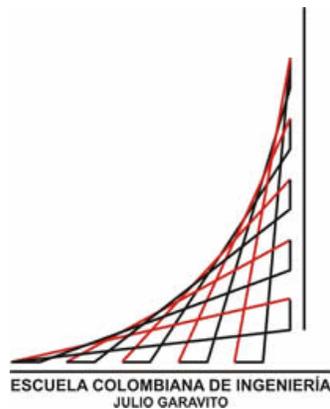


**PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO METODOLÓGICO DE LA MACROMEDICIÓN
EN ACUEDUCTOS URBANOS**

MAURICIO CRUZ GÓMEZ



**ESCUOLA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ
2014**

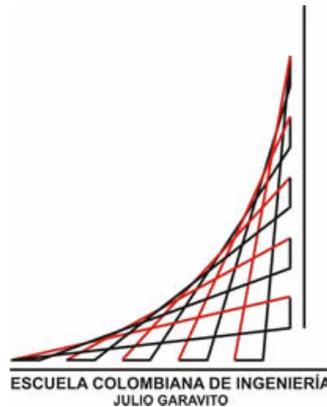
**PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO METODOLÓGICO DE LA MACROMEDICIÓN
EN ACUEDUCTOS URBANOS**

MAURICIO CRUZ GÓMEZ

TRABAJO DE GRADO

DIRECTOR

**HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ, PROFESOR TITULAR ESCUELA
COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO**



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ
2014**



Nota de aceptación:

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

Firma del jurado 3

Ciudad: _____ **fecha:** día – mes – año



DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios, quien me dio grandes dones y talentos que hoy puedo utilizar en mi vida. A mis padres, Ricardo y Carmen Rosa, quienes me apoyaron todo el tiempo y me alentaron día a día para lograr mis metas y objetivos propuestos. A mis hermanos, Javier y Catalina, quienes nunca dudaron de mis capacidades en terminar exitosamente esta tesis. A mi tutor, Dr. Alfonso Rodríguez, que sin su ayuda y consejos no hubiera podido desarrollar esta tesis. A mi amiga Marla, quien me impulsó a seguir este camino de éxito y metas. A todos ellos muchas gracias.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la empresa Aquadatos S.A.S., que me brindó su apoyo y colaboración en la asesoría técnica y suministro de información para la realización de esta tesis, en especial al ingeniero Germán González Leal, Representante Legal, y al ingeniero Luis Hernando Leal Coronado, Director de Proyectos.

De forma especial agradezco al profesor Héctor Alfonso Rodríguez Díaz por aceptarme para realizar este trabajo bajo su dirección y asesoría, quien con su guía, ideas y aportes hizo posible realizar exitosamente esta tesis. Le agradezco por su tiempo, disposición y paciencia con cada una de las reuniones, que sin duda alguna contribuyeron con un aporte enriquecedor, tanto en el desarrollo de esta tesis como en mi formación personal.

Gracias a las empresas distribuidoras de equipos de macromedición, que con sus manuales, cartillas o brochures publicados en sus páginas de internet o suministrados directamente contribuyeron significativamente en el desarrollo de este trabajo. Agradezco particularmente a las empresas Electrohidráulica S.A., al ingeniero mecánico Óscar Arias Tafur, Fluidis Servicios Asociados y B & C Biosciences Ltda.



CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS.....	18
1. LA MACROMEDICIÓN EN SISTEMAS DE ACUEDUCTOS URBANOS	19
1.1 TERMINOLOGÍA BÁSICA.....	19
1.2 CONFIGURACIÓN TOPOLÓGICA GENERAL DE UN SISTEMA DE ACUEDUCTO EN CIUDADES	22
1.2.1 ELEMENTOS HIDRÁULICOS BÁSICOS.....	22
1.2.2 ELEMENTOS HIDRÁULICOS COMPLEMENTARIOS	26
1.3 LA MACROMEDICIÓN EN LA CONFIGURACIÓN TOPOLÓGICA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	27
1.4 LA MACROMEDICIÓN	28
1.4.1 OBJETIVOS DE LA MACROMEDICIÓN EN SISTEMAS DE ACUEDUCTOS URBANOS	30
1.4.2 ESTRUCTURAS DE UN ESQUEMA DE MACROMEDICIÓN EN SISTEMAS DE ACUEDUCTOS URBANOS. FLUJOGRAMAS.....	32
2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LA MEDICIÓN DE CAUDAL Y PRESIÓN EN TUBERÍAS CERRADAS Y A PRESIÓN	40
2.1 ECUACIONES DIFERENCIALES BÁSICAS.....	40
2.1.1 ECUACIÓN GENERAL DE TRANSPORTE DE REYNOLDS.....	40
2.1.2 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	42
2.1.3 ECUACIÓN DE MOMENTUM	42
2.1.4 CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA MECÁNICA Y LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.....	45



2.2 ECUACIÓN DE ENERGÍA	46
2.2.1 LA ECUACIÓN DE ENERGÍA ENTRE DOS PUNTOS	47
2.3 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....	48
2.3.1 DEFINICIÓN DE UN FLUIDO	48
2.3.1 FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS	49
2.3.2 VISCOSIDAD	49
2.3.3 DENSIDAD.....	50
2.3.4 TEMPERATURA	50
2.3.5 PRESIÓN.....	51
2.3.6 CORROSIÓN Y ABRASIÓN	51
2.4 EL FLUJO Y SU CLASIFICACIÓN	51
2.4.1 FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO.....	52
2.4.1 FLUIDO IDEAL	53
2.4.2 FLUJO ROTACIONAL E IRROTACIONAL.....	53
2.4.3 FLUJO PERMANENTE Y NO PERMANENTE	54
2.4.4 FLUJO UNIFORME Y NO UNIFORME	54
2.4.1 FLUIDOS BIFÁSICOS	54
3. TECNOLOGÍAS EN EQUIPOS DE MEDICIÓN EN TUBERÍAS CERRADAS Y A PRESIÓN.....	56
3.1 APARATOS O DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL	56
3.1.1 FUNCIONAMIENTO, VENTAJAS Y DESVENTAJAS	58
4. IMPLEMENTACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN	86
4.1 DISEÑO DE LA SECTORIZACIÓN Y UN SISTEMA DE MACROMEDICIÓN ...	86
4.1.1 LA SECTORIZACIÓN	86



4.1.2	DISEÑO DE UN SISTEMA DE MACROMEDICIÓN.....	90
4.1.3	CONSIDERACIONES A LOS DISEÑOS	91
4.2	OBRAS CIVILES Y SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS	95
4.2.1	OBRAS CIVILES CÁMARAS DE MACROMEDICIÓN	95
4.2.2	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS.....	97
4.2.3	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE MACROMEDIDORES	98
4.2.4	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE ARMARIOS ELÉCTRICOS	98
4.3	COMUNICACIONES DIGITALES.....	100
4.3.1	SEÑALES ANÁLOGAS	100
4.3.2	SEÑALES DIGITALES.....	102
4.3.3	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL.....	103
5.	METODOLOGÍA PARA EL MANTENIMIENTO Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN.....	108
5.1	MANTENIMIENTO.....	108
5.1.1	MANTENIMIENTO PREVENTIVO.....	108
5.1.2	MANTENIMIENTO CORRECTIVO	111
5.1.3	MANTENIMIENTO MIGRATORIO.....	111
5.1.4	PLAN DE MANTENIMIENTO.....	112
5.2	ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN.....	112
5.2.1	PLAN DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN MACROMEDIDA.....	114
6.	METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS DE MACROMEDICIÓN	115
6.1	SELECCIÓN DE UN EQUIPO DE MEDICIÓN DE CAUDAL.....	115



6.1.1	FASE 1: SELECCIÓN POR PROPIEDADES DEL FLUIDO.....	115
6.1.2	FASE 2: SELECCIÓN POR LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE MEDIDA	118
6.1.3	FASE 3: SELECCIÓN POR ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL DISPOSITIVO DE MEDIDA	121
6.1.4	FASE 4: SELECCIÓN POR CRITERIOS ECONÓMICOS.....	124
7.	METODOLOGÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE DATOS	129
7.1	REGISTRO DE DATOS BRUTOS	129
7.2	CONSOLIDACIÓN DE DATOS.....	130
7.3	IDENTIFICACIÓN DE DATOS ATÍPICOS	133
7.3.1	DESARROLLO DEL MÉTODO ESTADÍSTICO DIAGRAMA DE CAJAS	134
7.4	ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE DATOS ATÍPICOS, ANÓMALOS O EXTRAÑOS	135
7.5	INDICADORES DE GESTIÓN	138
7.6	COMPORTAMIENTOS HISTÓRICOS DE LA MEDICIÓN	138
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	140
	REFERENCIAS.....	144



LISTA DE FLUJOGRAMAS

	pág.
Flujograma 1. Concepción y diseño de un sistema de acueducto urbano	33
Flujograma 2. Construcción de un sistema de acueducto urbano.....	36
Flujograma 3. Operación y control de un sistema de acueducto urbano.....	39
Flujograma 4. Diseño de un sistema de macromedición	91
Flujograma 5. Construcción de un sistema de macromedición	96
Flujograma 6. Metodología para el mantenimiento de los equipos de macromedición	109
Flujograma 7. Metodología para la selección de equipos de medición de caudal...	116



LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación de equipos de medición de caudal, según norma BS EN 7405 (British Standard)	57
Tabla 2. Ventajas de los equipos de presión diferencial (PD)	64
Tabla 3. Desventajas de los equipos de presión diferencial (PD)	65
Tabla 4. Ventajas de los equipos de sección variable (rotámetros)	67
Tabla 5. Desventajas de los equipos de sección variable (rotámetros).....	68
Tabla 6. Ventajas de los equipos volumétricos o de desplazamiento positivo (DP) ..	70
Tabla 7. Desventajas de los equipos volumétricos o de desplazamiento positivo (DP)	71
Tabla 8. Ventajas de los equipos de turbina	73
Tabla 9. Desventajas de los equipos de turbina.....	74
Tabla 10. Ventajas de los equipos vortex.....	75
Tabla 11. Desventajas de los equipos vortex.....	76
Tabla 12. Ventajas de los equipos electromagnéticos	78
Tabla 13. Desventajas de los equipos electromagnéticos.....	79
Tabla 14. Precisión de los equipos ultrasónicos de múltiples caminos	83
Tabla 15. Ventajas de los equipos ultrasónicos	84
Tabla 16. Desventajas de los equipos ultrasónicos.....	85
Tabla 17. Manejo de una señal análoga 4-20mA.....	101
Tabla 18. Plan de mantenimiento equipos de macromedición	113
Tabla 19. Plan de aseguramiento de calidad de información macromedida	114
Tabla 20. Selección de equipos de caudal de acuerdo con las propiedades del fluido, Fase 1	119



Tabla 21. Selección de equipos de caudal de acuerdo con la localización del punto de medida, Fase 2.....	123
Tabla 22. Selección de equipos de caudal de acuerdo con las especificaciones técnicas del dispositivo de medida, Fase 3.....	125
Tabla 23. Selección de equipos de caudal de acuerdo con criterios económicos, Fase 4	127



LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama de flujo sistema de acueducto urbano (ejemplo 1)	24
Figura 2. Diagrama de flujo sistema de acueducto urbano (ejemplo 2)	24
Figura 3. Diagramas de flujo sistema de acueducto urbano (ejemplo 3).....	25
Figura 4. Diagramas de flujo sistema de acueducto urbano (ejemplo 4).....	25
Figura 5. Diagrama de flujo sistema de acueducto urbano (ejemplo 5)	26
Figura 6. Velocidad de un fluido respecto a un sistema de coordenadas xy.....	41
Figura 7. Volumen de control elemental.....	47
Figura 8. Caudales bifásicos en tuberías vs. contenido de gas.....	55
Figura 9. Esquema típico medidor de caudal de placa de orificio	59
Figura 10. Pérdida en dispositivo de paso reducido vs. relación de diámetros d/D (β)	60
Figura 11. Sección transversal típica dispositivos de tobera.....	62
Figura 12. Sección transversal típica dispositivos toberas venturi	62
Figura 13. Sección transversal típica de los dispositivos tubos pitot.....	63
Figura 14. Sección transversal típica de los equipos de sección variable (rotámetros)	66
Figura 15. Funcionamiento típico de un equipo volumétrico, Error (%) vs. Δp vs. Caudal.....	69
Figura 16. Sección transversal típica de un equipo electromagnético.....	78
Figura 17. Funcionamiento de un equipo ultrasónico a partir del tiempo de tránsito. 82	
Figura 18. Señal análoga	101
Figura 19. Señal digital.....	102
Figura 20. Arquitectura básica en un sistema Modbus RTU	105



Figura 21. Tipos de señales de entrada y salida. Sensor y transmisor	124
Figura 22. Tabla tipo, presentación de datos brutos	129
Figura 23. Ejemplos tipo, consolidación de datos para casos \leq al 50% en ausencia de datos	131
Figura 24. Tabla tipo, presentación de datos brutos ausentes.....	132
Figura 25. Ejemplos tipo, consolidación de datos para casos $>$ al 50% en ausencia de datos	133
Figura 26. Ejemplos tipo, consolidación de datos para casos \leq al 50% en líneas de impulsión	134
Figura 27. Partes de un diagrama de caja	136
Figura 28. Gráfica tipo de un punto de medición ubicado a la salida de una unidad hidráulica.....	137
Figura 29. Relaciones posibles entre volúmenes suministrados, facturados y usuarios suscritos	139



INTRODUCCIÓN

La macromedición es la actividad que se utiliza para medir a gran escala (macro) un componente. Para un sistema de acueducto que transporta agua potable en conductos cerrados y a presión el resultado de la macromedición es disponer de información de caudales, presiones y parámetros de calidad de agua.

El tema de investigación de este proyecto cuyo título es “Planteamiento y desarrollo metodológico de la macromedición en acueductos urbanos” nace de la necesidad que se identifica para las etapas de diseño, construcción, operación y control de un sistema de acueducto urbano en procesos o desarrollos metodológicos, para operar eficientemente un sistema de acueducto y que tienen que ver con la macromedición de agua potable.

La importancia y relevancia de este proyecto radica en abarcar procesos o desarrollos metodológicos desde los puntos de vista de: a) implantación de la macromedición en sistemas de acueductos urbanos, b) mantenimiento y aseguramiento de la calidad de la información de la macromedición, c) selección de equipos de macromedición y d) procesamiento de la información de datos.

Ante la falta de claridad en procesos o desarrollos metodológicos para la macromedición de agua potable, la experiencia muestra los siguientes problemas particulares:

- Ausencia de procedimientos que presenten recomendaciones para la implementación de la macromedición, que dependerá de diferentes variables que incluye la sectorización, la distribución de la red en el sitio, propiedades particulares del agua, factores económicos del operador, entre otros.
- Normas de mantenimiento y aseguramiento de la calidad de la información de la macromedición desactualizadas y no acordes con los avances tecnológicos o equipos instalados, que aseguren la calidad de la información emitida por los equipos de macromedición.
- Baja confiabilidad en los resultados de la macromedición por mala selección del equipo o tecnología implementada en un punto de la red del sistema de acueducto urbano.
- Pérdidas económicas y dificultades en la operación y control del sistema de acueducto de las empresas operadoras, por ausencia de datos de macromedición, equivocados procesos de análisis de los resultados de campo, errónea selección del equipo o tecnología.



- Ausencia de procedimientos que garanticen una confiabilidad aceptable en la completitud de datos faltantes e identificación de datos atípicos para un registro histórico de mediciones.

Este proyecto se desarrolla con una recolección de información a empresas distribuidoras de equipos de macromedición, que con sus manuales, cartillas o brochures publicados en sus páginas de internet o suministrados directamente, permiten elaborar este producto.

La metodología empleada para la elaboración de este proyecto comienza a desarrollarse con un primer capítulo que presenta el marco conceptual de la investigación, el cual contiene terminología básica asociada con tema de macromedición, descripción básica de una configuración topológica de un sistema de acueducto en ciudades, la configuración topológica de una red de distribución entendida desde la macromedición y termina con la descripción de los objetivos, la aplicación y la importancia del tema propuesto: la macromedición en un sistema de acueducto que se desarrolla para un propósito de operación y control, y diagnóstico, diseño y optimización.

En el segundo capítulo se presenta algunos conceptos simples relacionados con la medición de caudales y presiones de fluidos en tuberías cerradas y a presión; incluye además, algunos conceptos físicos básicos asociados con el tema.

En el capítulo tres se detalla la evolución tecnológica y el estado del arte de los equipos de macromedición en conductos cerrados y a presión, los cuales transportan agua potable fría.

En el cuarto capítulo se presentan los requisitos técnicos y las recomendaciones en la implementación de la macromedición sobre un sistema de acueducto urbano.

El capítulo quinto desarrolla la metodología propuesta para el mantenimiento de los equipos de macromedición y las actividades que aseguran la calidad de la información transmitida por el sistema de macromedición, en beneficio de la confiabilidad de las mediciones captadas en campo sobre un sistema de acueducto urbano.

En el sexto capítulo se hace la propuesta metodológica para la selección de equipos o tecnologías en la implementación de la macromedición en un sistema de acueducto urbano.

El séptimo, y último capítulo, presenta procedimientos en el registro de datos brutos, consolidación o completitud de datos de un registro histórico, identificación, análisis y validación de datos atípicos, y evaluación de comportamientos, tendencias y desviaciones de los registros históricos, que se obtiene con el sistema de macromedición de un sistema de acueducto urbano.



Finalmente, se presentan las conclusiones, las recomendaciones y las referencias consultadas, que sirvieron como base para la elaboración de este documento y que aparecen citados en el texto.



OBJETIVOS

➤ GENERAL

Plantear y desarrollar un proceso metodológico para la implementación de la macromedición de agua potable en redes a presión para sistemas de acueductos urbanos. Este trabajo incluye considerar la macromedición desde el diseño, construcción, operación y control.

➤ ESPECÍFICOS

- Definir la importancia de la macromedición, por qué, para qué, dónde y cómo aplica e influye en la ejecución del diseño, construcción, operación y control de un sistema de acueducto.
- Establecer la topología de los sistemas de distribución de agua potable en ciudades y presentar un marco conceptual de la macromedición de agua potable en redes a presión.
- Evaluar el estado del arte y los avances tecnológicos en equipos de macromedición, en conductos a presión que transportan agua potable fría.
- Presentar recomendaciones para la implementación de la macromedición, teniendo en cuenta características y particularidades de la infraestructura e instrumentación que se requiere para la instalación in situ de un equipo que brinde continuidad y seguridad en el servicio de medición.
- Desarrollar una metodología de mantenimiento y aseguramiento de la calidad de la información de la macromedición.
- Plantear una metodología de selección del tipo de equipo de macromedición que se debería utilizar o implementar según las propiedades del fluido, localización del punto de medida, analizando para su selección puntos de vista de sensibilidad, de precisión, manejo y económicos, y considerando el estado del arte de la tecnología y las experiencias nacionales e internacionales al respecto.
- Proponer un procedimiento en el registro de datos brutos, completitud de datos de un registro histórico, identificación, análisis y validación de datos atípicos, y evaluación de comportamientos, tendencias y desviaciones de los registros históricos, que se obtiene con el sistema de macromedición de un sistema de acueducto urbano.



1. LA MACROMEDICIÓN EN SISTEMAS DE ACUEDUCTOS URBANOS

1.1 TERMINOLOGÍA BÁSICA

Para cualquier sistema de acueducto en ciudades y durante sus procesos de diseño, construcción, operación y control se manejan términos básicos, que es necesario definir para mayor comprensión del tema. A continuación se describen los términos y conceptos más relevantes y utilizados en estos procesos:

- **Macromedición:** actividad que se utiliza para medir a gran escala (macro) un componente. Para un sistema de acueducto que transporta agua potable en conductos cerrados y a presión se hace medición de caudales, presiones y parámetros de calidad de agua (Jiménez, 2003).
- **Índice de agua no contabilizada:** es un indicador que mide las pérdidas relativas de agua potable en una unidad de distribución del sistema de acueducto. Se utiliza para diagnosticar la eficiencia general de una entidad prestadora del servicio de agua potable. Corresponde a la diferencia entre el volumen total del agua tratada y suministrada al sistema de acueducto y el volumen total de agua contabilizada como consumo de los usuarios (Jiménez, 2003).
- **Volumen captado:** es el volumen de agua tomado por el operador del sistema de acueducto, generalmente de medios naturales, para suplir las necesidades de una comunidad en particular (Cruz, 2009).
- **Volumen producido o suministrado:** es el volumen de agua que sale de las plantas de tratamiento de agua potable hacia la red de distribución y áreas de servicio (Cruz, 2009).
- **Volumen facturado:** es el volumen de agua contabilizada como consumo de los usuarios, medida con la micromedición en el sistema de acueducto (Cruz, 2009).
- **Unidad de distribución:** se refiere a la unidad o sector hidráulico que define una sectorización: zona, sector, subsector, distrito, circuito, subcuenca, cuenca o microcuenca (Cruz, 2009).
- **Sectorización:** es la segmentación, parcelación, delimitación o división del área de servicio de un sistema de acueducto en unidades de distribución homogéneas, aisladas e independientes, útiles para macromedir volúmenes suministrados, optimizar las condiciones de servicio, calcular el índice de agua no contabilizada (IANC), formular proyectos de control de pérdidas y establecer las causas de estas. Sus divisiones se conocen como zona, sector, subsector, distrito, circuito, subcuenca, cuenca o microcuenca, entre otras (Jiménez, 2003).



- Válvula de cierre permanente: son válvulas de corte que se disponen sobre la red de distribución para separar de forma permanente las zonas de servicio o sectores hidráulicos (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)¹.
- Válvula de aislamiento temporal: son válvulas de corte que se disponen sobre la red de distribución para separar temporalmente zonas de servicio o sectores hidráulicos, maniobradas, generalmente de cerradas a abiertas, por el cambio de un servicio o reparaciones en la red (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).
- Volumen por error en la medición: corresponde a la parte del volumen suministrado y consumido por los usuarios de un sistema o área de servicio, que no factura a causa de la imprecisión original en la sensibilidad o deterioro de exactitud con el tiempo del aparato de medición (Cruz, 2009).
- Fugas visibles: corresponden a todas aquellas fugas que tiene consecuencias visibles, que permiten ubicar el punto de rotura sobre la tubería y su consecuente reparación (Jiménez, 2003).
- Fugas semivisibles: son aquellas fugas que producen algunos efectos, sin que éstos permitan rastrear la ubicación exacta del punto de rotura sobre la red (Jiménez, 2003).
- Fugas no visibles: existen numerosas fugas no visibles, que no presentan algún efecto que pueda ser percibido de manera evidente. No se traduce en presencia de agua superficial (Jiménez, 2003).
- Curvas de consumo: corresponde a la información horaria de caudales macro-medidos para un área de servicio en particular.
- Implementación de la macromedición: corresponde a la ejecución de diseños, obras civiles y suministros e instrumentación de los equipos de macromedición de caudales, presiones y calidad de agua.
- Modelo hidráulico calibrado: es una representación matemática sobre un software de modelación que representa las condiciones reales y en el tiempo del sistema de acueducto existente, capaz de obtener datos y curvas de presiones, caudales y algunos parámetros de calidad de agua en cualquiera de los puntos del sistema de acueducto modelado.
- Precisión o exactitud: en los equipos de macromedición se puede definir como la proximidad a la concordancia absoluta entre el valor medido y el valor real de lo que se mide. Generalmente los fabricantes la especifican en porcentaje, en proporción respecto a la lectura o en términos de porcentaje respecto al valor de

¹ Ministerio de Desarrollo Económico (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS-2000. Título D.* Bogotá D.C..

fondo de escala, siendo para este último la variación en precisión que puede tener un equipo de macromedición respecto a un campo o valores de trabajo (Altendorf, Matthias & otros, 2005).

- Repetibilidad: es la capacidad de un equipo de macromedición en dar respuestas o resultados idénticos al repetir una situación con los mismos valores de la cantidad medida y con las mismas condiciones de trabajo establecidas. La buena precisión de un equipo de macromedición garantiza una buena repetibilidad, pero una buena repetibilidad de un equipo de macromedición no siempre garantiza una buena precisión (Altendorf, Matthias & otros, 2005).
- Rangeabilidad o rango dinámico: se define como la habilidad de controlar una variable. Por ejemplo, una rangeabilidad de un equipo de medición de caudal de 100:1 significa que se puede llegar a controlar la centésima parte del rango de valores de la medida. Si el dispositivo mide hasta 100 litros por segundo máximo, se podrá reducir el caudal hasta 1 litro por segundo como mínimo (Altendorf, Matthias & otros, 2005).
- Linealidad: en los equipos de macromedición se puede definir como el rango de valores límite en el cual una medida puede variar como resultado de la relación entre el caudal real y los valores de salida indicados por el equipo de medición (Altendorf, Matthias & otros, 2005).
- Incertidumbre: en los equipos de macromedición se puede definir como el rango de valores entre los cuales se halla el valor real con una probabilidad determinada. Los equipos de medición de un componente en particular nunca miden con precisión absoluta; por lo tanto, la incertidumbre es el resultado de sumar todas las pequeñas perturbaciones que pueden estar presentes en un medio de medición, que dan como repuesta una variación del valor medido respecto al valor real (Altendorf, Matthias & otros, 2005).
- Error: se puede definir como la diferencia entre el valor de salida medido por un equipo de macromedición y el valor real del componente medido en el instante en el que se realiza la medición (Altendorf, Matthias & otros, 2005).
- Factor K de sensibilidad: se define como el número de impulsos por unidad de magnitud y es un parámetro calculado por los fabricantes de equipos de medición de caudal en el laboratorio. Para algunos fabricantes es un factor que resulta del cociente entre la frecuencia de salida y la velocidad del caudal. Para otros resulta ser un factor de corrección de la medida determinado por calibración en un laboratorio (Altendorf, Matthias & otros, 2005).
- Constante del contador: se define como el cociente entre el volumen real y el volumen registrado o medido por el equipo de medición. Algunos fabricantes presentan un diagrama de la constante del contador, el cual representa

gráficamente las variaciones de la constante del contador con el tiempo (Altendorf, Matthias & otros, 2005).

- Transmisor: son dispositivos electrónicos que procesan la señal que representa la variable física medida por el sensor y la convierten en una señal de salida estandarizada por el sistema para su registro, control o manipulación. También dispone de un indicador que muestra las lecturas de los valores medidos (Altendorf, Matthias & otros, 2005).

1.2 CONFIGURACIÓN TOPOLÓGICA GENERAL DE UN SISTEMA DE ACUEDUCTO EN CIUDADES

1.2.1 Elementos hidráulicos básicos

Un sistema de acueducto lo conforma una serie de elementos hidráulicos que trabajan articuladamente para un mismo fin, que es abastecer de agua potable a una población en particular. Los elementos hidráulicos básicos que define cualquier sistema convencional de abastecimiento de agua potable y reglamentado en el Artículo 10 de la Resolución 1096 de 2000 – Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)² son los siguientes:

- 1) Fuente de abastecimiento de agua: corresponde a todas las aguas provenientes de cursos superficiales como ríos, quebradas, nacederos, lagos, embalses o cuerpos subterráneos. En casos excepcionales también se pueden considerar como fuentes de abastecimiento las aguas lluvias y el agua de mar.
- 2) Captación: cumplen la función de captar el agua cruda de una corriente superficial o subterránea, con una denominación corriente de bocatoma o pozo profundo para los casos de captación de aguas superficiales o subterráneas, respectivamente.
- 3) Línea de aducción: trayecto en tubería a presión o a superficie libre por canales abiertos o cerrados que transporta el agua cruda captada al desarenador, prestando excepcionalmente servicio de suministro a lo largo de su longitud.
- 4) Línea de conducción: trayecto en tubería a presión que transporta el agua cruda del desarenador a la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) y de ésta al tanque de almacenamiento, generalmente sin entrega de agua en ruta.

² Ministerio de Desarrollo Económico (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS-2000. Título D.* Bogotá D.C..



- 5) Planta de tratamiento de agua potable: encargada de tratar el agua cruda captada, transformándola en un líquido apto para el consumo humano y cumpliendo con los criterios mínimos de tratabilidad.
- 6) Tanque de almacenamiento: guarda el agua tratada por la planta de tratamiento de agua potable, su función principal es acumular agua potable cuando la demanda es menor al suministro y distribuirla cuando la comunidad la demanda.
- 7) Estación de bombeo: localizada entre la transición o transporte del agua cruda o tratada, son necesarias para elevar el nivel de la línea piezométrica para vencer una diferencia de altura topográfica, las pérdidas por fricción y las pérdidas menores, cuando el aprovechamiento del transporte del agua a superficie libre no resulta factible.
- 8) Redes de distribución: transportan el agua tratada y lo distribuyen a los usuarios del sistema de acueducto. Se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Redes matrices o primarias: hacen parte de la red de distribución que conforma la malla principal de servicio de transporte de agua tratada a los usuarios del sistema de acueducto. Parte de los tanques de almacenamiento o línea de conducción a las redes secundarias del sistema. Su función principal es mantener las presiones básicas de servicio para el funcionamiento correcto de todo el sistema de acueducto y generalmente son líneas expresas, es decir, que no reparten agua durante su recorrido.

Para ciudades con un nivel de complejidad alto (mayores a 60.000 habitantes) se consideran como redes matrices o primarias las tuberías de diámetro mayor a 300 mm (12 pulgadas) y para ciudades con nivel de complejidad menor se consideran redes matrices o primarias las de diámetro de 150 mm (6 pulgadas) en adelante.

- Redes secundarias: redes de distribución que se derivan de las matrices o primarias para transportar el agua tratada a las redes menores de los barrios o urbanizaciones de la ciudad. Son líneas que pueden repartir agua en ruta y de diámetro menor a las primarias.

Para las ciudades con nivel de complejidad alto (mayores a 60.000 habitantes) se consideran redes secundarias las tuberías de diámetro comprendido entre 75 mm (3 pulgadas) y 300 mm (12 pulgadas), y para las ciudades con nivel de complejidad menor se consideran como redes secundarias las de diámetro comprendido entre 38 mm (1,5 pulgadas) y 100 mm (4 pulgadas).

- Redes menores: redes de distribución que se derivan de las secundarias para transportar el agua tratada a los puntos de consumo. Son líneas que reparten el agua en ruta y de diámetro menor a las redes secundarias.

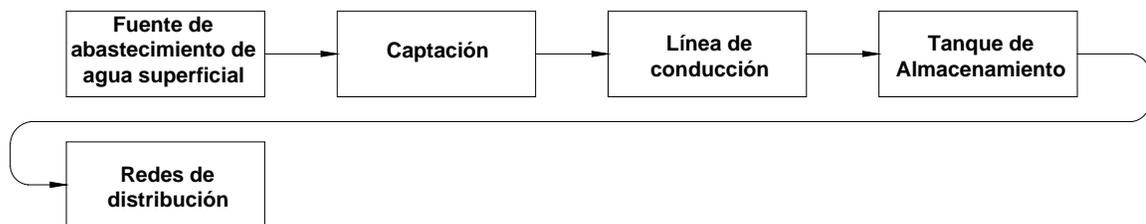
1.2.1.1 Disposición, interacción y configuración

La disposición, interacción y configuración entre los elementos hidráulicos cambian dependiendo de varios factores como: la población, la dotación y demanda, la localización, la calidad y cantidad de la fuente de abastecimiento, de las condiciones topográficas y de los recursos económicos.

A continuación se presentan algunos diagramas de flujo con ejemplos de sistemas de acueductos urbanos que varían dependiendo de los factores señalados.

- Ejemplo 1. La Figura 1 presenta un diagrama de flujo característico de un sistema de acueducto urbano sencillo, que nace de la buena calidad y cantidad de la fuente de abastecimiento, para una población de complejidad baja (menor a 2.500 habitantes), demandas bajas y que transporta el agua captada a superficie libre hasta el tanque de almacenamiento para distribuirla a presión a los usuarios con la energía disponible en el sistema.

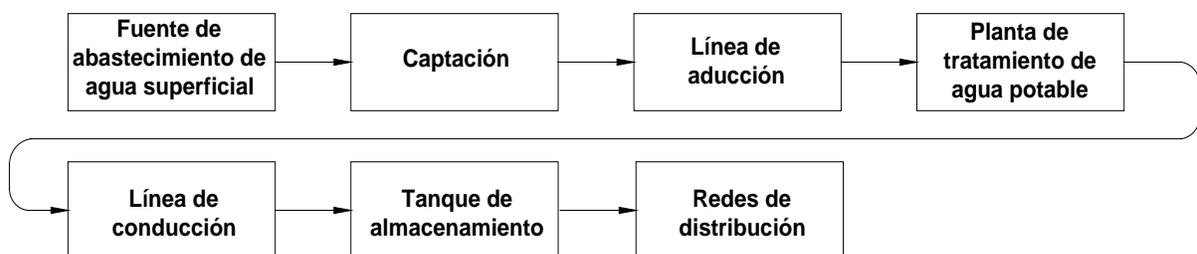
Figura 1. Diagrama de flujo sistema de acueducto urbano (ejemplo 1)



Fuente: autor.

- Ejemplo 2. La Figura 2 presenta un diagrama de flujo característico de un sistema de acueducto urbano que requiere de una planta de tratamiento que cumple con las normas de calidad de agua potable y transporta el agua cruda y tratada a superficie libre hasta el tanque de almacenamiento para distribuirla a presión a los usuarios con la energía disponible en el sistema. Sistema particular de un terreno quebrado y de alta pendiente.

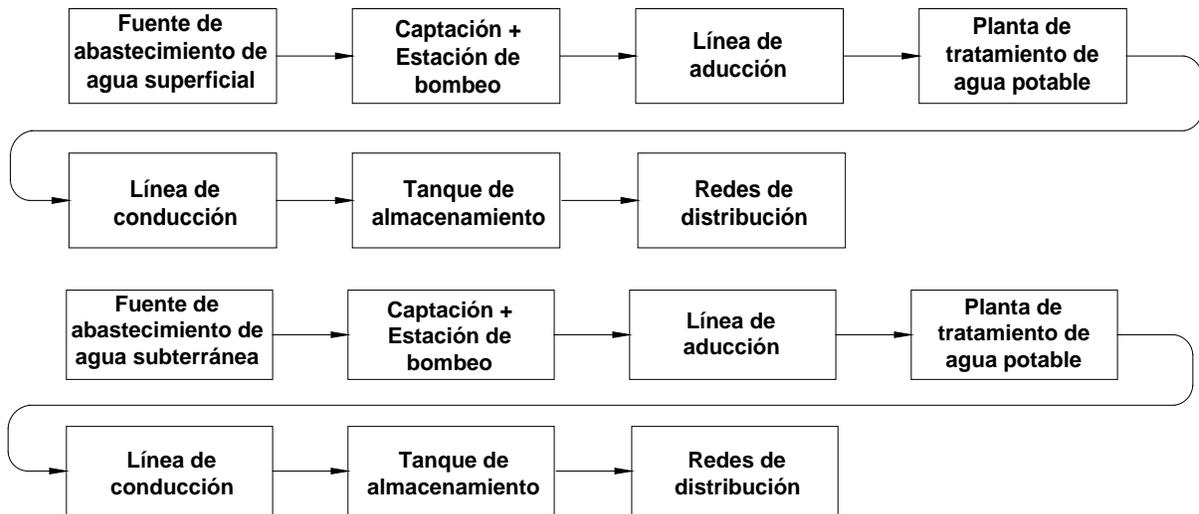
Figura 2. Diagrama de flujo sistema de acueducto urbano (ejemplo 2)



Fuente: autor.

- Ejemplo 3. La Figura 3 presenta unos diagramas de flujo característicos de un sistema de acueducto urbano que funciona por bombeo en su captación y a presión en el resto de su sistema. Sistema particular en un terreno mixto y de aceptables recursos económicos.

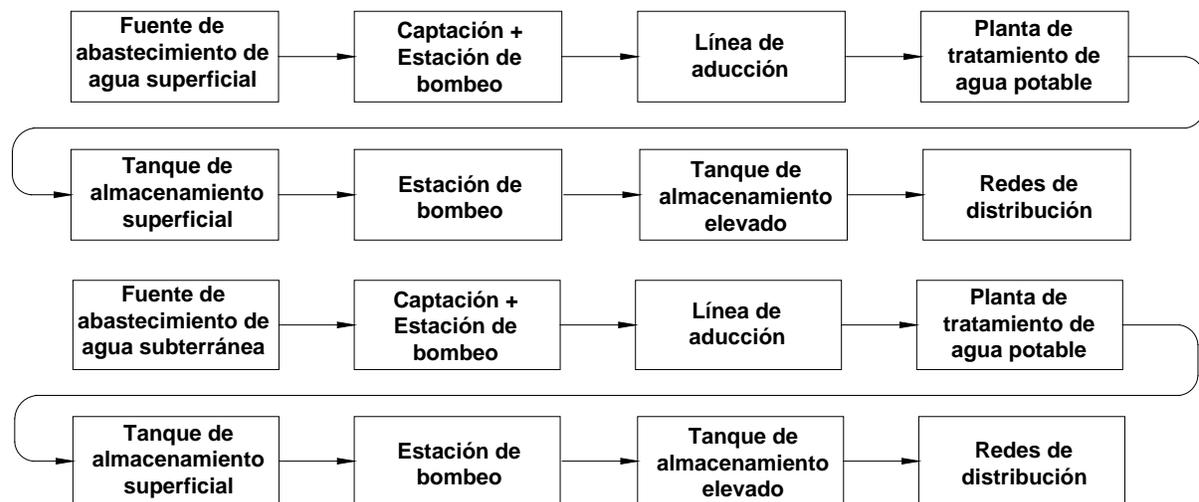
Figura 3. Diagramas de flujo sistema de acueducto urbano (ejemplo 3)



Fuente: autor.

- Ejemplo 4. La Figura 4 presenta dos diagramas de flujo característicos de un sistema de acueducto urbano que funciona por bombeo en su captación y en la alimentación del tanque de almacenamiento elevado. Sistema particular en terrenos planos y de aceptables recursos económicos.

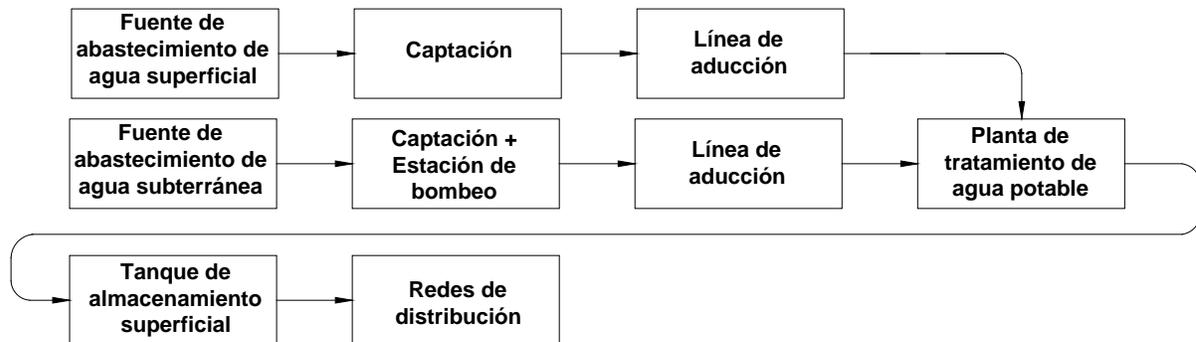
Figura 4. Diagramas de flujo sistema de acueducto urbano (ejemplo 4)



Fuente: autor.

- Ejemplo 5. Sistemas de acueductos urbanos tan complejos que combinan todos los diagramas de flujo presentados, con la implementación de dos o más captaciones y de diferentes fuentes (superficiales o subterráneas), que funcionan a superficie libre o a presión. Sistemas particulares para poblaciones de complejidad alta (mayores a 60.000 habitantes), dotaciones y demandas altas y de aceptables recursos económicos (Figura 5).

Figura 5. Diagrama de flujo sistema de acueducto urbano (ejemplo 5)



Fuente: autor.

De esta forma se pueden presentar numerables diagramas de flujo de sistemas de acueducto urbanos complejos o simples, cuyo diseño depende de los factores señalados en este capítulo.

1.2.2 Elementos hidráulicos complementarios

Existen elementos complementarios a los sistemas de acueducto en ciudades, que cumplen funciones particulares como las siguientes:

- Cámara de quiebre de presión: se utiliza en las líneas de aducción y conducción donde el transporte de agua se hace con tubería a presión. Se ubica en puntos estratégicos para modificar la línea piezométrica, donde se presentan presiones críticas para la clase de tubería dispuesta e implementada para la reducción de la presión igual a la atmosférica (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).
- Válvula de corte: dispositivo complementario a la red de distribución, líneas de conducción y aducción, sirve para aislar tramos de tubería en operaciones de inspección, mantenimiento o reparación (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).
- Válvula de purga: dispositivo complementario a la red de distribución, líneas de conducción y aducción, se utiliza para descargar o purgar el agua de un conducto en los puntos de acumulación de sedimentos y facilitar las operaciones de limpieza y mantenimiento (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).



- Válvula ventosa: dispositivo complementario a la red de distribución, líneas de conducción y aducción, sirve para admitir o expulsar aire dentro de la tubería, que facilita la operación del sistema de acueducto (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).
- Válvula reductora de presión: dispositivo complementario a la red de distribución para generar la pérdida o quiebre de presión, definiendo un nivel de presión para una unidad de distribución o zona determinada de consumo (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).
- Válvula sostenedora de presión: dispositivo complementario a la red de distribución, que sirve para tratar de mantener una presión aguas arriba de la válvula (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).
- Hidrantes: dispositivos complementarios a la red de distribución que permiten la conexión de mangueras especiales utilizadas en la extinción de incendios (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).
- Puntos de macromedición: equipos complementarios al sistema de acueducto para medir a gran escala (macro) un componente, sirven para medir caudales, presiones o parámetros de calidad de agua.

1.3 LA MACROMEDICIÓN EN LA CONFIGURACIÓN TOPOLÓGICA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN

La construcción y configuración topológica de cualquier sistema de redes de acueducto dependen de la conformación física del área urbana, de la localización de sus predios y linderos. Su distribución hidráulica se puede dar en redes abiertas, cerradas o mixtas, esto depende de las condiciones anteriores.

Para cualquier sistema de redes de acueducto urbano la distribución hidráulica está constituida por:

- Redes matrices o primarias.
- Redes secundarias.
- Redes de distribución.

Además existen elementos complementarios que aseguran, establecen, definen, optimizan y facilitan la distribución hidráulica, tales como:

- Válvulas de corte que generan, establecen, aseguran o limitan un área de servicio o de sectorización hidráulica,
- Válvulas de purga que facilitan las operaciones de limpieza y mantenimiento,



- Válvulas ventosas que facilitan la operación del sistema,
- Válvulas especiales como reductoras o sostenedoras de presión que optimizan el servicio,
- Puntos de macromedición que miden caudales, presiones y parámetros de calidad de agua para garantizar los propósitos generales que se describirán más adelante (véase Capítulo 1.4.1. Objetivos de la macromedición en sistemas de acueductos urbanos).

1.4 LA MACROMEDICIÓN

Ante la necesidad de abastecimiento de agua potable a una población concentrada nació la concepción de los sistemas de acueductos urbanos, que históricamente tuvo un predominio técnico en la planificación, diseño y construcción. Actualmente se incluyen nuevos aspectos para los sistemas de acueductos urbanos y de importancia para las empresas prestadoras, como los temas económicos, financieros y ambientales, que en su desarrollo implican generar herramientas en beneficio de la operación, control y optimización de los sistemas de producción y distribución de agua potable, siendo la macromedición protagonista de este tema, como se describe a continuación:

- Durante la operación, control y optimización de un sistema de acueducto, sin el conocimiento de los volúmenes producidos, distribuidos, vendidos, facturados, cobrados y contabilizados, presiones de servicio y calidad del agua producida, transportada y entregada a los usuarios, resulta imposible para las empresas prestadoras de este servicio tener una compañía autosostenible, con un servicio óptimo y de alta calidad y con una buena organización, gestión y administración empresarial.
- La sectorización, junto con la macromedición, cumple una estrategia de operación, control y optimización, que comprende la segmentación, parcelación, delimitación o división del área de servicio de un sistema de acueducto en unidades de distribución homogéneas, aisladas e independientes en las cuales es posible macromedir y consolidar volúmenes suministrados, presiones de servicio y parámetros de calidad de agua. Además, con los volúmenes suministrados macromedidos y los volúmenes facturados micromedidos es posible calcular parámetros de calidad como el índice de agua no contabilizada (IANC), que es una herramienta útil para diagnosticar la eficiencia de una entidad prestadora de servicio, estimando las pérdidas relativas de agua potable para cada una de las unidades de distribución definidas para el sistema de redes de acueducto.
- La macromedición permite determinar, analizar y divulgar datos temporales o permanentes de producción, conducción y distribución, relativos a caudales,



presiones y parámetros de calidad de agua y a niveles de puntos significativos dentro del sistema de acueducto, dependiendo de la sectorización.

- Con una sectorización definida sobre el sistema de redes de acueducto urbano y la implementación de la macromedición, las empresas operadoras con los resultados históricos que se deriven de las mediciones de caudal y presión por áreas de servicio, podrán definir actividades puntuales que permitan la búsqueda de fugas y establecer proyectos estructurados en las inversiones de reducción de pérdidas, que implicaría beneficios económicos y mejores balances financieros ante la reducción de pérdidas de agua por fugas, submedición o consumos fraudulentos.
- Con los registros históricos basados en la macromedición (caudal, presión y calidad de agua), las empresas operadoras podrán predecir el comportamiento hidráulico del sistema, incluso sobre cambios operacionales y daños repentinos. Esto implica reacciones más rápidas del operador, mejor calidad en la operación y control del servicio de acueducto.
- Para un sistema de acueducto urbano la macromedición facilita el diagnóstico, que puede ser específico de elementos de la red de acueducto, tales como capacidad de las redes y elementos hidráulicos, pérdidas de carga, coeficientes de rugosidad, medidas de consumo y detección de fugas. También facilita el planeamiento del sistema, la concepción y ejecución de los diseños nuevos y de optimización, la operación en el conocimiento del comportamiento hidráulico ordinario de los componentes del sistema, el mantenimiento del sistema y la comercialización del agua potable, todo ello en cumplimiento de las normas técnicas y de calidad.
- Debido al auge en la inversión de sistemas de macromedición, actualmente existe un amplio mercado en equipos que permiten observar la evolución de muchas tecnologías y diseños aplicativos. Existe gran variedad en costos, precisión, de aplicación, dependiendo de la temperatura del fluido, flujo de medición, tamaños de las líneas o simplemente de su entorno hidráulico, como la utilización de equipos a presiones por debajo de la presión atmosférica o en condiciones de altas presiones, lo cual permite la implementación de la macromedición para cualquier condición física, hidráulica y económica particular del sistema de acueducto.
- Las empresas de servicios públicos encargadas del suministro de agua potable están reguladas por entidades del Estado que controlan los monopolios naturales y competencias económicas, la calidad del servicio, la gestión empresarial y tarifaria, que para el caso de un sistema de acueducto la macromedición se convierte en una herramienta que facilita, agiliza, gestiona, opera y controla este recurso natural, de tal forma que las empresas reguladoras puedan diagnosticar, evaluar o controlar un sistema de acueducto en beneficio de una población servida.



- La macromedición dispuesta en un sistema de acueducto consolida un sistema de distribución que garantiza un servicio de calidad y continuidad, con altos beneficios operacionales, económicos, financieros y ambientales ante las acciones de optimización en la reducción de pérdidas de agua en el sistema, que involucraría racionalidad económica del volumen de agua entregada a los usuarios con el mejoramiento en la disponibilidad del recurso agua, reducción de costos de potabilización, de distribución y de comercialización.

De esta forma se entiende que sin la macromedición no hay herramientas necesarias para que las empresas prestadoras del servicio de agua potable puedan operar, controlar o optimizar su sistema de acueducto y, consecuentemente, generar resultados con beneficios económicos, financieros y ambientales.

Las razones para no implementar la macromedición en un sistema de acueducto urbano es ignorar su importancia, la falta de interés en saber lo que está pasando en un sistema de acueducto o en la falta de predecir y reaccionar rápidamente ante cualquier evento atípico del sistema operacional.

1.4.1 Objetivos de la macromedición en sistemas de acueductos urbanos

1.4.1.1 Propósitos generales

La macromedición en un sistema de acueducto urbano tiene como objetivo básico medir caudales, presiones y parámetros de calidad de agua para conseguir los siguientes propósitos generales:

- a) Operar y controlar un sistema de acueducto de una manera eficiente y precisa.
- b) Diagnosticar un sistema de acueducto existente con la implementación de un modelo hidráulico calibrado, para identificar, analizar y evaluar parámetros hidráulicos de calidad de agua y operacionales.
- c) Optimizar el sistema de acueducto existente mediante la ejecución de diseños nuevos y obras en función del cumplimiento de las normas y estándares de calidad vigentes.

1.4.1.2 Objetivos en la operación y control

- En la operación y control de los sistemas de acueductos urbanos, la macromedición orienta y genera conocimiento real y al día en la actuación sobre el sistema.
- Permite obtener resultados de predicción y reacción rápida ante cambios inesperados en la operación o por daños repentinos en el sistema de acueducto.



- A partir de los registros históricos medidos en los diferentes puntos de macromedición del sistema de acueducto es posible mejorar y optimizar su operación.
- Con un sistema de comunicación y control automático y en tiempo real la macromedición permite actuar eficiente y rápidamente sobre el sistema de acueducto, como por ejemplo en cambios de manejo de condiciones particulares en el sistema de tratamiento del agua potable, en la apertura y cierre de válvulas temporales o permanentes, en los cambios de configuraciones (*setting*) de las válvulas reductoras, en el manejo temporal de almacenamiento y generación de alternativas de suministro o para determinar el grado de utilización o periodo de saturación de los elementos del sistema.
- Conocer el funcionamiento del sistema y garantizar que los caudales, presiones de servicio y parámetros de calidad de agua cumplan con los requerimientos y la normatividad vigente.
- Durante la operación y con las actividades de la macromedición, el operador del sistema podrá evaluar capacidades de conducciones, presiones de servicios mínimos y máximos, caudales mínimos nocturnos, pérdidas de carga, detención de fugas, generación de herramientas para el cálculo del índice de agua no contabilizada (IANC), calidad en el servicio de agua potable y medidas de consumo por unidad de distribución.
- Casos operativos especiales donde la macromedición en la red de distribución permite ajustar los procesos de producción de agua potable y realizar mantenimiento a los elementos hidráulicos del sistema de acueducto.
- Cuando una empresa prestadora de servicio de agua potable le vende agua a otro operador o empresa particular, la macromedición permite determinar los volúmenes vendidos.

1.4.1.3 Objetivos en el diagnóstico, diseño y optimización

- Incluir la macromedición en el diagnóstico, diseño y optimización de un sistema de acueducto urbano implica garantizar resultados acertados, que se logran con la implementación de un modelo hidráulico calibrado.
- Diagnosticar un sistema de acueducto existente para identificar, analizar y evaluar la capacidad de las redes, pérdidas de carga, coeficientes de rugosidad, medidas de consumo y detención de fugas, apoyado con un modelo hidráulico calibrado.
- Con los resultados del diagnóstico de un sistema de acueducto existente se procede a plantear alternativas para el diseño de obras que optimicen el servicio;



por ejemplo, se puede establecer la restructuración o creación de una sectorización, construcción e instalación de estaciones reductoras de presión, líneas de refuerzo, tanque de compensación, renovación de infraestructura existente, generación de empates evidentes, etc.

- La macromedición y la implementación de un modelo hidráulico calibrado permite definir actividades en la búsqueda de fugas y establecer proyectos para garantizar la reducción de pérdidas en el sistema de acueducto.

1.4.2 Estructuras de un esquema de macromedición en sistemas de acueductos urbanos. Flujogramas

Las actividades que conforman la macromedición, desde la concepción de un sistema de acueducto (diseño y construcción) hasta su operación, control y optimización, se presentan a continuación.

1.4.2.1 La macromedición en la concepción y diseño

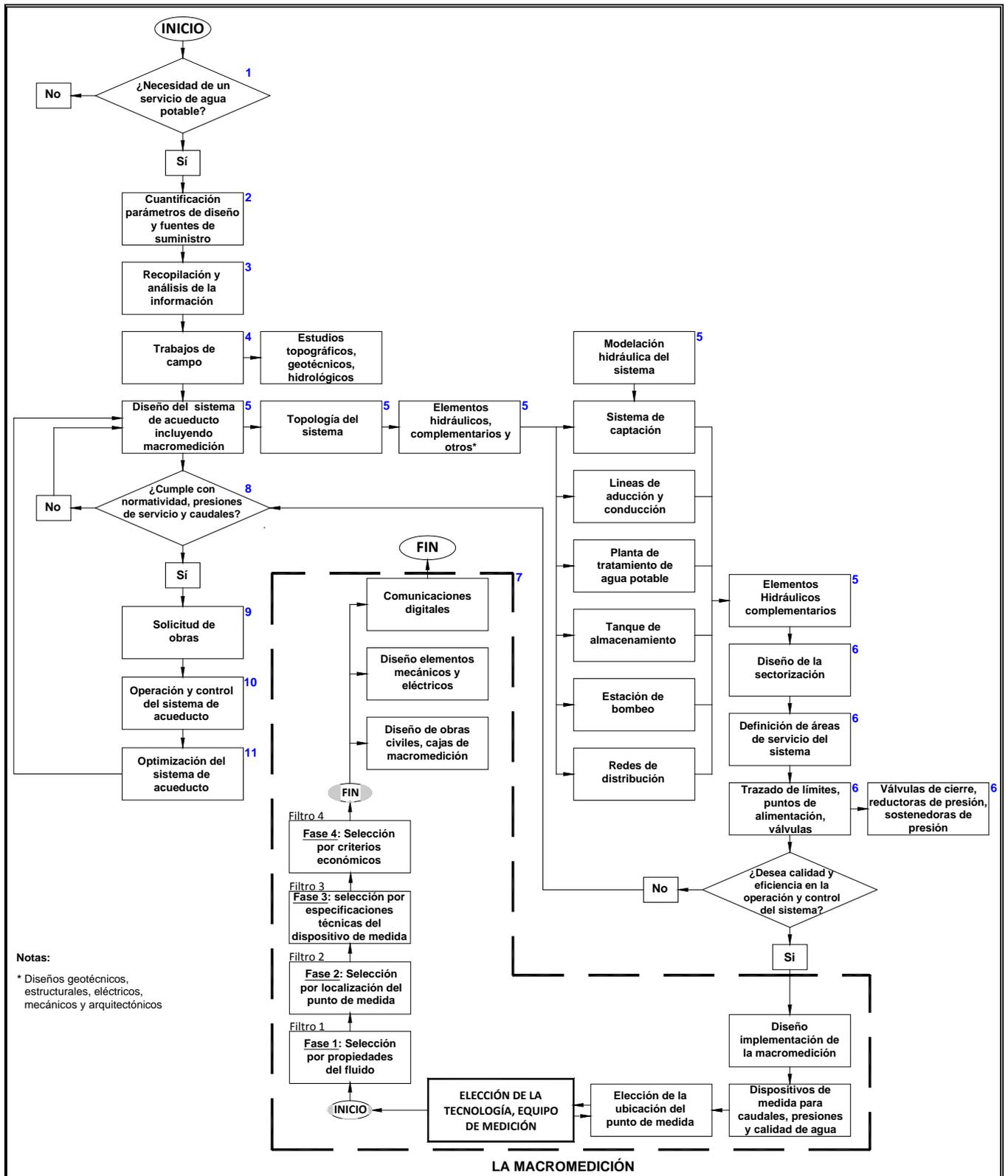
En el Flujograma 1 se relacionan las actividades pertenecientes a un diseño de un sistema de acueducto urbano, que involucra la secuencia y el orden lógico de sus actividades para la concepción de un diseño integral.

A continuación se hace una descripción del diagrama indicado en el Flujograma 1.

- Actividad 1. ¿Necesidad de un servicio de agua potable?. Esta actividad responde a la necesidad de diseñar y construir un sistema de acueducto urbano en beneficio de una población que quiere abastecerse de agua potable, para un desarrollo social y económico que mitigue impactos de morbilidad y mortalidad, producto de un servicio de agua potable que garantice calidad, continuidad y eficiencia.
- Actividad 2. Cuantificación de los parámetros de diseño y fuentes de suministro. Esta actividad corresponde a la identificación y cuantificación de los requisitos técnicos obligatorios para un diseño de un sistema de acueducto, tales como población, nivel de complejidad, dotaciones, estimación de pérdidas, cálculo de caudales de diseño, fuentes de suministro (superficiales o subterráneas), entre otros.



Flujograma 1. Concepción y diseño de un sistema de acueducto urbano



Fuente: autor.



- Actividad 3. Recopilación y análisis de la información. En esta actividad un consultor de ingeniería civil y especializado en el diseño de sistemas de acueductos realiza la recolección y análisis de la información. Mediante esta primera actividad recopila, analiza y depura información existente como climatología, geología y suelos, topografía, recursos hídricos, infraestructura existente, características socioeconómicas, comunicaciones, vías de acceso, disponibilidad de mano de obra, materiales y energía eléctrica.
- Actividad 4. Trabajos de campo. Esta actividad hace referencia a los trabajos de campo necesarios para la elaboración de los diseños hidráulicos, estructurales, geotécnicos, eléctricos, mecánicos y arquitectónicos que permiten un diseño integral de un sistema de acueducto, por lo cual el consultor especializado ejecuta estudios topográficos, geotécnicos e hidrológicos en el área de estudio.
- Actividades 5. Diseño del sistema de acueducto incluyendo macromedición. Estas actividades comprenden todos los trabajos de oficina que realiza el consultor especializado en la elaboración de los diseños de los elementos hidráulicos y complementarios apoyado con una modelación hidráulica del sistema.
- Actividades 6. Diseño de la sectorización. Estas actividades se derivan de la anterior, con la concepción de una sectorización en la identificación de áreas de servicio, límites, puntos de alimentación y necesidades en la constitución de otros elementos complementarios, tales como hidrantes, válvulas de cierre, reguladoras de presión y sostenedoras de presión, todo ello en cumplimiento de las normas técnicas aplicables y vigentes.
- Actividades 7. La macromedición. Diseño de un elemento complementario para el sistema de acueducto que es la macromedición (véase también Capítulo 4.1. DISEÑO), que ya dio inicio con la identificación de los puntos de alimentación (entradas y salidas) establecidas por el diseño de la sectorización (Actividades 6).

En esta actividad se elige una primera ubicación de los puntos de macromedición, que se pueden modificar con la siguiente etapa, correspondiente a la elección de la tecnología del equipo de medición (véase Capítulo 6. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS DE MACROMEDICIÓN). Una vez cumplido este proceso se continúa con el diseño de las obras civiles o cajas de macromedición, el diseño de los elementos mecánicos y eléctricos y el diseño del sistema de comunicación digital en la emisión y recepción de datos.

- Actividad 8. ¿Cumple con la normatividad, presiones de servicio y caudales?. Esta actividad responde a la evaluación que debe hacer el consultor especializado, quien valida los diseños ejecutados para el sistema de acueducto urbano y el cumplimiento de la normatividad aplicable. Si la respuesta es positiva se procede con la solicitud de obras o construcción del sistema. En caso de una



respuesta negativa se retoman de nuevo los diseños para los arreglos o ajustes pertinentes hasta cumplir con la normatividad vigente, las presiones de servicio y los caudales demandados.

- Actividad 9. Solicitud de obras. Corresponde a las actividades de construcción del sistema de acueducto urbano diseñado.
- Actividad 10. Operación y control del sistema de acueducto. Se refiere a las actividades de operación y control del sistema de acueducto urbano diseñado y construido.
- Actividad 11. Optimización del sistema de acueducto. Son todas aquellas actividades de rediseño y construcción que permiten mejorar el servicio en calidad, continuidad, eficiencia y expansión del sistema.

1.4.2.2 La macromedición en la construcción

En el Flujograma 2 se relaciona la secuencia y el orden lógico de construcción de un sistema de acueducto urbano.

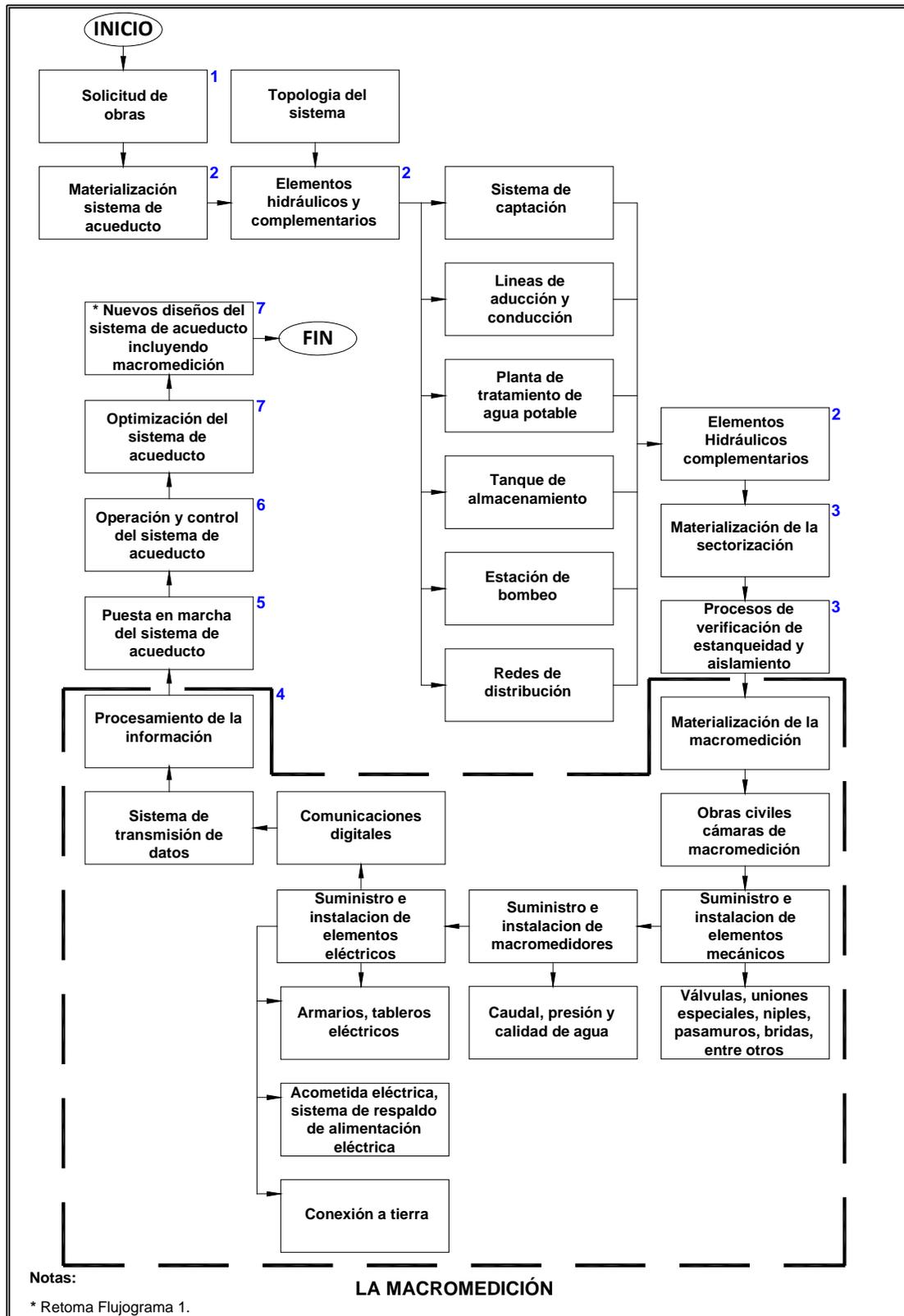
A continuación se hace una descripción del diagrama indicado en el Flujograma 2.

- Actividad 1. Solicitud de obras. Es el inicio que genera la construcción del sistema de acueducto urbano, con la disposición de recursos económicos y los diseños elaborados y aprobados por la entidad competente.
- Actividades 2. Materialización del sistema de acueducto. Estas actividades comprenden todos los trabajos de campo en la construcción de los elementos hidráulicos y complementarios.
- Actividades 3. Materialización de la sectorización. Estas actividades se derivan de la anterior, corresponden a la construcción de la sectorización con el suministro e instalación de válvulas de cierre, reguladoras de presión y/o sostenedoras de presión, hidrantes y puntos de alimentación (macromedición).

Para materializar la macromedición son necesarios los procesos de verificación de estanqueidad y aislamiento de las áreas de servicio (véase numeral 5.2 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN), luego se procede con la materialización de los puntos de macromedición en caudal, presión y calidad de agua (Actividad 4), garantizando así la calidad de la información emitida ante el conocimiento del área de servicio caracterizada y controlada.



Flujograma 2. Construcción de un sistema de acueducto urbano



Fuente: autor.



- Actividades 4. Materialización de la macromedición. Construidos los elementos hidráulicos y garantizada la materialización de la sectorización, de acuerdo con los diseños y las pruebas de verificación de estanqueidad y aislamiento de las áreas de servicio, se procede con la construcción de la macromedición, lo cual implica: construcción de una infraestructura para la instalación in situ de los equipos de medición y demás elementos mecánicos y eléctricos complementarios que incluye, además, la instalación del sistema de comunicación o control para la emisión y recepción de datos (véase Capítulo 4. IMPLEMENTACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN).

Materializada la macromedición en un sistema de acueducto urbano y constituyéndola como la culminación de las actividades en campo y de obra, se inician las actividades de puesta en marcha y operación.

- Actividad 5. Puesta en marcha del sistema de acueducto. Corresponde a los procedimientos y medidas pertinentes a la puesta en marcha, operación, control y mantenimiento de los elementos hidráulicos y complementarios de un sistema de acueducto urbano, los cuales deben seguir los requerimientos establecidos para cada componente en particular (véase Capítulo 5. METODOLOGÍA PARA EL MANTENIMIENTO Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN).
- Actividad 6. Operación y control del sistema de acueducto. Corresponde a las actividades de operación y control del sistema de acueducto urbano diseñado y construido.
- Actividad 7. Optimización del sistema de acueducto. Corresponde a todas aquellas actividades en rediseño y construcción que permiten mejorar el servicio en calidad, continuidad, eficiencia y expansión del sistema.

1.4.2.3 La macromedición en la operación y control

Incluyendo el Flujograma 3 con la operación y control de un sistema de acueducto urbano que involucra actividades de optimización, se cierra el ciclo de las actividades que conforman la macromedición.

A continuación se hace una descripción del diagrama indicado en el Flujograma 3.

- Actividad 1. Operación y control del sistema de acueducto. Corresponde a las actividades de operación y control del sistema de acueducto urbano diseñado y construido.
- Actividad 2. Sistema de control (véase Capítulo 7. METODOLOGÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE DATOS). Para brindar calidad y eficiencia del servicio de acueducto en una ciudad, la operación y el control

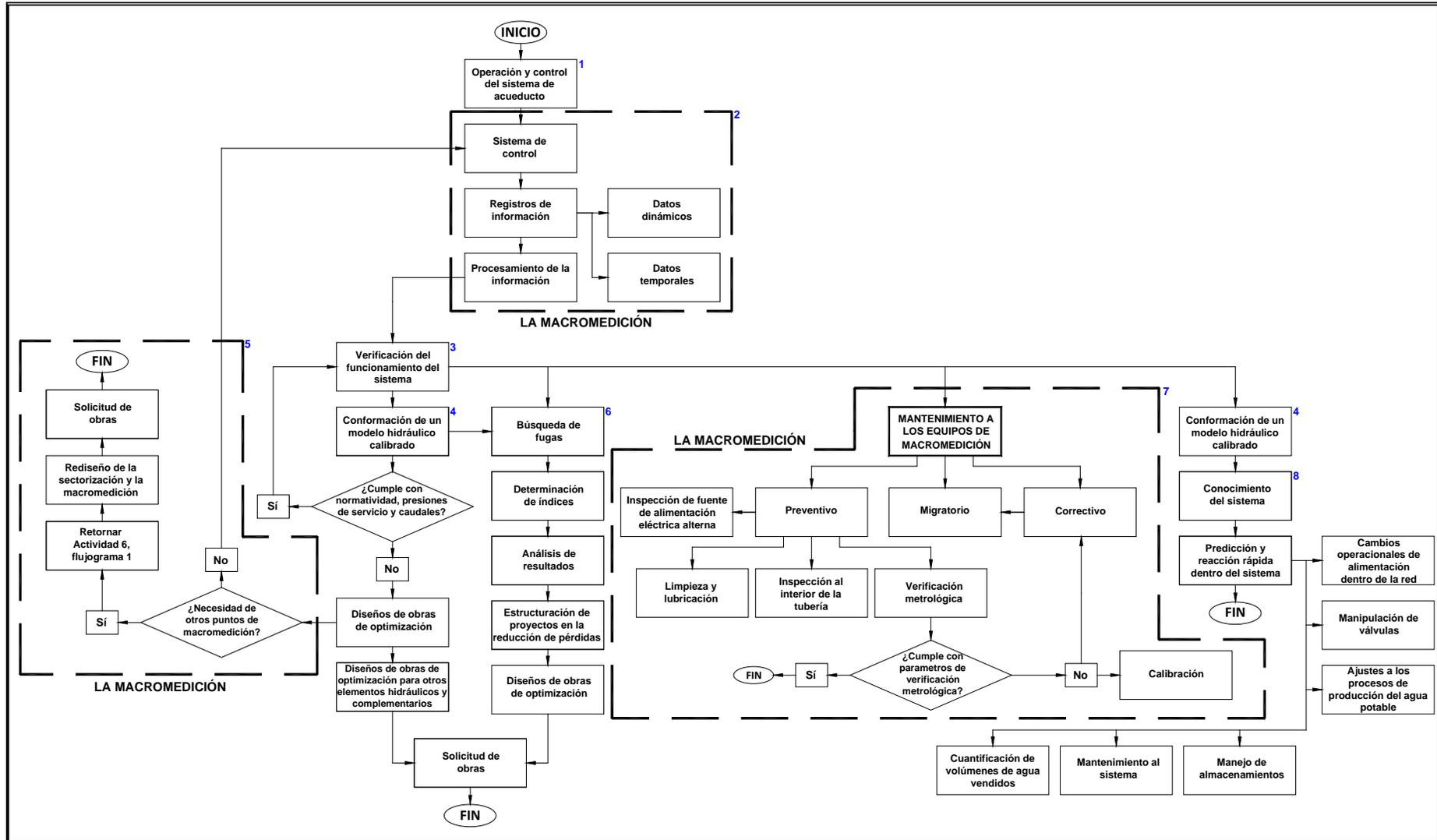


deben estar apoyados con un sistema o procedimiento capaz de registrar la información macromedida, para que con los datos temporales o permanentes registrados en caudales, presiones y parámetros de calidad de agua, se procese y analice la información recolectada, y apoyados con la memoria de la macromedición del sistema o los registros históricos se puedan generar herramientas útiles para verificar el cumplimiento de las normas y los estándares de calidad del sistema de acueducto, en la predicción y reacción rápida durante la operación y control del servicio, con el conocimiento real y al día de lo que sucede en el sistema.

- Actividad 3. Verificación del funcionamiento del sistema. Es la actividad que se deriva del proceso de medición, recolección y análisis de la información macromedida, generando herramientas de utilidad para la operación y control del sistema.
- Actividad 4. Conformación de un modelo hidráulico calibrado. Con la macromedición se obtienen curvas de consumo, de presión y de calidad de agua, información útil en la implementación de un modelo hidráulico calibrado capaz de representar las condiciones físicas y reales del sistema en un tiempo dinámico, que ayude a la verificación del funcionamiento del sistema.
- Actividad 5. Necesidad de otro punto de macromedición. Esta actividad corresponde a la evaluación que debe hacer un consultor especializado ante la necesidad de replantear la sectorización, en función de garantizar una optimización en el servicio que podrá contemplar el rediseño de este y la macromedición.
- Actividad 6. Búsqueda de fugas. Durante la operación y control de un sistema y con la macromedición y un modelo hidráulico calibrado es posible generar herramientas en la búsqueda de fugas, apoyado en los resultados del índice de agua no contabilizada (IANC), que concluirá con la estructuración de proyectos en la reducción de pérdidas.
- Actividad 7. Mantenimiento a los equipos de macromedición. Esta actividad contiene el proceso que debe realizar cualquier operador con un sistema de macromedición (véase Capítulo 5. METODOLOGÍA PARA EL MANTENIMIENTO Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN).
- Actividad 8. Conocimiento del sistema. Esta actividad representa los conocimientos y respuestas que puede realizar cualquier operador de un sistema de acueducto con la implementación de la macromedición y un modelo hidráulico calibrado, el conocimiento del sistema y su actuación sobre él para la predicción y reacción rápida ante cambios inesperados en la operación o por daños repentinos durante el servicio.



Flujograma 3. Operación y control de un sistema de acueducto urbano



Fuente: autor.



2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LA MEDICIÓN DE CAUDAL Y PRESIÓN EN TUBERÍAS CERRADAS Y A PRESIÓN

En los siguientes capítulos se introducen algunos conceptos básicos relacionados con la medición de caudales y presiones de fluidos en tuberías cerradas y a presión, incluyendo algunos conceptos físicos básicos asociados con el tema.

2.1 ECUACIONES DIFERENCIALES BÁSICAS³

Este capítulo desarrolla una serie de ecuaciones diferenciales parciales no lineales para cada una de las leyes de la mecánica, donde el volumen de control y las ecuaciones de conservación correspondientes se encogen a un punto en sentido límite del cálculo y resultan ecuaciones punto a punto.

2.1.1 Ecuación general de transporte de Reynolds

Para establecer la relación entre las ecuaciones que se aplican a un sistema y las que se aplican a un volumen de control (leyes de movimiento de Newton, ley de conservación de la masa, la primera y segunda ley de la termodinámica, ley de viscosidad de Newton) considérese algunas situaciones generales de flujo, en las cuales la velocidad de un fluido está dada con respecto a un sistema coordinado xy (véase Figura 6).

En el tiempo t considérese una cierta masa de flujo contenida dentro de un sistema, el cual tiene las fronteras de líneas continuas. También considérese un volumen de control fijo con relación a los ejes xyz , que coinciden exactamente con el sistema en el tiempo t . En el $t + \Delta t$ el sistema se ha movido un poco, debido a que cada partícula de masa se mueve a una velocidad asociada con su posición.

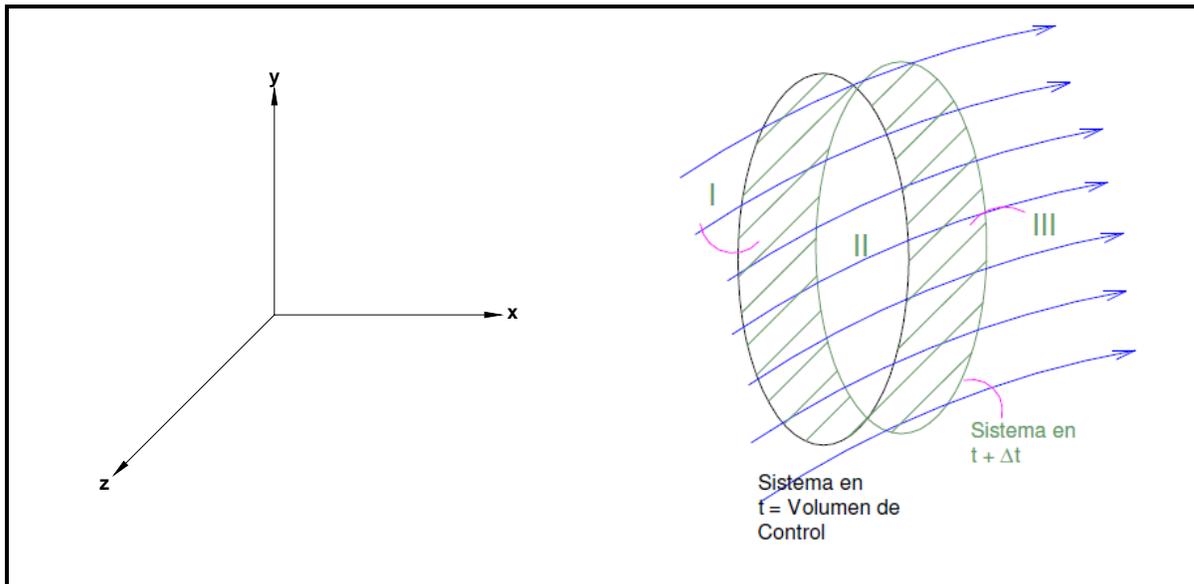
Sea N la cantidad total de alguna propiedad (por ejemplo, masa, energía o momentum) dentro del sistema en el tiempo t y sea η la cantidad de esa propiedad, por unidad de masa, a través del fluido. La tasa temporal de incremento de N para el sistema se formula ahora en términos del volumen de control.

En $t + \Delta t$ el sistema corresponde a los volúmenes II y III, mientras que en el tiempo t éste ocupa el volumen I. El incremento en la propiedad N para el sistema en el tiempo Δt está dada por:

³ Texto tomado de la referencia - Streeter, V. L. (1988). *Mecánica de fluidos*. México: Editorial McGraw-Hill.

$$N_{sis_{t+\Delta t}} = N_{sis_t} = \left(\int_{II} \eta \rho dV + \int_{III} \eta \rho dV \right)_{t+\Delta t} - \left(\int_{II} \eta \rho dV \right)_t$$

Figura 6. Velocidad de un fluido respecto a un sistema de coordenadas xy



Fuente: Santos, 2011.

Realizando las operaciones pertinentes, reuniendo y reorganizando los términos de la ecuación anterior se llega a la siguiente ecuación de volumen de control de Reynolds:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \eta \rho dV + \int_{sc} \eta \rho v \cdot dA$$

En otras palabras, la ecuación anterior establece que la tasa temporal de incremento de N dentro de un sistema es exactamente igual a la tasa temporal de incremento de la propiedad N dentro del volumen de control (fijo con respecto a xyz), más la tasa neta de flujo de N a través de la frontera del volumen de control.

Derivando las ecuaciones diferenciales generales validadas en un punto de la ecuación de volumen de control de Reynolds se obtiene la siguiente ecuación diferencial básica, correspondiente al teorema de transporte diferencial de Reynolds:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \eta) + \nabla \cdot (\eta \rho v)$$



2.1.2 Ecuación de continuidad

La ecuación de cantidad de movimiento o de conservación de la masa es fundamental, ya que debe mantenerse en cualquier campo de fluido sin importar el tipo de suposiciones simplificadoras que se hayan hecho.

Esta ecuación establece que la tasa temporal de cambio de la masa en el volumen de control, más la tasa neta a la cual la masa sale del volumen de control a través de sus superficie es igual a cero; por consiguiente, $dN/dt = 0$, y η , la masa por unidad de masa, es igual a 1. De esta forma, la ecuación general de transporte de Reynolds se convierte en la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

2.1.3 Ecuación de momentum

2.1.3.1 Ecuación vectorial básica

El balance fuerza momento da como resultado una ecuación diferencial vectorial que consta de tres ecuaciones diferenciales parciales no lineales. Como referencia de la ecuación de transporte diferencial de Reynolds, ahora η es el momentum por unidad de masa $mv/m = v$, mientras que dN/dt es igual al vector de fuerza por unidad de volumen f . Entonces la ecuación resultante es:

$$f = \frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v)$$

El producto $\rho v v$ se conoce como el producto diádico, el cual se puede simplificar con rapidez utilizando la regla de la cadena de diferenciación, resultando la siguiente expresión:

$$f = v \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) \right] + \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right]$$

El primer término es la ecuación de continuidad que debe ser igual a cero y el segundo término, entre corchetes, es el vector aceleración de la ecuación; por consiguiente, se reconoce que la ecuación anterior es la forma euleriana de la segunda ley de Newton, expresada por una base por unidad de volumen. Las tres ecuaciones diferenciales de forma componente de la ecuación vectorial quedaría así:

$$f_x = \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right]$$



$$f_y = \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right]$$

$$f_z = \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right]$$

2.1.3.2 Descripción de la fuerza

El vector fuerza se divide en una fuerza superficial y una fuerza de cuerpo por unidad de volumen, donde el vector fuerza de cuerpo es sólo el resultado de la gravedad y la fuerza de superficie se produce por el contacto directo de partículas del fluido.

Una forma de expresar la fuerza de gravedad en notación vectorial es la siguiente:

$$f_g = \rho g (\cos \alpha_x i + \cos \alpha_y j + \cos \alpha_z k)$$

$$f_g = -\rho g \nabla h$$

Combinando las tres ecuaciones vectoriales básicas con la ecuación vectorial de la fuerza de gravedad, se reescribe en forma vectorial como:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = -\rho g \nabla h - \nabla p + \nabla \cdot \tau^*$$

La notación τ^* corresponde al tensor esfuerzo de las siguientes ecuaciones, que son el resultado de sustraer el término de esfuerzo volumétrico de cada uno de los tres términos de esfuerzos normales, empleando la relación entre el esfuerzo volumétrico y la presión.

$$f_{sx} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right]$$

$$f_{sy} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right]$$

$$f_{sz} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

2.1.3.3 Ecuación de Navier - Stokes

Navier y Stokes terminaron la deducción relacionando el campo de esfuerzos con la deformación del campo resultante del campo de velocidad variable en el espacio y el tiempo. Aquí se invoca la ley de viscosidad de Stokes, una generalización de la ley



de viscosidad de Newton. Si se supone que el flujo es incompresible, entonces se pueden mantener las siguientes ecuaciones:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial z}$$

y

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = 2\mu \varepsilon_z = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = 2\mu \varepsilon_y = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = 2\mu \varepsilon_x = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, μ el factor de proporcionalidad conocida como la viscosidad del fluido, ε la tasa de deformación y los diferenciales expresan el cambio de velocidad dividido por la distancia en que éste ocurre.

Por consiguiente, el núcleo de la relación de esfuerzo cortante es la dependencia lineal del esfuerzo cortante con respecto a la tasa de deformación, donde el coeficiente de proporcionalidad es el coeficiente de viscosidad de Newton.

Ensamblando las ecuaciones:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial y} + (v \cdot \nabla)v \right) = -\rho g \nabla h - \nabla p + \nabla \cdot \tau^*$$

y

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial z}$$



y

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = 2\mu\varepsilon_z = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = 2\mu\varepsilon_y = \mu\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = 2\mu\varepsilon_x = \mu\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$$

Se obtiene la ecuación de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right) = -\rho g \nabla h - \nabla p + \mu \nabla^2 v$$

O en forma de componentes:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\rho g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\rho g \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\rho g \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

2.1.4 Conservación de la energía mecánica y la ecuación de Bernoulli

2.1.4.1 Ecuación de Euler a lo largo de una línea de corriente

Uno de los primeros enfoques para resolver la ecuación de Navier-Stokes es simplemente argumentar que los términos de fricción son bastante pequeños con respecto a los demás y, por consiguiente, eliminarlos. Esta suposición da como resultado la ecuación de Euler del movimiento para un campo de flujo no viscoso. La ecuación de Navier-Stokes se convierte en la siguiente expresión, siguiendo los argumentos mencionados:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right) = -\rho g \nabla h - \nabla p$$



Considerando ahora el movimiento a lo largo de una línea de corriente se puede desarrollar la ecuación de Euler para una línea de corriente. Definiendo un volumen de control prismático de tamaño muy pequeño, teniendo en cuenta la definición de la línea de corriente donde la única velocidad permitida se encuentra a lo largo de la línea de corriente, suponiendo viscosidad igual a cero, o que el flujo no tiene fricción, y que las únicas fuerzas que actúan sobre el volumen de control son las fuerzas en los extremos y el peso, y aplicando estos criterios en la ecuación de momentum al volumen de control, y considerando que el flujo es permanente, se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{dp}{\rho} + g dz + v dv = 0$$

Esta ecuación es una forma de la ecuación de Euler, la cual requiere tres suposiciones: 1) flujo sin fricción, 2) movimiento a lo largo de una línea de corriente y 3) flujo permanente. Cuando se integra si p es una función de z o si es constante, se obtiene la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{p}{\rho} + gz + \frac{v^2}{2} = \text{constante}$$

Es importante resaltar que la constante de integración (conocida como la constante de Bernoulli) generalmente varía de una línea de corriente a otra, pero permanece constante a lo largo de una línea de corriente en flujo permanente, sin fricción e incompresible.

Cada uno de los términos de la ecuación de Bernoulli puede interpretarse como una forma de energía disponible. Esta ecuación también se conoce como la ecuación de conservación de energía mecánica.

2.2 ECUACIÓN DE ENERGÍA⁴

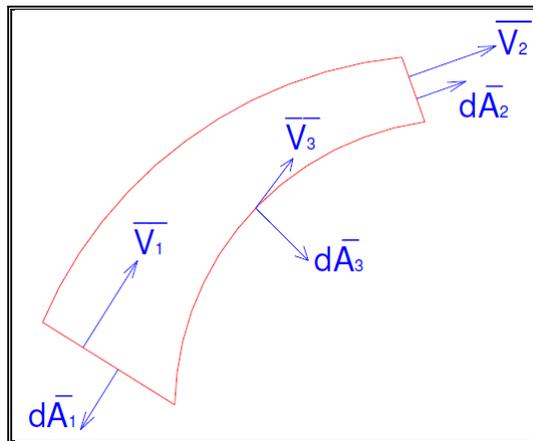
La ecuación de conservación de energía debe tener en cuenta las fuentes, los intercambios y las disipaciones de energía en todas sus formas. En contraste con la ecuación de Bernoulli, se eliminan la aproximación de flujo no viscoso y la suposición de movimiento a lo largo de una línea de corriente, y se deduce una ecuación generalizada de energía entre dos puntos.

⁴ Texto tomado de la referencia - Streeter, V. L. (1988). *Mecánica de fluidos*. México: Editorial McGraw-Hill.

2.2.1 La ecuación de energía entre dos puntos

Considerando una muestra de tubo de corriente en el campo de flujo con dos secciones transversales diferenciales pequeñas a la entrada y la salida, y una longitud del tubo de corriente δs , y suponiendo únicamente el flujo permanente, se aplica la ecuación de energía de estado permanente a este volumen de control elemental (Figura 7).

Figura 7. Volumen de control elemental



Fuente: Santos, 2011.

$$\frac{\delta Q_H}{\delta t} + \left(\frac{P_1}{\rho_1} + gz_1 + \frac{v_1^2}{2} + u^{**}_1 \right) \rho_1 v_1 \delta A_1 = \frac{\delta W_s}{\delta t} + \left(\frac{P_2}{\rho_2} + gz_2 + \frac{v_2^2}{2} + u^{**}_2 \right) \rho_2 v_2 \delta A_2$$

Reordenando la ecuación y realizando las reducciones pertinentes, la ecuación anterior toma una forma de la Primera Ley de la Termodinámica:

$$\frac{dp}{\rho} + g dz + v dv + du^{**} + pd \left(\frac{1}{\rho} \right) - dq_H = 0$$

Utilizando la Segunda Ley de la Termodinámica y la desigualdad de Clausius se llega a:

$$dw_s + \frac{dp}{\rho} + v dv + g dz + d(\text{pérdidas}) = 0$$

Esta es la forma más importante de la ecuación de energía. En general, las pérdidas deben determinarse mediante experimentación. Esto implica que parte de la energía disponible se convierte en energía intrínseca durante un proceso irreversible. Las pérdidas ocurren cuando parte de la energía disponible en el flujo de un fluido se convierte en energía térmica a través de esfuerzos cortantes viscosos o turbulentos.



Esta ecuación, en ausencia del trabajo en el eje, sólo difiere de la ecuación de Euler en el término de pérdidas.

En el desarrollo del ejemplo dentro del tubo de corriente, donde se hace trabajo sobre el fluido mediante una bomba, entonces w_s es negativo. La estación 1 se encuentra aguas arriba y la estación 2 aguas abajo. Si el flujo es incompresible, $\rho_1 = \rho_2$, la ecuación de energía se convierte en:

$$\frac{v_1^2}{2} + gz_1 + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + \frac{P_2}{\rho} + W_s + Pérdidas_{1-2}$$

O dividiendo por la gravedad, g:

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + H_s + h_{1-2}$$

Donde H_s es la cabeza de trabajo del eje y h_{1-2} el término de pérdidas en unidades de cabeza o cabeza pérdida.

2.3 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS⁵

Aquí se describen las propiedades de los fluidos que afectan en cierto grado los equipos de medición de caudal, que pueden inducir a cambios en la naturaleza del propio fluido, como en el interior del equipo de medición, o provocando efectos físicos al interior de la tubería.

2.3.1 Definición de un fluido

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante, sin importar qué tan pequeño sea ese esfuerzo.

Los materiales diferentes a los fluidos no pueden satisfacer la definición de un fluido. Una sustancia plástica se deforma cierta cantidad proporcional a la fuerza, pero no cuando el esfuerzo aplicado se encuentra por debajo de su esfuerzo cortante de fluencia. Por consiguiente, los plásticos y los sólidos se excluyen de la clasificación de fluidos.

⁵ Texto tomado de la referencia - Streeter, V. L. (1988). *Mecánica de fluidos*. México: Editorial McGraw-Hill.



2.3.1 Fluidos newtonianos y no newtonianos

Los fluidos newtonianos son aquellos grupos donde existe una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante (τ) aplicado y la tasa de deformación resultante (gradiente hidráulico (dv/dx)).

Los fluidos no newtonianos, también conocidos como plásticos, pseudoplásticos o fluidos delatantes, son aquellos que exhiben factores de corte que cambian con la temperatura y donde existe una relación no lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante (τ) aplicado y la tasa de deformación angular. Entre ellos encontramos algunos lodos, fluidos de arena, arcillas movedizas y la mayoría de pinturas.

Existe otro tipo de fluidos denominados tixotrópicos, en los que la viscosidad cambia a la vez con el tiempo y con el gradiente de velocidad. Un ejemplo de éstos son algunos tipos de pinturas modernas que contienen pigmentos plásticos.

Para el campo de aplicación de la macromedición de caudales con equipos mecánicos, éstos sólo se han diseñado para medir fluidos newtonianos cuando se utilizan para medir fluidos no newtonianos experimentan efectos de no linealidad y sus resultados se consideran poco fiables.

2.3.2 Viscosidad

Es la propiedad que tienen los fluidos de ofrecer resistencia ante influencias externas que intentan cambiar su forma o cuando se encuentran en movimiento. La viscosidad también es uno de los medios por los cuales se genera pérdida de energía, lo cual para un fluido de alta viscosidad es la respuesta de alta resistencia a cambiar de forma, por lo que las pérdidas de energía para este fluido son notables.

La viscosidad es la propiedad de los fluidos que causan esfuerzos cortantes cuando se encuentran en movimiento. Esta definición se resume con la siguiente expresión:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dx}$$

Donde: τ = esfuerzo cortante
 μ = coeficiente de viscosidad (viscosidad absoluta)
 $\frac{dv}{dx}$ = gradiente de esfuerzos cortantes

La ecuación anterior y sus relaciones son importantes porque determinan el perfil de velocidad, la viscosidad, la velocidad local del fluido y la posición de la tubería, sin olvidar la rugosidad de la tubería.

Otro término comúnmente empleado es la viscosidad cinemática, que no es más que la viscosidad absoluta (μ) sobre la densidad del fluido (ρ).



Una propiedad característica de la viscosidad cinemática en los líquidos es que disminuye con la temperatura, mientras que en el caso de los gases aumenta.

2.3.3 Densidad

La densidad de un fluido se define como su masa por unidad de volumen.

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

Donde: ρ = densidad
 Δm = la masa de un fluido contenido en un volumen pequeño Δm
 ΔV = volumen

La densidad tiene una relación estrecha con la temperatura y la concentración. Si añadimos calor a un volumen dado, la mayoría de los fluidos disminuyen su densidad, mientras que si añadimos sal al agua fresca, es decir, masa, se incrementa la densidad.

En el caso de las mediciones de caudal en los sistemas de acueductos urbanos la densidad se mantiene virtualmente constante, pero en los casos en que se produzcan grandes variaciones en la densidad del fluido es necesario algún tipo de ajuste.

2.3.4 Temperatura

El contenido de calor en un volumen, ΔV , de un fluido es igual a:

$$Q_H = \rho c_p T \Delta V$$

Donde: c_p = calor específico a presión constante
T = temperatura absoluta

El calor específico es importante para los contadores de caudal másico térmico en el cálculo del flujo calorífico de un gas, ya que algunos gases presentan un comportamiento no lineal con los cambios de temperatura, mientras que los líquidos al ser esencialmente incompresibles sólo tienen una capacidad calorífica.

La temperatura puede influir en el cambio de la densidad del fluido, en las propiedades mecánicas de un equipo de medición afectando componentes de los soportes y del equipo, en la rigidez de la tubería y en los mismos resultados de medición al provocar caudales bifásicos en la relación líquido/gas.



2.3.5 Presión

La presión en un punto la causa una fuerza normal que empuja contra un plano definido en el flujo o contra una superficie plana que está en contacto con el fluido. La presión en un punto es la relación entre la fuerza normal y el área del plano a medida que dicha área se aproxima a un valor muy pequeño que incluya el punto.

Normalmente los líquidos no pueden soportar esfuerzos de tensión porque se evaporizan, mientras que sí pueden soportar presiones considerables o una fuerza de compresión con un pequeño o ningún cambio observable en la densidad.

La presión, al igual que la temperatura, puede influir en las propiedades mecánicas de un equipo de medición afectando componentes de los soportes y del equipo, y la rigidez de la tubería.

2.3.6 Corrosión y abrasión

La corrosión es la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades físicas y químicas. La característica fundamental de este fenómeno es que sólo ocurre en presencia de un electrolito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas anódicas y catódicas. Una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a otras regiones catódicas. En la región anódica se produce la disolución del metal (corrosión) y, consecuentemente, en la región catódica la inmunidad del metal (Sidney, 2013)⁶.

La abrasión es la acción mecánica de rozamiento y desgaste que provoca la erosión de un material o tejido (wikipedia, 2013)⁷.

Como efectos derivados del transporte de agua dentro de una tubería, la corrosión y la abrasión pueden influir en el funcionamiento y en los resultados de un equipo de medición, estropeando los elementos mecánicos o en el desgaste de éstos.

2.4 EL FLUJO Y SU CLASIFICACIÓN⁸

Existen diferentes clases de fluidos, como se describe a continuación.

⁶ Texto tomado de la referencia - Sidney H. A. (2013, 10 de febrero). *Corrosión e integridad*. Recuperado de <http://www.monografias.com/trabajos3/corrosion/corrosion.shtml>.

⁷ Texto tomado de la referencia - Wikipedia (2013, 10 de febrero). *Abrasión*. Recuperado de es.wikipedia.org/wiki/Abrasi3n.

⁸ Texto tomado de la referencia - Streeter, V. L. (1988). *Mecánica de fluidos*. México: Editorial McGraw-Hill.



2.4.1 Flujo laminar y turbulento

Antes de definir el flujo laminar y turbulento se debe conocer el concepto y término del número de Reynolds.

2.4.1.1 Número de Reynolds

El número de Reynolds resulta de la relación entre las fuerzas de origen inercial respecto a las fuerzas de origen viscoso (esfuerzo cortante).

El número de Reynolds se define con la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot D}{\mu \cdot V} = \frac{V \cdot D}{\sigma}$$

Donde: ρ = densidad del fluido
 V = velocidad del fluido
 D = diámetro de la tubería (longitud característica)
 μ = coeficiente de viscosidad (viscosidad absoluta)
 σ = viscosidad cinemática (μ/ρ)

Con el cálculo del número de Reynolds se puede señalar la naturaleza del flujo laminar o turbulento y se pueden considerar los siguientes criterios:

- Los números de Reynolds altos o fuerzas inerciales intensas denotan corrientes libres. Los números bajos corresponden a corrientes altamente viscosas o resistivas al movimiento.
- Dos flujos se consideran similares si su contorno geométrico es parecido y si los números de Reynolds coinciden.
- Un fluido con un número de Reynolds por debajo de los 2.000 se conoce como laminar. Por encima de los 4.000 se considera un flujo turbulento. Entre los 2.000 y 4.000 el fluido está en transición de laminar a turbulento.
- En la mayoría de las condiciones reales el flujo será turbulento y la influencia más importante será la rugosidad de la tubería.

2.4.1.2 Flujo laminar

En un flujo laminar las partículas fluidas se mueven a lo largo de trayectorias suaves en láminas o capas, que se deslizan levemente sin formar creces entre una y otra. La tendencia para movimientos laterales o giros son fuertemente atenuadas por la viscosidad. El flujo laminar está gobernado por la ley de la viscosidad de Newton, la cual relaciona el esfuerzo cortante con la tasa de deformación angular. El flujo



laminar no es estable en situaciones que involucran combinaciones de baja viscosidad, alta velocidad o grandes caudales, y se rompe en flujo turbulento.

Para una condición laminar el tránsito de un flujo en una tubería es suave y estable, con velocidades en las paredes igual a cero por el rozamiento y en el centro es donde la fuerza de retardo alcanza el valor mínimo.

2.4.1.3 Flujo turbulento

En un flujo turbulento las partículas fluidas se mueven en trayectorias arremolinadas muy irregulares. Este efecto se produce por un aumento de velocidad o porque la viscosidad disminuye.

En las paredes de una tubería y en sus inmediaciones las velocidades cambian rápidamente con la posición, esto se conoce como capa límite. Con el aumento de la velocidad esta capa se reduce y el perfil de velocidad se amplía. Esta condición es altamente beneficiosa para la macromedición de caudales por lo que los efectos del perfil de velocidad disminuyen.

Los efectos de la capa límite en la medición de caudales es imposible de menospreciar, ya que muchas tecnologías ubican sus sensores en las paredes de la tubería o cerca de esta capa, donde las velocidades cambian rápidamente.

2.4.1 Fluido ideal

Un fluido ideal no tiene fricción y es incompresible. La suposición de un fluido ideal es útil al analizar flujos en situaciones que involucran grandes cantidades, como los océanos. Un flujo sin fricción es no viscoso y sus procesos son reversibles y libres de pérdidas.

La capa de flujo en la vecindad inmediata a una frontera real del flujo, que tiene su velocidad relativa a la frontera afectada por esfuerzos cortantes viscosos, se conoce como la capa límite, que puede ser laminar o turbulenta, dependiendo de su longitud, viscosidad, velocidad del flujo cerca de ella y de la rugosidad de la frontera.

2.4.2 Flujo rotacional e irrotacional

La rotación de una partícula de flujo alrededor de un eje dado, por ejemplo el eje z , se define como la velocidad angular promedio de dos elementos lineales infinitesimales en la partícula, que originalmente se encuentran haciendo ángulo recto uno con respecto al otro y en relación con el eje dado. Si dentro de una región las partículas de flujo tienen rotación alrededor de cualquier eje, el flujo se conoce como rotacional o vórtice. Si dentro de una región el flujo no tiene rotación, se conoce como irrotacional. Si un flujo se encuentra en reposo y no tiene fricción,



cualquier movimiento subsecuente de este fluido también es irrotacional. Sin embargo, en la mayoría de las circunstancias prácticas, los esfuerzos cortantes introducidos por la presencia de fronteras sólidas, de gradientes de densidad u otras interacciones entre procesos fluidos dan como resultado una rotación.

2.4.3 Flujo permanente y no permanente

Como la gran mayoría de los problemas de flujo son tridimensionales y altamente variables en el tiempo, usualmente no es posible obtener soluciones generales. Han surgido diversas clasificaciones espaciales y temporales que describen procedimientos para llevar a cabo análisis simplificados. La definