041 no la acepta como un tipo de medición primaria, su uso es intensivo y extensivo en la industria, precisamente por los buenos resultados que se observan al compararlos con los métodos tradicionales. Los métodos acústicos han ido avanzando positivamente debido al constante mejoramiento tecnológico. Siempre y cuando cumplan con los requisitos de instalación los cuales están más relacionados con el fenómeno físico que con la electrónica del medidor, los resultados son ampliamente satisfactorios; y se puede considerar que se puede obtener una incertidumbre del $\pm 1\%$ a $\pm 2\%$ en casos conservadores, aunque en la literatura circulan trabajos en los que se afirman se han conseguido incertidumbres menores al $\pm 1\%$.

Después de lo mencionado anteriormente se puede concluir que los requerimientos en cuanto a **incertidumbre** total es del orden del $\pm 1\%$ a $\pm 2\%$ con un **nivel de confianza del 95%** como mínimo.

Otro requerimiento de la medición en Centrales Hidroeléctricas es que los resultados de la medición puedan ser **monitoreados en tiempo real**. El tiempo normal de monitoreo lo decide el organismo contratante de acuerdo a su necesidad, no obstante, es una práctica común que sea cada 15 segundos.

Por ejemplo, sí se aplica el método de Winter – Kennedy para obtener caudales el resultado obtenido (lecturas puntuales) se extrapola en el tiempo, es decir, el caudal y la eficiencia para cierta carga y gasto circulante se extrapolan a otros gastos y cargas hidráulicas que caen dentro de los intervalos para los cuales se tienen resultados de ensayos. Mientras que con la medición por métodos ultrasónicos se adquieren datos tanto de las variables de medición (carga hidráulica H , nivel del embalse, nivel del desfogue, apertura del distribuidor, etc.) como de las variables calculadas (potencia mecánica, potencia eléctrica, gasto, eficiencia, etc.) y éstas pueden ser visualizadas en tiempo real, en vista de ello, es posible utilizar esta información como una base sólida en la toma de decisiones no sólo en cuanto a la operación de una central sino de todo el sector de distribución eléctrica.

Los datos obtenidos durante la medición en tiempo real se respaldan electrónicamente y son

enviados periódicamente a las oficinas centrales para su almacenamiento, distribución y análisis pertinentes.

El rango de medición de gastos en centrales con gran potencial hidráulico varía de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ - $300 \text{ m}^3/\text{s}$, las de mediana capacidad desde $50 \text{ m}^3/\text{s}$ - $150 \text{ m}^3/\text{s}$ mientras que las de menor capacidad van $30 \text{ m}^3/\text{s}$ - $75 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por otro lado, cualquiera que sea el método para que una medición se considere válida es necesario que el flujo esté en estado permanente o cuasi-permanente cada vez que se lleve a cabo una prueba. También se recomienda que durante la prueba se vayan graficando los caudales medidos contra tiempo para evaluar la naturaleza y extensión de posibles perturbaciones.

Se recomienda evitar fugas tanto como sea posible, infiltraciones o desvío de flujo, antes o en la sección de medición durante el tiempo que se esté llevando a cabo las pruebas.

2.6. MÉTODOS DE MEDICIÓN DIRECTA

2.6.1 Método área-velocidad por medio de molinetes

La medición por éste método se lleva a cabo utilizando molinetes localizados en puntos específicos en una sección transversal apropiada ya sea de un

canal abierto o bien, de un conducto cerrado. Las mediciones de la velocidad que se leen simultáneamente en los puntos asignados se integran en la sección de medición mencionada, de esta manera se obtiene el caudal total. Es altamente recomendable que el agua esté lo suficientemente limpia, de tal manera que la materia en suspensión o disuelta no afecte la exactitud de las lecturas de los molinetes durante la prueba.

La norma IEC600-41 establece que se pueden usar algunas técnicas de integración para calcular el gasto suponiendo que la distribución de velocidades se aproxime mucho a leyes conocidas, especialmente en la vecindad de las fronteras sólidas. Si se usan estas técnicas es necesario seleccionar una sección de medición donde esta hipótesis sea probable que se cumpla completamente.

Si se usa en un canal abierto, éste debe ser un canal artificial o una sección transversal bien definida. Las corrientes naturales no se consideran adecuadas para las pruebas que se llevan a cabo en Plantas Hidroeléctricas.

Las mediciones con cada arreglo de molinetes deben durar al menos 2 minutos. Si se presentan variaciones de velocidad entonces cada prueba debe incluir al menos cuatro ciclos de estas variaciones. Esto influye en la duración del programa completo de ensayos. La duración de las variaciones se puede determinar mediante observaciones del cambio en la velocidad de los molinetes de 10 -15 minutos, para al menos dos condiciones típicas de operación.

El número de molinetes debe ser suficiente para asegurar que el perfil de velocidades se determine satisfactoriamente sobre toda la sección de medición. No se permite que haya sólo un punto de medición.

Se deben usar al menos 13 puntos de medición en una tubería circular. Uno de los cuales debe ser el punto central de la sección. El número de medidores por radio, Z , excluyendo el punto central puede determinarse a partir de la relación siguiente:

$$4\sqrt{R} < Z < 5\sqrt{R} \quad (2.2)$$

donde R , es el radio interno del conducto. Para un número dado de molinetes, es preferible aumentar el número de radios que incrementar el número de molinetes por radio, pero se debe tener cuidado para evitar una obstrucción excesiva.

La obstrucción central se puede reducir si los radios se apoyan de la pared del conducto hacia el centro, si se hace esto, solamente es necesario extender un brazo hasta el centro del conducto. Se obtiene una pequeña ventaja midiendo sobre más de 8 radios o en más de ocho puntos por radio, sin contar el punto central.

Se deben usar al menos 25 puntos de medición en una sección rectangular o trapezoidal. En algunos lugares éstos puntos se obtienen dividiendo la sección total en 5 secciones verticales y 5 horizontales. Si es probable que la distribución de velocidades no sea uniforme, el número de puntos de

medición, Z , deberá ser determinado a partir de la siguiente expresión:

$$24\sqrt[3]{A} < Z < 36\sqrt[3]{A} \quad (2.3)$$

En donde A , es el área de la sección de medición en metros cuadrados.

Si el conducto o canal está dividido en varias secciones, las mediciones deberán hacerse simultáneamente en todas las secciones.

2.6.2 Requisitos generales y calibración

Solamente se usarán molinetes de propela. El impulso eléctrico de la rotación de la hélice debe ser transmitida por cables hacia el contador y el dispositivo de adquisición de datos, de tal manera que la velocidad de rotación instantánea pueda ser vista antes y después de la prueba. Los molinetes deben cumplir los requisitos de la norma ISO 2537 "Hydrometry – Rotating element current-meters". Todos los molinetes deben ser capaces de resistir la presión del agua y el tiempo de sumergencia sin cambiar su calibración. Puede ser necesario reducir dicho tiempo donde el agua es dura.

Las propelas de los molinetes no deben ser menores de 100 mm de diámetro excepto para las mediciones en la periferia donde se usan molinetes menores de hasta 50 mm. La distancia desde el borde de salida de la hélice hacia el borde delantero de la varilla de fijación debe estar al menos a 150 mm.

El ángulo entre el vector de velocidad local y el eje del molinete no debe exceder 5°. Cuando no se pueden evitar ángulos mayores, la compensación propia de las hélices que miden directamente el componente axial de la velocidad deberá ser usada, pero solamente para ángulos para los cuales hayan sido diseñadas y calibradas.

La respuesta de un molinete puede ser afectada por las componentes axiales y transversales de la turbulencia del flujo, y este efecto no se toma en cuenta durante la calibración porque ésta última es llevada a cabo cuando el flujo está en reposo. Así pues, se recomienda seleccionar el tipo de hélices o propelas que sean menos sensibles a la turbulencia (con un alto momento de inercia).

Los medidores deben ser calibrados con el mismo tipo de fijación que se usará durante la prueba. Si los medidores se montan en varillas de fijación durante la calibración, éstas deberán estar al menos 150 mm bajo el eje de la hélice. Se deben calibrar varios molinetes montados al mismo tiempo a la misma distancia y de la misma manera en que serán usados durante la prueba.

El rango de calibración de velocidades, deben en lo posible cubrir el rango de las que se presentarán en las pruebas. Un rango normal de velocidades varía de 0.4 m/s a 6 m/s y aún 8 m/s, el límite superior frecuentemente es limitado por la vibración. Si se requiere extrapolar la curva más allá del 20% de la velocidad máxima calibrada, esto será posible si las partes interesadas llegan a un acuerdo a

sabiendas que la incertidumbre en la medición se incrementa.

La incertidumbre sistemática estimada a un nivel de 95% de confianza, debida a la calibración del medidor, normalmente debe ser menor al 0.5% para velocidades entre 0.4 m/s y 6 m/s. Para velocidades mayores o menores se espera una incertidumbre mayor a la señalada, dependiendo de las características de la estación de calibración y de las hélices. El tiempo de calibración depende de la duración y el tipo de pruebas a las que serán sometidos los medidores. Se puede tomar como guía 300 horas de uso en condiciones favorables. Solamente es necesario calibrar los medidores después de las pruebas si éstos presentan algún daño.

2.6.3 Uso en estructuras/obras de toma corta

Se define como corta a una estructura que tenga una longitud recta menor a 25 veces su diámetro. No hay un estándar que trate de mediciones en sitios en donde no se tenga una longitud adecuada, especialmente si éstos se encuentran en plantas con baja carga hidráulica. Pudiera servir de guía la norma ISO 3354:2008 Measurement of clean water flow in closed conduits -- Velocity-area method using current-meters in full conduits and under regular flow conditions, especialmente si se lleva a cabo la medición en secciones transversales rectangulares también se aplican los requisitos generales del punto 4.4.2. La principal dificultad con este tipo de medición parte del hecho de que

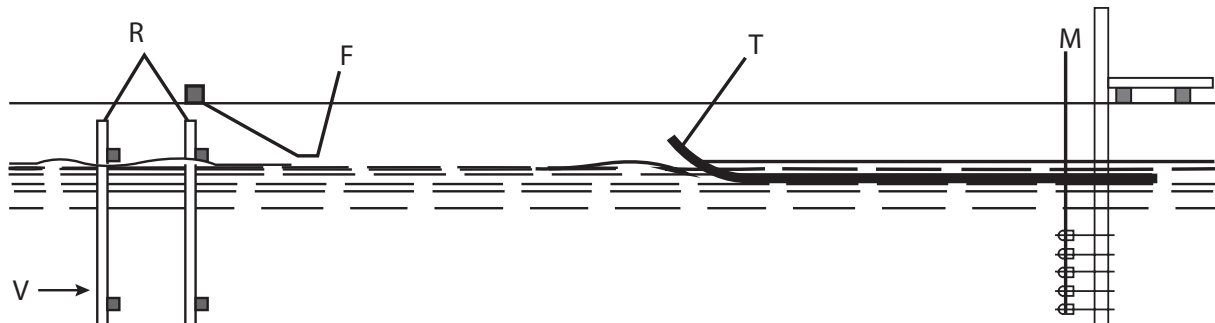
la sección de medición se deberá colocar en un tramo corto y convergente con una distribución de velocidades desigual e inestable a la vez que en presencia de flujo oblicuo a los medidores. Se debe intentar remediar esas dificultades ya sea mediante el uso de un acondicionador de flujo o usando técnicas de medición especiales, las cuales se describen brevemente en la norma IEC 60041 en el apartado 10.2.4.3.

2.6.4 Método área-velocidad por medio de molinetes en canales abiertos

Como ya se apuntó anteriormente, éste método se puede aplicar solamente en canales artificiales, usualmente con secciones rectangulares o trapeciales, sin embargo, si es un canal compuesto también se puede instrumentar por secciones.

Se requiere que la sección de medición sea más alta o ancha que 0.8 m o bien, 8 veces más grande que el diámetro de la hélice del correntómetro. Si es necesario que los patrones de flujo sean más uniformes, se puede acondicionar la sección de medición con dispositivos como aquietadores, bastidores, techos sumergidos u otros. El punto de medición debe estar al menos a 10 veces el diámetro aguas abajo del último dispositivo excepto el techo sumergido, el cual sirve para definir mejor la sección. Algunos de los dispositivos mencionados anteriormente son efectivos para suprimir la superficie agitada, lo cual incrementa la exactitud de la medición del tirante hidráulico.

Figura 2.2 Dispositivos para estabilizar el flujo en un canal abierto.



R = bastidor
 F = plataforma flotante
 T = cubierta sumergida
 M = sección de medición

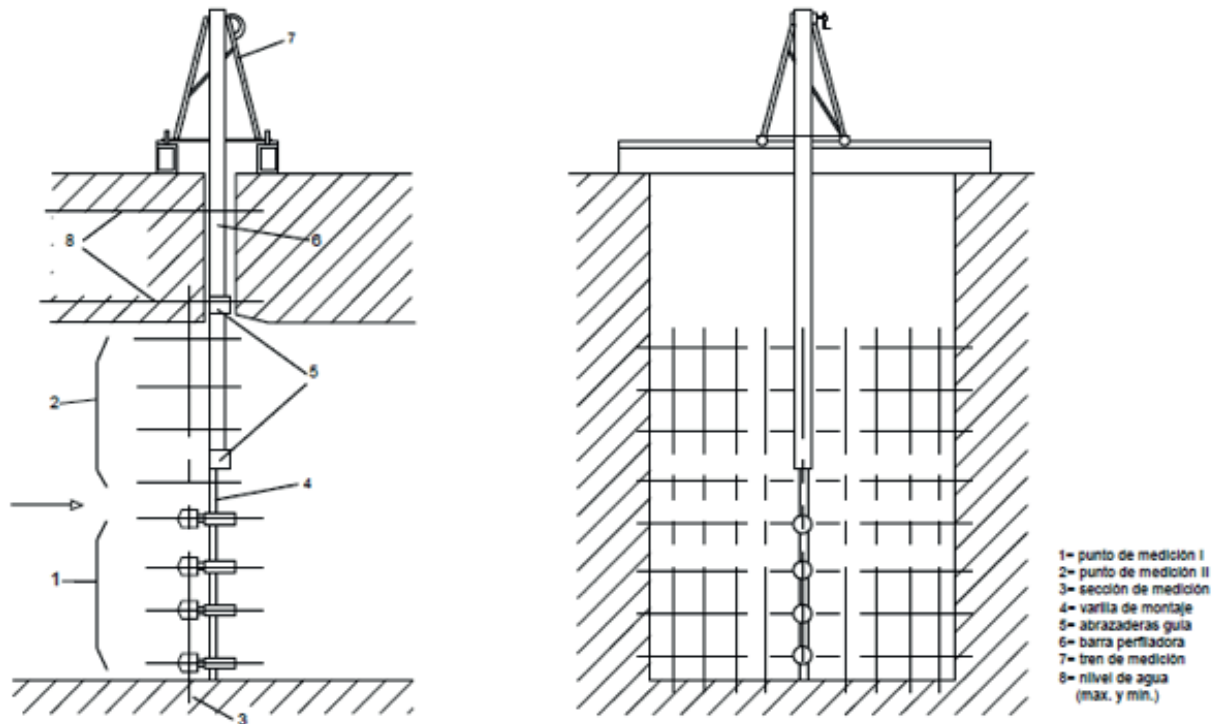
En cuanto a la distribución de los puntos de medición aplican los criterios 4.4.1 y 4.4.2, mencionados arriba, en caso de que haya zonas con gradientes de velocidad más pronunciados como en: el fondo, paredes o superficie, dichos puntos deben colocarse más cercanos unos de otros, de tal forma que la diferencia de velocidades entre dos puntos vecinos no exceda el 20% de la velocidad más grande de ambos puntos. El espacio mínimo del correntómetro no debe ser menor a $d+30$ mm, donde d , es el diámetro externo de las hélices. En cuanto a los que se colocan cerca de las paredes, éstas deben estar una distancia entre $0.75 d$ como mínimo y 200 mm como máximo por arriba del eje del medidor. Los ejes de los correntómetros que se ponen más cerca de la superficie libre deberán estar al menos una vez el diámetro de la propela abajo de ésta.

Los medidores se deben sujetar de forma que queden rígidamente unidos a las varillas de mon-

taje con los ejes de las hélices perpendiculares al plano de la sección de medición. La rigidez de la estructura de montaje debe ser de tal manera que evite que las vibraciones afecten al medidor; también debe ofrecer un arrastre e interferencia mínimos con la operación del correntómetro.

Los medidores se pueden colocar en forma de una batería fija formada por varillas de montaje paralelas sobre la totalidad de una sección de medición. En canales con sección transversal pequeña, la manera de colocar los medidores descrita anteriormente, puede producir una significativa obstrucción del área de medición. En su lugar se puede utilizar un marco montado sobre un tipo de grúa viajera en donde los medidores se pueden colocar vertical u horizontalmente y éste se puede mover de una estación a otra en una sección de medición.

Figura 2.3 Barra vertical con correntómetros montada sobre una grúa viajera.



De acuerdo a lo que se ha venido diciendo hasta aquí, para llevar a cabo cualquier medición es necesario que el flujo se encuentre en estado permanente por largo tiempo, por lo tanto, cualquier variación en la velocidad media se debe monitorear mientras dure la prueba por al menos un medidor fijo o por medio de una medición índice de la descarga. Existen varios métodos para determinar el tirante hidráulico o profundidad del agua, ésta no debe exceder $\pm 1\%$ de la profundidad promedio y al igual que la velocidad, también se debe monitorear durante toda la prueba.

Para calcular el caudal o gasto se usa el método general que se encuentra en el apartado 8.3 de

la norma ISO 3354 el cual se aplica para aforar el caudal en conductos rectangulares, en este apartado se usa junto con las mediciones. La fórmula para extrapolar las velocidades en la zona periférica:

$$V_x = V_a \left(\frac{x}{a} \right)^{1/m} \quad (2.4)$$

Donde,

- v_x = velocidad a una distancia "x" de la pared más cercana
- v_a = velocidad en un punto de medición considerado extremo (a una distancia "a")
- m = coeficiente que depende de la rugosidad de pared y de las condiciones de flujo.

Se aplica en los puntos cercanos a las paredes y el fondo de la sección de medición, pero no cerca de la superficie libre en donde el perfil de la velocidad se extrapola por continuidad. Si se tienen secciones transversales trapezoidales, la primera

integración siempre se hace a lo largo de las líneas verticales (Figura 2.4) y la segunda integración dibujando el producto sobre el ancho de la sección del canal

Figura 2.4 Determinación de las descargas parciales por integración gráfica de las velocidades locales medidas.

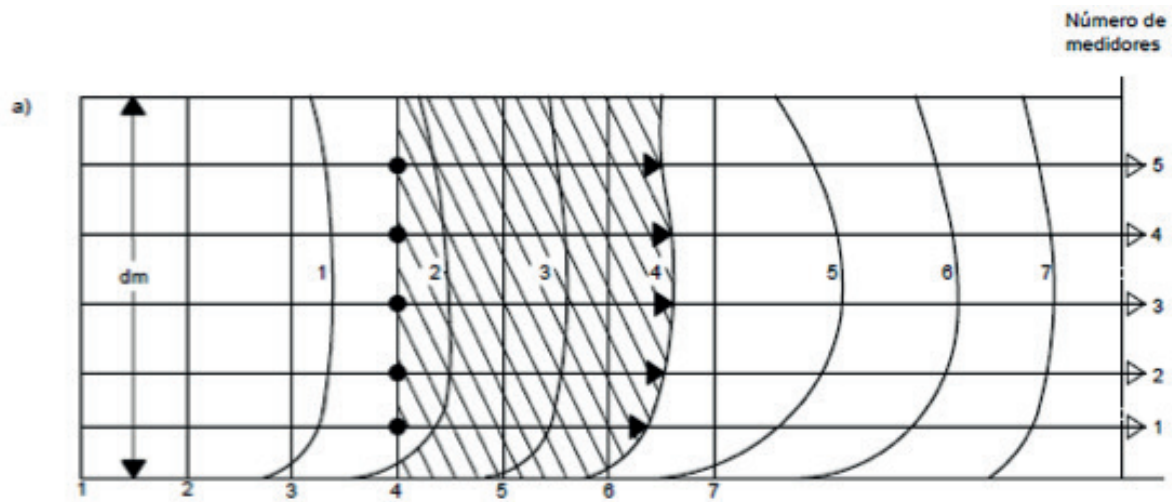
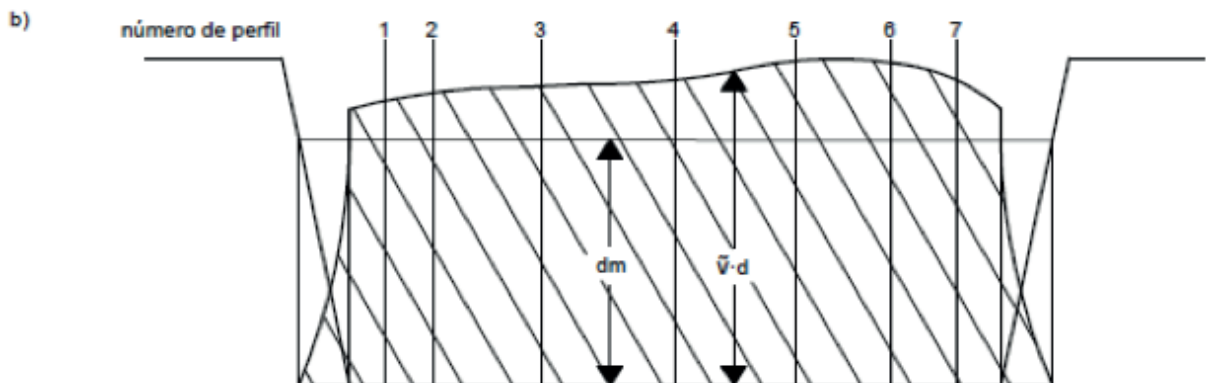


Figura 2.5 Determinación de la descarga total por integración gráfica de las descargas parciales obtenidas en Figura 2.4.



$\bar{v}$, es la velocidad media sobre una línea vertical.
 d , es la profundidad del agua sobre la misma línea vertical.

En cuanto a la incertidumbre de la medición, ésta es llevada a cabo por medio de aforos con molinetes y depende de factores relativos al flujo como: distribución de la velocidad, remolinos o flujo oblicuo, turbulencia, fluctuaciones periódicas; relacionados a la calidad de las mediciones (número y distribución de puntos de medición y efectos de obstrucciones) y del método de cálculo del caudal.

A continuación, se muestra una lista en la que se muestran la incertidumbre sistemática con un 95% de confianza en ciertas obras hidráulicas, siempre y cuando la medición se lleve a cabo en condiciones apropiadas y con una buena técnica de medición:

Conductos cerrados	± 1.0 a $\pm 1.5\%$
Entradas en obras de toma tipo acampanadas	± 1.0 a $\pm 2.0\%$
Entradas en obras de toma sin campana	± 1.2 a $\pm 2.0\%$
Canales abiertos con sección rectangular	± 1.2 a $\pm 2.0\%$
Canales abiertos con sección trapezoidal	± 1.4 a $\pm 2.3\%$

2.6.5 Método presión-tiempo

Método para medir caudales, frecuentemente conocido como Método de Gibson el cual está basado en la segunda ley de Newton y en leyes de la mecánica de fluidos. Proporciona la relación entre la fuerza debida a la diferencia del cambio

de presión entre dos secciones y la aceleración o desaceleración de la masa de agua entre esas secciones debido al movimiento de una compuerta o álabe. En teoría, este método es válido para turbinas y bombas cuando están en operación o para cuando se abre o se cierra una compuerta, en la práctica solamente se usa cuando en una turbina que está operando el caudal se interrumpe repentinamente.

En general este método se usa para determinar el gasto que estaba circulando dentro de un tramo de tubería a presión, justo antes de cerrar una compuerta aguas abajo. Es una práctica común que este método se lleve a cabo cuando se da mantenimiento a las unidades de presión. Por otro lado, las conducciones en donde se aplique este método no deben tener bifurcaciones (Tamari *et al.*, 2010).

El método de Gibson se fundamenta en ciertas suposiciones:

1. La tubería trabaja a presión.
2. La tubería es rígida (el área A permanece constante).
3. El agua se comporta como un fluido incompresible (ρ es constante).
4. Las pérdidas de presión por fricción entre el agua y la tubería son proporcionales al valor cuadrado del gasto en cualquier momento.
5. No hay asimetría en el flujo del agua dentro de la tubería (es decir, las líneas de corriente son siempre paralelas entre ellas y con una simetría axial).

6. Toda la masa de agua en el tramo de tubería considerado se decelera de la misma manera.
7. El agua fluye siempre en el mismo sentido.

Variantes del Método de Gibson.

La norma IEC 60041 describe tres variantes, sus requisitos del sistema de medición y cálculo. Se diferencian dependiendo de la instrumentación utilizada y las técnicas de integración, sin embargo, el principio sigue siendo el mismo.

Variante 1. “Método Diferencial de presión-tiempo”. El cambio de presión diferencial entre dos secciones de medición, separados por una longitud > 10 m, solo es afectado por los cambios en la fricción y de cantidad de movimiento cinético entre estas dos secciones. Adicionalmente se debe cumplir que el producto de la distancia entre las dos secciones de medición y la velocidad media en la tubería a plena carga, sea $> 50 \text{ m}^{2/s}$.

Variante 2. “Método Diagramas separados”. En esta variante del método presión-tiempo, los cambios en la presión de medición en dos secciones transversales del conducto se registrarán por separado mediante dos transductores de presión manométricos, en particular, la distancia entre las dos secciones debe ser > 50 m.

Variante 3. “Método de diagramas separados comparando con el nivel del agua”. En esta variante del método presión-tiempo, los cambios en la presión

de medición en dos secciones transversales del conducto se registrarán por separado utilizando sólo una sección de medida, comparándola con la superficie libre del agua, sin embargo, esta variante sólo puede utilizarse si hay una torre de oscilación para medir el tirante y además la geometría de la tubería desde el embalse hacia la sección de medición no debe ser demasiado compleja (forma abocinada), no debe superar el 2% de la longitud total.

Las variantes del método sólo difieren en la instrumentación y en la técnica de cálculo de la integral presión-tiempo, también por la adquisición de datos separados o diferenciales.

Para que el método de Gibson sea válido, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- a) No exista superficie libre en algún punto/zona intermedia entre los dos puntos de medición.
- b) El cierre debe ser continuo y total (al final $Q=0$). Si hay fugas o desviaciones de gasto (por ejemplo: sistema de enfriamiento) este debe ser medido o estimado utilizando un método independiente con una precisión del 0.2% y debe ser menor al 5% del gasto circulante.
- c) Es recomendable instalar al menos cuatro tomas de presión en cada sección de medición y en un plano perpendicular al eje del conducto, en caso que el conducto tenga un diámetro menor a 4 m se pueden utilizar únicamente dos tomas.
- d) En conductos circulares, las tomas de presión se deben colocar de tal manera que haya el

mismo ángulo entre cada toma, sin que alguna toma quede justo en el fondo o en la parte superior de la sección de medición. Para conductos rectangulares las tomas de presión se deben colocar a $\frac{1}{4}$ de distancia unas de otras. En ningún caso una toma de presión debe ser colocada a una distancia menor a dos veces el diámetro de cualquier irregularidad en el conducto.

- e) En lo posible los conductos deben ser rectos y tener una sección transversal constante además de no presentar alguna irregularidad significativa.
- f) Tanto la sección transversal del conducto como la longitud entre los puntos de medición deben ser medidos en campo con la precisión necesaria para determinar el factor de tubo F con una exactitud de 0.2%. Los planos cons-

Figura 2.6 Método diferencial de presión-tiempo.

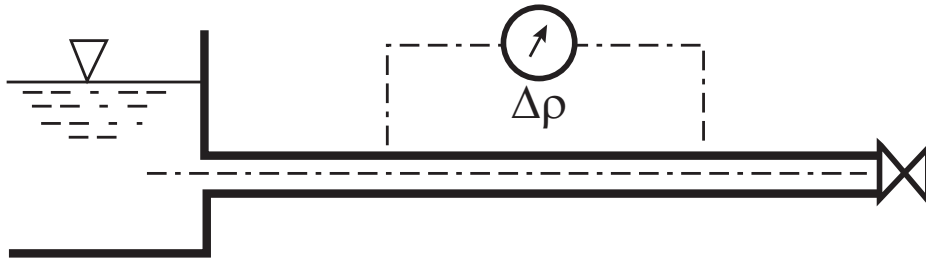


Figura 2.7 Método de diagramas separados.

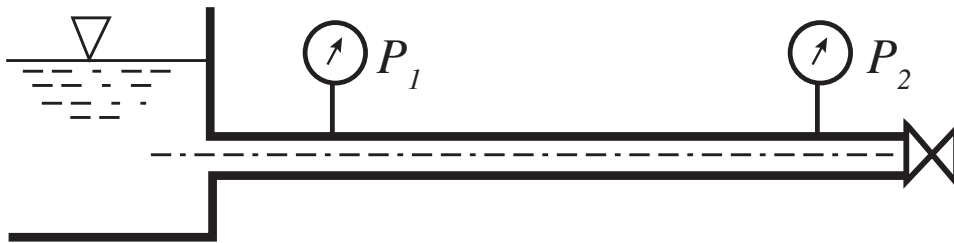
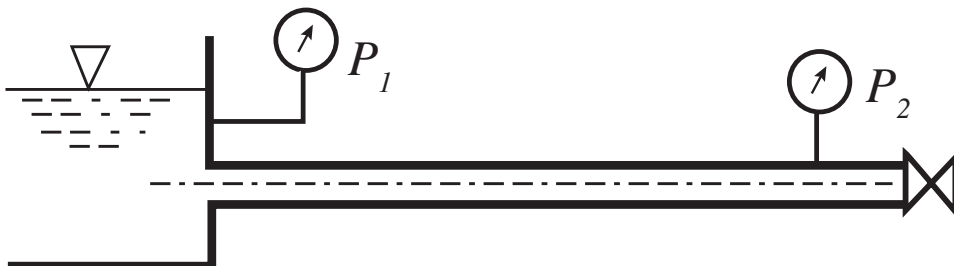


Figura 2.8 Método de Diagramas separados comparando con el nivel de agua.



- tructivos se pueden usar solamente para cotejar las mediciones hechas en campo.
- g) Los tiempos de registro antes del comienzo y después del cierre del obturador/compuerta no deben ser menores a 20 s cada uno.
- h) Se obtiene el registro presión-tiempo, de la onda de presión cerrando el obturador de forma continua.
- i) La medición se puede hacer mediante manómetros diferenciales de mercurio o bien por medio de transductores de presión.
- j) La medición de la suma de las pérdidas de presión entre dos secciones de la presión dinámica cuando se opera a descarga máxima no debe exceder el 20% del cambio promedio en la presión diferencial registrado durante el cierre del obturador/compuerta/álabe.
- k) El transductor de presión diferencial o dispositivo de Gibson se debe colocar de tal manera que se tengan las mismas longitudes de conexión entre los piezómetros que estén aguas arriba y aguas abajo.
- l) Todas las conexiones de las tomas de presión y tuberías se deben apretar para evitar que haya fugas también se debe verificar que todas las tuberías y las tomas de presión y el aparato de presión-tiempo deben estar libres de aire. Se deben hacer inspecciones periódicas de las tuberías y purgarlas cada vez que se va a llevar a cabo cada prueba.
- m) En cada prueba para determinar el caudal es necesario medir la temperatura del agua y del mercurio si es que se usa el aparato de Gibson, con una exactitud de $\pm 1^\circ$.

- n) Antes de cada prueba debe hacerse una calibración del sistema de medición. En cada serie se tiene que comprobar el punto cero del sistema de medición y la calibración cuando se utilizan transductores de presión.

Los siguientes elementos deben ser anotados en cada serie:

- Los diagramas de calibración del dispositivo de medición de la presión antes y después del cierre de la válvula.
- Los diagramas de presión-tiempo antes, durante y después de este cierre (por lo menos cuatro ondas de presión se registrarán después de la finalización del cierre).

Fundamentos teóricos del Método de Gibson.

La energía total del agua se puede descomponer en tres términos:

$$E_w = E_h + E_p + E_c \quad (2.5)$$

E_h , es la energía de presión se debe a la presión que se ejerce sobre el fluido; E_p , es la energía potencial debida al efecto de la gravedad; E_c , es la energía cinética debida al movimiento del fluido.

Haciendo un balance de energía en un tramo de tubería:

$$E_{w1} - E_{w2} = \Delta E_f + \Delta E_s \quad (2.6)$$

- E_{w1} = Energía del agua que entra (aguas arriba)
 E_{w2} = Energía del agua que sale (aguas abajo)
 ΔE_f = Pérdida de energía por fricción con la pared del tubo
 ΔE_s = Energía suministrada al agua

La pérdida de energía por fricción (ΔE_f), se debe a la fricción que existe entre el fluido en movimiento y la pared del tubo; puede expresarse como:

$$\Delta E_f = m \frac{\Delta p_f}{\rho} \quad (2.7)$$

Donde:

- Δp_f = Pérdida de presión por fricción (Pa)
 m = Masa del fluido (kg)
 ρ = Masa volumétrica (o «densidad») del fluido (kg m⁻³)

Es común que se considere que el signo de la pérdida de presión por fricción es el mismo que el signo del gasto, y que la magnitud de esta pérdida es proporcional al valor cuadrado del gasto:

$$\Delta p_f = K_f Q |Q| \quad (2.8)$$

donde:

- K_f = Coeficiente de pérdidas por fricción (kg m⁻⁷)

Además, cuando se utiliza el método tradicional de Gibson, se asume que el coeficiente de pérdidas por fricción (K_f) es una constante. En este

caso, dicho coeficiente puede estimarse a partir de la condición inicial, es decir: antes del cierre de la compuerta (IEC 60041, 1991; Urquiza et al., 2007).

Asumiendo de K_f es constante:

$$K_f = \frac{\Delta p_{f0}}{Q_0 |Q_0|} \quad (2.9)$$

En este caso, se deduce:

$$\begin{aligned} \Delta p_f &= \Delta p_{f0} \left(\frac{Q |Q|}{Q_0 |Q_0|} \right) \\ \Delta p_f &= \Delta p_{f0} \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Se considera que el agua va hacia la derecha.

La energía suministrada al agua (ΔE_s) se debe a su cambio de aceleración:

$$\Delta E_s = L m \frac{dv_{m*}}{dt} \quad (2.11)$$

donde:

- L = Longitud del tramo de tubería (m)
 m = Masa del fluido (kg)
 v_{m*} = Velocidad promedio del agua a lo largo de la tubería (m s⁻¹)
 t = Tiempo (s)

Sustituyendo cada término en la Ec. 2.5:

$$\begin{aligned}
& \left(m \frac{p_1}{\rho} + m g z_1 + \alpha_1 \frac{m v_{m1}^2}{2} \right) - \\
& \left(m \frac{p_2}{\rho} + m g z_2 + \alpha_2 \frac{m v_{m2}^2}{2} \right) \\
& = m \frac{\Delta p_f}{\rho} + L m \frac{d v_{m*}}{d t} \\
& (p_1 - p_2) + \rho g (z_1 - z_2) + \\
& \frac{\rho}{2} (\alpha_1 v_{m1}^2 - \alpha_2 v_{m2}^2) = \\
& \Delta p_f + \rho L \frac{d v_{m*}}{d t}
\end{aligned} \quad (2.12)$$

Si se supone que la masa de agua se desacelera de forma constante y que el gasto (Q) es el mismo a lo largo de la tubería, la velocidad promedio a lo largo de la tubería es igual a:

$$\begin{aligned}
v_{m*} &= \frac{1}{L} \int_0^L \frac{Q(x)}{A(x)} dx = \\
\frac{Q}{L} \int_0^L \frac{dx}{A(x)}
\end{aligned} \quad (2.13)$$

Reemplazando las velocidades por el gasto, se deduce:

$$\begin{aligned}
& (p_1 - p_2) + \rho g (z_1 - z_2) \\
& + \frac{\rho Q^2}{2} \left(\frac{\alpha_1}{A_1^2} - \frac{\alpha_2}{A_2^2} \right) = \\
& \Delta p_f + \rho \frac{dQ}{dt} \int_0^L \frac{dx}{A(x)}
\end{aligned}$$

Introduciendo las siguientes notaciones:

$$\Delta P = (P_1 - P_2) + \rho g (z_1 - z_2) \quad (2.14)$$

donde:

$$\Delta P = \text{Diferencia de presión piezométrica (Pa)}$$

$$\Delta p_d = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\alpha_1}{A_1^2} - \frac{\alpha_2}{A_2^2} \right) Q^2 \quad (2.15)$$

donde:

$$\Delta p_d = \text{Pérdida de presión dinámica (Pa)}$$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \text{Coeficiente de Coriolis}$$

En general se considera que el coeficiente de Coriolis para un flujo completamente desarrollado dentro de una tubería de presión tiene valores entre 1.04 y 1.40.

$$F = \int_0^L \frac{dx}{A(x)} \quad (2.16)$$

donde:

$$F = \text{Factor geométrico del tubo (m}^{-1}\text{)}$$

Se tiene:

$$\Delta P + \Delta p_d = \Delta p_f + \rho F \frac{dQ}{dt}$$

Reordenando:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\rho F} (\Delta P + \Delta p_d - \Delta p_f) \quad (2.17)$$

Integrando desde un tiempo anterior al cierre de compuerta ($t_0 = 0$), hasta un tiempo posterior al cierre (t_F), se deduce:

$$Q_0 = \frac{1}{\rho F} \int_0^{t_F} (-\Delta P - \Delta p_d + \Delta p_f) dt \quad (2.18)$$

+ Q_F

donde:

- t_F = Tiempo posterior al cierre de compuerta (s)
- Q_0 = Gasto inicial, es decir: antes de cerrar la compuerta ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
- Q_F = Gasto final, es decir: cuando se cerró la compuerta ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

Simplificación considerada en la norma IEC 60041 (1991)

En la norma IEC 60041 (1991), se presenta una teoría «simplificada» sobre el método de Gibson. De hecho, se asume que el tramo de tubería considerado es horizontal (en este caso, no hay una diferencia de energía potencial en el tramo: $z_1 = z_2$ lo cual implica que $\Delta P = \Delta p$) y cilíndrico (en este caso, el factor de forma de la tubería se calcula fácilmente como: $F = L/A$, y la pérdida de presión dinámica es nula: $\Delta p_d = 0$). Se deduce la siguiente ecuación:

$$Q_0 = \frac{A}{\rho L} \int_0^{t_F} (-\Delta P + \Delta p_f) dt \quad (2.19)$$

+ Q_F

Es importante hacer notar que esta fórmula no es válida para la tercera variante del método de Gibson, donde se considera que el «tramo» de

tubería empieza a la altura del embalse: por ello, no puede despreciarse la pérdida de presión dinámica. Considerando: $A_1 \rightarrow +\infty$ y asumiendo $\alpha_2 \approx 1$, se tiene: $\Delta p_d \approx -\frac{\rho Q^2}{2 A_2^2} = -\frac{\rho v_2^2}{2}$.

Determinación del gasto por el método de Gibson.

Análisis del «diagrama de tiempo - presión» obtenido con una prueba de Gibson

En la Figura 2.9 se muestra un ejemplo típico de como varía la diferencia de presión entre dos puntos de una tubería (ΔP) obtenido mediante un aparato de Gibson, cuando se cierra una compuerta aguas abajo. En dicha ilustración el sentido de flujo es hacia la izquierda. Las longitudes, alturas, distancias y áreas deben estar en un sistema de unidades coherente.

- a) La línea 0-0 es la línea cero del aparato de Gibson y del diagrama.
- b) La línea A-A, representa las pérdidas de presión promedio cuando el flujo está en estado permanente y antes de que se cierre alguna válvula/compuerta/obturador.
- c) La línea F-F, representa las pérdidas de presión promedio finales debido a fugas después de que válvula/compuerta/obturador se haya cerrado. Coincide con la línea mediana de las ondas después del cierre. Esta línea es casi idéntica a la línea 0-0.
- d) Se mide sobre la línea F-F una distancia B representando el semiperiodo de las ondas pos-

teriores. A la distancia B se le resta un factor de corrección f , tomando en cuenta el ancho del obturador del dispositivo de adquisición de fotografías.

- e) Después se miden las alturas H de dos ondas adyacentes medidas a partir de la línea $F-F$ y se calcula la relación E :

$$E = \frac{H_j}{H_{j+1}} \quad (2.20)$$

- f) Enseguida calcular:

$$D = (B - f) \frac{\arctg(2\Pi / \ln E)}{\Pi} \quad (2.21)$$

Restar la distancia D de un punto N dado donde el borde descendente de una onda intersece la línea $F-F$. Se obtiene así un punto denominado M , el cual define el fin del diagrama.

- g) Dibujar una línea de recuperación de prueba G-P-M como se muestra en la figura 4.8 (línea punteada).
- h) Se mide/calcula el área total bajo los puntos G-P-M. Esta área se puede subdividir en varios segmentos $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ como se muestra en la figura. La corrección por espaciamiento se obtiene multiplicando las alturas verticales de cada segmento de área por el ancho efectivo de cada segmento, se debe deducir de cada una de las áreas.
- i) Cálculo del caudal mediante la expresión:

$$Q = \frac{g}{sy} \frac{A_T}{F} + q \quad (2.22)$$

s, y , son constantes de calibración del diagrama (s corresponde a la longitud correspondiente a 1 segundo, por otro lado, y es la altura correspondiente a una columna de 1 m de agua).

F Es el factor de tubo (relación L/A de la longitud del tramo de medición al área transversal del conducto)

q son las fugas después del dispositivo de cierre.

- j) Determinar una nueva línea de recuperación suponiendo que en cualquier tiempo dado t_i las pérdidas presión restantes están dadas por:

$$C_i = C(1 - r_i)^x \quad (2.23)$$

C son las pérdidas de presión antes del comienzo del cierre (diferencia entre las líneas 0-0 y A-A).

x es el factor exponencial de Q en la expresión de las pérdidas de presión ($x=2$ para tubos en donde el número de Reynolds sea mayor a 5×10^6 , para valores menores de Re , x se debe determinar en cada caso. A su vez cada término está definido como:

$$r_i = \frac{a_i}{A_T + A_L} \quad \text{con} \quad a_i = \sum_{k=1}^i A_k \quad \text{y} \quad A_L = qF \frac{sy}{g}$$

- k) Calcular un nuevo valor del gasto mediante el procedimiento enunciado en los puntos *h)* e *i)*. Cuando dos valores sucesivos del gasto Q tengan una diferencia relativa de 0.1%, se para el cálculo y el último valor encontrado se toma como el valor de la descarga total al momento en que las compuertas cierran. Si no es así, se va al inciso j) y se vuelve a calcular Q .

El procedimiento anterior describe el procedimiento para obtener el gasto según la norma IEC 60041 (1991). No obstante, en la misma norma se menciona que la variante I del método Gibson permite que los datos de los transductores de presión sean grabados con más precisión por lo cual se puede hacer un cálculo numérico del gasto.

A este respecto y dado los últimos avances tecnológicos Tamari *et al.* (2010) y Pérez *et al.* (2012) han hecho esfuerzos al proponer nuevas metodologías para calcular gastos o caudales simulando fenómenos transitorios de presión que son la base del método de Gibson, aplicando métodos numéricos.

El cálculo se realiza con un algoritmo de integración de la diferencia de presión en función del tiempo que considera diferentes variables además de las que se especifican en la Norma IEC 60041, 1991 para tal método, especialmente el término de la diferencia de presión dinámica Δp_d . Por lo que en los próximos años es posible esperar obtener resultados más precisos obtenidos utilizando

Figura 2.9 Esquema de un “diagrama de tiempo - presión” usando un aparato de Gibson.

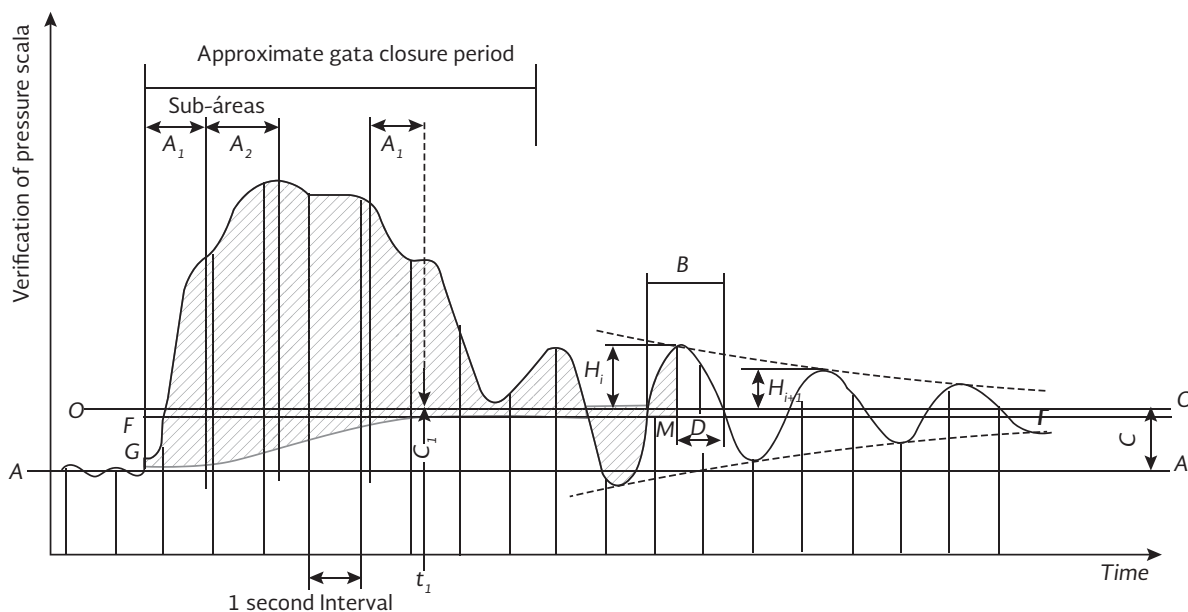


Figura 2.10 Colector que recibe la presión de 4 tomas. Instrumentación del método de Gibson.
Urquiza, G. et al. (2007).



algoritmos numéricos e incluso mejoras en la instrumentación.

2.7. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA

La mayoría de los códigos o normas de referencia así como los proveedores de medidores proponen ciertos requisitos a cumplir para que una medición se considere válida con el equipo en cuestión, entre los cuales se puede citar: calidad

del agua circulante, material orgánico, sólidos disueltos, metales pesados, líquidos corrosivos, turbulencia, velocidad del flujo, temperatura del fluido, etc. y la más crítica: necesidad de tramos rectos largos.

Es común que, en las obras hidráulicas existentes en México, las cuales en general ya han rebasado su vida útil (mayor a 30 años de operación), las geometrías en presas de almacenamiento o centrales hidroeléctricas sean complejas, con poco espacio circundante y definitivamente con tramos rectos

muy cortos. Sin embargo, debido a que en el diseño de una máquina hidráulica intervienen muchos factores tanto de costos como de eficiencia mecánica es de esperarse que éstos criterios sigan imperando por encima de la necesidad de contar con geometrías uniformes y de gran longitud para llevar a cabo una medición adecuada. Por lo que no se espera que los criterios de medición impacten en el cambio de geometrías de obras de toma y conductos a presión, al menos no, en el corto plazo. Es por eso que el desarrollo tecnológico en la medición de flujos industriales tiene especial relevancia, porque el desarrollo y la aplicación de nuevas técnicas de medición que se ajusten a las condiciones prácticas existentes y resuelvan el problema de tener una medición confiable con diversas limitaciones ya sea de espacio, de régimen de flujo, de temperatura, etc., es un reto a vencer.

Precisamente porque en campo es difícil encontrar obras de toma con tramos tan largos que permitan tener buenas longitudes de desarrollo de los perfiles de velocidad, condición necesaria para determinar la ubicación del sitio de medición, la Subcoordinación de Obras y Equipos Hidráulicos ha implementado con éxito la modelación numérica de flujo en obras de toma para determinar éste último con base en la deformación y velocidad de los perfiles de flujo. Esto ha permitido instalar sistemas de medición que, en otras condiciones, es decir, siguiendo las recomendaciones de Normas de Referencia o de proveedores se hubieran descartado.

2.7.1 Aplicación de la modelación numérica para determinar la ubicación del sistema de medición

Típicamente se conocen dos aproximaciones para abordar los fenómenos que ocurren en la naturaleza: el teórico y el experimental. El advenimiento de las computadoras digitales de alta velocidad, aunado al desarrollo de algoritmos numéricos más exactos para resolver problemas de física ha revolucionado la práctica de la dinámica de fluidos y ha introducido una tercera aproximación: la dinámica de fluidos computacional, que sinérgicamente complementa a las dos anteriores sin pretender reemplazarlas.

Se utilizó un software CFD (dinámica de fluidos computacional) denominado PHOENICS para simular el flujo en las unidades de presión, éste funciona en tres etapas principales:

1. Definición del problema, en el cual el usuario introduce información del problema a ser simulado y las variables que le interese conocer.
2. Solución numérica. El código PHOENICS está basado en el método de volumen finito para mallas estructuradas. Es capaz de resolver problemas en mallas cartesianas, cilíndricas o curvilíneas.
3. Presentación de resultados. PHOENICS puede desplegar los resultados de sus simulaciones en una amplia variedad de formas. Tiene la capacidad de tomar los resultados de una

predicción y usarlos como condiciones iniciales para alimentar otro problema.

Ecuaciones Fundamentales

Las ecuaciones de la dinámica de fluidos que se resolvieron con PHOENICS son las ecuaciones promediadas de Reynolds de flujo turbulento incompresible en estado permanente; el modelo de turbulencia utilizado es el k-ε estándar (Wilcox, 1998).

Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0. \quad (2.24)$$

Donde, $\bar{U}_j$ es el vector velocidad promedio.

Ecuación de la cantidad de movimiento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = & - \frac{1}{\rho_n} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} \\ & + g_i + v_n \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_j}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

P = Presión total en el flujo, en Pa

g = constante de la gravedad, 9.81 m²/s.

$\overline{u_i u_j}$ = promedio de velocidades fluctuantes en el flujo.

El término $\overline{u_i u_j}$, introduce el problema de no completitud de las ecuaciones (2.24) y (2.25), y debe evaluarse con formulaciones suplementarias llamadas comúnmente modelos de cerradura, que

conduzcan a un sistema de ecuaciones que permita ser resuelto, en este caso mediante el modelo de turbulencia k-ε. Este término es importante ya que contiene a su vez dos términos, uno de ellos el responsable de la deformación del flujo y el segundo el de rotación del flujo. A final de cuentas la información de estos dos términos modela la turbulencia del flujo.

A continuación, se presentan un caso de aplicación en que la modelación numérica del flujo ha sido útil no sólo para ubicar el sistema de medición sino a través de sus resultados decidir sobre la viabilidad de instalar un sistema de medición.

a) Modelación de un conducto de la obra de toma de la Central Hidroeléctrica “Luis D. Colosio Murrieta (Huites)” ubicada en Choix, Sinaloa.

Características de la Central Hidroeléctrica:

Localización geográfica. Se localiza al pie de la presa del mismo nombre aproximadamente a 145 km de la ciudad de Los Mochis, y a 20 km del municipio de Choix sobre el Río Fuerte, en el estado de Sinaloa; El río conserva su nombre hasta su desembocadura al Océano Pacífico, previo almacenamiento formado por la presa Miguel Hidalgo (El Mahone), con la cual la presa Huites trabaja en sistema. Su localización se encuentra entre las coordenadas 26° 50' 32" latitud norte y 108° 22' 12" longitud oeste de Greenwich.

Descripción. La central cuenta con una capacidad total de 422MW, y una generación media anual (de diseño) de 917 millones de KWH. Proporciona energía eléctrica que se integra al sistema eléctrico Noroeste, alimentando a la subestación “Pueblo Nuevo”, en Navojoa, Sonora, a través de dos líneas de transmisión de 230 KV, desde la subestación “Huites”.

La presa está formada por una cortina, la cual consta de dos tramos correspondientes a distintos tipos de estructuras; el tramo principal, de sección gravedad construida de concreto masivo convencional, altura máxima de 160.0 m y con longitud de 316.0 m, empotrado en la ladera izquierda, remata a la derecha con un contrafuerte que sirve para apoyo del otro tramo, este último para empotramiento en la ladera derecha, está formado por un arco abovedado de curvatura simple de concreto convencional con altura máxima 87.75 m y longitud de 104 m, desplantado sobre un pedestal de concreto simple; la obra de toma para generación, ubicada tanto en el pedestal de apoyo como en la sección del arco consiste de dos estructuras de rejillas en cantiléver que cubren el frente de la estructura de entrada en la elevación 190.00 msnm, formada de dos conductos de 6.13 m de ancho por 7.80 m de alto, en cuyo inicio se localizan las guías para las compuertas de emergencia y servicio.

En ambos conductos continúa hacia aguas abajo la transición de sección rectangular a circular de

7.80 m de diámetro para acoplarse cada uno con la tubería de presión que conduce el agua a su correspondiente unidad de generación. La capacidad de cada conducto es de 235 m³/s; la obra de control y excedencias está ubicada sobre los monolitos de la cortina de sección gravedad a la izquierda, la obra de control tiene 4 compuertas radiales de 15.50 m de ancho de 21.00 m de altura, apoyadas sobre el cimacio cuya cresta está en la elevación 258.00 msnm; las descargas se conducen por el canal de la rápida, el cual por previsión de operación y seguridad se dividió en dos canales, dotados de aireadores ubicados en tres secciones a lo largo de la rápida con longitud de 195 m, en cuyo extremo se localiza un deflector. La capacidad de esta estructura es de 22 445 m³/s.

La casa de máquinas quedó ubicada a cielo abierto, al pie del talud a la derecha, dentro de la cual se tienen instalados los equipos correspondientes a las dos unidades de generación, consistentes en dos turbinas tipo Francis y dos generadores para una capacidad total instalada de 422 MW.

Obra de toma: La obra de toma para generación de energía eléctrica está alojada en el cuerpo de la cortina en arco, en la margen derecha y cuenta con dos tuberías de acero de 7.8 m. de diámetro y 192.65 m de longitud, que conducen un gasto de diseño de 234.9 m³/s cada una, hasta las turbinas en casa de máquinas.

Antecedentes

La geometría de la obra de toma de la Central Hidroeléctrica “Luis Donald Colosio Murrieta” (Huites) es complicada. Por un lado, es una obra que no tiene grandes tramos rectos libres, lo que de entrada no permite aplicar las recomendaciones de instalación de la norma IEC-60041 en cuanto a tramos rectos a respetar antes y después del sistema. Se analizaron aspectos hidráulicos y normativos a fin de determinar el sistema y el sitio más adecuado para instalar el sistema de medición de tipo ultrasónico.

Análisis Numérico

Se volvieron a ejecutar simulaciones numéricas con mallas más refinadas y diferentes métodos de promediado en cada celda. La convergencia de la solución se alcanzó aproximadamente a las 6 horas de cálculo con 6000 iteraciones. El gradiente de cambios en las variables fue del orden de 10^{-5} hasta 10^{-2} y en los escalares de 0.0.

Normativos

1) La norma IEC-60041 recomienda como mínimo dejar una longitud igual a 10 veces el diámetro del conducto aguas arriba de cualquier irregularidad importante y al menos una longitud de 3 veces el diámetro del conducto aguas abajo entre la sección de medición y cualquier alteración. Sin embargo, si se garantiza la uniformidad del flujo se puede medir con un solo

plano de medidores en una longitud de al menos 20 veces el diámetro del conducto.

2) Las irregularidades o alteraciones pueden ser: codos, vórtices, o turbulencia de gran escala. Algunos factores que pueden provocar componentes transversales de flujo o distorsión del perfil de velocidades del flujo son: condiciones aguas arriba de la entrada de las obras de toma, la geometría de la entrada, la presencia de codos aguas arriba de la sección de medición, cambios en el diámetro del conducto aguas arriba y la proximidad de codos o cambios de diámetro aguas abajo de la sección de medición.

Las dos condiciones anteriores no se pueden satisfacer debido a la complicada geometría sin tramos rectos disponibles. Existe un tramo recto en la parte inferior de la tubería sin embargo, corresponde a una sección cónica ya que es una reducción de 7.8 m a 6.70 m de diámetro por lo cual no **se recomienda** de ninguna manera se coloque el sistema de medición en la parte inferior; de acuerdo a la recomendación del apartado 8.1.1 referente a calibración de la norma ISO/TR 12765: 1998, se establece lo siguiente:

Para la obtención de una precisión alta, el valor del diámetro D debe ser el promedio del diámetro interno del tubo. El diámetro medio interno debe ser el promedio aritmético de las mediciones de al menos 12 veces el diámetro, a lo largo de cuatro veces el diámetro posicionados en ángulos iguales uno de otro, distribuidos en tres secciones repre-

sentativas distribuidas a lo largo del tubo que contiene los transductores. **Ningún diámetro diferirá por más de 0.3% del promedio de los doce diámetros.**

Resultados

A continuación se muestran algunos resultados de visualización del flujo en el conducto. Existe un tramo recto en la parte superior del conducto en el cual se puede colocar el sistema de medición bajo ciertas consideraciones especiales, el segundo punto posible para colocar el sistema de medición corresponde al tramo recto inclinado. En la parte baja hay un tramo recto de 35 m, 23 de los cuales corresponden a una sección cónica, debido a esto

existe una gran deformación del flujo, condición no deseable para obtener alta exactitud en una medición.

Según planos existentes, la unidad 2 tiene un tramo libre en la parte superior de 33 m observando el conducto de perfil, en cambio, sí se ve el conducto en planta dicha longitud es de 46.81 m, esto es porque el conducto varía en los planos x-y. Personal de la Central entró al conducto y verificó la longitud de dicho tramo libre encontrando que tal distancia es 27.00 m, debido a ello el IMTA llevó a cabo dos simulaciones más, la primera con las dimensiones tal y como se muestran en los planos y la otra modificando las dimensiones del tramo, para localizar el sitio más apropiado de ubicación

Figura 2.11 Perfil de velocidades a lo largo del conducto, el puntero indica la posición I.

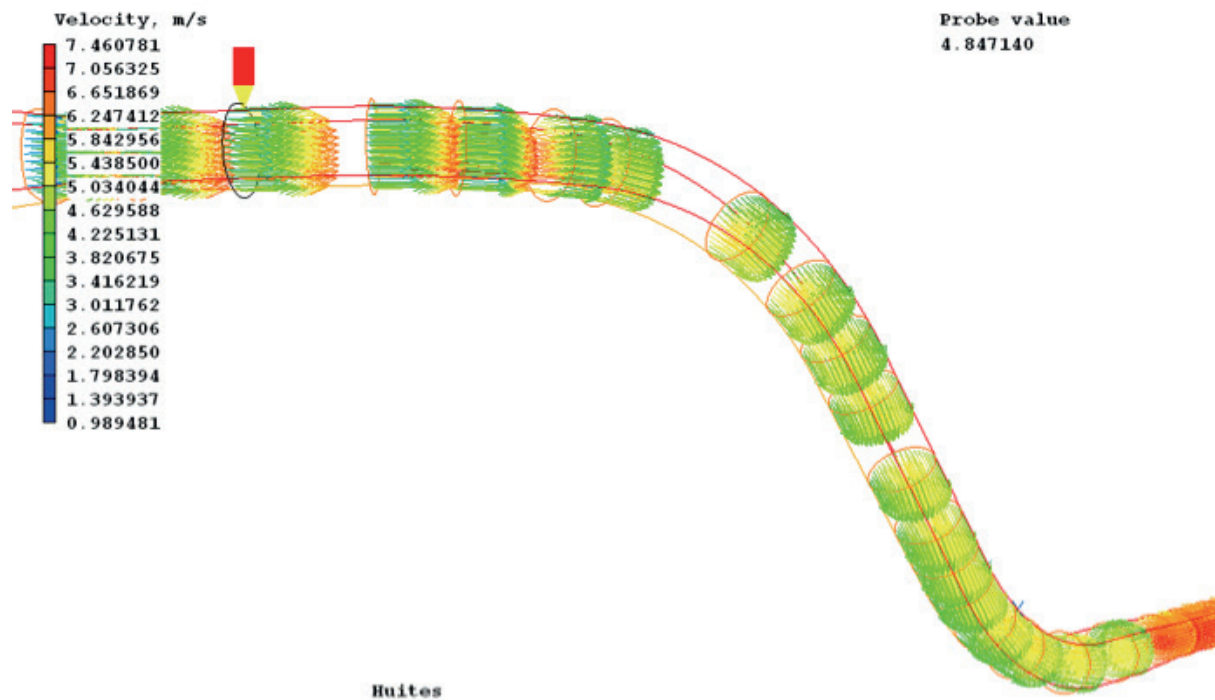
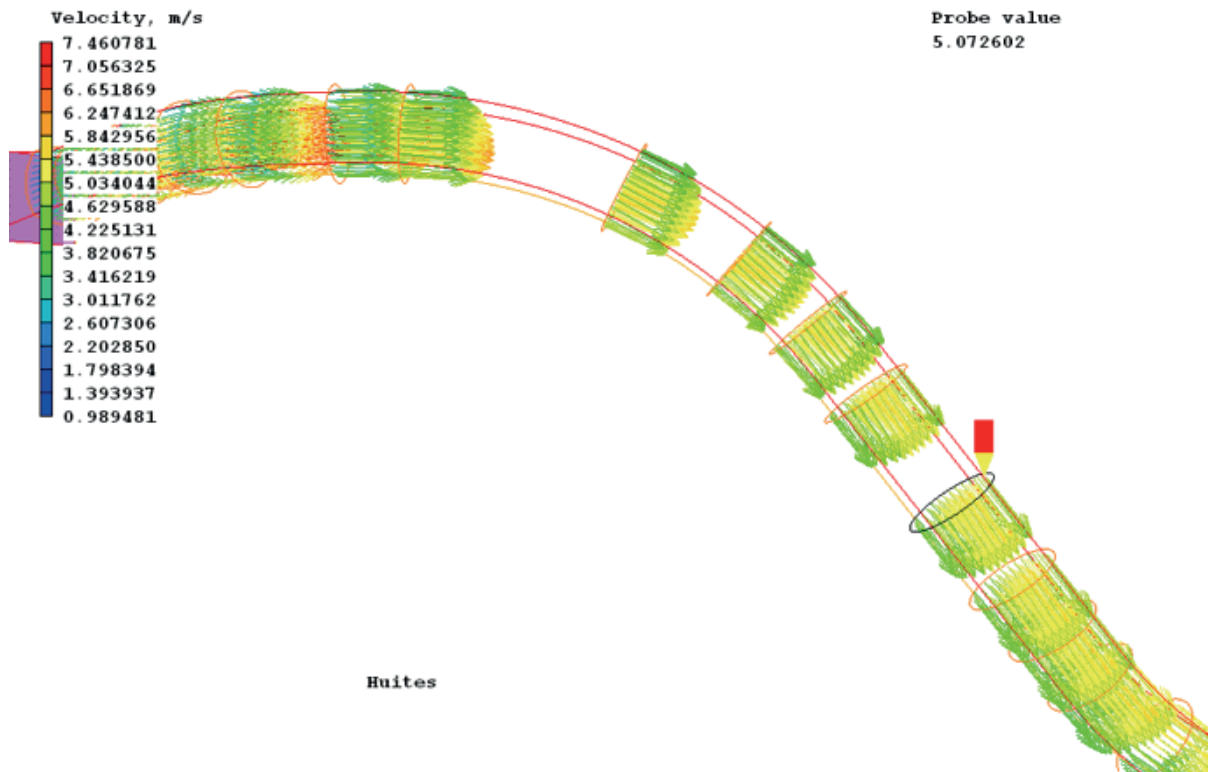


Figura 2.12 Perfil de velocidades en la ubicación de la opción 2.



del sistema de medición. Se presenta el caso 2 correspondiente al de la geometría modificada con dos opciones: la opción 1 se refiere a la ubicación del Sistema en la parte recta superior cerca de la compuerta de servicio y la opción 2 se refiere a la colocación del Sistema en la parte inclinada del conducto.

Se observa que los patrones de flujo tienen asimetrías, de acuerdo a las magnitudes y distribución de las deformaciones se propone la localización del sistema de medición en el tramo recto superior

a 18 m aguas abajo de la transición de concreto (punto G 49, opción 1) y en el tramo recto inclinado a 9 m aguas abajo del codo superior (punto G23, opción 2).

Se hizo un cálculo que corresponde a la situación hipotética en la cual el sistema de medición constaría de dos trayectorias cruzadas a 45° respecto al eje de la tubería y colocadas al centro del conducto, en los sitios mencionados. Los resultados se muestran en la página siguiente:

• Opción I

Cuadro 2.1 Velocidades extraídas del simulador numérico para verificar cálculos de gasto, correspondiente a la opción I del caso I.

Velocidad A 45°	Velocidad A 45°	Vel prom sección
6.2437	3.5628	4.9012
6.2471	3.5591	4.9012
6.0477	3.9682	4.9012
6.0479	3.9641	4.9012
5.7312	4.3765	4.9012
5.7292	4.3724	4.9012
5.4209	4.666	4.9012
5.418	4.6621	4.9012
5.1521	4.91	4.9012
5.1486	4.9063	4.9012
4.8989	5.1418	4.9012
4.8951	5.1383	4.9012
4.6304	5.394	4.9012
4.6263	5.3909	4.9012
4.3118	5.7001	4.9012
4.3072	5.6979	4.9012
3.875	6.0532	4.9012
3.8702	6.0535	4.9012
3.4523	6.3321	4.9012
3.4478	6.3357	4.9012
4.9751	5.0093	4.9012

Area: **47.78**Gasto: V*A **238.543498** m³/s

	A	B	Promedio
1	4.9751	5.0093	4.99

Las lecturas corresponden sólo a una trayectoria, por lo cual se debe calcular el factor de forma del perfil de flujo Kh, para cada trayectoria cruzada (A/B).

		Trayectoria A	Trayectoria B
	Número de Reynolds, Re diag:	38805546	39072150
	Kh diag :	0.9647647	0.96479515
Q calc	Gasto (vel diag):	229.35 m ³ /s	230.93 m ³ /s
Q ref	Gasto simulado:	235 m ³ /s	235 m ³ /s
	% Err Q:	-2.40404337 %	-1.73043325 %

- Opción 2.

Cuadro 2.2 Velocidades extraídas del simulador numérico para verificar cálculos de gasto, correspondiente a la opción 2 del caso 2.

Velocidad A 45°	Velocidad A 45°	Vel prom sección
4.6943	4.8839	4.9447
4.7028	4.8808	4.9447
4.9062	5.1046	4.9447
4.9129	5.1015	4.9447
5.1135	5.2671	4.9447
5.1187	5.2649	4.9447
5.2421	5.3175	4.9447
5.2461	5.3167	4.9447
5.3108	5.33	4.9447
5.3134	5.3309	4.9447
5.3328	5.3189	4.9447
5.3338	5.3217	4.9447
5.3107	5.2822	4.9447
5.31	5.2873	4.9447
5.2318	5.2058	4.9447
5.2294	5.2131	4.9447
5.0295	5.0711	4.9447
5.0254	5.0804	4.9447
4.7707	4.9454	4.9447
4.7652	4.956	4.9447
5.0950	5.1740	4.9447

Area: **47.78**

Gasto: $V \cdot A$ **245.344899** m³/s

	A	B	Promedio
1	5.0950	5.1740	5.13

Las lecturas corresponden sólo a una trayectoria, por lo cual se debe calcular el factor de forma del perfil de flujo Kh , para cada trayectoria cruzada (A/B).

		Trayectoria A	Trayectoria B
	Número de Reynolds, Re_{diag} :	39741039	40357122
	Kh_{diag} :	0.96487063	0.96493906
Q calc	Gasto (vel diag):	234.91 m ³ /s	238.56 m ³ /s
Q ref	Gasto simulado:	235 m ³ /s	235 m ³ /s
	% Err Q:	-0.04030371 %	1.51651373 %

Para el cálculo de las variables involucradas en el gasto se usaron las fórmulas incluidas en el British Standard ISO/TR 12765:1998 (Measurement of fluid flow in closed conduits — Methods using transit-time ultrasonic flowmeters) pag. 32.

2.8. CONCLUSIONES

Los cálculos presentados anteriormente corresponden a dos trayectorias cruzadas que pasan por el centro del conducto, dan idea de patrones y magnitudes, por ejemplo, en un cálculo sencillo nos dice el error entre el gasto calculado y el simulado es mayor en la parte superior que en el tramo recto inclinado, lo cual era de esperarse, dada la asimetría de la distribución de velocidades causada por la fuerza centrípeta en el conducto, ya que en ese tramo si bien tiene una parte recta, en conjunto forma una curva horizontal.

En el **caso 1**, arroja una diferencia entre el gasto circulante y de referencia de 1.7374 y -1.7629 % para los transectos A y B respectivamente, mientras que para el tramo inclinado tal diferencia es

de 0.154 y 1.467 %. En el **caso 2**, la diferencia en la opción 1 de instalación es de -2.404 y -1.730 , y para el tramo inclinado (opción 2) tal diferencia es de -0.0403 y 1.516%.

Ahora bien, no se debe perder de vista en primer lugar que dichos resultados corresponden a una trayectoria que pasa por el centro del conducto, mientras que en el tipo de sistemas que se instalan en las Centrales son de 4 trayectorias que forman cada par de sensores a diferentes alturas, en segundo lugar; que aunque la diferencia en porcentaje a primera vista parece pequeña, la curvatura que tiene el conducto induce a la aparición del fenómeno de “swirling” éste consiste en que el flujo rota a medida que avanza, éste a su vez induce flujo pulsante, debido a ello y a que en ningún caso se tienen los tramos rectos recomendados por normas y fabricantes, se propone que se instalen **sistemas de cuatro pares cruzados (8 pares, 16 sensores)** en las distancias que marcan las opciones 1 o 2, dependiendo de cuál se escoja. Las distancias se resumen en la Cuadro 2.3 mostrada a continuación:

Cuadro 2.3 Resumen de la posición del sistema de medición de acuerdo a la geometría del conducto a presión.

Localización	
Parte Superior	18 m aguas abajo del punto G49
Tramo inclinado	9 m aguas abajo del punto G23.

b) Otros Problemas

Ejemplos de problemas de uso de diferentes Sistemas de Medición son los siguientes: Los medidores de tiempo de tránsito en conductos a presión requieren grandes longitudes de desarrollo del perfil de flujo, ya que la base teórica establece que la velocidad axial es la velocidad promedio, esto implica que las velocidades transversales son pequeñas respecto a la velocidad horizontal o axial. Este tipo de medidor es sensible a la turbulencia o a gastos intermitentes. Los medidores acústicos de efecto doppler son muy sensibles a las velocidades altas. Mientras que los medidores electromagnéticos no requieren tanta longitud de desarrollo, pero su costo es alto y pocas marcas los producen para conductos de gran diámetro (> 3 m) y mandarlos a hacer bajo pedido los encarece aún más. La medición con molinetes, placa de orificio o vertedores, en general, tienen una incertidumbre mayor al 2%, por lo cual se descartan para la aplicación en el Sector Hidroeléctrico. Respecto a los molinetes la excepción es el uso de mallas de molinetes, método empleado en las pruebas de aceptación de turbinas cuya implementación es complicada y costosa, y sólo se adquieren datos una sola vez.

2.9. SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN Y ESPECIFICACIONES DE COLOCACIÓN

En general, en complejos hidroeléctricos el uso de medidores es extensivo. Tanto para grandes gastos

como para gastos pequeños, internos y externos, ultrasónicos, de propela y electromagnéticos, principalmente.

Sin embargo, para la medición de grandes gastos los sistemas de medición de tipo ultrasónico intrusivo han dado buenos resultados. Por un lado, porque toda la tubería a presión está embebida en concreto por lo que los sensores ultrasónicos externos no son una opción y en ese caso, tampoco lo son los medidores electromagnéticos ya que a pesar de ofrecer mejor exactitud los costos para tuberías de grandes diámetros es muy alto y la instalación de éstos en una obra de conducción podría implicar cantidad de obra civil y/o cambio de diseño de la planta o tuberías.

En cuanto a los requerimientos de espacio, los sistemas de medición de tiempo de travesía son muy demandantes ya que requieren como mínimo un espacio hacia aguas arriba de 10 veces el diámetro del conducto en donde se instalará el medidor y un mínimo de 3 veces el diámetro aguas abajo, evitando la cercanía de codos, reducciones, válvulas, y cambios de dirección. Mientras que los sistemas de medición electromagnética según literatura requieren longitudes de 3 veces el diámetro de la obra de toma en cuestión aguas arriba y 1 vez aguas abajo. Los sistemas doppler no necesitan tantos tramos de longitud sino turbulencia, burbujas o materiales disueltos, sin embargo, como ya se señaló son muy sensibles a velocidades altas, lo cual es frecuente en centrales hidroeléctrica ya que se aprovecha la energía potencial del agua que está en el embalse.

2.10. SUMINISTRO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN DE SISTEMAS DE MEDICIÓN DE TIPO ULTRASÓNICO EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

2.10.1 Suministro de elementos del sistema de medición

No es exagerado pensar que instalar un sistema de medición para un sitio complejo es casi una actividad artesanal. El suministro de los elementos se hace de acuerdo a las condiciones que haya en la Central, por ejemplo, los sensores de tiempo de travesía deben ser adecuados a la presión total existente en el sitio de localización del sistema de medición, y de acuerdo a la localización del sistema de medición se determina la longitud de cables de señal a emplear. Otro ejemplo es que de acuerdo a la posición de la Central y a los vientos incidentes sobre su embalse, se determina si se genera poco o mucho oleaje y a partir de ese dato se escoge el tipo de transductor para medir el nivel del embalse. También la elección del medidor de nivel podría depender del tamaño de la represa: si éste último es grande la variación de nivel será mínima, sucede lo contrario en caso de que el embalse sea un cañón o no sea tan extenso. Otro ejemplo, es la elección del sitio en el cual se debe localizar el sensor para medir el nivel en el canal de desfogue de la unidad, ya que, en algunas Centrales se ocupa un mismo canal de desfogue para la descarga del

gasto de dos unidades, así que la elección del sitio es de vital importancia porque esa variable influye en la determinación de la eficiencia hidráulica y de la turbina de la unidad.

Por otro lado, en ocasiones, es necesario diseñar o rediseñar algunos de los elementos necesarios para la instalación, un ejemplo de ello, son los soportes para los sensores o para anclar los elementos de sujeción del sistema, los cuales se rediseñan de acuerdo a la velocidad promedio del flujo.

Así pues, debido a la naturaleza tan específica de aparatos, dispositivos y elementos que se ocupan para la instalación de un sistema de medición, se entiende que el suministro no es inmediato éste requiere planeación previa, además, por lo menos en México, aunque en el mercado se pueden encontrar equipos de casi todas las principales firmas que ofrecen sistemas de medición que cumplen con los requerimientos de las normas operativas e industriales vigentes, el suministro se hace desde el extranjero por lo que éste último puede tardar de uno a tres meses.

2.10.2 Instalación del sistema de medición

A continuación, se incluye la instalación de un Sistema de Medición de tipo Ultrasónico Intrusivo, es decir, al interior de un conducto a presión. Se aclara que no es una instalación tipo, las etapas dependen de la complejidad del sistema a instalar; solamente se muestra para fines ilustrativos.

Trabajos Preliminares de Acceso al sitio de Trabajo: Estos incluyen el desagüe de la obra hidráulica y en algunos casos, cuando en la obra de conducción haya restos de basura, arenilla o tenga limos que hagan la superficie resbalosa, se lleva a cabo la

limpieza de la unidad con agua a presión, la colocación de escaleras para entrar al conducto y para llegar hasta el sitio en donde se colocara el sistema, así como la iluminación del sitio.

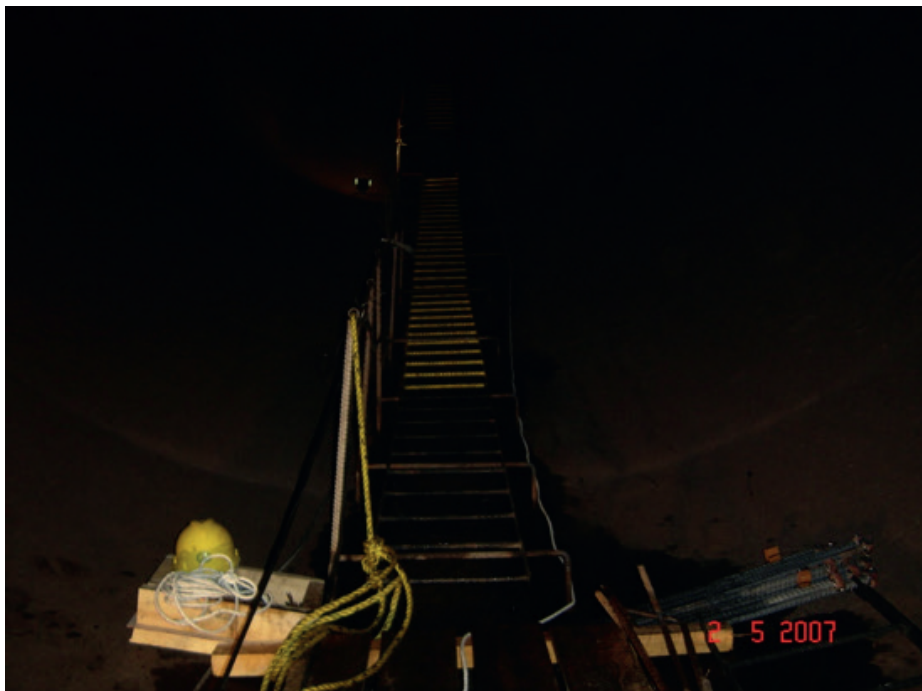
Figura 2.13 Iluminación de la obra de conducción.



Figura 2.14 Colocación de escalones hacia el sitio de instalación.



Figura 2.15 Escaleras de acceso al sitio de trabajo.



Localización del Centro del Sistema: Una vez que el estudio pertinente arroja el sitio óptimo de localización del Sistema en el conducto, se procede a encontrar el Centro del Sistema, de éste punto

$\frac{1}{2}$ veces el diámetro hacia aguas arriba quedara la batería de sensores aguas arriba de igual forma, $\frac{1}{2}$ veces el diámetro hacia aguas abajo que la batería de sensores de nombre análogo.

Figura 2.16 Se establece una referencia en plano y de ahí se parte para determinar el Centro del Sistema.



Figura 2.17 Punto de localización del Centro del Sistema.



Figura 2.18 Del Centro del sistema se mide una la mitad del diámetro hacia aguas arriba y hacia aguas abajo para ubicar el sitio de colocación de los sensores.



Acondicionamiento del Lugar de Trabajo: Una vez determinado el Centro del sistema se procede a armar los andamios, partiendo del centro una vez el diámetro de la tubería hacia aguas arriba y de igual manera hacia aguas abajo, en general, la longitud del andamio es de dos veces el diámetro

de la tubería con altura igual a la del conducto. El andamio es de aluminio sólido con partes móviles lo cual permite que se adapte a las geometría circular. Por cuestiones de seguridad, los apoyos de los andamios se sueldan al conducto.

Figura 2.19 Piezas de andamio sin armar.



Figura 2.20 Armado de andamios.



Figura 2.21 Andamio terminado y colocado.



Determinación del ángulo de las trayectorias y la ubicación geométrica de los sensores: La localización geométrica de los sensores es especialmente importante ya que si éstos no quedan perfectamente paralelos a la dirección axial del conducto se contribuye al error sistemático de la instalación,

a su vez, esto tiene una influencia negativa en la exactitud de la medición del gasto. Por eso, cada proveedor de medidores tiene una técnica de instalación específica y detallada para determinar el ángulo de las trayectorias y la posición de los sensores en el perímetro del conducto.

Figura 2.22 Ubicación de sensores en la pared del conducto por medio de teodolito.



Figura 2.23 Colocación de pernos autosoldables al centro de la base del sensor.

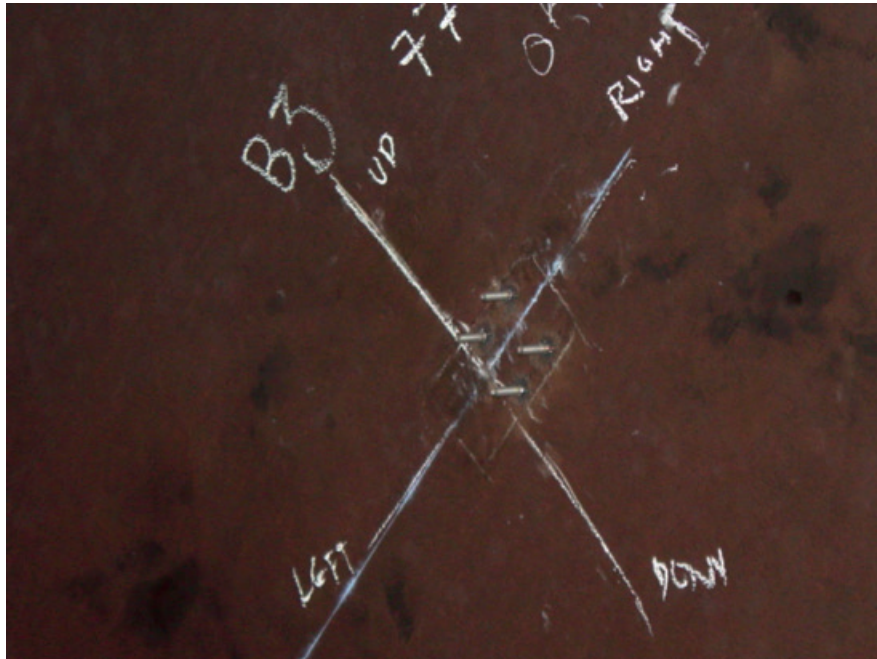


Figura 2.24 Sensor colocado en el punto determinado.



Fijación de elementos de Sujeción: El sistema de sujeción está compuesto por elementos que protegen los cables de señal, estos son: ángulos, registros, liberadores de esfuerzos, piezas especiales y un anillo formado por una canaleta semicircular, en la que se colectan los cables de todos los sensores, mismos que se guían hacia la salida del conducto, haciéndolos pasar por registros colocados a lo largo de la tubería.

Para fijar estos elementos previamente se hace una limpieza mecánica en el conducto, ésta consiste en remover la protección anticorrosiva, óxidos y/o materia orgánica que se encuentre adherida en la zonas en donde se soldará o donde se vayan a colocar pernos autosoldables.

En caso de que los elementos vayan soldados, antes de la aplicación de material de aporte, es for-

zoso que el área se precaliente para eliminar humedad atrapada en el material base así como para eliminar esfuerzos residuales en las paredes de la tubería que pudieran dañarla. Si los elementos van sujetos por medio de pernos autosoldables, la limpieza mecánica consiste en remover el recubrimiento epóxico en un área igual al área transversal de los pernos, dejando el material base blanco.

En los casos anteriores, después de aplicar el material de aporte o de soldar los pernos, la limpieza posterior consiste en remover el hollín dejado por las aplicaciones mencionadas.

Sí los elementos van fijados sobre concreto armado, no se requiere limpieza previa sino solamente se alojan las varillas roscadas en los barrenos. La limpieza posterior se realiza sobre éstos con aire o agua a presión para eliminar todo el material suelto.

Figura 2.25 Remoción de recubrimiento epóxico como limpieza previa a la aplicación de material de aporte.



Figura 2.26 Limpieza mecánica de los elementos de sujeción.



Figura 2.27 Precalentamiento previo a la aplicación de material de aporte para soldar elementos.



Figura 2.28 Medición de temperatura adecuada de precalentamiento.



Figura 2.29 Aplicación de material de aporte. Soldaduras para fijar elemento circunferencial de sujeción.



Figura 2.30 Limpieza mecánica del material base para colocar pernos autosoldables.



Figura 2.31 Material base preparado para colocación de pernos autosoldables.



Figura 2.32 Colocación de pernos autosoldables.



Figura 2.33 Perno colocado.

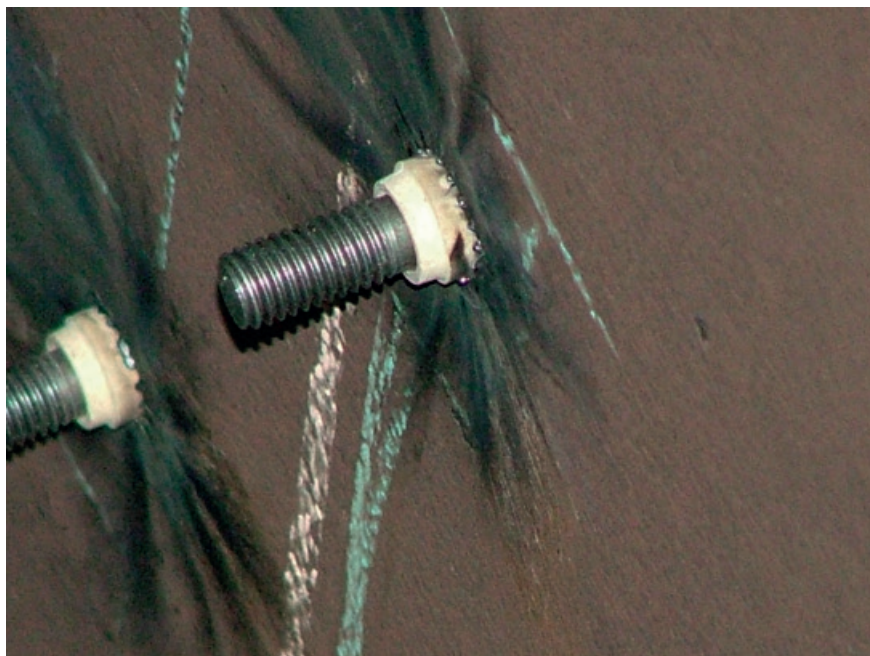


Figura 2.34 Elemento de sujeción fijado con pernos autosoldables.



Figura 2.35 Perforación de barrenos para la fijación de elementos de sujeción en concreto.



Figura 2.36 Aplicación de anclaje químico para fijar pernos.



Figura 2.37 Colocación de pernos.



Figura 2.38 Colocación de elemento de sujeción (ángulo) en concreto.



Protección anticorrosiva de los Elementos de Fijación: Los elementos del sistema de sujeción son de fierro en cualquiera de sus clases y por ende son susceptibles a la oxidación y a la corrosión, por lo anterior, es necesario la protección de dichos elementos tanto como del metal base en donde se alojan mediante recubrimientos epóxicos de alta resistencia a ambientes corrosivos o industriales. La mezcla y la aplicación debe hacerse de acuerdo

a las especificaciones del producto, en tres capas. Al final del tiempo de secado se verifica que la capa de protección tenga un espesor mínimo de 16 milésimas y buena adherencia. Para esto último se lleva a cabo una prueba de adherencia que consiste en rayar alguna superficie protegida con una navaja, colocar cinta adhesiva sobre ésta y tirar; si no hay buena adherencia, se removerá material de la superficie probada.

Figura 2.39 Limpieza mecánica anterior a la aplicación de protección anticorrosiva.



Figura 2.40 Limpieza con desengrasante antes de la aplicación del epóxico.



Figura 2.41 Aplicación de la protección anticorrosiva en el anillo colector de cables.



Figura 2.42 Protección de los elementos del sistema de sujeción.



Figura 2.43 Medición de espesores del recubrimiento en los elementos.



Figura 2.44 El espesor mínimo requerido del recubrimiento es de 16 milésimas de pulgada.



Figura 2.45 Prueba de adherencia. Rayado de la superficie a probar.



Figura 2.46 Después del rayado de la superficie se procede a adherir una cinta especial para esta prueba.



Figura 2.47 Resultados de la prueba de adherencia. En este caso, se concluye que la limpieza mecánica y química, el rayado del metal base, la aplicación del producto y tiempo de secado, fueron adecuados.



Colocación y alineación de los Sensores: Los sensores se colocan sobre material debidamente cubierto con protección anticorrosiva, el apriete se hace al torque con aplicación final de un sellado de roscas para mantener fijas las piezas. Sin embargo, un sensor bien colocado no significa un sensor bien alineado. Para tal fin se busca la colinealidad de los

sensores en ambas direcciones es decir de aguas arriba hacía agua abajo y viceversa. En la práctica, el requisito es que un rayo láser que parta del centro de un sensor incida sobre el centro del sensor del lado opuesto, se acepta una desviación de hasta 5 cm. Lo anterior, para garantizar las lecturas de señal emitidas y recibidas por los transductores.

Figura 2.48 Sensor debidamente colocado.

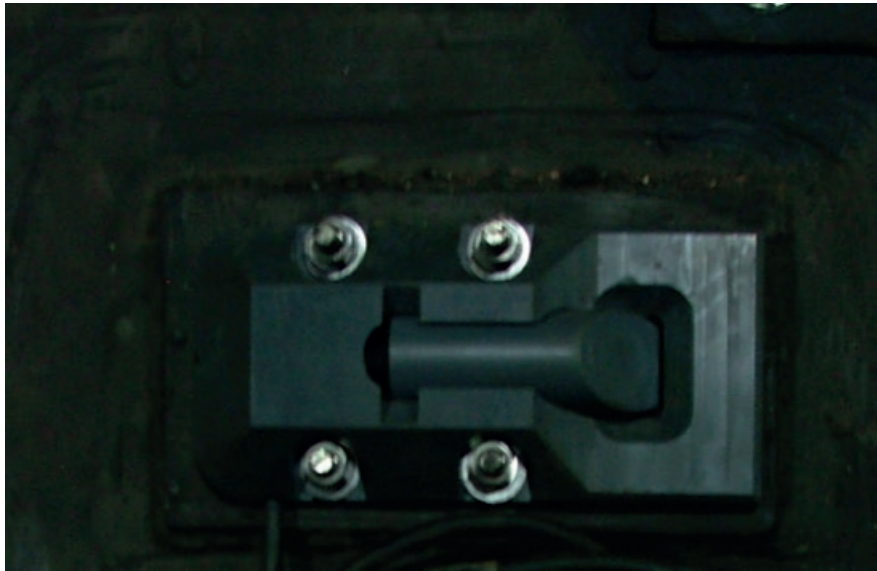


Figura 2.49 Ajuste de la alineación del Sensor.



Figura 2.50 Incidencia de rayo láser sobre la cara opuesta de un sensor respecto de otro desde el cual se está verificando la alineación.



Cableado del Sistema de Medición y Conexión de Sensores. Este consiste en conectar los cables del sensor y los cables que finalmente llevarán los datos hasta la unidad electrónica. Se utiliza cable coaxial RG-59 con malla interna, son resistentes

al agua y soportan grandes presiones. La mayoría de los elementos y dispositivos instalados sirven para la protección del cableado, que finalmente lleva toda la información a la unidad electrónica en donde será procesada.

Figura 2.51 Suministro de cable, dependiendo de la longitud hasta la unidad electrónica, en total en una instalación se pueden usar hasta 1200 m.



Figura 2.52 Trabajos preliminares al cableado del sistema.

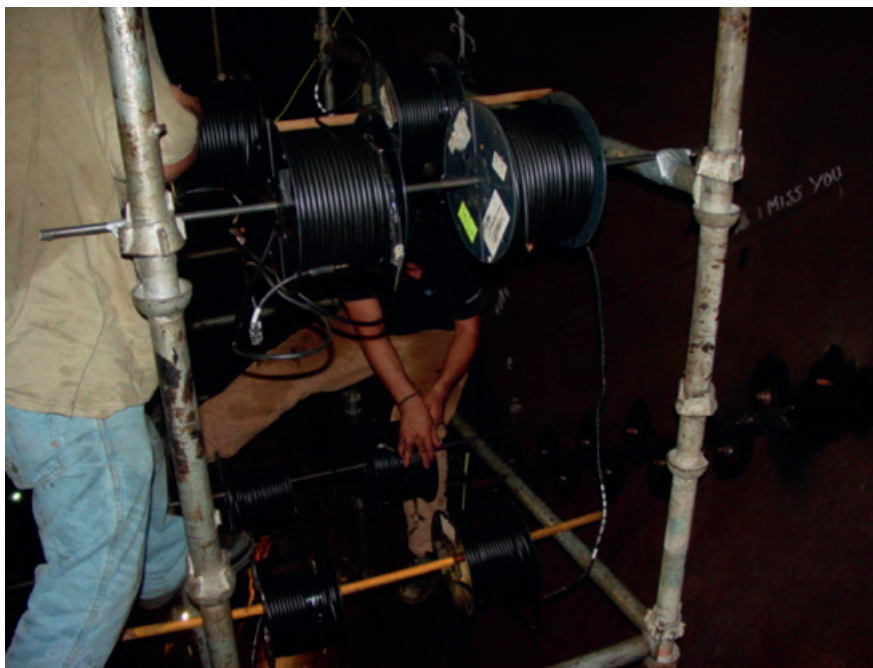


Figura 2.53 Desarrollo del trabajo de cableado.



Figura 2.54 Conexión del cable de Señal con el cable del Sensor.



Figura 2.55 La conexión anterior se sujeta con un dispositivo que evita que los cables se desconecten por acción de su mismo peso o al ser jalados.



Figura 2.56 Vista externa de la conexión de sensor-cable de señal.



Pruebas preliminares de los sensores. Al final del cableado se hacen pruebas preliminares para asegurarse que hay paso de señal a través de éste. Estas consisten en excitar la cara de los sensores

y leer en el otro extremo el pico de voltaje generado, con lo cual se comprueba que los cables están conectados correctamente y que hay paso de señal.

Figura 2.57 Excitación eléctrica del sensor.



Figura 2.58 Lectura del voltaje generado por la señal.



Salida de cables al exterior del conducto. En general, la salida de cables se hace en un punto cercano a la escotilla de acceso. Se requiere poco espacio. Es común que cada proveedor de sistemas de medición tenga una forma específica de sacar los cables. En este caso, la salida de cables se hace por me-

dio de un sistema que se denomina Penetrator™. Este consiste en una tuerca roscada y empaques que impiden que el agua se fugue por las ranuras de la rosca, una vez instalado este dispositivo se cubre con una tapa de registro que evita el impacto directo del agua sobre éste.

Figura 2.59 Perforación del orificio en donde se monta el pasacables mencionado.



Figura 2.60 Orificio visto desde el interior del conducto.



Figura 2.61 Orificio visto desde el exterior del conducto.



Figura 2.62 Componentes del sistema para sacar el cableado del conducto.



Figura 2.63 Vista interna una vez que el dispositivo es colocado.



Figura 2.64 Registro colocado al interior del conducto para evitar que el flujo golpee directamente al dispositivo.



Figura 2.65 Vista externa del dispositivo armado e instalado correctamente.



Figura 2.66 Sistema totalmente instalado en el interior de un conducto a presión.



Figura 2.67 Líneas de señales electrónicas conectadas al medidor.



Como se mencionó en el apartado 2.1, el principal objetivo de la instrumentación llevada a cabo en Centrales Hidroeléctricas es el de optimizar la producción de energía eléctrica. Para esto, la instalación del sistema de medición es importante, sin embargo, sólo es una parte del conjunto. Para cuantificar la eficiencia de una máquina hidráulica de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Ph = \eta H Q \gamma + \Delta ph \quad (2.26)$$

Ph = Potencia Hidráulica, KW

H = Caída Neta, m

Q = Gasto volumétrico, m³/s

η = Eficiencia de la máquina, adim.

γ = Peso específico del flujo, kg/m³

Es necesario conocer además del gasto volumétrico la carga hidráulica neta, esto es, el nivel del embalse menos el nivel de desfogue de las turbinas, temperatura del agua, y apertura del distribuidor; para lograrlo, se lleva a cabo una instrumentación complementaria en la Central. Se muestra a continuación la instalación de algunos de estos elementos.

Figura 2.68 Perforación en una tubería del sistema de enfriamiento para instalar un termopar para medir la temperatura del agua.



Figura 2.69 Termopar tipo J instalado.



Figura 2.70 Sensor para medir el nivel del embalse. El sitio en donde se debe instalar estará lo más aislado posible del oleaje y de la acción del viento, para evitar que la estructura se afloje y pierda la horizontalidad.



Figura 2.71 Sensor de nivel tipo ultrasónico para determinar la elevación del espejo de agua del embalse.



Figura 2.72 Sensor de nivel tipo ultrasónico para determinar la elevación del espejo de agua del embalse.



2.11. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

2.11.1 Análisis de información de la prueba de funcionamiento del equipo

Un indicativo de confiabilidad de la medición consiste en conocer la incertidumbre de la misma. En el sector hidroeléctrico, la norma IEC-4191 establece como se deben hacer las pruebas de entrega de equipos generadores nuevos, sin embargo, en la práctica también se utiliza este protocolo con algunas modificaciones para llevar a cabo las denominadas pruebas de funcionamiento de los sistemas de medición.

El procedimiento estándar establece que se debe probar el funcionamiento de las unidades a bajas y altas potencias de ida y vuelta, evitando rangos de generación intermedia en la que las vibraciones de la unidad sean excesivas. Las potencias y/o los gastos a probar se acuerdan entre las partes.

Una vez que se obtiene el permiso, fecha y hora de la prueba por parte de la entidad reguladora de la producción eléctrica ya sea local o nacional, se debe verificar que toda la instrumentación adjunta esté debidamente calibrada y/o purgada antes de empezar la prueba. Esto incluye: termopares, transductores, sensores, intensidad de señal, etc. En general, se empieza por generar la potencia más baja permisible dejando cierto tiempo en el

cual se espera que tanto el flujo como el perfil de velocidades se establezca (puede ser de 5 a 10 minutos), seguido por un lapso de tiempo de igual magnitud al anterior en el que la unidad electrónica o medidor propiamente dicho adquiere las propiedades de los flúidos y los datos del flujo, como son: velocidad del sonido, intensidad de señal, tiempo de travesía de la señal en cada trayectoria así como la velocidad promedio, después de ello se procede a cambiar la potencia de la unidad y por ende del caudal en la obra de conducción. Este procedimiento puede ser efectuado de menor a mayor potencia y viceversa.

El análisis de los resultados de la prueba conlleva la determinación de la incertidumbre en la medición. En general, la incertidumbre tiene dos componentes principales, una asociada a la repetibilidad de la prueba denominada aleatoria y la otra asociada a errores que se reproducen con el mismo sentido y magnitud en todas las mediciones de una serie, es decir, se pueden asociar a procedimientos, a fenómenos físicos al momento de efectuar una prueba, o a los dispositivos de medición mismos.

En el siguiente cuadro se presenta una evaluación de la incertidumbre en un sistema de medición de 4 trayectorias, para un gasto dado.

Cuadro 2.4 Evaluación de incertidumbre de un sistema instalado.

Escenario:		CENTRAL HIDROELÉCTRICA GUSTAVO DÍAZ ORDAZ (BACURATO) GASTO APROXIMADO 22.4185 M ³ /S				
Cálculos hechos por:		S. Tamari (2007/07/17)				
Comentario:						
Variable	Unidad	Tubería	Par 1	Par 2	Par3	Par 4
1 co	(m/s) =	1480.7				
2 D	(m) =	4.600				
- u(D)	(m) =	0.006				
3 v _i	(m/s) =		1.196	1.383	1.380	1.332
4 w _i	(-) =		0.138197	0.361804	0.361804	0.138197
5 a _i	(deg) =		54.0	18.0	-18.0	-54.0
6 V	(m/s) =	1.349				
7 A	(m ²) =	16.617				
8 Q	(m ³ /s) =	22.419				
9 e	(m) =		0.038	0.038	0.038	0.038
- u(e)	(m) =		0.003	0.003	0.003	0.003
10 phi	(deg) =		45.4	45.9	45.9	45.4
11 tau	(s) =		1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05
12 dtau	(s) =		2.0E-08	2.0E-08	2.0E-08	2.0E-08
- u(dtau)	(s) =		2.0E-09	2.0E-09	2.0E-09	2.0E-09
13 L _i	(m) =		3.691	5.985	5.985	3.691
- u(L _i)	(m) =		0.006	0.006	0.006	0.006
14 t1i	(s) =		2.50E-03	4.05E-03	4.05E-03	2.50E-03
15 t2i	(s) =		2.50E-03	4.05E-03	4.05E-03	2.50E-03
- u(t _i)	(s) =		3.8E-08	8.4E-08	9.1E-08	6.2E-08
16 dti	(s) =		2.8E-06	5.2E-06	5.2E-06	3.1E-06
u-repet (v _i)	(m/s) =		0.023	0.032	0.034	0.037
(rel)			0.019	0.023	0.025	0.028
u-repet (Q)	(m ³ /s) =	0.297				
(rel)		0.013				
c2-dti	=		7.3E-07	2.8E-07	2.8E-07	7.2E-07
c2-Li	=		7.7E-06	4.0E-06	4.0E-06	9.5E-06
c2-D	=		2.5E-06	3.5E-06	3.5E-06	3.1E-06
c2-e	=		2.5E-06	3.5E-06	3.5E-06	3.1E-06
u-repro (v _i)	(m/s) =		0.004	0.003	0.003	0.004
(rel)			0.003	0.002	0.002	0.003
u-repro (Q)	(m ³ /s) =	0.066				
(rel)		0.003				
						Velocidad del sonido en el agua
						Diametro interno de la tubería
						Incertidumbre estandar sobre D
						Velocidad del agua entre cada par de sensores
						Factores de peso para la integración
						Angulo de cada par de sensor % centro tubería
						Velocidad promedio del agua en la tubería
						Area hidraulico
						Caudal
						Espesor de cada sensor ultrasónico
						Incertidumbre estandar sobre e
						Angulo de cada par de sensor % eje tubería
						Retraso debido a la electronica
						Diferencia entre dos sensores de un mismo par
						Incertidumbre estandar sobre dtau
						Longitud de interrogación de cada par de sensor
						Incertidumbre estandar sobre Li
						Tiempo de travesía hacia aguas arriba
						Tiempo de travesía hacia aguas abajo
						Incertidumbre estandar sobre t1i o t2i
						Diferencia de tiempo de travesía
						Repetibilidad de las mediciones de velocidad
						Valor relativo
						Repetibilidad de la estimación del gasto
						Valor relativo
						Contribución a la varianza de dti
						Contribución a la varianza de Li
						Contribución a la varianza de D
						Contribución a la varianza de e
						Reproducibilidad de las mediciones de velocidad
						Valor relativo
						Reproducibilidad de la estimación del gasto
						Valor relativo

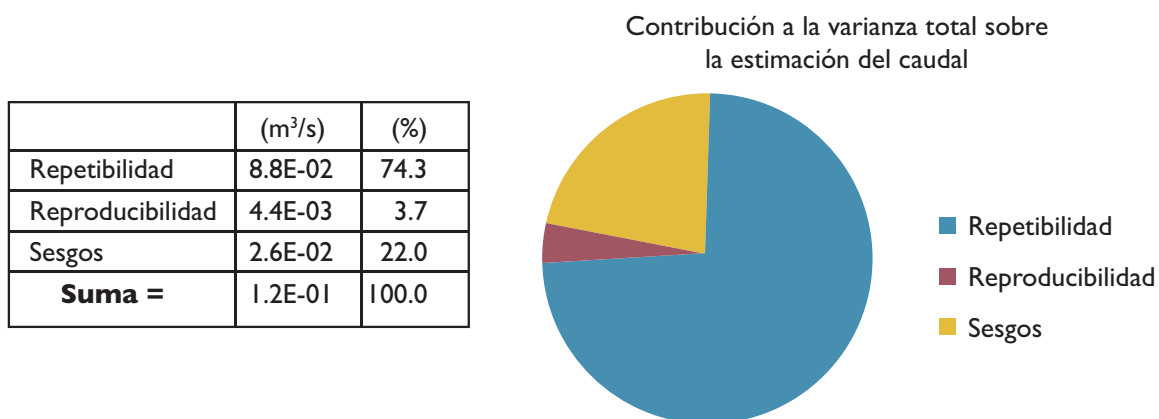
Cuadro 2.4 Evaluación de incertidumbre de un sistema instalado. (Continuación).

u-int (Q)	(rel) =	0.005					Sesgo debido a la técnica de integración
	(m3/s) =	0.112					Valor absoluto
u-flujo (Q)	(rel) =	0.005					Sesgo debido al flujo no ideal
	(m3/s) =	0.112					Valor absoluto
u-sens (Q)	(rel) =	0.001					Sesgo debido al flujo perturbado por los sensores
	(m3/s) =	0.022					Valor absoluto
u-med (Q)	(rel) =	0.001					Sesgo debido al funcionamiento del medidor
	(m3/s) =	0.022					Valor absoluto
u-sesgo (Q)	(m3/s) =	0.162					Reproducibilidad de la estimación del gasto
	(rel) =	0.007					Valor relativo
u-total (Q)	(m3/s) =	0.345					Incertidumbre total de la estimación del gasto
	(rel) =	0.015					Valor relativo

CENTRAL HIDROELÉCTRICA GUSTAVO DÍAZ ORDAZ (BACURATO) GASTO APROXIMADO 22.4185 M3/S

Q = 22.419 +/- 0.690 (m3/s) con $k = 2$ (factor de cobertura)
+/- 3.1 (%)

Figura 2.73 Gráfica de Contribución a la Varianza Total sobre la estimación del gasto.



2.11.2 Monitoreo de las variables del sistema de monitoreo local

El Sistema de Monitoreo Local está formado por un sensor de temperatura, un sensor del nivel del embalse, un sensor de nivel de desfogue de las unidades generadoras, la unidad electrónica o medidor; la unidad central de procesamiento, así como todos los elementos para su interconexión y suministro eléctrico. La información de todos estos componentes es procesada y desplegada en tiempo real en la pantalla de monitoreo de la sala de control de la central hidroeléctrica, dicha información también es descargada al servidor de la red nacional de la Entidad que contrata el servicio

ya sea privada o gubernamental. Esta información está disponible para cualquier persona que tenga acceso a dicha red, en este caso, en cualquier parte de la República y es útil para tomar decisiones relacionadas a la producción de la energía eléctrica.

2.12. SATISFACCIÓN DE LAS NECESIDADES Y REQUERIMIENTOS DE MEDICIÓN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Ya se ha comentado que la medición del gasto circulante en centrales hidroeléctricas tiene como objetivo primordial monitorear la eficiencia en la

Figura 2.74 Despliegue del Monitoreo de variables relativas al sistema de medición.



producción de energía de las unidades generadoras, es así, que el sistema de monitoreo en cada Central, tal y como se ha descrito en los párrafos anteriores cumple ampliamente con los objetivos para lo cual fue implementado, en ese sentido, esto se puede considerar como una aplicación exitosa de la medición de gasto (Figura 2.73).

Esto puede mejorarse mediante una evaluación cuidadosa por parte del implementador; acerca si es conveniente en términos económicos llevar a cabo la instrumentación en cada una de las unidades en una Central o interpolar los resultados de una unidad hacia las otras con las debidas consideraciones.

2.13. OBSOLESCENCIA, TÉRMINO DE VIDA ÚTIL, MANTENIMIENTO E INCUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Al igual que en muchos ámbitos, la irrupción de la ciencia aplicada produce mejoras en los sectores

tecnológicos y el de la producción de energía eléctrica no es la excepción, es así, que un sistema de medición ultrasónico puede quedar en la obsolescencia al haber mejoras en los sensores, por ejemplo, sí se introducen en el mercado sensores más rápidos, con más capacidad de discriminación de señales, materiales más resistentes, etcétera.

En general, se considera un periodo de 5 años como vida útil de un sistema de medición, plazo que en la realidad es superado por mucho, sin embargo, debido al medio en que son instalados, estos pueden sufrir deterioros o dejar de funcionar debido a golpes, colisiones, o si las condiciones del medio son corrosivas y/o agresivas. Si hay presencia de materia orgánica, el material transparente que cubre o protege los sensores puede ensuciarse o dañarse, con lo cual, la emisión y recepción de señales se puede ver afectada. Esto perjudicaría la calidad de los datos enviados a la central de procesamiento y sería una condición poco probable en que el sistema de medición no cumpliera con su objetivo. Se recomienda dar mantenimiento general al sistema cada año mínimo o tan pronto como las condiciones prevalecientes en los sitios de instalación lo permitan.

REFERENCIAS

- British Standard ISO/TR 12765. *Technical Report of Measurements of fluid flow in closed conduits – Methods using transit-time ultrasonic flowmeters. First Edition.* United Kingdom, British Standard, 1998. 405 pp.
- Castro, A. *Minicentrales Hidroeléctricas*. Instituto para la diversificación y ahorro de energía, España, 2006. Disponible para World Wide Web: [http:// www. idea.es/](http://www.idea.es/)
- Crane. Division de Ingenieria. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*, México, 1998. Ed. McGraw-Hill.
- Code ISO 6416:2004 *Hydrometry – Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method*. Third Edition. Switzerland. International Standard Organization, 2004, 50 pp. ISO 6416:2004 (E).
- Code IEC 60041:1991-11. *Field Acceptance tests to determine the Hydraulic Performance of Hydraulic Turbines, storage pumps and pump turbine*. Third Edition, 1991 International Standard Organization, 1997.
- Endress & Hauser . *Manual de Medición de Caudal*. E&H Flowtec AG, CH-1453 Reinach/BL, Barcelona, 2005. 464 pp. ISBN 3-9520220-5-5
- Millán B. C et al. *Informe Final del Proyecto HC-06 I 1.3*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2006. 114 pp.
- Pérez, G. A. et al. *Estudio del golpe de ariete aplicado a medición de flujo*. Memorias del XVIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 2012. México. 1440-1446 pp.
- Sóteló A.G. *Fundamentos de Hidráulica General*. Vol. I. México, 1994. Editorial Limusa. 559 pp.
- Tamari, S. et al. *Informe Final del Proyecto HC-0902.1*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2010. 211 pp.
- Urquiza G.U., Adamkowski A., Kubiak J., Sierra F., Janicki W., Fernández J.M. 2007. Medición del flujo de una turbina hidráulica de 170 MW utilizando el método de Gibson. *Ingeniería Hidráulica en México* **22(3)**: 125-137.
- Wolfgang A. Schmid, Lazos M. Rubén J. *Guía para estimar la incertidumbre Revisión 1*. México, Centro Nacional de Metrología, 2004.



3 MEDICIÓN EN PRESAS DE ALMACENAMIENTO

*Víctor Manuel Arroyo Correa
Víctor Guillermo Mejía Astudillo
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

3.1. INTRODUCCIÓN

Cualquier actividad relacionada al uso y consumo del agua debe llevar implícito la medición de este recurso. En el sector agrícola, el conocer la cantidad de agua extraída y entregada permite obtener importantes beneficios técnicos (por ejemplo se pueden obtener las eficiencias en su uso, ya sean las eficiencias electromecánicas del equipo de bombeo); usos económicos (por ejemplo permite su facturación y cobranza); y usos ambientales (por ejemplo permite el control de la calidad y la explotación de las fuentes subterráneas y superficiales). Medir bien el agua trae consigo beneficios como: aumenta la confianza de los usuarios, apoya objetivamente las decisiones de mejora, aumenta la eficiencia en el uso del recurso, y facilita la comparación en caso de controversia. Por ello la medición no debe verse como la obtención de un número sino la determinación de un componente básico para el análisis integral sobre el uso y explotación del agua.

Para el caso de presas de almacenamiento, la medición del agua tiene como objetivo determinar el volumen acumulado en su vaso, o el volumen extraído a través de la obra de toma o el vertedor. En este capítulo nos enfocaremos a la medición del agua que se extrae a través de la obra de toma mediante una tubería a presión o túnel descargando a un canal.

Las diferentes obras de toma que existen en las presas y la disposición de sus componentes repercuten de manera importante en el método de medición, en la ubicación de la sección de aforo y en la selección del dispositivo de medición. Asimismo, la calidad de la medición depende de varios factores entre los cuales se puede mencionar: el dispositivo de medición (selección), el protocolo de medición, la frecuencia de la medición, la experiencia de la persona que toma las mediciones, el análisis de los datos, etc.

La Comisión Nacional del Agua, que es en México la autoridad encargada de administrar y cuidar el recurso, tiene cada vez más la necesidad de incrementar en el tiempo y en el espacio la medición, por ello requiere mejorar continuamente la forma de medir. Actualmente esta mejora en la medición consiste en: (a) sustitución de la medición con molinete y curvas de válvulas, por equipos con mejor exactitud; (b) medición continua, contrariamente a la medición discreta de una o dos o tres veces por día y (c) envío de los datos de medición por telemetría para su consulta en un sitio de la WEB.

Con el fin de llevar a cabo esta mejora en la medición, desde el año 2003 la Comisión Nacional del Agua ha realizado la instalación de sistemas de telemedición en las obras de toma de varias presas de almacenamiento. Este sistema consiste básicamente de sensores ultrasónicos y componentes para el almacenamiento, transmisión y recepción de datos vía satélite.

El propósito de este capítulo es exponer las experiencias que se han tenido en la selección, la instalación, el funcionamiento, y el seguimiento en el desempeño de estos equipos.

Lo nuevo en esta segunda edición, es mostrar el caso en que no es posible instalar medidores directamente en la obra de toma de las presas, ya sea por la falta de acceso y/o la presencia de turbulencia que generan las llamadas “aguas blancas” que se encuentra en los rápidos de un cauce o conducto, con una carga considerable de burbujas y en ocasiones acompaña también de sedimentos. Estas condiciones obligarán a instalar los sensores ultrasónicos aguas abajo hasta encontrar una estructura hidráulica con las condiciones favorables. Por lo general, esto se facilitará cuando esta estructura es un canal revestido, pero será prácticamente imposible cuando sea un cauce natural o un conducto no revestido de sección irregular; si este fuera el caso solamente sería posible con la rectificación.

3.2. IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES Y REQUERIMIENTOS DE LA MEDICIÓN EN PRESAS

La medición de la extracción del volumen de agua que se realiza por la obra de toma de las presas de almacenamiento, siempre se ha llevado a cabo, sin embargo, diversos estudios realizados por la Conagua y el IMTA, demostraron que dicha medición podría mejorarse sustancialmente (Patiño et al., 1996). Por lo general, estas mediciones se efectúan a través de curvas de calibración de las válvulas de operación apoyadas de aforos realizados en secciones muy alejadas de éstas. Más aún, en la mayoría de los casos no existe una sección de aforo apropiada. Por lo común, los métodos de aforo utilizados son a base del uso del molinete y se realizan de manera poco frecuente. En estos estudios se compararon los gastos aforados con molinetes calibrados y los reportados por los encargados de las presas; se encontraron diferencias significativas.

De este estudio se determinó que en la mayoría de los casos, la medición podría mejorarse sustancialmente. Básicamente se presentaron los siguientes problemas: (a) exactitud, debido a que los métodos usados no tienen una exactitud alta (molinete y curvas de calibración de válvulas y compuertas); (b) totalización, porque se mide a ciertas horas sin registrar los cambios de gasto fuera de este horario, por lo que los volúmenes acumulados podrían tener grandes errores; y (c) problemas de operación, ya que el presero coloca aproximadamente

el gasto solicitado y tiene que esperar varias horas, inclusive más de un día, para que los aforadores le den el gasto que está extrayendo y a veces no es el solicitado.

Considerando estos problemas, se puede decir que las necesidades y requerimientos de la medición en presas se puede llevar a cabo atendiendo los siguientes tres aspectos: (a) mejorando la exactitud de la medición; (b) aumentando la frecuencia de la medición (medición continua) y (c) mayor oportunidad en la recepción, análisis y respaldo de los datos.

Mejorando la exactitud de la medición

La medición en las obras de toma se realiza a través de las curvas de calibración de las válvulas de operación o con molinete, que tienen en el mejor de los casos un error nominal del 10%; actualmente se han colocado medidores ultrasónicos en tuberías con una tolerancia nominal del $\pm 2\%$.

Medición continua

El método de medición con molinete se realiza de una a tres veces al día, dependiendo del personal disponible y de situaciones de emergencia en las que puede aumentarse la frecuencia de medición a cada hora. De cualquier manera la información es discreta durante el transcurso del día. Con los nuevos equipos de medición se está monitoreando con una frecuencia más alta que puede llegar a la lectura de datos cada minuto, por ejemplo. Esto

es muy útil porque se pueden detectar variaciones en el gasto en tiempos diferentes a los que se mide actualmente.

3.3. MAYOR OPORTUNIDAD EN LA RECEPCIÓN, ANÁLISIS Y RESPALDO DE LOS DATOS

Los sistemas de medición que se están instalando tienen componentes para almacenar, transmitir y recibir vía satélite o celular las variables hidráulicas de gasto, volumen total y velocidad, de esta forma son concentradas a través de un servidor para ser consultadas vía Internet. Si bien el envío de información es de tres veces por día, dicha información enviada es la lectura de gastos cada 15 minutos, pudiéndose variar este periodo. Esto es útil porque la información puede llegar rápidamente a las autoridades de vigilancia y control de las extracciones, simplemente ingresando a una página de Internet. Asimismo en campo, el operario (presero) puede estar observando en la pantalla de la unidad electrónica el gasto que se está extrayendo en el instante que realiza el movimiento de las válvulas. Esto le permite ajustar lo más exacto posible el gasto solicitado sin esperar a que se haga el aforo aguas abajo.

Con base en los requerimientos y necesidades mencionadas, la concepción del sistema de medición se realizó para que lleve a cabo las siguientes funciones:

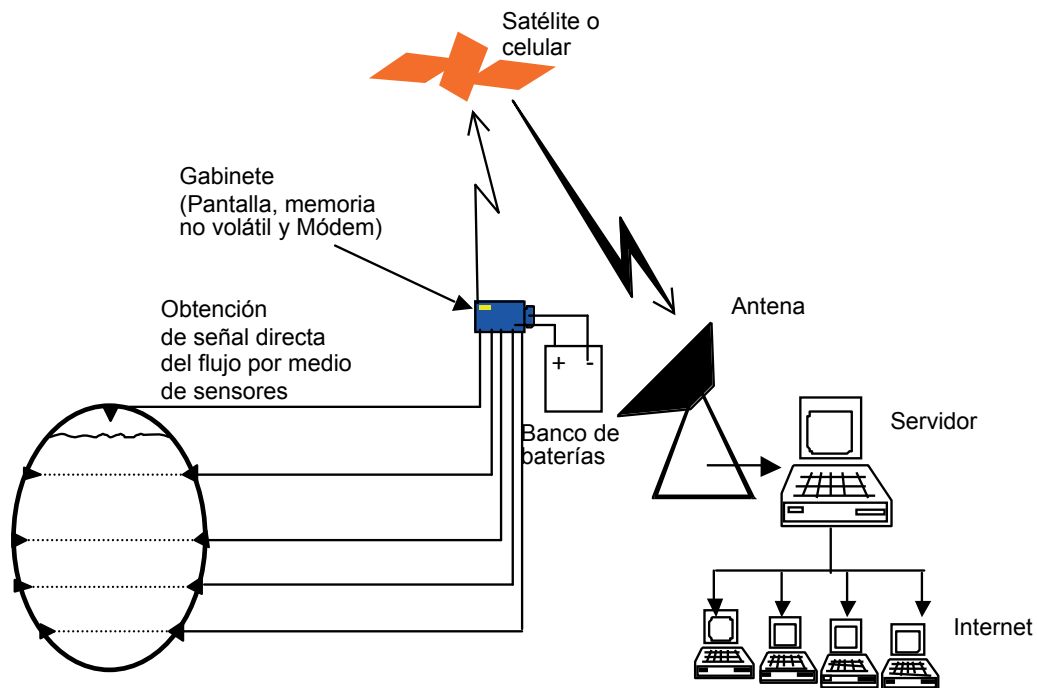
a) obtener una señal directa del flujo a través de los sensores ultrasónicos de velocidad y nivel, b) mostrar la velocidad, el flujo, y el volumen totalizado en una pantalla, c) almacenar esta información en *in situ* a través de una memoria no volátil, d) extraer la información *in situ* por medio de un interrogador portátil (puede ser USB), e) enviar información a oficinas vía satélite a través de un módem satelital o celular, y f) acceder a la información, en las oficinas, por medio de una página WEB. A este sistema se le asignó el nombre de sistema de telemedición (figura 3.1).

3.4. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA DE LA MEDICIÓN EN PRESAS

Con base en los requerimientos y necesidades comentados en el inciso anterior, la Conagua está ejecutando un programa para mejorar la medición del agua en obras de toma de varias presas. En éste, se contemplan obras de toma que son conductos a presión y a superficie libre. Siendo éstas últimas más complejas de medir debido a las variaciones del tirante y a la forma de la sección del conducto.

En general, las obras de toma en presas son conductos a través de los cuales se extrae agua de acuerdo con una ley determinada, sus principales componentes son: estructura de entrada, conductos, mecanismos de regulación y emergencia, equi-

Figura 3.1 Funcionamiento del sistema de telemedición.



pos de operación y dispositivos para disipación de energía. Por su disposición las obras de toma pueden clasificarse en (Torres, 1987): (a) Obras de toma con tubería a presión a través de cortinas de concreto, Figura 3.2; (b) obra de toma con tiro

vertical, túnel a presión y tubería expuesta en túnel, Figura 3.3 y (c) obra de toma con tiro vertical, túnel a presión, galería vertical para compuertas deslizantes y conducto abierto en túnel, Figura 3.4

Figura 3.2 Obra de toma con tubería a presión a través de cortina de concreto.

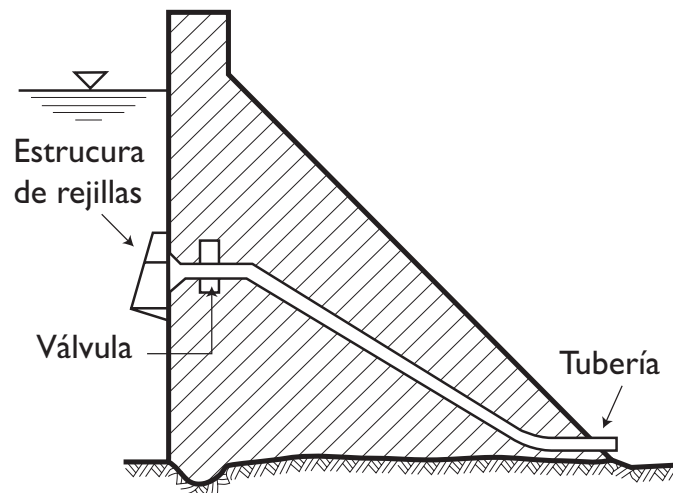


Figura 3.3 Obra de toma con tiro vertical, túnel a presión y tubería expuesta en túnel.

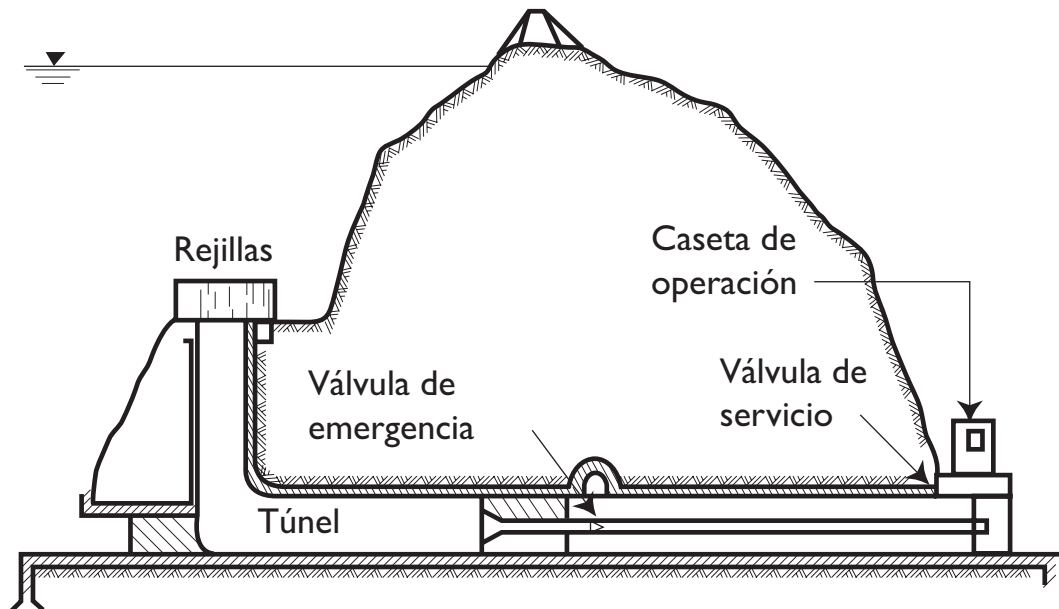


Figura 3.4 Obra de toma con tiro vertical, túnel a presión, galería vertical para compuertas deslizantes y conducto abierto en túnel.

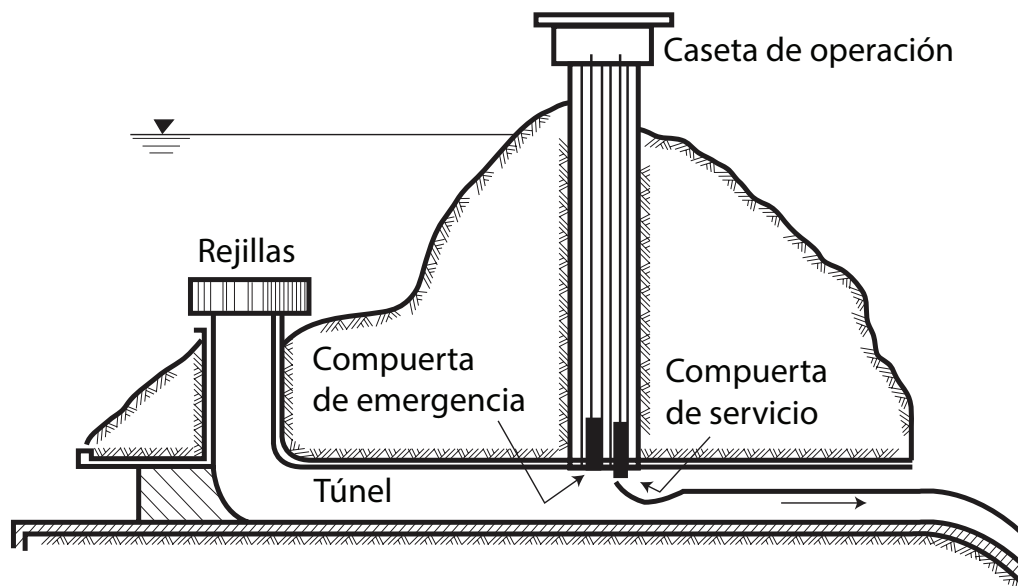


Figura 3.5 Obra de toma con galería a presión.

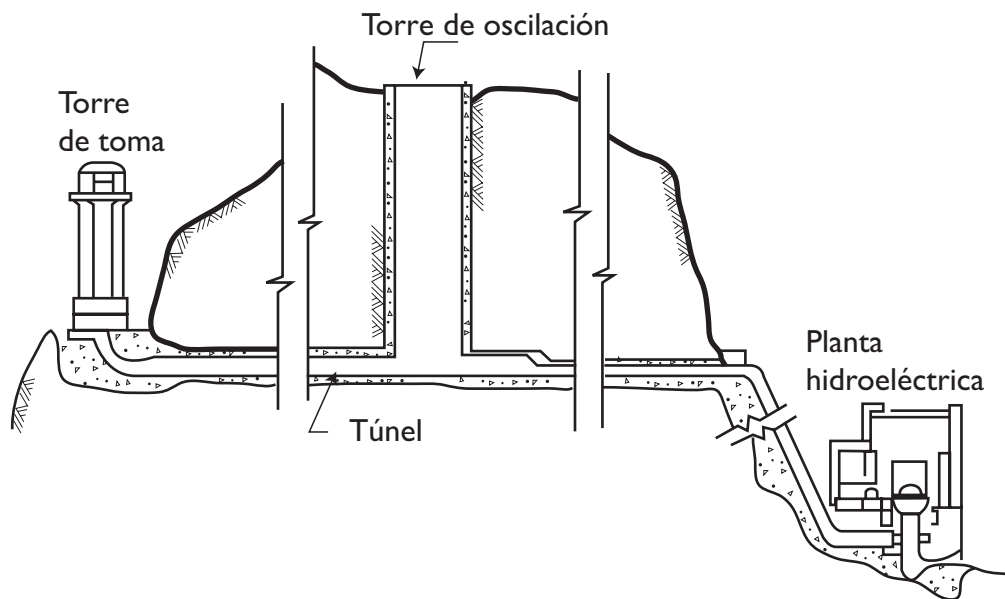
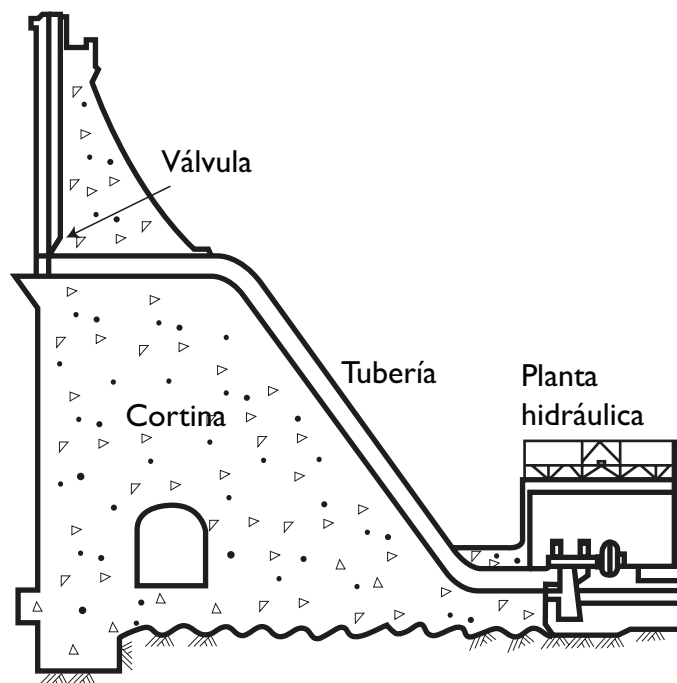


Figura 3.6 Obra de toma con tubería parcialmente embebida en la cortina.



Como se puede apreciar en las figuras anteriores de las diferentes obras de toma, no se contempla una parte específica dedicada a la medición del agua. Aunque se menciona que las principales funciones de las obras de toma se relacionan con el control de la extracción, se deja la acción de medir (para controlar) a elementos ajenos y posteriores a la construcción de la presa y su obra de toma. El hecho de no diseñar alguna parte de la obra de toma para medición redundante, obviamente, en que la medición se hará en condiciones desfavorables adaptadas a las condiciones finales de la presa ya construida. Como ya se mencionó, los métodos más usuales de medición son el molinete y la estimación del gasto con valores de coeficientes suministrados por los fabricantes de válvulas y compuertas que claramente no eran obtenidos por calibración en el sitio.

Para mejorar la medición es recomendable medir en alguna parte de la obra de toma en lugar de hacerlo aguas abajo; dos son las razones básicas: generalmente, aguas abajo de la obra de toma, los cauces se encuentran en condiciones naturales muy parecidas, o iguales, a las que tenían antes de la construcción de la presa; ello hace que no se cumplan los requisitos básicos de cualquier sección de aforo, es decir, tramo recto de sección uniforme y estable en una longitud de alrededor de diez veces la carga máxima que se pueda registrar (Skerchtly, 1988). Otra razón es que los sistemas de medición tienen partes cuya protección es mejor si se alojan en el cuerpo de la obra de toma, ya que se tiene mayor vigilancia. Sin embargo, no es

trivial decidir qué tipo de sensores usar y en dónde deben colocarse. Uno de los inconvenientes lo representa el diseño de la obra de toma ya que en muchos casos no presenta sitios adecuados de colocación y en algunos casos son completamente inexistentes (ver por ejemplo Figura 3.2, donde la tubería está completamente embebida en concreto). Afortunadamente, la tecnología de medición actual presenta bastantes alternativas que se adaptan a la mayoría de las condiciones.

Como se mencionó anteriormente en esta edición se presentarán algunos casos en que no fue posible la colocación de los sensores en algún sitio de la tubería a presión o en el túnel de la obra de toma y la única alternativa fue colocarlos aguas abajo, incluso con rectificación de cauce.

3.4.1 Obra de toma con conducto a presión sin acceso al exterior del tubo

Este tipo de obras de toma son difíciles de instrumentar. Corresponde al ejemplo de la figura 3.2, no existe ninguna parte donde se puedan colocar los sensores en el exterior del tubo ya que su totalidad está embebida en el concreto. Una posible solución es la colocación de los sensores en el interior del tubo siempre y cuando existan registros que permitan el acceso al interior. Si no existen estos registros la instrumentación sería prácticamente imposible. Adicionalmente, debe ser posible aislar la parte donde se deben colocar los sensores ya que también sería imposible

colocarlos con agua en la tubería. Si la presa estuviera exactamente como indica la figura 3.6, si se podrían colocar los sensores dentro de la tubería ya que la válvula se encuentra en la entrada. La localización de los sensores se haría un poco debajo de la mitad de la tubería en la parte inclinada. Otro problema adicional sería que los tramos rectos no fueran suficientemente largos para cumplir con las especificaciones y se generará turbulencia. Otra consideración importante para la instrumentación de esta toma son las condiciones de seguridad, el trabajar en lugares confinados requiere de buena ventilación para la extracción de gases por el uso de soldadura y otros productos químicos, se requiere de visibilidad, y del uso obligatorio de prendas de protección. En este tipo de obras se buscaría la instalación agua abajo sobre el cauce natural (con rectificación).

3.4.2 Obra de toma con conducto a presión y acceso al exterior del tubo

Este tipo de obras de toma (figura 3.3) representa la opción más sencilla de instrumentar siempre y cuando se tengan los tramos rectos suficientes. Ya sea colocando sensores secos o húmedos. Para colocar los sensores húmedos de inserción, se debe tener una distancia adecuada entre la pared del túnel para poder maniobrar con los taladros con que se perfora la tubería. La distancia mínima es de 1.5 m. Esta restricción no aplicaría para obras de toma con tubería expuesta fuera de túneles (Figura 3.5 y Figura 3.6) donde la tubería está al

aire libre. La dificultad de estas tuberías es que a veces están inclinadas y las maniobras para colocación de los sensores es difícil. Inclusive se pueden colocar sensores húmedos de inserción sin vaciar la tubería por medio de taladros especiales. En el caso de colocar sensores de inserción hay que tener cuidado en seleccionar adecuadamente el tipo, por ejemplo hay sensores de inserción en que para colocarlos es necesario tener que entrar a la tubería y desde adentro tener que apretar algunas piezas roscables por lo que su colocación no se podría realizar si no se puede entrar a la tubería y llegar hasta la sección en que se están instalando. Otro tipo de sensores de inserción se colocan realizando las maniobras desde afuera, en esta caso no es necesario entrar a la tubería.

Para el caso de sensores secos se debe tener cuidado en colocarlos en tramos de tuberías que no tengan muchas incrustaciones ya que la señal puede ser amortiguada y desviada con otro ángulo. Para encontrar el sitio adecuado se aconseja determinar el espesor de la tubería mediante un medidor de espesores ultrasónico, si el espesor resulta ser mayor que el de diseño y varía de manera irregular con seguridad se tendría un tramo con incrustaciones. Otros de los factores es la vibración excesiva de las tuberías, aunque no hay muchos estudios al respecto, se considera que la vibración excesiva puede interferir en la señal de los sensores, para ello se aconseja realizar una prueba preeliminar con medidores ultrasónicos portátiles para los gastos máximos de operación de la obra de toma. Estas pruebas se pueden realizar en di-

ferentes tramos hasta encontrar el sitio ideal en que no haya interferencia. En caso de que no sea satisfactoria esta prueba la opción sería considerar medidores húmedos (colocación en el interior de la tubería).

3.4.3 Obra de toma con conducto abierto

Este tipo de toma se caracteriza principalmente porque son túneles excavados en laderas de cerros o alojados sobre la misma cortina de la presa. Por lo general son de sección circular o herradura revestidos de concreto. Se controlan principalmente a través de compuertas localizadas en la parte media del desarrollo del conducto como se muestra en la Figura 3.4, en donde en este caso el tramo del túnel aguas arriba de las compuertas se encuentra a presión, mientras que en el tramo aguas abajo el flujo del agua se desarrolla a superficie libre. Si este tramo es corto, el flujo se moverá con mucha turbulencia y con un contenido grande de burbujas de aire (aguas blancas), por consiguiente el flujo no presenta una superficie bien definida y la medición difícilmente se podrá llevar a cabo con buena exactitud. Incluso, en estas condiciones algunos sensores con tecnología tipo tiempo de tránsito presentan pérdidas de señal y en consecuencia no funcionan. En este caso la medición se podrá llevar a cabo identificando una sección aguas abajo de la salida del túnel. Algunas tomas de este tipo por lo general descargan hacia el canal principal por lo que la medición se podrá llevar a cabo sobre esta estructura, se recomienda

buscar la sección lo mas cerca a la descarga para evitar la menor cantidad de pérdidas por evaporación, infiltración y extracción.

Existen otras variantes de este tipo de toma. Por ejemplo cuando se coloca una compuerta de emergencia al inicio del túnel y en la parte media se aloja la válvula de operación. Si se puede acceder al interior, este arreglo permite como opción colocar los sensores en el interior del tramo presurizado, para ello, se debe de cerrar el túnel desde la compuerta de emergencia y abrir la válvula de operación para desalojar el agua, en caso de que quede agua estancada se tendrá que desaguar por las compuertas de desagüe, si la toma no tiene estos accesorios se tendrá que desalojar el agua a través de un equipo de bombeo. En general, antes de decidir esta opción se debe verificar que el tramo presurizado sea lo suficientemente recto para que el perfil de velocidades sea lo más uniforme posible además de verificar que la velocidad media no sobrepase el rango medido por los sensores. El uso de simuladores de flujo puede ayudar en encontrar la mejor sección en donde se encuentra el perfil de velocidades más uniforme y analizar también las presiones máximas a que estarán sometidos los elementos de sujeción y el cableado.

Otro tipo de toma que se encuentra frecuentemente es cuando la extracción del agua se realiza a través de una sola compuerta que se aloja en alguno de los diques de la presa. La descarga del agua es directa sobre el canal principal o el cauce natural. Para este tipo de toma la opción es

medir sobre el canal o el cauce en donde muy probablemente se tendrá que rectificar un tramo para asegurar una buena medición, de nuevo se recomienda buscar la sección lo mas cercana a la descarga para evitar la menor cantidad de pérdidas por evaporación, infiltración y extracción.

3.5. SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN Y SITIOS DE COLOCACIÓN EN PRESAS

La exactitud de las variables medidas dependerá del sitio donde se colocan los sensores. En general, el mejor sitio será donde las líneas de flujo sean uniformes y la sección transversal del conducto sea de una forma geométrica definida (si es posible de sección transversal constante); secciones donde existan remolinos o una fuerte turbulen-

cia (aguas blancas) deben de descartarse. Se recomienda que en la sección de medición exista aguas arriba un tramo recto de 5 a 10 veces el ancho del conducto, y aguas abajo de 3 a 5 veces. El fondo del conducto debe ser estable por lo que se recomienda que la sección esté revestida.

Como primer paso para localizar el sitio y seleccionar el sistema de medición se recomienda un levantamiento en campo, por ejemplo el formato que se muestra en la Figura 3.7 da un panorama general de los requerimientos básicos para una selección adecuada. Este formato corresponde a uno usado para la selección en una obra de toma de una presa de almacenamiento.

Debido a las dimensiones de los conductos de las obras de toma los sensores que se utilizan son ultrasónicos (o acústicos) con tecnología *doppler* o tecnología tiempo en tránsito (o tiempo de travesía).

Ubicación del sitio:

Fecha:	
Elaborado por	
Teléfono	
E-mail:	

Nombre común de la presa	
Nombre oficial de la presa	
Estado	
Municipio	
Forma de llegar	

Nombre del Jefe de Operación	
Teléfono	
E-mail	
Nombre del presero	

Longitud (grados/min/seg)	
Latitud (grados/min/seg)	

Características de la obra de toma:

Designación	☐ Toma Alta ☐ Toma Baja ☐ Toma Única ☐ Toma Norte ☐ Toma Sur ☐ Toma CONAGUA ☐ Toma CFE Otra:_____
Número de conductos	

Gasto de diseño (m ³ /s)	
-------------------------------------	--

Tipo	☐ Túnel como conducto ☐ Túnel con tubo expuesto con turbina ☐ Túnel con tubo expuesto sin turbina ☐ Tubería embebida con turbina ☐ Tubería embebida sin turbina Otro:_____	Tipo de túnel: ☐ Herradura ☐ Circular ☐ Medio punto Otro:_____
Geometría	Tubería	Túnel
	Diámetro (m)	Altura (m)
	Espesor (mm)	Ancho (m)
	Tipo de material	Diámetro (m)
	Longitud (m)	Longitud (m)

Desarrollo	☐ Curva ☐ Tramo recto sin caída ☐ Tramo recto con caída
------------	--

Características de la conducción aguas abajo de la obra de toma:

☐ Canal revestido ☐ Canal no revestido ☐ Cauce rectificado ☐ Cauce natural Otro: _____		
Geometría	Tipo de canal	☐ Trapezoidal ☐ Rectangular Otro: _____
	Altura(m)	
	Ancho(m)	
	talud	
	pendiente	

Consideraciones particulares sobre el sitio:

Aforo y parámetros hidráulicos	
Forma actual de aforo	
Ubicación (referido a la obra de toma)	
Gasto máximo registrado (m ³ /s)	
Gasto mínimo registrado (m ³ /s)	

Uniformidad del flujo a la salida de la obra de toma:	☐ Uniforme ☐ No uniforme ☐ No se
---	---

Características visuales del agua a la salida de la obra de toma	
Espuma	☐ Mucha ☐ Poca ☐ Nada
Oleaje	☐ Mucho ☐ Poco ☐ Nada
Sólidos	☐ Mucho ☐ Poco ☐ Nada

Calidad del agua a altura del sitio:	☐ Agua de buena calidad ☐ Agua que trae muchos azolves ☐ Agua residual (negra o gris) ☐ Agua con problemas de sales
¿Interfiere la obra de excedencias?	☐ Si ☐ No ☐ No sabe

¿Que tan importantes son los problemas de vandalismo a altura del sitio?	☐ Muy importante ☐ Poco importantes ☐ No se
--	--

¿Se puede desalojar el agua de la obra de toma?	☐ Si ☐ No ☐ No se
---	--

¿Qué tan complicado es acceder al interior de la obra de toma?	☐ Fácil ☐ Complicada ☐ No hay acceso ☐ No se
--	---

¿Se tiene una idea de cual sería el equipo más adecuado para instrumentar el sitio?	☐ Tiempo de tránsito extrusivo para tuberías ☐ Tiempo de tránsito intrusivo para tuberías ☐ AGL (Aforador garganta larga en canal) ☐ ATT (Aforador tiempo de tránsito en canal) ☐ ADL (Aforador Doppler lateral en canal) ☐ Otro equipo: ☐ No se
---	---

Fotos

☐	Sitio, visto desde aguas arriba
☐	Sitio, visto desde aguas abajo
☐	Sitio de acceso al interior de la obra de toma
☐	Flujo del agua a la salida de la obra de toma (para apreciar su uniformidad)
☐	Sitio más cercano donde se realizan aforos
☐	Caseta de operación (si existe) o sitio previsto para la caseta (si no existe)
☐	Escala para medir el tirante (si existe)
	” Cualquier otro detalle que se considera relevante para la instrumentación del sitio

3.5.1 Tecnología *doppler* y tecnología tiempo en tránsito

Cuando las ondas sonoras viajan con frecuencias más altas de las que puede percibir el oído humano se califican con el término ultrasónico, en la práctica corresponden a frecuencias superiores a los 18 KHz. Las ondas con estas frecuencias altas tienen longitudes de onda más cortas, por lo que la difracción en torno a un obstáculo se reduce en forma correspondiente a las dimensiones de éste. Por lo tanto es más fácil dirigir y enfocar un haz de ultrasonido. Asimismo las ondas ultrasónicas pueden atravesar sin dificultad las paredes metálicas o plásticas de las tuberías. Esto en la práctica permite que los sistemas de medición a base de ultrasonido puedan montarse sobre las tuberías. Esto es muy importante si se quiere medir en tuberías por donde circulan fluidos con propiedades corrosivas, radiactivas y explosivas.

Las tecnologías empleando medidores acústicos, *doppler* y de tiempo de travesía, fueron desarrolladas al inicio de los años 70's como métodos de medición de flujo. El medidor *doppler* emplea la transmisión de una onda continua mientras que en el medidor tiempo en tránsito la transmisión es a través de pulsos.

El avance más significativo que ha ocurrido en este campo es la capacidad de los medidores de flujo que emplean el método de tiempo de travesía para manejar aplicaciones con un nivel signi-

ficante de sólidos en suspensión y gases (burbujas de aire), ya sea en tuberías o conductos abiertos. Típicamente, los medidores *doppler* son utilizados para estas aplicaciones, sin embargo, con su desarrollo los medidores de tiempo de travesía son cada vez más aceptados. Un medidor de flujo *doppler* requiere de la presencia de sólidos suspendidos o burbujas de aire para realizar correctamente la medición del flujo. Esto no es necesario en un medidor de tiempo de travesía.

Los medidores *doppler*, miden la velocidad de las partículas, ya sean sólidos en suspensión o burbujas de aire, que se desplazan en un fluido en movimiento. Un transductor emisor emite señales acústicas de frecuencia conocida, que son reflejadas por las partículas en movimiento y que son captadas por un transductor receptor. Los cambios de frecuencia que se presentan entre la señal emitida y la recibida y el resultado promedio de estas diferencias se relaciona directamente con la velocidad media de las partículas que se están moviendo dentro del fluido, proporcionando de esta manera la velocidad media del flujo.

Los medidores ultrasónicos de tiempo de travesía están basados en el principio de que una señal acústica de alta frecuencia enviada hacia aguas arriba, viaja más lentamente que una señal enviada hacia aguas abajo (*Bureau of Reclamation, 1997*). Midiendo el tiempo que emplean las señales acústicas, enviadas en ambas direcciones a través de una trayectoria inclinada, puede ser calculada la velocidad promedio en esa trayectoria. Este tipo

de medidores pueden tener una sola trayectoria acústica generada por un par transductor o un sistema multitrayectoria, empleando varios pares, siendo ésta última la más adecuada cuando no se cumple con la longitud recta mínima que deben existir aguas arriba y aguas abajo de donde se colocan los pares transductores. Los medidores que emplean una sola trayectoria acústica generalmente son una alternativa de bajo costo, siendo menos complejos, lo que permite una fácil instalación. Los medidores multitrayectorias trabajan mejor bajo variables y/o distribución de perfil de velocidad no ideal, causado por perturbaciones en el flujo tanto aguas arriba como aguas debajo de la sección de medición. Este tipo de medidores puede suministrar información confiable y continua sobre los gastos en un rango amplio de condiciones, incluyendo el flujo en ambas direcciones.

Los microprocesadores han permitido que la tecnología de tiempo de travesía mejore sus capacidades de cálculo y discriminación de la señal, en un punto donde existían problemas debido a la variación de las características del líquido. Otra de las grandes ventajas en los medidores actuales de tiempo de travesía, es la capacidad para transmitir pulsos múltiples, en lugar del pulso simple que transmitían los primeros sistemas. En un sistema multipulsos la pérdida de señal debido a la presencia de aire o sólidos es insignificante comparadas con el sistema de pulso simple.

Por otra parte, para la obtención del gasto estas tecnologías están incluidas en el método de

área-velocidad. Por lo tanto el principal parámetro que nos proporcionan estos medidores es la velocidad media del flujo en cierta sección. Con relación a este parámetro los medidores *doppler* típicamente tiene un rango de medición entre 0 y 6 m/s, mientras que los medidores tiempo en tránsito su rango es entre 0 y 20 m/s con la posibilidad de medir en ambas direcciones. En las obras de toma, por lo común, las velocidades rebasan los 6 m/s por lo que el uso de los medidores tiempo de tránsito son los más adecuados para este tipo de estructuras.

Desde el punto de vista del tamaño de los conductos, la exactitud de la medición es mejor cuando se pueden tener arreglos de varios sensores ultrasónicos como lo permiten los sensores tipo de travesía, incluso estos arreglos están referenciados en las normas IEC 6041 y la ISO 6416. En la obras de toma se tienen conductos que superan los 2 m de diámetro y cauces o canales con anchos mayores a los 6 m. Por ello, el uso de los medidores tiempo de tránsito son más adecuados para tener una mejor exactitud a la vez de que se está cumpliendo con las normas establecidas.

En el caso de conductos a superficie libre si la variación del tirante es mínima y las dimensiones del conducto son relativamente pequeñas se podría preferir un medidor tipo *doppler*, sin embargo, se tiene que considerar aspectos importantes como la calibración. En general los medidores tipo *doppler* requieren calibración en campo mientras que los tipo tiempo en tránsito no lo requieren.

Con las consideraciones anteriores en la práctica se pueden tener los siguientes sistemas de medición:

3.5.2 Medidores ultrasónicos para conductos presurizados

La opción tecnológica más adecuada la presentan los medidores con sensores ultrasónicos de tiempo de travesía. Existen dos tipos de sensores: los secos (*dry sensors*) y los húmedos (*wetted sensors*). Los sensores secos se colocan sobrepuestos en la tubería (*strap on*) con sujetadores soldados, o bien, con cinchos o abrazaderas. Los sensores húmedos se pueden colocar desde el exterior de la tubería (de inserción) o dentro de la misma (intrusivos).

Figura 3.7 Sensores secos en arreglo "Z".

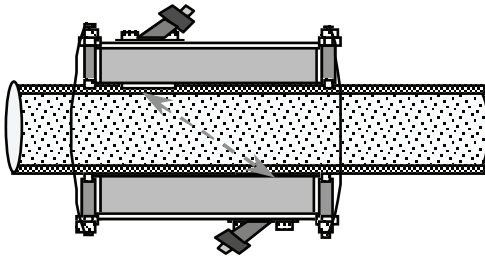
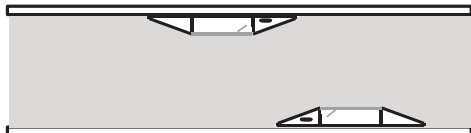


Figura 3.9 Sensores húmedos intrusivos en arreglo "Z" colocados en el interior del tubo.



El arreglo de colocación se refiere a la disposición de los sensores y la trayectoria de la señal ultrasónica. A saber, los arreglos más comunes son en "Z" y "V". Para los sensores secos se pueden tener los dos arreglos (Figura 3.7 y Figura 3.8). Algunos fabricantes de equipos recomiendan un arreglo en "Z" para tuberías con diámetro mayor a 1.6 m, y el arreglo en "V" para diámetros menores a 1.6m. Para el caso de sensores húmedos colocados desde el interior del conducto la única opción es en "Z" (Figura 3.9) ya que por lo general son para tubería de gran tamaño. Los sensores húmedos de inserción pueden aceptar los dos arreglos, incluso hay sensores de este tipo que ya vienen en carrete y que por lo general son para tuberías pequeñas (Figura 3.11).

Figura 3.8 Sensores secos en arreglo "V".

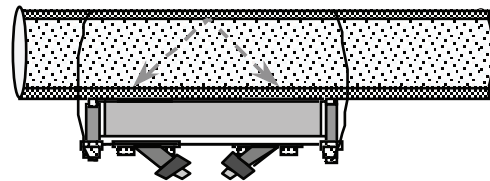


Figura 3.10 Sensores húmedos de inserción en arreglo "Z" colocados desde el exterior del tubo.

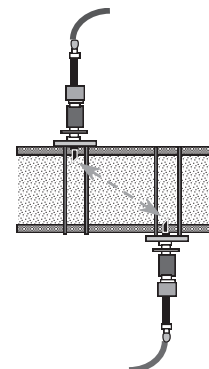
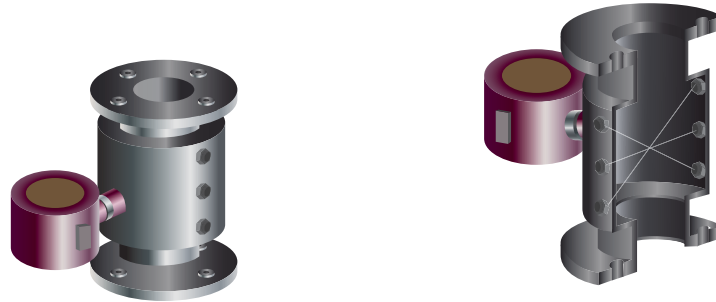


Figura 3.11 Sensores húmedos de inserción (tres pares) en arreglo "Z" en carrete bridado.



3.5.3 Medidores ultrasónicos para conductos abiertos

A diferencia de los sensores usados para tuberías, que calculan el área hidráulica por medio del área de un círculo (el tubo), los medidores para conductos abiertos calculan el área hidráulica en función del nivel. Es por ello que deben tener un sensor adicional para medir dicho nivel. Actualmente, se presentan tres versiones comerciales de medidores con sensores ultrasónicos de efecto *doppler*: uno que se coloca en el fondo del conducto (intrusivo), otro que se coloca en las paredes del conducto (intrusivo) y otro que se coloca fuera

del agua, encima de la superficie (extrusivo). Los medidores ultrasónicos de tiempo de travesía para conductos a superficie libre estiman la velocidad por medio de pares de sensores que funcionan, al igual que los sensores para tuberías, midiendo la diferencia de frecuencia entre un emisor y un receptor, generada por el efecto del flujo. Por lo general, se colocan desde dos hasta cuatro pares de sensores que miden la velocidad. El sensor de nivel que se utiliza para determinar el área hidráulica puede ser externo (ultrasónico) y se sujeta por lo general en la parte superior del conducto de manera que no quede sumergido, por el contrario, si es intrusivo (transductor de presión) se coloca en el fondo del conducto o en un pozo quietador.

Figura 3.12 Sensores ultrasónicos de tiempo de travesía y ultrasónico de nivel.

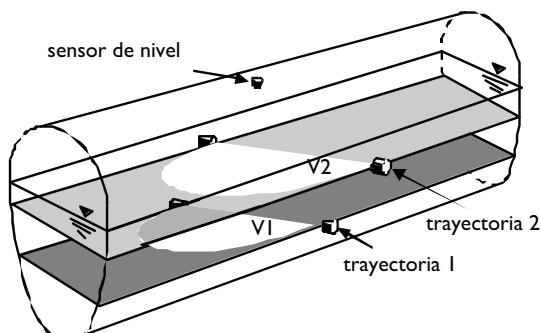


Figura 3.13 Medidores de flujo con sensores ultrasónicos de efecto doppler y ultrasónicos de nivel.

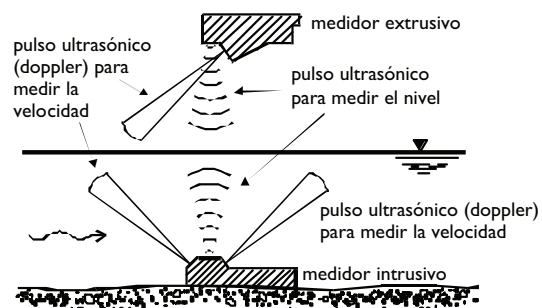
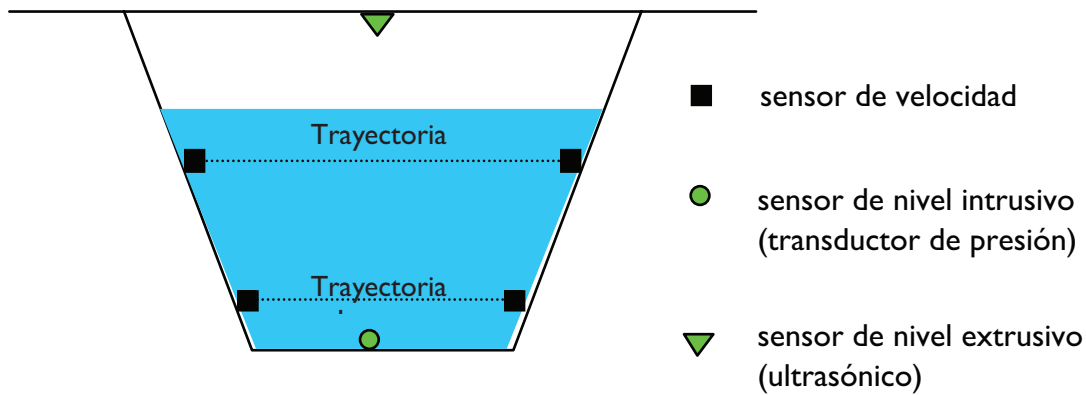


Figura 3.14 Colocación típica de los diferentes sensores en la sección del conducto a superficie libre.



En función de las características de la obra de toma se selecciona el sistema de medición más adecuado. Por ejemplo, si se tiene una tubería alojada en un túnel de dimensiones considerablemente mayores al diámetro del tubo, lo más recomendable es un medidor ultrasónico de tiempo de tránsito

colocado desde el exterior del tubo. En el siguiente Cuadro 3.1 se dan algunas recomendaciones generales en función del tipo de toma considerando que se disponen de los tramos rectos y que no se tiene la presencia de turbulencia (aguas blancas).

Cuadro 3.1 Sistema de medición en función de la obra de toma.

Tipo de conducción de descarga de la obra de toma		Sistema recomendable	Requerimientos
1	Túnel como conducto abierto de pequeñas dimensiones (hasta 5 m de ancho y 3 m de tirante). Figura 3.4	Sensor de nivel: extrusivo o intrusivo. + Sensor de velocidad: tipo doppler o tiempo en tránsito.	Sensor de nivel extrusivo: flujo sin espuma y sin sólidos flotando en la superficie. Sensor de nivel intrusivo: sin excesiva cantidad de sólidos disueltos ni sedimentos. Sensor de velocidad doppler : velocidad menor a 6 m/s. Poca variación de tirantes. Área hidráulica bien definida. Sensor de velocidad tiempo en tránsito: velocidad menor a 15 m/s. Si la variación de tirantes es grande se pueden instalar dos o más pares de sensores. Área hidráulica bien definida.
2	Túnel como conducto abierto de grandes dimensiones (más de 5 m de ancho y más 3 m de tirante). Figura 3.4	Sensor de nivel: extrusivo o intrusivo. + Sensor de velocidad: tipo tiempo en tránsito.	Sensor de nivel extrusivo: flujo sin espuma y sin sólidos flotando en la superficie. Sensor de nivel intrusivo: sin excesiva cantidad de sólidos disueltos ni sedimentos. Sensor de velocidad tiempo en tránsito: velocidad menor a 15 m/s. Si la variación de tirantes es grande se pueden instalar cuatro o más pares de sensores. Área hidráulica bien definida.

Cuadro 3.1 Sistema de medición en función de la obra de toma (Continuación).

3	Tubo con suficiente longitud expuesta para colocación de sensores. Figura 3.3	Sensor de velocidad extrusivo: tipo tiempo en tránsito.	Se debe instalar como mínimo un par de sensores Tubería llena Flujo sin aire disuelto Velocidad menor a 15 m/s Flujo sin turbulencia (en caso de turbulencia se deben colocar como mínimo dos pares de sensores cruzados)
4	Tubo embebido sin suficiente longitud expuesta con acceso al interior. Figura 3.6	Sensores de velocidad intrusivos colocados desde el interior de la tubería: tipo tiempo en tránsito.	Se debe instalar como mínimo un par de sensores Tubería llena Flujo sin aire disuelto Velocidad menor a 15 m/s Flujo sin turbulencia (en caso de turbulencia se deben colocar como mínimo dos pares de sensores cruzados) Se debe permitir desaguar la tubería para la instalación.
5	Tubo embebido sin suficiente longitud expuesta y sin acceso al interior. Figura 3.2	Medición aguas abajo (cauce o canal).	Se tendrá que rectificar y revestir un tramo del cauce o canal.
6	Cualquier otro arreglo diferente a los anteriores.		Se puede tratar como tipo 1 o 2.

3.5.4 Clasificación de arreglos para sensores ultrasónicos en conductos a presión y a superficie libre

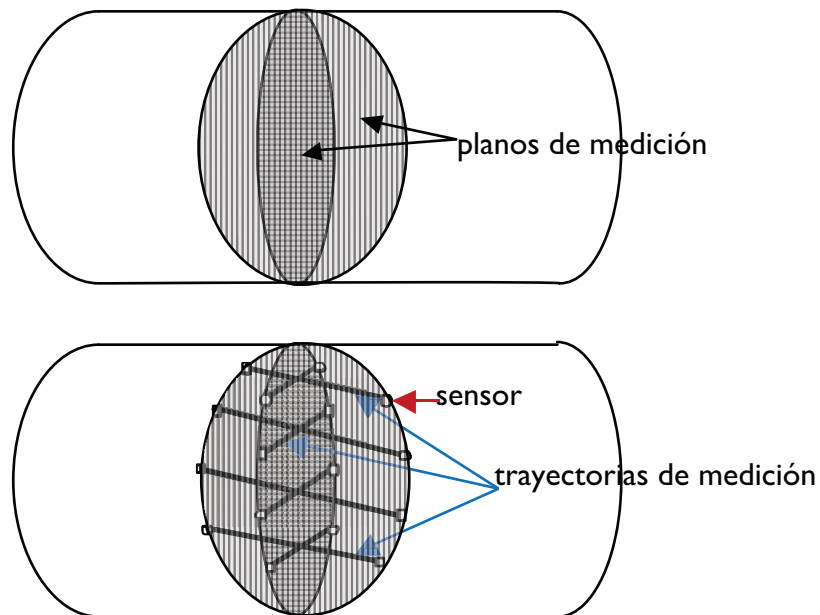
Algunos fabricantes de equipos ultrasónicos han sugerido algunas clasificaciones para referirse de manera práctica a los diferentes arreglos y combinaciones de medidores según la precisión re-

querida. Al respecto se mencionan los siguientes conceptos:

Trayectoria de medición: Es la línea hipotética que sigue el pulso ultrasónico entre sensores.

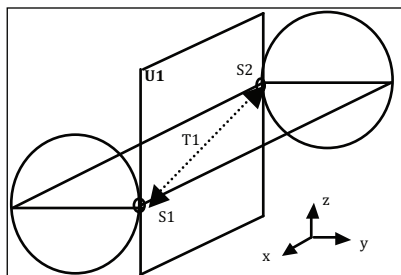
Plano de medición: Es el plano vertical en donde quedan alojadas las trayectorias de medición.

Figura 3.15 Elementos para el arreglo de los sensores en conductos a presión y a superficie libre.



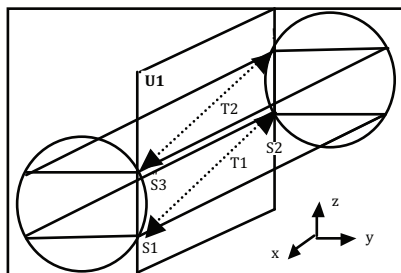
Uno o dos planos pueden alojar un número de trayectorias de medición y por consecuencia serán necesarios un número de sensores ultrasónicos.

Por ejemplo las siguientes combinaciones son posibles:



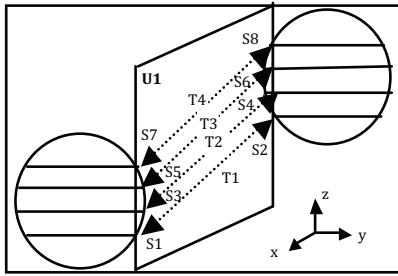
Un plano vertical (U1)
Una trayectoria de medición (T1)
Sensores requeridos (S1, S2): 2

Clave: IE1P



Un plano vertical (U1)
Dos trayectorias de medición (T1, T2)
Sensores requeridos (S1...S4): 4

Clave: IE2P

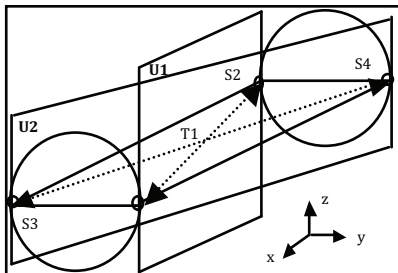


Un plano vertical (U1)

Cuatro trayectorias de medición (T1...T4)

Sensores requeridos (S1...S8): 8

Clave: 1E4P

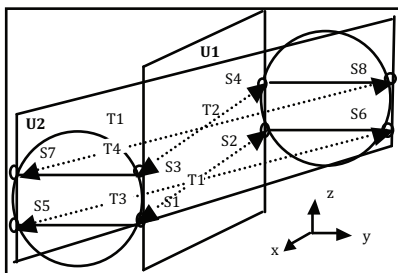


Dos planos verticales (U1, U2)

Dos trayectorias de medición (T1, T2)

Sensores requeridos (S1...S4): 4

Clave: 2E2P



Dos planos verticales (U1, U2)

Cuatro trayectorias de medición (T1...T4)

Sensores requeridos (S1...S8): 8

Clave: 2E4P

De acuerdo a lo anterior, un arreglo con la siguiente clave: 2E8P, tendrá 2 planos verticales, 8 trayectorias (4 en cada plano) y se requerirán 16 sensores.

La clave 2E16P, tendrá igualmente dos planos verticales, pero 16 trayectorias (8 en cada plano) y se requerirán 32 sensores.

La combinación disponible dependerá del fabricante y del nivel de precisión requerida en la medición.

3.6. SUMINISTRO, COLOCACIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN DE SISTEMAS DE MEDICIÓN EN PRESAS

Una vez realizado las visitas de campo y haber seleccionado el sistema de medición más adecuado al tipo de toma, se debe de realizar el proyecto ejecutivo en donde se establecerá claramente el tipo de medidor a suministrar, el sitio de colocación y las pruebas de verificación que deben llevarse a cabo para la puesta en operación.

El proyecto ejecutivo debe de contener las siguientes partes:

- Características de la presa y obra de toma
- Medidor propuesto y localización
 - Tipo de medidor
 - Número de equipos y localización
 - Equipo a suministrar
 - Rango de medición
 - Suministro de energía
 - Sensores acústicos
 - Tolerancia nominal del medidor
 - Variables hidráulicas que debe medir el sistema
 - Sistema de unidades
 - Obtención y almacenamiento de la información
 - Envío de la información
 - Interrogador portátil y equipo de respaldo de información
 - Gabinete de alojamiento
 - Adecuaciones y protección de los cables
 - Estructuras de protección y seguridad
 - Capacitación para el personal encargado del seguimiento
 - Pruebas de verificación
 - Garantía general, asesoría técnica y suministro de refacciones
- Catálogo de conceptos
 - Presupuesto de obra
 - Lista de insumos
 - Análisis de precios unitarios
- Planos
 - Plano de localización de la presa

- Plano de ubicación del sistema de medición
- Plano de instalación del medidor (detalles)
- Plano del funcionamiento del sistema de medición
- Anexo fotográfico de la obra de toma

3.7. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE LA MEDICIÓN EN PRESAS

Una vez que el sistema de medición es verificado se deben establecer los periodos de muestreo en que se almacenarán los datos de medición, así como los tiempos en que se transmitirán por telemetría (vía satelital, celular, o radio) estos registros y consultarlos a través de la *Internet*.

Para definir estos tiempos de muestreo y transmisión se sugiere tomar en cuenta las siguientes definiciones:

Memoria no volátil. Es el dispositivo que permite almacenar información generada por los sensores de medición durante un período determinado. En este caso también una PC pudiera hacer las veces de este dispositivo.

Sitio de medición. Es el lugar geográfico en el que se concentra la información de varios sensores instalados en una presa, para ser enviada a un satélite.

Lectura. Es la serie de valores generados por los sensores instalados, y almacenados en la memoria no volátil para un sitio de medición en un tiempo dado.

Período de muestreo. Es el tiempo que ocurre entre dos lecturas consecutivas.

Período de transmisión. Es el tiempo que transcurre entre dos transmisiones consecutivas de información del sitio de medición al satélite. Típicamente, el período de transmisión será mayor o cuando mucho igual al período de muestreo.

Paquete de lecturas. Es una secuencia de lecturas almacenadas en la memoria no volátil de un sitio de medición durante el período de transmisión para ser enviadas al satélite.

Una vez definidos estos periodos pueden ser obtenidos registros para ser presentados en forma de cuadro. Por ejemplo, a continuación se da un registro obtenido donde se muestra la fecha, la hora y las variables hidráulicas que caracterizan la medición del gasto.

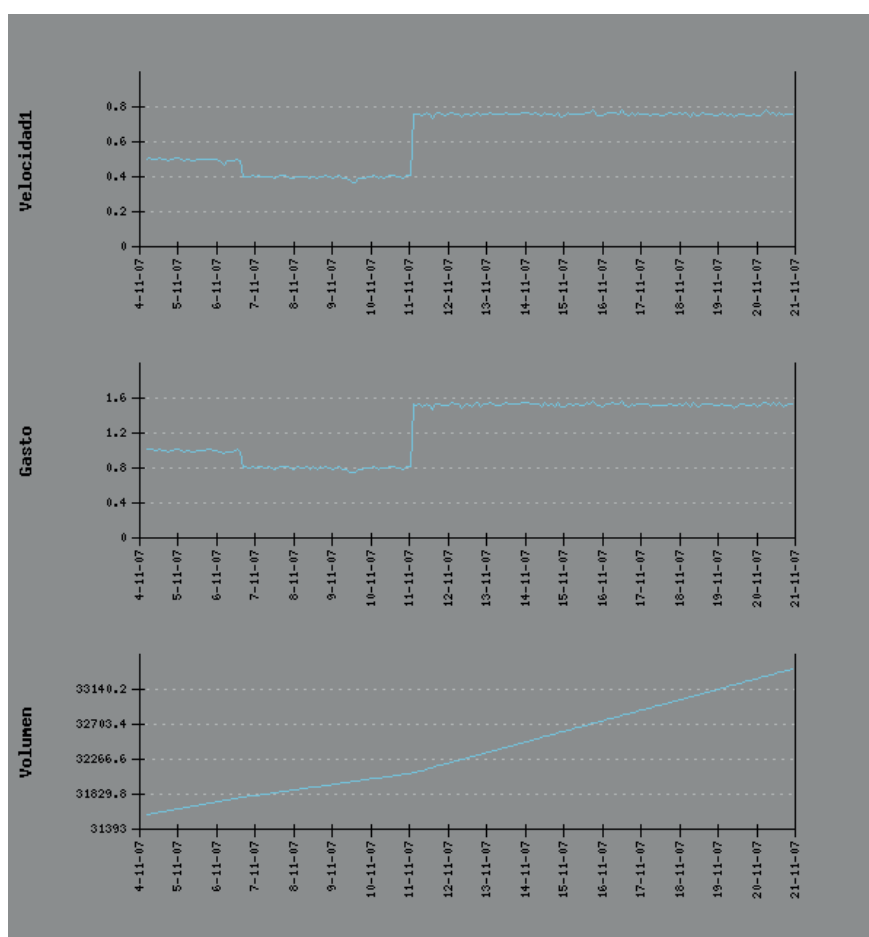
Cuadro 3.2 Información enviada vía satélite y consultada a través de de la Internet.

Fecha/ Tiempo	Velocidad (m/s)	Gasto(m ³ /s)	Volumen total (miles de m ³)
10/07/2016 23:00	1.50	3.023	25464.720
11/07/2016 01:00	1.50	3.020	25486.516
11/07/2016 03:00	1.51	3.024	25508.328
11/07/2016 05:00	1.52	3.062	25530.156
11/07/2016 07:00	1.51	3.041	25551.960
11/07/2016 09:00	1.51	3.032	25573.772
11/07/2016 11:00	1.52	3.054	25595.582
11/07/2016 13:00	1.50	3.013	25617.412
11/07/2016 15:00	1.52	3.048	25639.222
11/07/2016 17:00	1.53	3.073	25661.060
11/07/2016 19:00	1.51	3.031	25682.890
11/07/2016 21:00	1.50	3.008	25704.698
11/07/2016 23:00	1.50	3.009	25726.526
12/07/2016 01:00	1.51	3.024	25748.342

En el cuadro anterior, el periodo de muestreo corresponde cada 2 horas, y el periodo de transmisión corresponde a las 6:00, a las 12:00, y a las 18:00 horas. Estos periodos deben ser definidos por los usuarios de acuerdo a las necesidades de administración del agua.

Otra forma de analizar la información contenida en el cuadro es a través de forma gráfica como se muestra a continuación.

Figura 3.16 Análisis gráfico de la información.



3.8. CASOS DE APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN EN PRESAS DE ALMACENAMIENTO

Presas Gustavo Díaz Ordaz: Corresponde a un sistema de medición con sensores secos colocados en arreglo "Z".

Figura 3.17 Medición del espesor de la tubería.



Figura 3.19 Base con sensor.



Figura 3.18 Soldando las bases para los sensores.



Figura 3.20 Vista general de localización.



Figura 3.21 Gabinete donde se alojan los componentes electrónicos.

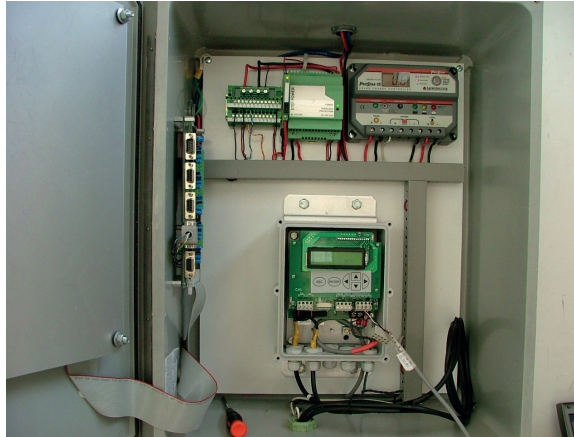


Figura 3.22 Unidad electrónica del medidor.



Presa Santiago Bayacora: Corresponde a un sistema de medición con sensores secos colocados en arreglo "V".

Figura 3.23 Cerco de malla ciclónica para protección de celdas solares.



Figura 3.24 Vista de antena satelital.



Figura 3.25 Sensores en la tubería en arreglo V.



Figura 3.26 Vista del sensor con su placa soldada.



Figura 3.27 Vista hacia aguas abajo.



Figura 3.28 Gabinete principal.



Presas Ignacio Allende: Corresponde a un sistema de medición con sensores húmedos colocados desde el interior de la tubería en arreglo "Z".

Figura 3.29 Inicio de desmonte de la escotilla.



Figura 3.30 Tapa de escotilla removida para acceder al interior de la tubería.



Figura 3.31 Perforación de la tubería para la salida de los cables de sensores.



Figura 3.32 Mediciones preliminares para ubicación de sensores.

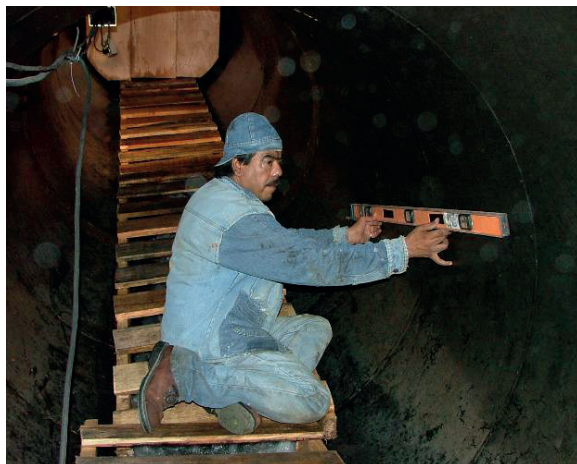


Figura 3.33 Instalación de abrazaderas en el interior de la tubería.



Figura 3.34 Colocación de la placa base para asentar sensor de velocidad.



Figura 3.35 Tubería de PVC para alojar cables de sensores.



Figura 3.36 Deflector para proteger tubería de PVC.



Figura 3.37 Alineamiento de sensores con rayo láser.



Figura 3.38 Vista del desarrollo de tubería de PVC. Se aprecia el par de sensores.



Figura 3.39 Otra vista del desarrollo de tubería de PVC en el interior de la tubería.



Figura 3.40 Salida del cable de los sensores por el conector.



Figura 3.41 Colocación de la escotilla.



Figura 3.42 Vista de la unidad electrónica en la caseta de operación.



Figura 3.43 Vista de la celda solar y la antena satelital.



Figura 3.44 Gabinete que aloja la unidad electrónica en la caseta de operación.



Presas Gustavo Díaz Ordaz (Bacurato): Corresponde a un sistema de medición con sensores húme-

dos de inserción colocados desde el exterior de la tubería en arreglo "Z".

Figura 3.45 Vista de la tubería.



Figura 3.46 Estructura para realizar las perforaciones.



Figura 3.47 Vista de los sensores de inserción.



REFERENCIAS

- Arroyo Correa Víctor Manuel, Aguilar Chávez Ariosto, Álvarez Bretón Ricardo Andrés, Bonola Alonso Isaac, Gómez Lugo Luis, López Vázquez Alejandro, Mejía Astudillo Víctor Guillermo, Millán Barrera Cecilia, Pedroza González Edmundo, Santana Sepúlveda Sergio, Mejoramiento de la medición en presas de almacenamiento y pozos. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Informe HC04I I, 2004. 130pp.
- Arroyo Correa Víctor Manuel, Aguilar Chávez Ariosto, Álvarez Bretón Ricardo Andrés, Bonola Alonso Isaac, López Vázquez Alejandro, Mejía Astudillo Víctor Guillermo, Millán Barrera Cecilia, Pedroza González Edmundo, Salgado Maldonado Gilberto, Santana Sepúlveda Sergio, Tamari Wagner Serge, Mejoramiento de la medición en presas de almacenamiento y pozos agrícolas (2005-2006). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Informe HC05I4-3 y HC06I4-3, 2006. 237pp.
- Bureau of Reclamation. Water Measurement Manual. US Department of the Interior and United States Department of Agriculture, Third Edition, USA, 1997
- Patiño G. C., Pedroza G. E., Morales P. H., García V. N. H., Martínez A. P. y Guzmán R. R. Revisión, evaluación y diagnóstico técnico de la infraestructura y prácticas de aforo en las obras de toma de diez de las principales presas de riego del estado de Sinaloa. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Informe interno, 1996.
- Skerchty M. L. (1988) "Manual de diseño de estructuras de aforo". Serie didáctica 2. Coordinación de Investigación, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- Torres H. F. (1987) "Obras hidráulicas". Editorial Limusa, México.



4

INTRODUCCIÓN A LA METROLOGÍA EN EL CONTEXTO DE LA MEDICIÓN DE AGUA

Julio Sergio Santana
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

4.1. INTRODUCCIÓN

Diariamente enfrentamos tareas que requieren de alguna medición, particularmente en los terrenos de la tecnología y de la ciencia. De hecho, la misma palabra *diariamente*, atiende a una frecuencia que, a su vez, requiere de la medición del tiempo, en este caso, del paso de los días. Para medir, los humanos hacemos uso de instrumentos de medición, que pueden ser muy diversos, dependiendo de lo que se mida. En la vida común, no escapamos del uso de esos instrumentos, por ejemplo, los que se muestran en la Figura 4.1 son instrumentos de medición que casi todo el mundo utiliza o por lo menos conoce.

Figura 4.1 Instrumentos de medición cotidianos.



La parte del conocimiento que se refiere a todos los asuntos relacionados con las mediciones es la *metrología*, que puede ser definida formalmente (a partir del griego $\mu\epsilon\tau\rho\omicron\nu$ [metron] [metron], 'medida', y el sufijo *logía*, 'tratado', 'estudio', 'ciencia', y éste del sufijo griego $-λογία$ [loguía]) como la rama de la física que estudia las mediciones de las magnitudes garantizando su normalización mediante la trazabilidad. Este último tema se aborda en la sección 4 de este capítulo.

El concepto más básico de la metrología es el de medición. Una medición se define como el conjunto de operaciones que tienen el propósito de determinar el valor de una magnitud. El tema central de este escrito es la medición del agua; particularmente, lo que interesa es conocer la cantidad de

agua que pasa por un conducto cerrado o abierto. Entonces, la medición que nos interesa es la que se refiere al conjunto de operaciones que tienen el propósito de determinar el valor del gasto, esto es, el valor del volumen de agua que pasa por un conducto durante un tiempo determinado.

Desafortunadamente, la naturaleza misma nos impide conocer de manera exacta el valor verdadero de una magnitud. Esto significa que siempre nos quedaremos con cierta *incertidumbre* o duda acerca de ese valor. Afortunadamente, la incertidumbre en una medición también se puede medir o cuantificar de alguna manera, y, además, a partir de la medición de esa incertidumbre se puede hablar también de la *calidad* de la medición.

Dado que a la metrología le atañen todo tipo de magnitudes físicas, para el caso de una medición en particular, es necesario definir cuál es la magnitud a la que se ésta se enfoca. Así pues, se denomina *mensurando* a aquello cuya magnitud se quiere determinar como operación final de todas las tareas involucradas en una medición. De este modo, por ejemplo, para el caso señalado previamente, el mensurando es el gasto, o sea, el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo a través de un conducto.

Existen diversas maneras de medir el gasto; algunas de ellas pueden requerir de efectuar otras mediciones. Por ejemplo, supongamos que se quiere determinar el gasto en una toma doméstica, me-

dante una cubeta de 8 litros y un cronómetro (ver Figura 4.2). En este caso, la medida del volumen en la cubeta y del tiempo en el cronómetro no constituyen el mensurando final de la medición, pues éste sigue siendo el gasto, aunque requiere para su determinación *indirecta* de esas otras dos mediciones. Éste es también un ejemplo de lo que se conoce como una *medición indirecta*, puesto que para determinar el valor del mensurando se aplicará una fórmula: , donde Q es el gasto, V es el volumen y t es el tiempo. Otro ejemplo de medición indirecta, podría ser la determinación de la velocidad de un vehículo, a partir de la medición de la distancia que recorre y el tiempo en que hace el recorrido, para aplicar luego la fórmula , donde v es la velocidad, s la distancia y t es el tiempo.

Figura 4.2 Determinación indirecta del gasto.



4.2. RESULTADO DE UNA MEDICIÓN

La finalidad de una medición es la determinación del valor de una magnitud; ese valor constituye *el resultado de la medición*. Para atender este asunto, haremos uso de las siguientes definiciones:

- **Valor verdadero.** Este es el valor que se obtendría como resultado de una medición perfecta. Como se mencionó anteriormente, no es posible conocer con exactitud este valor.
- **Valor convencionalmente verdadero.** Es el valor atribuido a una magnitud particular y aceptado, algunas veces, como un valor que tiene una incertidumbre apropiada para un propósito determinado. Normalmente, el valor asignado a la magnitud realizada por un patrón de referencia, se toma como un valor convencionalmente verdadero.

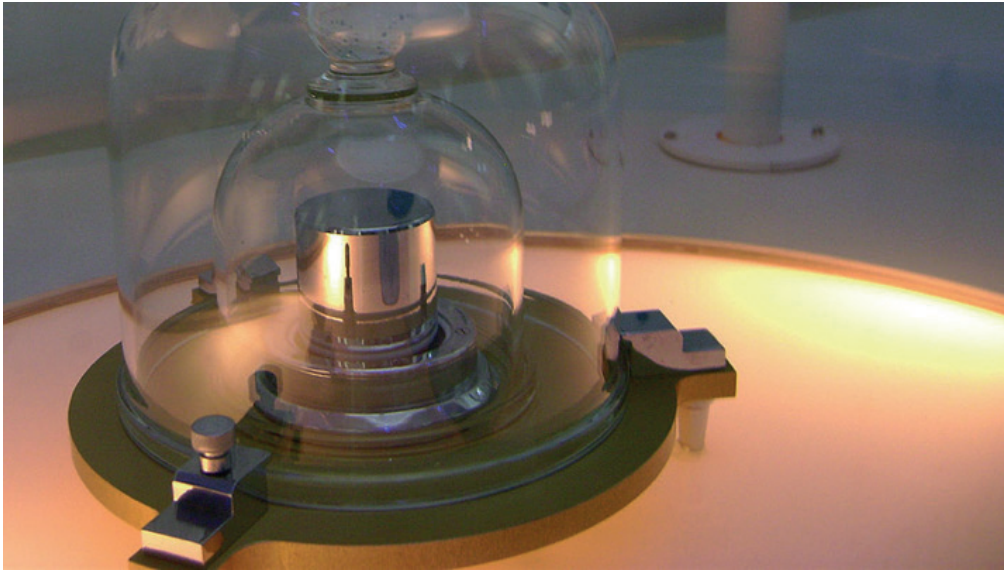
- **Patrón.** Es una medida materializada, un instrumento de medición, un material de referencia, o un sistema de medición, destinado a definir, realizar, conservar, o reproducir una unidad, o uno o más valores de una magnitud, para servir de referencia. Por ejemplo, un medidor de propela, como el mostrado en la Figura 4.3, calibrado para medir el flujo de agua en tuberías, puede muy bien ser tomado como patrón para el gasto en tuberías. Otros ejemplos de patrones podrían ser un patrón de masa de 1 Kg., o lo que comúnmente se conoce como *una pesa* de 1 Kg; ambos ejemplos se pueden ver en la Figura 4.4. Otro patrón también pudiera ser un amperímetro patrón, o un cronómetro patrón, etcétera.

Por diversos factores, entonces, el resultado de una medición siempre llevará implícito un error. Así que el tema de los errores es central en el estudio de las mediciones. Con referencia precisa-

Figura 4.3 Medidor de flujo de tipo propela.



Figura 4.4 Kilogramo masa: patrón y pesa.



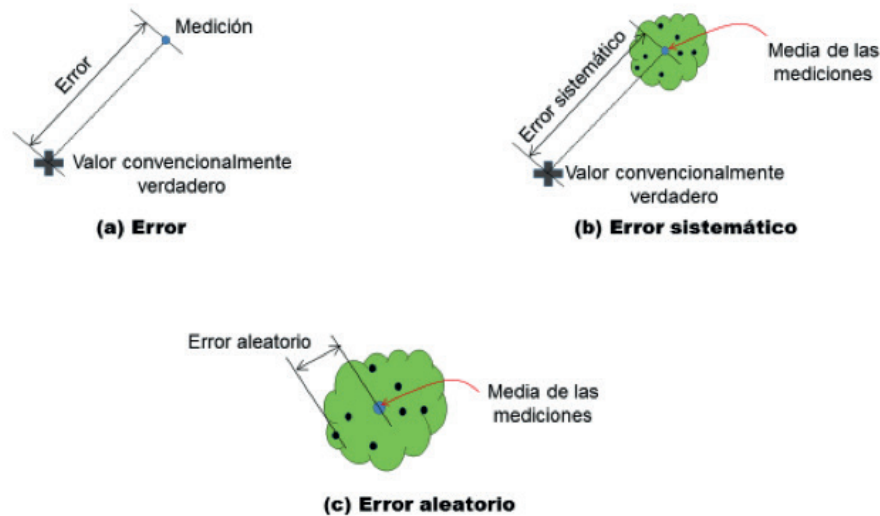
mente a ese tema, se introducen aquí también las siguientes definiciones:

Error de medición. Es la diferencia entre el resultado de una medición y el *valor verdadero* del mensurando. Nótese que aquí, el término *valor verdadero del mensurando*, se refiere al valor convencionalmente verdadero, tal como se ha definido previamente. En la Figura 4.5(a), se muestra esquemáticamente esta definición.

Con la finalidad de tener una mejor idea del valor de alguna magnitud, se realizan varias mediciones para un mismo mensurando. Con referencia a este conjunto de mediciones surgen los siguientes conceptos:

Error sistemático. Es la diferencia entre la media de muchas mediciones menos el valor verdadero del mensurando. En la Figura 4.5(b), se muestra una descripción gráfica de este concepto. De acuerdo con esto: $E_s = \bar{Y} - Y$ Donde, E_s representa el

Figura 4.5 Errores en la medición.



error sistemático, $\bar{Y}$ es la media de las mediciones, y Y representa el valor verdadero del mensurando.

Error aleatorio. Es la diferencia que hay entre una medición individual y la media de un gran número de mediciones para un mismo mensurando. En la Figura 4.5(c), se muestra esquemáticamente esta definición. Nótese que aquí no interviene el valor verdadero de la medición.

Cuando se pueden cuantificar, de alguna manera, los errores producidos en una medición, se pueden también hacer correcciones a los resultados. Las formas principales mediante las que se efectúa esta corrección son dos, a saber:

- Corrección (*modificación por suma*): $Y_c = Y_m + C$

- Factor de corrección (*modificación por multiplicación*): $Y_c = F_c Y_m$

Donde, Y_c es el valor corregido, Y_m es el valor medido, C es la corrección *absoluta*, y F_c es el factor de corrección.

Aunque en la mayoría de los casos se aplica la corrección por suma, es necesario saber cuándo debe aplicarse un factor de corrección, o sea, la multiplicación, para corregir los errores en la medición. Un caso típico donde se puede llegar a aplicar esta forma de corrección de errores, es el de un dinamómetro usado para estimar el peso o la masa de objetos, digamos la carga de ropa para una lavandería (ver Figura 4.6).

Figura 4.6 Un dinamómetro puede requerir un factor de corrección.



Para determinar el factor de corrección, en casos como el señalado, se puede proceder como se describe a continuación.

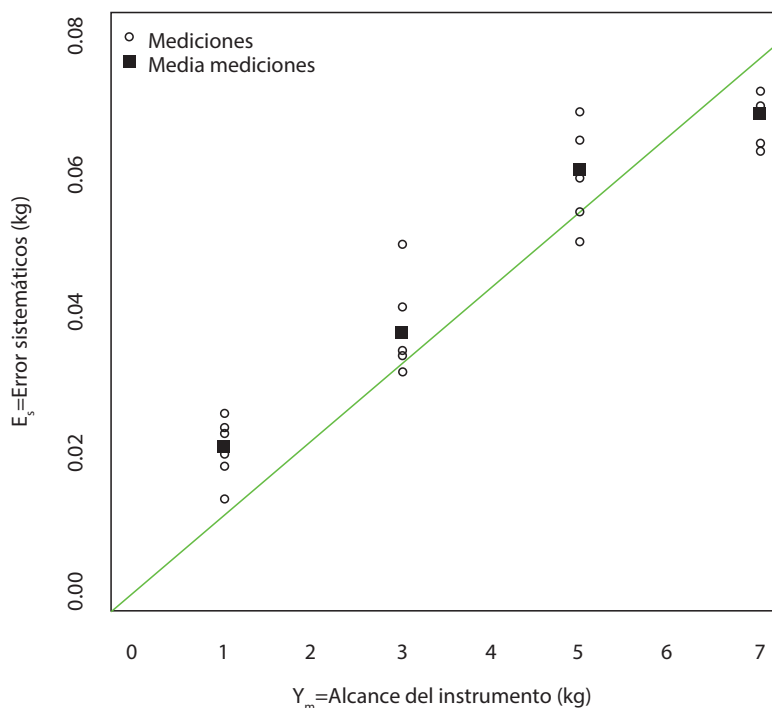
El instrumento tiene un cierto alcance, o sea, el rango de valores dentro de los cuales mide. Para varios valores seleccionados dentro de ese alcance, se hacen varias mediciones. Si se observa que los errores sistemáticos en cada valor resultan más o menos proporcionales a los que se intentan medir, entonces se puede aplicar el factor de corrección. En otras palabras, este tipo de corrección se deberá hacer si la ejecución de diversas mediciones en el alcance del instrumento presenta un

comportamiento similar al que se muestra en la Figura 4.7.

Para ilustrar la determinación del factor de corrección, se supondrá que el caso mostrado en la Figura 4.7, describe una serie de ensayos en los que a un dinamómetro de una lavandería se sometió a *pesar* pesas calibradas de 1, 3, 5, y 7 Kg, y que después de varias pruebas para cada valor de masa¹, se obtuvieron las medias de los errores sistemáticos que se muestran en el Cuadro 4.1 y que son los mismos que se pueden ver en la Figura 4.7 marcados con el símbolo ■.

¹ En nuestra cultura, los valores de masa se toman como valores de peso, por ello el encabezado de la primera columna de el Cuadro 4.1 se ha etiquetado como “Peso”.

Figura 4.7 Determinación del factor de corrección.



El primer paso en la determinación del factor de corrección, es el cálculo de la pendiente de la recta que pasa por el origen y a la vez aproxima mejor la serie de puntos que representan el error sistemático medio, mostrada en verde en la Figura 4.7. Para ello, se utiliza una regresión lineal simple forzando a la recta a pasar por el origen. Para un conjunto de puntos x, y esa pendiente está dada por la fórmula²:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i)^2}$$

Cuadro 4.1 Error sistemático medio.

Y _m = Peso (Kg)	Es = Error Sistemático Medio (Kg)
1	0.020
3	0.037
5	0.060
7	0.069

2 La deducción de esta fórmula, por el método de mínimos cuadrados, es semejante a la que se hace en Dekking et al., 2005, pp. 329-331, sólo que forzando la recta a pasar por el origen.

El uso de esta fórmula se puede simplificar mediante un cuadro como en el Cuadro 4.2, en la que la tercera columna resulta de elevar al cuadrado la primera, y la cuarta, de multiplicar la primera por la segunda. La pendiente está dada por la división de la suma de la cuarta columna, entre la suma de la tercera columna:

$$m = \frac{0.914}{84} = 0.011$$

Cuadro 4.2 Para cálculo de la pendiente de recta ajustada.

x	y	x^2	$x \cdot y$
$Y_m = \text{Peso (Kg)}$	$E_s = \text{Error Sistemático Medio (Kg)}$		
1	0.020	1	0.020
3	0.037	9	0.111
5	0.060	25	0.302
7	0.069	49	0.481
	SUMA	84	0.914

Una vez determinada la pendiente de la recta, m , se procede a determinar el factor de corrección, F_c , como sigue:

Según se dijo antes, el error sistemático está dado por: $E_s = Y_m - Y$, de aquí, $Y = Y_m - E_s$, pero también tenemos, de acuerdo con la gráfica de la Figura 4.7 que la pendiente es, $m = E_s / Y_m$ y, por tanto, $E_s = mY_m$, que, sustituido en la expresión anterior, da $Y = Y_m - mY_m$, y de aquí, $Y = (1 - m)Y_m$, y entonces, como, $Y = Y_c = F_c Y_m$, el factor de corrección es:

$$F_c = (1 - m)$$

con la pendiente, m , calculada con la fórmula y el procedimiento descritos anteriormente. Así, para

el caso del ejemplo, $F_c = (1 - 0.011) = 0.989$. De modo que cuando, por ejemplo, el dinamómetro de la lavandería hubiera marcado un peso de 3.5 Kg, el valor corregido estaría dado por: $(3.5)(0.989) = 3.462$ Kg.

4.3. INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN

La exactitud en una medición se define como la proximidad de concordancia entre el resultado de una medición y un valor verdadero. De este mismo concepto surge también la idea de estimar, de alguna manera, qué tan próximo o alejado puede estar el resultado de una medición de su valor verdadero. Así, se define *la incertidumbre de una medición* como un parámetro asociado al resultado de la medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando.

Como se ha dicho anteriormente, en la sección 4.1, hay mediciones directas e indirectas. Sin embargo, en el mundo real, son muchas más las mediciones que se tienen que hacer indirectamente, que aquellas que se hacen directamente. Particularmente, en el asunto de la medición del flujo de agua, éste se mide siempre de manera indirecta. La misma definición del gasto obliga a ello, y aunque la manera más directa de estimar esta magnitud es la que se ha ejemplificado en la Figura 4.2 y el texto relacionado, en la mayoría de los casos reales se tiene que recurrir a métodos que involucran la estimación de la velocidad del agua, v , y el área

transversal del conducto por el que fluye, A , mediante alguna fórmula del tipo: $Q = A \cdot v$.

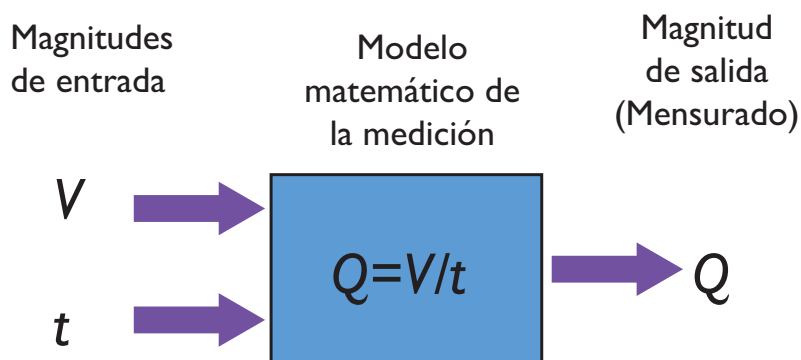
A las magnitudes que intervienen en la estimación de otra magnitud se les denomina *magnitudes de entrada*. Así, en el caso del gasto, según cualquiera de las dos fórmulas que se use, las magnitudes de entrada serán el volumen, V , y el tiempo, t , o el área, A , y la velocidad, v . Por otra parte, a la fórmula que se emplea para estimar la magnitud se le denomina *modelo matemático de la medición*. Recapitulamos aquí, que, a la magnitud de salida, el gasto, Q , en este caso, se le denomina el *mensurando de la medición*. La Figura 4.8 muestra esquemáticamente las magnitudes de entrada y el mensurando en la determinación del gasto a partir del tiempo y el volumen de agua.

4.3.1 Fuentes de incertidumbre

En una medición indirecta, la incertidumbre de un mensurando dependerá de las incertidumbres individuales de las magnitudes de entrada que se utilizan para su estimación.

Por otra parte, en la determinación de una magnitud cualquiera, las fuentes de la incertidumbre pueden ser diversas. Por ejemplo, si seguimos con el caso de la medición del gasto en una toma domiciliaria, que se ha ilustrado en la Figura 4.2, suponiendo que la cubeta tiene marcas entre 0 y 8L a cada 2L, la determinación del volumen puede tener como fuentes de incertidumbre: la calibración de la cubeta, esto es, que tan bien puestas están las marcas de volumen en ella³. En el caso del tiempo,

Figura 4.8 El volumen y el tiempo como magnitudes de entrada para determinar el gasto.



3 Si la cubeta ha de ser tomada como un instrumento de medición de volumen de líquido, las marcas a cada 2L deben haber sido establecidas mediante la comparación contra algún patrón de referencia o mediante algún otro instrumento de medición que provea una mayor exactitud y que esté debidamente calibrado.

nuevamente interviene la calibración del instrumento; el cronómetro debe haberse comparado contra un patrón de tiempo de mayor exactitud.

Otro factor que interviene como fuente de incertidumbre es la resolución del instrumento, lo que se refiere a la mínima indicación, o marca, que puede ser percibida de manera significativa. Puesto que la cubeta sólo tiene marcas a cada 2L, su resolución pudiera tomarse quizá como 1L, ya que se puede percibir si el nivel del agua está sobre una marca, o más cerca de la mitad entre dos marcas. La resolución del cronómetro, pudiera ser 1s (un segundo), o 1cs (un centisegundo), dependiendo de lo que éste exhibe en su carátula. La pregunta aquí es, si de acuerdo con el diseño de nuestra prueba, se deben tomar como fuentes de incertidumbre ambas resoluciones. Si suponemos entonces que la prueba para medir el gasto se diseña de tal modo que, una vez abierta la válvula de la toma (llave), se tomarán lecturas del cronómetro cada vez que el nivel del agua en la cubeta pase por una de las marcas, la única influencia aquí será la resolución del cronómetro. Siguiendo ese mismo diseño de prueba, dado que cada lectura del cronómetro, se tomará como una repetición de la medición, otra fuente de incertidumbre, en el caso del tiempo, es la repetibilidad⁴. La *repetibilidad*

de los resultados de mediciones es la proximidad de concordancia de los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando, en las que se cumplen las siguientes condiciones:

- Se aplica el mismo procedimiento de medición en cada una de las mediciones.
- El observador que hace las mediciones es siempre el mismo.
- Se utiliza el mismo instrumento de medición y en las mismas condiciones.
- Las mediciones se efectúan en el mismo lugar.
- La repetición de las mediciones se hace dentro de un período corto de tiempo.

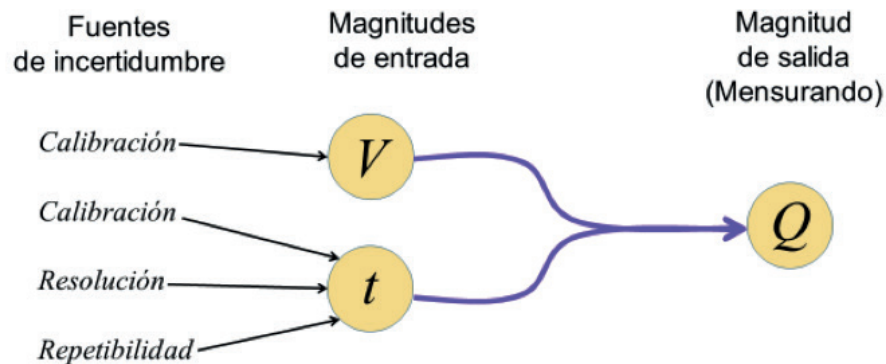
La Figura 4.2 muestra la manera en que las distintas fuentes de incertidumbre influyen en la determinación de la magnitud de salida o mensurando, que, en nuestro ejemplo, es el gasto.

4.3.2 Clasificación de las fuentes de incertidumbre

Dependiendo de la forma como se obtienen los valores de la incertidumbre, las fuentes de incertidumbre se pueden clasificar básicamente en dos:

4 En el caso ejemplificado, el paso del nivel del agua por cada una de las marcas se tomará como la repetición de una misma medición del gasto de 2L en el tiempo observado en el cronómetro. Esto supone, de manera simplificada, que no hay variaciones en la cantidad entregada por la toma una vez abierta ésta. También, por simplicidad, aquí estamos suponiendo que la lectura de las marcas es exacta, es decir, el error que pudiera ocurrir aquí, se lo atribuimos exclusivamente a la lectura del tiempo.

Figura 4.9 Influencia de las fuentes de incertidumbre en la determinación del gasto.



Evaluación Tipo A: La incertidumbre la obtiene directamente el metrologo u operador; a partir de técnicas estadísticas aplicadas a los resultados de mediciones repetidas efectuadas directamente en el proceso de la medición.

Evaluación Tipo B: La información sobre la dispersión de los datos y, por consiguiente, para la determinación de la incertidumbre, se obtiene de otra manera, por lo general consultando documentos originados externamente, tales como, un certificado de calibración del instrumento, un manual del instrumento donde se indiquen estos valores, normas, cuadros, valores de mediciones anteriores, etc.

En el caso que se ha venido ejemplificando y que se ilustra en la Figura 4.9, la calibración de los dos

instrumentos de medición, y la resolución del cronómetro, son fuentes de incertidumbre con una evaluación tipo B, mientras que la repetibilidad, en el caso de las lecturas repetidas del cronómetro, es una fuente de incertidumbre con una evaluación tipo A.

4.3.3 Cuantificación de la incertidumbre

Cuando se desarrolla una medición, dependiendo del propósito de ésta, se debe establecer cuánto es lo más que se puede alejar el valor medido del valor convencionalmente verdadero del mensurando. Esto, es se debe establecer una tolerancia en la exactitud de la medición. La Figura 4.10 muestra esquemáticamente este concepto.

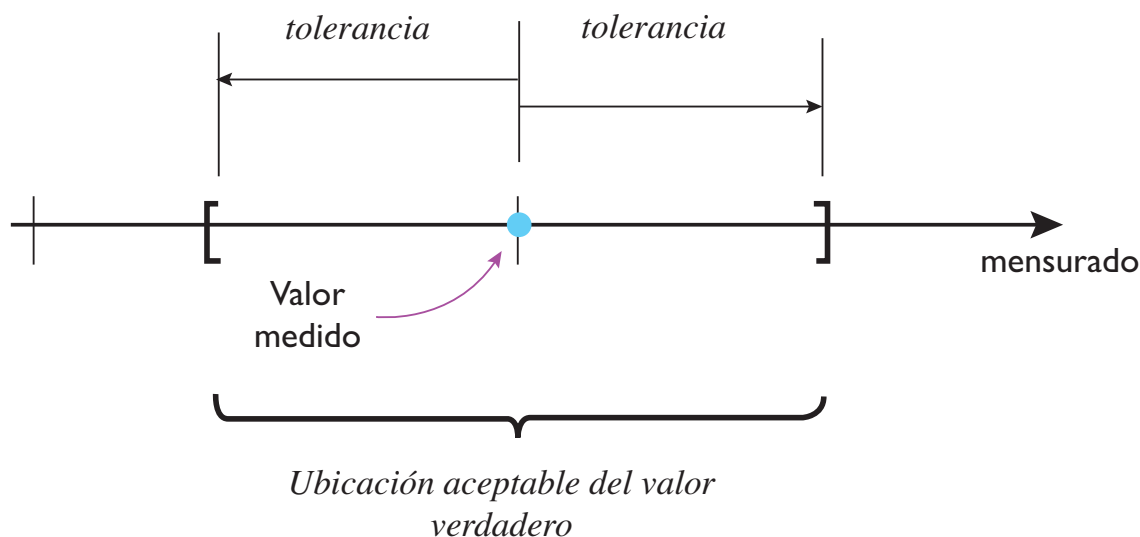
La tolerancia se expresa generalmente como un porcentaje del valor medido. Por ejemplo, en una licitación pública para la compra de medidores de flujo de agua, se puede establecer que la tolerancia en las mediciones hechas con éstos sea del 4%, para un rango de gastos dados. Esto significaría que, independientemente alcance nominal del equipo y de su tolerancia especificada de fábrica⁵, para el rango de gastos especificados, $0.96 \cdot Q_m \leq Q_v \leq 1.04 \cdot Q_m$, donde Q_m es el valor medido del gasto, y Q_v es el valor verdadero del gasto.

La definición de incertidumbre, que se ha dado al principio de la sección 4.3, pudiera parecer muy

técnica o teórica, porque está enfocada a la forma como se obtiene su valor, y por ello nos referiremos aquí más bien al aspecto de qué es lo que se trata de expresar con ese valor. Una vez que se ha hecho una medición, la *incertidumbre* es un valor numérico que indica el espacio al rededor del valor medido, dentro del cual puede estar el valor verdadero, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 4.11. Tres cosas son importantes de notar en lo que se ha dicho:

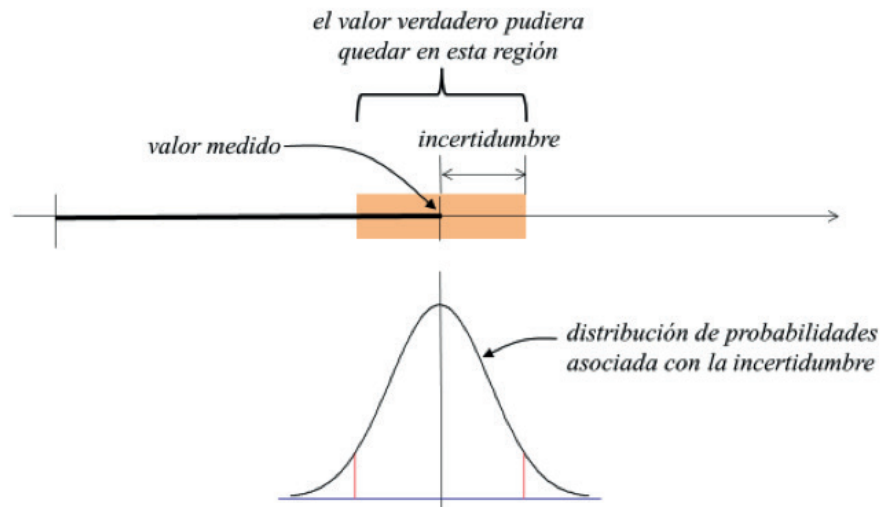
- I. No se debe confundir la *tolerancia* con la *incertidumbre*. Mientras que la tolerancia es un valor que se fija de acuerdo con el propósito de la medición y tiene la finalidad de discriminar

Figura 4.10 Tolerancia en la medición.



5 Este valor, dado en porcentaje, es lo que muchos fabricantes llaman precisión del equipo, aunque el término precisión no tiene ningún significado en el léxico de la metrología.

Figura 4.11 La incertidumbre y el valor verdadero.



las mediciones aceptables de las inaceptables, la incertidumbre es un valor que se calcula en el proceso de cada medición y tiene como finalidad establecer el espacio, al rededor del valor medido, en el cual probablemente se encuentra el valor verdadero. Esto es, la tolerancia se fija de acuerdo con criterios externos al proceso de la medición en sí, mientras que la incertidumbre se calcula en el proceso mismo de la medición.

2. Por razones de simplicidad, en la discusión acerca de los dos conceptos anteriores, tolerancia e incertidumbre, no se ha incluido el manejo que debe hacerse de los errores sistemáticos. Esto es, se ha supuesto que el valor medido es el resultado de haber aplicado ya las correcciones correspondientes a los errores sistemáticos.
3. Lo que finalmente determina si el valor obtenido en una medición particular es *aceptable* o

inaceptable, es la combinación de los tres conceptos mencionados arriba: *corrección por errores sistemáticos*, *tolerancia* e *incertidumbre*, tal como se ilustra en la Figura 4.12. Ahí se muestra gráficamente que, para que una medición sea aceptable, el área sombreada, correspondiente a *la región de incertidumbre*, debe estar completamente incluida entre los corchetes que delimitan *la región de tolerancia* establecida.

Ahora bien, el valor de la incertidumbre para una medición dada, se determina como una composición de las contribuciones particulares de cada una de sus fuentes de incertidumbre. Previo a esta determinación, es necesario calcular por separado el valor con el que contribuye cada fuente de incertidumbre. Independientemente de si la evaluación de la incertidumbre para una fuente es tipo A o tipo B, a ésta se le asocia una distribución de probabilidades, tal como se muestra en la

Figura 4.12 Medición aceptable o inaceptable.

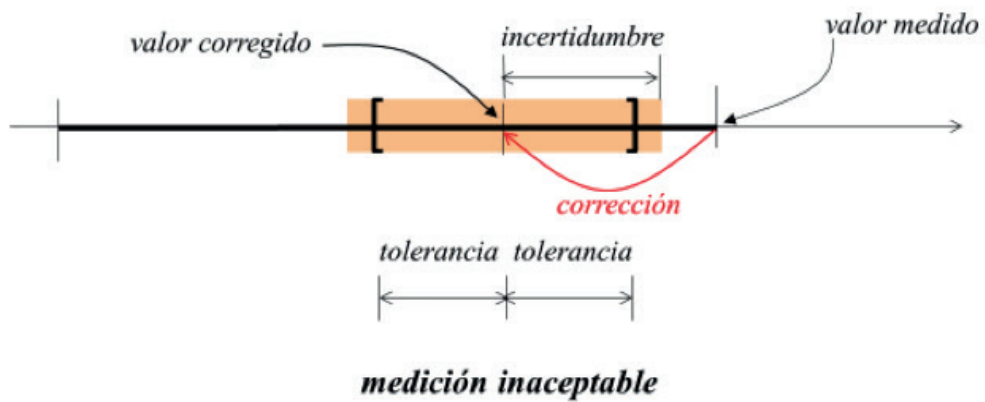
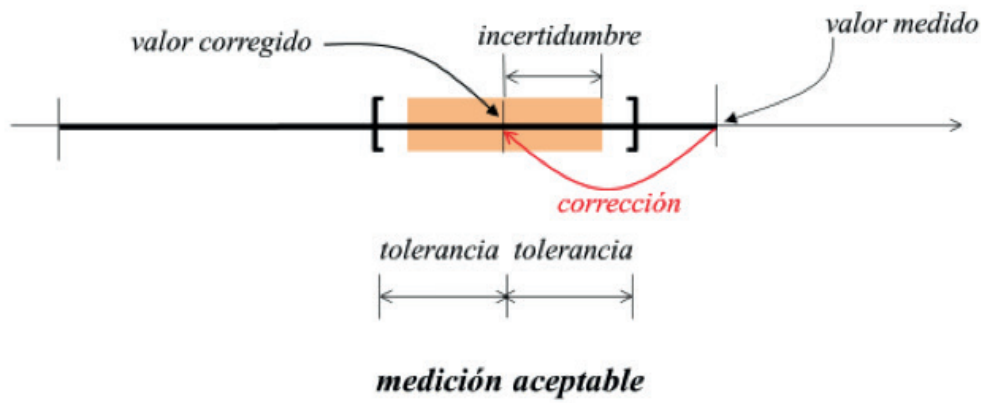


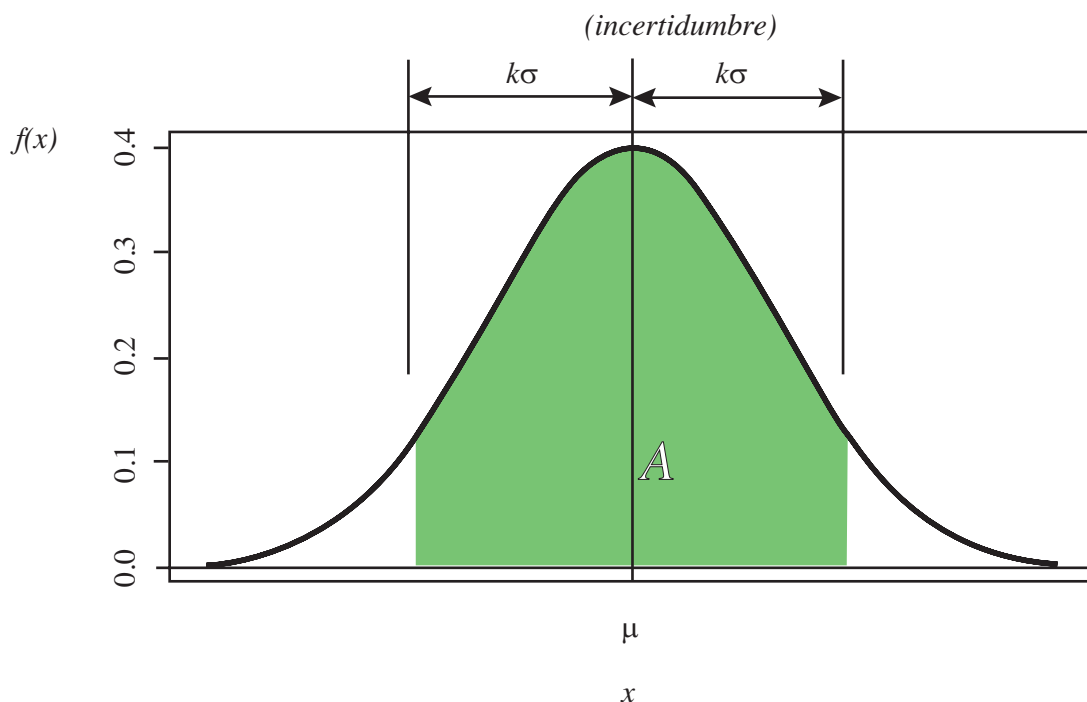
Figura 4.11. Esta función de distribución de probabilidades, indicaría qué tan probable es que algún cierto valor, próximo al medido, sea el valor verdadero. Por ejemplo, intencionalmente, en la figura la función de distribución indica que lo más probable es que el valor medido sea a la vez el valor verdadero. Por definición, el área total debajo de una curva de distribución de probabilidades es igual a la unidad. Ahora bien, la incertidumbre será una magnitud elegida en función de la distribución de probabilidades para cubrir una mayor o menor porción de esa área debajo de la curva. Si la distribución corresponde a lo que se conoce como una curva de distribución normal, como la mostrada en la figura, ésta se construye en términos de la media, μ , y la desviación estándar, σ , de acuerdo con la ecuación (4.1):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (4.1)$$

Cuando la distribución corresponde a esta ecuación, se puede seleccionar el valor de la incertidumbre en términos únicamente de la desviación estándar; esto es, como una constante multiplicada por la desviación estándar; tal como se muestra en la Figura 4.13.

El Cuadro 4.3 y la Figura 4.13, muestran el valor del área, A , como un porcentaje del área total debajo de la curva de distribución, para distintos valores de k , de acuerdo con lo ilustrado en la Figura 4.13. A estos porcentajes de área cubierta también se les conoce como el nivel de confian-

Figura 4.13 Cobertura del área de distribución de probabilidades.



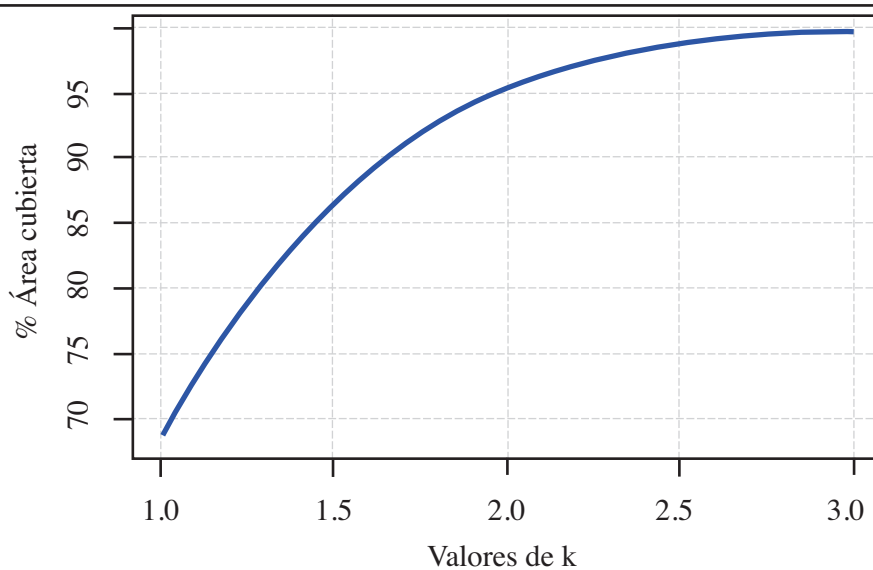
za que proporciona un valor determinado de la incertidumbre.

Cuando los datos para conformar la curva de distribución provienen de mediciones experimenta-

Cuadro 4.3 Proporciones de área debajo de la curva de la Figura 4.13 para distintos valores de k .

Valor de k	A=%Área cubierta
1	68.27%
1.5	86.64%
2	95.45%
2.5	98.76%
3	99.73%

Figura 4.14 Gráfico de las proporciones de área cubierta bajo la curva de la Figura 4.13 para distintos valores de k .



les que, se supone, tendrían en su conjunto una apariencia semejante a la distribución normal, se usa la desviación estándar experimental de la media⁶, $u_A(\bar{x})$, en lugar de la desviación estándar simple, con el propósito de conservar los mismos niveles de cobertura de área, correspondientes a k , mostrados en el Cuadro 4.3 y en la Figura 4.14. Para el cálculo de $u_A(\bar{x})$ se usan las ecuaciones (4.2) y (4.3).

$$u_A(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.2)$$

Aquí s es la desviación estándar experimental, y n es el número de muestras o mediciones, en este caso. La desviación estándar experimental se calcula con:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.3)$$

Aquí x_i es representa el valor de la i -ésima medición, y $\bar{x}$ es la media de todas las mediciones.

Al valor $u_A(\bar{x})$ encontrado con la ecuación (4.2) también se le conoce como incertidumbre estándar: Cuando éste valor se multiplica por la constante k , mostrada en la Figura 4.14 y en el Cuadro 4.3, se conoce como incertidumbre expandida y su valor está dado por:

$$U_A(\bar{x}) = k \cdot u_A(\bar{x}) \quad (4.4)$$

Para clarificar lo que se ha venido diciendo, retomemos el ejemplo de la cubeta de 8L de capacidad y el cronómetro. Supóngase que se han tomado las siguientes lecturas del cronómetro, cada vez que el nivel del agua ha tocado una de las marcas de 2L en la cubeta:

Marca	2L	4L	6L	8L
i	1	2	3	4
Cronómetro . (s)	12.05	24.03	36	48.08
Tiempo(x_i) . (s)	12.05	11.98	11.97	12.08

6 A este parámetro estadístico también se le conoce como *error estándar de la media*. Para una mayor información ver Walpole, et al., 2012, pp. 276-277.

Para estos valores se obtiene lo siguiente:

$$\bar{x} = \frac{12.05 + 11.98 + 11.97 + 12.08}{4} = 12.02$$

$$s = \sqrt{(12.05 - 12.02)^2 + (11.98 - 12.02)^2 + (11.97 - 12.02)^2 + (12.08 - 12.02)^2} = 0.0535$$

y, para los tiempos medidos, la incertidumbre está dada por:

$$u_A(\bar{x}) = \frac{0.0535}{\sqrt{4}} = 0.0268 \text{ s} \quad (4.5)$$

y entonces, si se quisiera cubrir un 95.45% del área debajo de la curva de distribución de probabilidades, de acuerdo con el Cuadro 4.3 o con la Figura 4.14, $k = 2$, y entonces la incertidumbre expandida estará dada por:

$$U_A(\bar{x}) = 2 \cdot 0.0268 = 0.0535 \text{ s}$$

Lo que indica que el tiempo medido para cada dos litros de agua entregados es:

$$T = (12.02 \pm 0.0535) \text{ s}, \text{ con un nivel de confianza de 95.45\%} \quad (4.6)$$

Este es un ejemplo de evaluación de la incertidumbre tipo A, ya que se ha calculado a partir

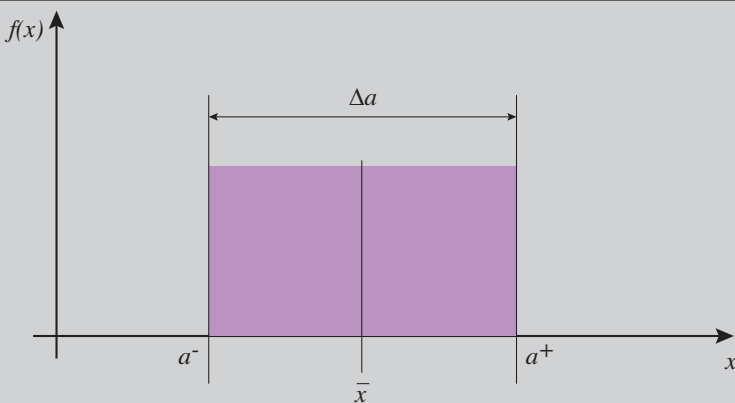
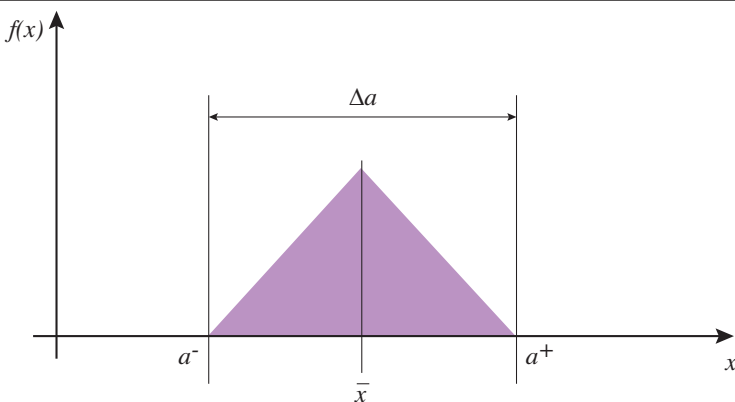
de datos procedentes del proceso de medición.. Lo discutido hasta aquí vale para la evaluación de incertidumbres, ya sea tipo A o B, para las que la probabilidad del valor verdadero en relación con el valor medido se supone que tiene una distribución normal. La incertidumbre estándar para otras curvas de distribución de probabilidades más simples, como la uniforme y la triangular es como se muestra en el Cuadro 4.4⁷.

4.3.4 Composición de las contribuciones a la incertidumbre

Se ha dicho en la sección anterior, que el valor de la incertidumbre para una medición dada se determina como una composición de las contribuciones particulares de cada una de sus fuentes de incertidumbre (Véase la Figura 4.9). Ahora bien, esta composición descansa primordialmente en tres aspectos fundamentales, a saber: (1) la evaluación numérica de las incertidumbres particulares de cada una de las fuentes de incertidumbre, (2) la determinación de la sensibilidad del valor del mensurando a las variaciones de las variables o magnitudes de entrada que intervienen en su evaluación, y (3) la forma como se combinan las contribuciones para obtener una incertidumbre final combinada. En los siguientes párrafos se revisarán brevemente estos conceptos.

⁷ A diferencia de valores que se comportan con una distribución normal de probabilidades, la incertidumbre estándar para distribuciones uniformes y triangulares es igual a la desviación estándar teórica o poblacional, en vez de la desviación estándar experimental de la media.

Cuadro 4.4 Incertidumbre estándar para distribuciones de probabilidad sencillas.

Distribución	Gráfico	Incertidumbre estándar = (desviación estándar para estos casos)
Uniforme		$u_A(\bar{x}) = \frac{\Delta a}{\sqrt{12}}$
Triangular		$u_A(\bar{x}) = \frac{\Delta a}{\sqrt{24}}$

4.3.5 Evaluación de la incertidumbre particular de cada fuente

La sección 4.3.3 se ha dedicado, entre otras cosas, a evaluar numéricamente la incertidumbre tipo A. La evaluación de la incertidumbre tipo B es más sencilla ya que proviene de datos establecidos en algún documento, como un certificado de calibración, el manual de un instrumento, o cualquier

otro tipo de documentación escrita, o visualmente perceptible en el instrumento mismo. Para clarificar esto, se continuará con el ejemplo que se ha propuesto aquí, y cuyas contribuciones a la incertidumbre han sido plasmadas en la Figura 4.9. En el ejemplo, al final de la sección 4.3.3 se ha evaluado la contribución correspondiente a la repetibilidad del tiempo, que es la única de tipo A en el ejemplo. Se evaluarán en seguida las otras contribuciones, y para ello se tiene la siguiente información adicional:

1. La cubeta cuenta con un certificado de calibración que indica una incertidumbre expandida de $U_c = 0.08L$ con $k = 2$, para cada marca de 2L en la cubeta.
2. El cronómetro cuenta con un certificado de calibración que indica una incertidumbre expandida de $U_T = 0.0084s$, y en el que se indica además que esta incertidumbre proporciona un nivel de confianza de 95.45%.
3. El cronómetro tiene una pantalla digital que muestra hasta centésimas de segundo.

A partir de los datos anteriores, se encontrarán las incertidumbres estándar para cada una de esas fuentes de incertidumbre:

1. De acuerdo con la expresión (4.4), la incertidumbre estándar correspondiente a la calibración de la cubeta es:

$$u_v = \frac{U_c}{k} = \frac{0.08 L}{2} = 0.04 L \quad (4.7)$$

2. En el caso de la calibración del cronómetro, se ha indicado el nivel de confianza de 95.45%. Para este nivel de confianza, de acuerdo con el Cuadro 4.3, $k = 2$, y usando la misma expresión que en el punto anterior se tiene:

$$u_T = \frac{U_T}{k} = \frac{0.0084 s}{2} = 0.0042 s \quad (4.8)$$

3. Con referencia a la resolución del cronómetro, se observa que ésta tiene un valor de 0.01s. Por su naturaleza, la distribución de probabilidades que se le asocia es la distribución uniforme o rectangular. Entonces, su incertidumbre estándar está dada por:

$$u_R = \frac{a}{\sqrt{12}} = \frac{0.01 s}{\sqrt{12}} = 0.00288 s \quad (4.9)$$

4.3.6 Determinación de la sensibilidad del mensurando a las magnitudes de entrada

En general, el mensurando se evalúa como una función de las distintas magnitudes de entrada que contribuyen a su evaluación. Esto es, si Y es el mensurando:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots) \quad (4.10)$$

donde X_i es cada una de las magnitudes de entrada. En el caso del ejemplo del gasto que se ha venido trabajando a lo largo de este capítulo, esa función es:

$$Q = V/T \quad (4.11)$$

La sensibilidad del mensurando, Y , a las variaciones de alguna magnitud de entrada depende de la forma de la función dada en la expresión (4.10). Pero, en general, esta sensibilidad se mide en términos de las derivadas parciales de la función. Así, el coe-

ficiente de sensibilidad del mensurando asociado a la magnitud X_i está dado por:

$$c_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \quad (4.12)$$

Para poder visualizar esto, pensemos que se trata de una función de únicamente dos variables, X_1 y X_2 . Es decir, $Y = F(X_1, X_2)$. La forma como Y se ve afectada por las variaciones de X_1 y X_2 se puede ver gráficamente en la Figura 4.15. Así, estos coeficientes nos dan la razón de cambio del mensurando cuando nos movemos en el sentido de una u otra variable o magnitud de entrada.

Para el caso del gasto, que se evalúa de acuerdo con la expresión (4.11), tenemos dos coeficientes de sensibilidad:

$$c_v = \frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{\partial}{\partial V} (V/T) = \frac{1}{T} \quad (4.13)$$

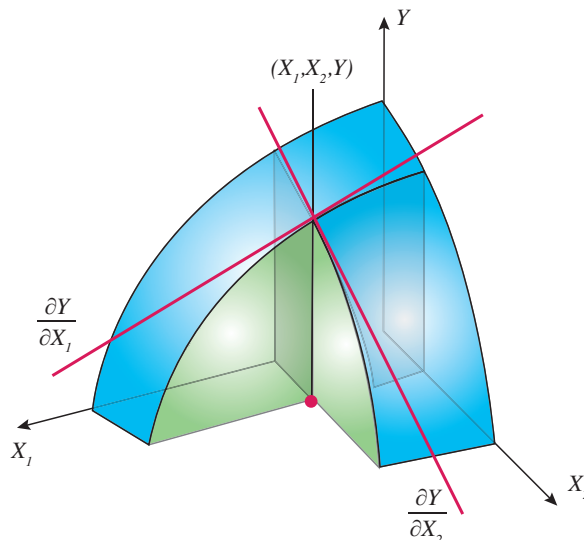
$$c_v = \frac{\partial Q}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} (V/T) = \frac{V}{T^2} \quad (4.14)$$

Es de esperarse que la incertidumbre generada por cada una de las magnitudes de entrada contribuya a la incertidumbre global del mensurando de acuerdo con los coeficientes de sensibilidad correspondientes. La manera en que esto ocurre se revisará en la sección siguiente.

4.3.6.1 Combinación de las contribuciones para obtener la incertidumbre

La idea fundamental para definir la manera de combinar incertidumbres particulares de las distintas fuentes y producir un valor que represente la incertidumbre del valor obtenido para el mensurando, es la de que contribuyen más aquellas fuentes asociadas a las magnitudes de entrada cuya

Figura 4.15 Sensibilidad del mensurando a las magnitudes de entrada



variación hace variar más al mensurando. Los coeficientes de sensibilidad, definidos anteriormente, representan un índice del efecto que tienen las variaciones de las magnitudes de entrada. Por eso, cada incertidumbre estándar particular de alguna fuente de incertidumbre tiene que ser afectada del coeficiente de sensibilidad de la magnitud de entrada correspondiente. La Figura 4.16, muestra la manera cómo se tienen que afectar las incertidumbres estándar particulares por los coeficientes para producir la incertidumbre estándar final del mensurando. Debe notarse que la configuración del gráfico mostrado en esta figura es similar, y en efecto, ha sido generada a partir de la configuración de que se ha mostrado en la Figura 4.9.

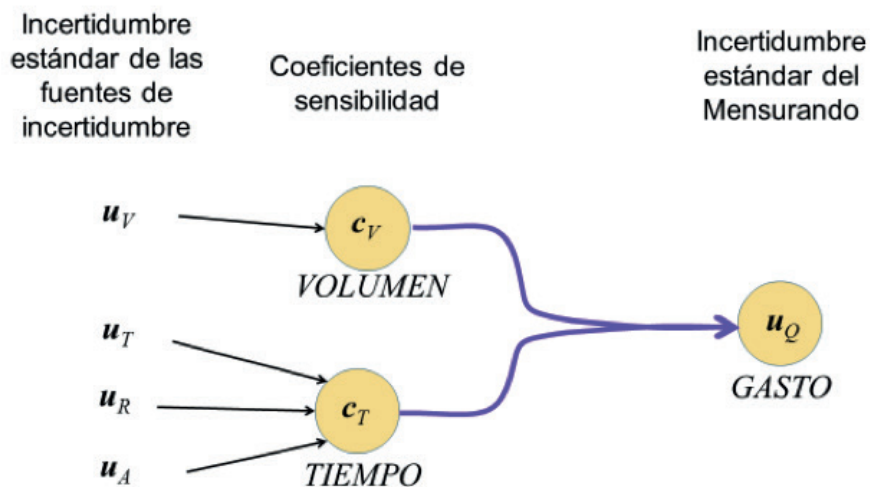
Finalmente, la fórmula mediante la cual se combinan estos valores es:

$$u_Y = \sqrt{\sum_i [c_i \cdot u_j(x_i)]^2} \quad (4.15)$$

Aquí, u_Y es la incertidumbre estándar del mensurando Y ; $u_j(x_i)$ representa una o más de las incertidumbres asociadas con la magnitud de entrada o influencia x_i ; $c_i = \partial Y / \partial x_i$ es el coeficiente de sensibilidad de la magnitud de entrada o influencia x_i . A cada término de la forma $c_i \cdot u_j(x_i)$ se le conoce también como una contribución de la incertidumbre de x_i a la incertidumbre combinada del mensurando.

Para continuar con el ejemplo que se ha venido desarrollando en este capítulo, se determinará primero el gasto, a partir de las cuatro mediciones que se hicieron. El volumen de agua es el correspondiente a la diferencia de volumen entre cada par de marcas, esto es, $V = 2L$, y el tiempo es el obtenido mediante la expresión (4.6) y es: $T = 12.02$,

Figura 4.16 Combinación de las incertidumbres estándar



entonces, de acuerdo con la expresión (4.11), el gasto, sin considerar la incertidumbre aún, estaría dado por:

$$Q^* = \frac{2}{12.02} = 0.166389 \text{ L/s} \quad (4.16)$$

Se calculará ahora la incertidumbre estándar para este valor. Para los valores de volumen y tiempo dados, los coeficientes de sensibilidad, de acuerdo con las expresiones (4.13) y (4.14), obtenidas anteriormente es:

$$c_V = \frac{1}{12.02} = 0.08319 \quad (4.17)$$

$$c_T = -\frac{2}{(12.02)^2} = -0.01384 \quad (4.18)$$

y, entonces, de acuerdo con la expresión (4.15), se tiene que:

$$u_Q = \sqrt{(c_V \cdot u_V)^2 + (c_T \cdot u_T)^2 + (c_T \cdot u_R)^2 + (c_T \cdot u_A)^2} \quad (4.19)$$

$$u_Q = \sqrt{(c_V \cdot u_V)^2 + c_T^2(u_T^2 + u_R^2 + u_A^2)} \quad (4.20)$$

que con los valores obtenidos anteriormente es:

$$u_Q = \sqrt{(0.08319 \cdot 0.04)^2 + (-0.01384)^2(0.0042^2 + \dots + 0.00288^2 + 0.0268^2)} = 0.003349 \quad (4.21)$$

La incertidumbre expandida para una $k=2$, sería entonces:

$$U_Q = 2 \cdot 0.003349 = 0.006698 \quad (4.22)$$

Y, finalmente, el gasto, considerando la incertidumbre se puede expresar como:

$$Q = 0.166389 \text{ L/s} \pm 0.006698 \text{ L/s}, \quad (4.23) \\ \text{con } k=2$$

Se ha encontrado aquí la incertidumbre para el mensurando propuesto, el gasto, y solamente faltaría determinar si esta medición es aceptable, de acuerdo con alguna tolerancia previamente establecida de acuerdo con los propósitos de la medición.

4.4. TRAZABILIDAD

Cuando se efectúa una medición resulta muy importante determinar de qué manera está asociada con los patrones existentes de las magnitudes que intervienen en la medición y cómo es afectada por éstos. El propósito de la trazabilidad es justamente ese, y se define formalmente como: la propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón, por la cual puede ser relacionado a referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas ellas teniendo incertidumbres determinadas.

En la sección 4.2 se ha definido el término patrón. Ahora bien, los patrones se pueden categorizar como sigue:

Patrón primario. Es un patrón que es designado o ampliamente reconocido como un patrón que tiene las más altas cualidades metrológicas y cuyo valor es aceptado sin referencia a otros patrones de la misma magnitud. Generalmente los patrones nacionales, que son los adoptados por algún país como base de comparación para alguna magnitud, son patrones de esta categoría. Ellos se comparan típicamente con otros patrones nacionales o directamente con los patrones que están bajo el resguardo del BIPM (Buró Internacional de Pesas y Medidas). En nuestro país, la mayoría de patrones nacionales están bajo el resguardo del CENAM (Centro Nacional de Metrología).

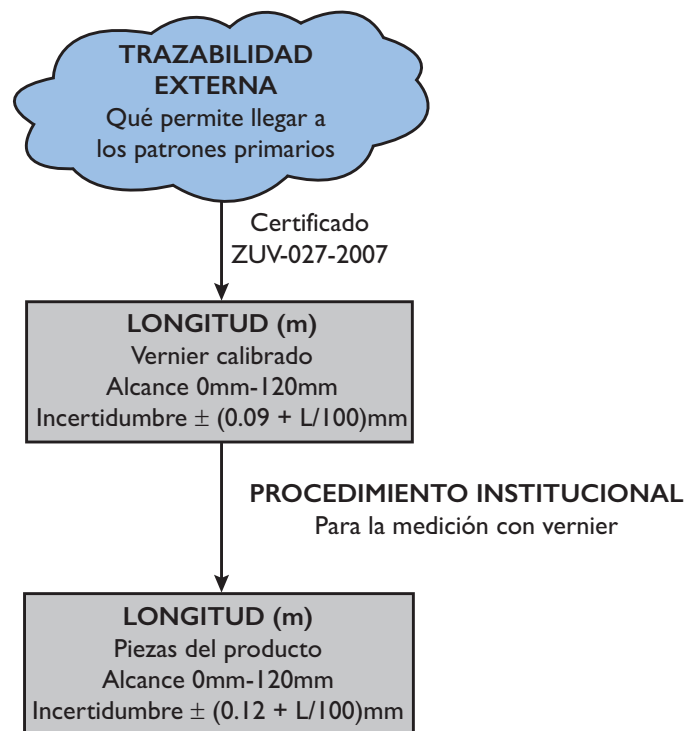
Patrón secundario. Es un patrón cuyo valor se establece por comparación con un patrón primario de la misma magnitud. Los patrones de transferencia del CENAM caen dentro de esta categoría, y son patrones que se utilizan únicamente como intermediarios para comparar con los patrones de trabajo, que son los que finalmente emplea esta organización en las calibraciones solicitadas por organizaciones o individuos que requieren de instrumentos con estas características.

Patrón de referencia. Es un patrón que tiene la mayor calidad metrológica disponible en un lugar u organización dada y del cual se derivan las mediciones realizadas en dicho lugar. Los laboratorios secundarios, que son aquellos que obtienen la calibración de sus patrones directamente de instituciones nacionales como el CENAM, disponen de éstos como sus patrones de referencia. Igualmente, alguna otra organización que obtenga la calibración de sus patrones de estos laboratorios, podrá disponer de éstos como patrones de referencia dentro de su organización.

La trazabilidad de una medición, entonces, consiste en dar seguimiento a las cadenas de comparaciones que se han hecho sobre cada magnitud involucrada en la medición hasta llegar a los patrones primarios. Este seguimiento permitirá observar la forma en la que la incertidumbre se ha ido disseminando, a partir de los valores asociados a cada uno de los patrones, hasta llegar a la incertidumbre calculada para la medición en cuestión.

La cadena de trazabilidad se va armando con eslabones como el mostrado en la Figura 4.17. Aquí debe notarse que la incertidumbre se establece en términos de la magnitud que se mide, la longitud en este caso. Ahora bien, como se dijo con anterioridad, para cada magnitud que interviene en la medición se deben establecer este tipo de eslabones.

Figura 4.17 Un eslabón en la cadena de trazabilidad.



REFERENCIAS

Shmid, W.A., Lazos M., R. J., Guía para Estimar la Incertidumbre en la Medición. CENAM, Abril, 2004.

CENAM y EMA, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la Calibración de Medidores de Flujo de Líquidos, Empleando como Referencia un Patrón Volumétrico. CENAM/EMA, 2004.

International Standard ISO 11631. Measurement of fluid flow – Methods of specifying flowmeter performance. 1998.

Dekking, F.M., Kraaikamp, C., Lopushaä, H.P., Meester, L.E. A Modern Introduction to Probability and Statistics: Understanding Why and How. Springer-Verlag London Ltd, 2005.

Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., Ye, K. Probability & Statistics for Engineers & Scientists. 9th Ed., Prentice Hall, 2012.



5

MEDICIÓN DE VOLÚMENES, SELECCIÓN DE UNA TÉCNICA

*Ariosto Aguilar Chávez
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

En la Ley de Aguas Nacionales (LAN 2016-03-24) se indica que las concesiones y asignaciones de aguas nacionales es obligatorio la medición del volumen y por consiguiente la instalación de un equipo de medición. El proceso para medir el volumen se establece bajo el principio indicado en el artículo 15 de Ley de Metrología y Normalización (LMN 2009-04-30), en donde indica: “En toda transacción comercial, industrial o de servicios que se efectúe a base de cantidad, ésta deberá medirse utilizando los instrumentos de medir adecuados, ...”.

El proceso para medir el volumen de aguas nacionales debe estar referenciado en Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y en Normas Mexicanas (NMX), con estos instrumentos se tendrán al menos las reglas, especificaciones, métodos de prueba, directrices, etc., para tener una certidumbre adecuada en la medición (LMN 2009-04-30).

La realidad actual en el caso de la medición de gastos y flujos en conductos a presión o a superficie libre, las transacciones en México sólo están establecidas para los medidores de agua fría en conductos cerrados NOM-012-SCFI: (1997) o su similar internacional ISO-4064-1: (2014) y la OIML R49-1: (2013), y en los casos de flujos a superficie libre o en tuberías con diámetros mayores a 800 mm, no se cuenta con un respaldo normativo, que defina a detalle la manera de hacer la medición de volúmenes.

En este documento se indicarán algunos de los aspectos principales que se deben considerar en el desarrollo e implementación de un proyecto de norma para la medición de flujo, considerando los requerimientos de equipos a instalar y la aplicación práctica necesaria para poder realizar la medición de volúmenes de aguas nacionales.

En este aspecto los principales puntos que se deben considerar en la elaboración de la norma es revisar la normatividad internacional existente, los procesos para la aplicación de los métodos de medición, la confiabilidad en la contabilización de los volúmenes anuales, la facilidad de aplicación autodidáctica por parte del usuario del agua y la consideración de crear estándares de competencia como parte del aseguramiento del proceso de aplicación de la norma. Un aspecto importante a considerar en la elaboración del documento es asegurar que los datos de medición lleguen a la autoridad del agua, con la calidad y oportunidad adecuada.

5.1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo del documento de norma de medición de gasto se debe buscar establecer los criterios para seleccionar el medidor o un sistema de medición, que sea apropiado al tipo de obra por la cual se extraen aguas nacionales, y definir las características que deben reunir los medidores volumétricos, la metodología para medir volúmenes de aguas nacionales donde sea óptimo la instalación de medidores volumétricos y los requisitos mínimos a observarse en su instalación, que aseguren la correcta medición de volúmenes de aguas nacionales usados, explotados o aprovechados, así como el procedimiento para transmitir los datos de medición a la autoridad que corresponda.

5.2. ALCANCE

Establecer los métodos para la medición de los volúmenes de agua nacionales usados, explotados o aprovechados. El documento debe facilitar tanto a los usuarios y contribuyentes de agua nacional como a la Autoridad del Agua en el aspecto de dar certidumbre en la medición de los volúmenes de aguas nacionales, teniendo en cuenta lo indicado en la Ley de Agua Nacionales. Con lo anterior se busca establecer los criterios de ubicación del sitio de medición, procedimiento para adecuación de la estación de aforo y transmisión de datos a la autoridad.

5.3. EXPERIENCIAS PREVIAS EN LA MEDICIÓN DE GASTO

El marco legal establece que la autoridad del agua debe medir el gasto o volumen concesionado y el usuario del recurso está de acuerdo con este valor; por supuesto una vez que se mide bajo un procedimiento. Desde el punto de vista de la medición del parámetro físico este es mensurable e incluso se puede establecer todos los requerimientos de trazabilidad e incertidumbre (GUM (ISO/IEC) 1995).

Para conocer el universo de técnicas posibles de uso o de aplicación para medir los volúmenes en el Cuadro 5.1 se muestran los tipos de métodos de medición de volúmenes y su correspondiente principio físico, y en el Cuadro 5.2, se presenta una

clasificación entre la condición de flujo, método de medición y su correspondencia a normas internacionales (ISO- International Organization for Standardization, IEC - International Electrotechnical Commission). En el último cuadro sólo se indican los métodos más comunes instalados en el México (Tamari, S y Aguilar, C.A. 2010).

El proceso completo de medición o la cadena de medición parte desde la medición de un parámetro físico, por ejemplo, medir el nivel aguas arriba de un aforador de cresta delgada, para aplicar un modelo de medición de flujo (ecuación de descarga (ISO-1438 2008)) y el traslado de la información a la autoridad del agua. Por supuesto este traslado de información puede incluir más de mil kilómetros, pero la información debe mantener su confiabilidad y su rango de incertidumbre. A lo anterior se puede decir que este proceso construye el acuerdo legal entre la autoridad y el usuario.

Cuadro 5.1 Métodos de medición de volúmenes y principio físico.

Método de medición de volúmenes	Principio físico
Presión - Gasto	Principio de continuidad y conservación de energía
Transitorios de presión	Integración de la diferencia de presión en dos secciones del conducto causado por el efecto de un transitorio de presión
Cambio de régimen	Condición de energía mínima del flujo a superficie libre
Área - Velocidad	Integración de la variación del vector normal de velocidad en un área transversal a la vena líquida
Velocidad índice	Variante del método área - velocidad que estima la velocidad media del canal mediante una calibración en sitio
Sección - Pendiente	Condición de flujo normalizado por efecto de la rugosidad del canal

Cuadro 5.2 Clasificación entre el tipo de flujo, tipo de conducción y técnica de aforo.

Tipo de flujo	Tipo de conducción	Método de aforo	Técnica de aforo	Referencia
Conducto Cerrado	Tuberías de agua potable $D \leq 1m$	Volumétrico	Medidor en carrito calibrado en banco	(NOM-012-SCFI 1997) (ISO-4064-1 2014) (OIML R 49-1: 2013)
		Presión - Gasto	Placa de orificio, Tubo Venturi y Tobera	(ISO-5167-3 2003)
	Tuberías en presa $D \geq 1m$	Winter – Kennedy	(solo para operación una vez calibrado con una técnica primaria)	(IEC-60041 1991)
		Transitorios de presión	Método de Gibson (técnica de calibración primaria)	(IEC-60041 1991)
		Área - Velocidad	Molinetes (técnica de calibración primaria)	(IEC-60041 1991)
			Tubo de pitot (técnica de calibración primaria)	(IEC-60041 1991)
			Aforador de tiempo de travesía con cuatro pares de sensores "intrusivos", y eventualmente "cruzados" (ATT4-i)	(IEC-60041 1991) (ISO-6416 2004)
			Aforador de tiempo de travesía con un par de sensores "externos", y eventualmente "cruzados" (ATT1-c)	(BS-8452 2005)
			Sonda electromagnética que cubre toda la pared del tubo	(ISO-9213 2004)
			Medidor acústico de tipo "Doppler extrusivo "	(BS-8452 2005)
			Medidor acústico de "correlación cruzada"	(BS-8452 2005)
Superficie Libre	Canal prismático	Cambio de régimen	Aforador de pared delgada (APD) con sección rectangular o triangular	(ISO-1438 2008) (ISO-8368 1999)
			Aforador de garganta larga (AGL) o aforador Parshall	(ISO-4359 2013) (ISO-4362 1999) (ISO-8363 1997)
		Área - Velocidad	Tiempo de travesía con cuatro pares de sensores sumergidos y "cruzados" (ATT4x2)	(ISO-6416 2004)
			Tiempo de travesía con cuatro pares de sensores sumergidos (ATT4)	(ISO-6416 2004)
			Tiempo de travesía con tres pares de sensores sumergidos (ATT3)	(ISO-6416 2004)
			Tiempo de travesía con dos pares de sensores sumergidos (ATT2)	(ISO-6416 2004)
			Tiempo de travesía con un par de sensores sumergido (ATT1)	(ISO-6416 2004)
			Sonda electromagnética en todo el ancho del canal	(ISO-9213 2004)
			Aforador acústico de efecto Doppler Lateral (ADL)	(ISO-15769 2010)
			Aforador acústico de efecto Doppler de Fondo (ADF)	(ISO-15769 2010)
	Cauce Natural	Sección - Pendiente	Medición del tirante en dos puntos de un mismo tramo de canal	(ISO-1070 1992) (ISO-8363 1997)
		Área - Velocidad	Medición con molinete o equipo ADCP montado en un barco	(ISO-748 2007) (ISO-ISO/TR-24578 2012)
		Escala-gasto	Medición del nivel en una sección conocida	(ISO-9123 2001)

Más aún, este proceso se mejora con los sistemas de transmisión de información como son los SMS de celular, ftp o Wi-Fi en una red de internet o la transmisión vía satélite, y contribuyen a que la información enviada a la “nube” sea confiable. Lo anterior es aplicado ya en forma rutinaria por científicos para validar modelos e incluso por los hidrólogos para diseñar infraestructura. El problema de aceptación es distinto cuando se tiene un usuario, que normalmente no es experto o no conoce los conceptos de incertidumbre, y una autoridad tiene que aplicar una reglamentación o una tasa impositiva y no cuenta con el marco legal normativo adecuado, cuando en un futuro se somete a la rendición de cuentas, en el caso de México de Normas NMX o NOM.

Con este antecedente, en el documento normativo se debe identificar la secuencia de medición, considerando su facilidad de aplicación práctica, para que un usuario sin gran experiencia pueda definir qué equipo de medición debe instalar y la autoridad cómo debe considerar los volúmenes que se están usando o explotando. En el siguiente apartado se muestra la secuencia y un esquema de la misma.

5.4. SECUENCIA DE DECISIÓN PARA LA SELECCIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

Para la selección del sistema de medición se consideraron dos aspectos el tipo de conducción y el

volumen medio que circula por la sección transversal y en la figura 1 se muestra la secuencia de selección. Para la elaboración de esta secuencia de selección se consideraron al menos los siguientes criterios: a) Tipo de descarga; b) gasto instantáneo y volumen medio anual de la descarga; c) experiencia de instalación de equipos similares en país, y d) costo de los equipos o sistemas de medición considerando en costo de instalación y mantenimiento.

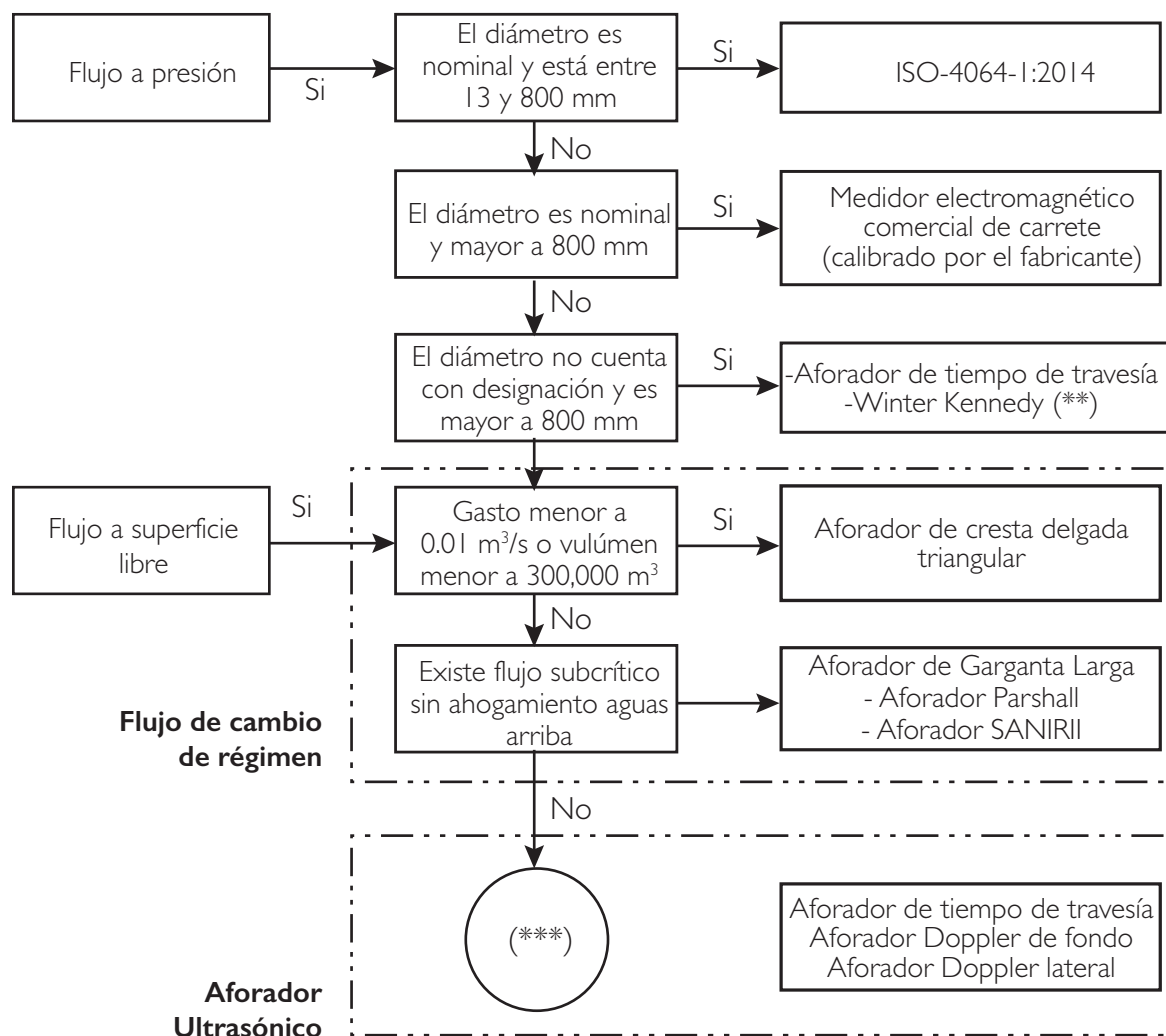
5.4.1 Fuente de abastecimiento subterránea

Cuando la fuente de abastecimiento de aguas nacionales sea subterránea (acuíferos) y atendiendo a que la forma de su extracción es mediante infraestructura por bombeo, para medir el volumen de agua que circula por la conducción como flujo a presión se debe seleccionar un medidor que cumpla con las características establecidas en la (NOM-012-SCFI 1997), (ISO-4064-1 2014), siempre y cuando se trate de diámetros nominales entre trece y ochocientos milímetros ($13 \text{ mm} < \text{DN} < 800 \text{ mm}$).

5.4.2 Fuente de abastecimiento superficial

Cuando la extracción de las aguas nacionales se realice en una conducción con flujo a superficie libre el volumen extraído se medirá conforme a los siguientes sistemas de medición en función del gasto instantáneo de la sección de medición:

Figura 5.1 Secuencia de selección del equipo medición.



(*) Continuar la ruta de selección en caso de no encontrar un medidor comercial electromagnético que se ajuste al diámetro nominal de la tubería

(**) La prueba Winter-Kennedy se utiliza cuando la extracción de agua sea para generación de energía eléctrica en una central hidroeléctrica.

(***) Pasar directamente a este nivel de selección en caso de que el gasto sea mayor a 0.1 m³/s o el volumen mayor a 3 000 000 m³.

5.4.3 Aforador de cambio de régimen de cresta delgada triangular (ISO-1438 2008)

Este sistema es adecuado cuando la conducción tiene un gasto instantáneo de muestreo entre uno y diez litros por segundo (equivalente a $0.001 \text{ m}^3/\text{s} < q_n < 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$) o un volumen de agua nacional anual entre treinta mil y trescientos mil metros cúbicos ($30,000\text{m}^3 < Vol_a < 300,000\text{m}^3$).).

5.4.4 Aforador de cambio de régimen de garganta (ISO-4359 2013), (ISO-4362 1999)

Este sistema es adecuado cuando la condición de gasto instantáneo de muestreo sea mayor a diez litros por segundo (equivalente a $q_n \geq 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$) o un volumen de agua nacional anual mayor a trescientos mil metros cúbicos ($Vol_a \geq 300,000\text{m}^3$).

5.4.5 Aforadores ultrasónicos

Cuando la instalación del aforador de cambio de régimen de garganta sea para un gasto instantáneo de muestreo mayor a cien litros por segundo (equivalente a $q_n \geq 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$) o un volumen de agua nacional anual mayor a 3 millones de metros cúbicos ($Vol_a \geq 300,000\text{m}^3$) o las características del sitio de instalación del sistema de medición presente una velocidad mayor a 0,6 del

número de Froude ($Fr > 0,6$) o que su instalación produzca un desbordamiento del canal (condición de descarga ahogada), se debe seleccionar un aforador ultrasónico (ISO-6416 2004), (ISO-ISO/TR-24578 2012), del tipo que a continuación se enlistan:

- Aforador de tiempo de travesía. Para su instalación el canal debe tener un ancho de más de 6 m, una profundidad media mayor a 1,5 m y una velocidad del agua máxima menor a 4 m/s, las características.
- Aforador Doppler de fondo. Para su instalación el canal debe ser angosto de 1 a 7 m de ancho, una profundidad de 0,3 a 2 m y una velocidad del agua menor a 5 m/s, las características.
- Aforador Doppler lateral. Para su instalación el canal debe tener un ancho de 2 a 120 m, una profundidad de 1 a 6 m y una velocidad del agua menor a 5 m/s.

5.5. DETERMINACIÓN DE VOLUMEN

Para la medición del volumen con los sistemas de medición que se indican en la figura 1 y en el caso que sólo determinen el gasto en un periodo de muestreo, será necesario contar con la sucesión de valores de tiempos de toma de muestra y los valores de gastos instantáneos circulantes. El valor del volumen será la acumulación de gastos instantáneos circulantes, que suceden entre dos tiem-

pos de muestra a lo largo del periodo a medir en forma continua, entonces para determinar el volumen se utiliza la ecuación siguiente:

$$Vol_{A_P} = \Delta t \sum_{n=1}^N q_n$$

donde, Vol_{A_P} es el volumen de aguas nacionales en un periodo determinado en m^3 ; N es el número entero de muestras realizadas en el periodo de medición (p); Δt : es el intervalo de toma de muestra n en segundos, y q_n es el gasto instantáneo en la toma de la muestra en m^3/s . El número de muestras en la medición del volumen de aguas nacionales se establece en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3 Criterio de toma de muestras para contabilizar el volumen.

Número de muestras mensuales	Intervalo de toma de muestra (h)	Intervalo de toma de muestra (s)
Una por cada día de los días del mes	24	86 400

5.6. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra un esbozo de la secuencia de decisión que debe seguir un usuario del agua, para cumplir normativamente, en la medición de los volúmenes de agua que aproveche para algún proceso productivo, un consumo o un uso consuntivo. Existen algunas referencias para la selección de una técnica de medición, como la presentada por Tamari y Aguilar (2010), en donde se indica la secuencia de la técnica de medición, pero sólo para instalaciones en canales y no para tuberías a presión, entonces este documento será una herramienta de trabajo muy favorable para medir los gastos en canales y tuberías.

Una crítica a los métodos utilizados en este documento surge cuando se revisan las normas o bibliografía de medición de gasto, por ejemplo, el Manual de la Organización Meteorológica Mundial (WMO 2010), hay una gran diversidad de métodos y equipos. Los métodos seleccionados en este documento son los que han tenido una mejor aceptación o que para aplicación en campo han soportado el vandalismo o que sus costos de operación son relativamente bajos y además se cuenta con proveedores que suministran las refacciones o soporte técnico a un relativo bajo precio. Pero una vez que someta a discusión con el público es posible que cambien algunos de los métodos y equipos, con la justificante de construir los acuerdos entre los usuarios y la autoridad del agua.

REFERENCIAS

- BS-8452. (2005). *Use of clamp-on (externally mounted) transit time metering techniques for liquid applications. Guide.* British Standar.
- GUM (ISO/IEC). (1995). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.* International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission.
- IEC-60041. (1991). *Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines.* International Electrotechnical Commission.
- ISO-1070. (1992). *Liquid flow measurement in open channels – Slope-area method.* International Organization for Standardization.
- ISO-1438. (2008). *Hydrometry – Open channel flow measurement using thin-plate weirs.* International Organization for Standardization.
- ISO-15769. (2010). *Hydrometry – Guidelines for the application of acoustic velocity meters using the Doppler and echo correlation methods.* International Organization for Standardization.
- ISO-4064-1. (2014). *Water meters for cold potable water and hot water – Part 1: Metrological and technical requirements.* International Organization for Standardization.
- ISO-4359. (2013). *Flow measurement structures – Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes.* International Organization for Standardization.
- ISO-4362. (1999). *Hydrometric determinations – Flow measurement in open channels using structures – Trapezoidal broad-crested weirs.* International Organization for Standardization.
- ISO-5167-3. (2003). *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 3: Nozzles and Venturi nozzles.* International Organization for Standardization.
- ISO-6416. (2004). *Hydrometry – Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method.* International Organization for Standardization.
- ISO-748. (2007). *Hydrometry – Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats.* International Organization for Standardization.
- ISO-8363. (1997). *Measurement of liquid flow in open channels – General guidelines for selection of method.* International Organization for Standardization.
- ISO-8368. (1999). *Hydrometric determinations – Flow measurements in open channels using structures – Guidelines for selection of structure.* International Organization for Standardization.
- ISO-9123. (2001). *Measurement of liquid flow in open channels – Stage-fall-discharge relationships.* International Organization for Standardization.

- ISO-9213. (2004). *Measurement of total discharge in open channels – Electromagnetic method using a full-channel-width coil*. International Organization for Standardization.
- ISO-ISO/TR-24578. (2012). *Hydrometry – Acoustic Doppler profiler – Method and application for measurement of flow in open channels*. International Organization for Standardization.
- LAN. (2016-03-24). *Ley de Agua Nacionales*.
- LMN. (2009-04-30). *Ley Federal Sobre Metrología y Normalización*.
- NOM-012-SCFI. (1997). *Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos-medidores para agua potable fría-especificaciones*. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- OIML R 49-1. (2013). *Water meters for cold potable water and hot water. Part 1: Metrological and technical requirements*. International Organization for Legal Metrology.
- Tamari, S, & Aguilar, C.A. (2010). *Aforo en canales y presas selección de una técnica*. IMTA.
- WMO. (2010). *Manual of stream gauging Vol. I*. World Meteorological Organization.



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA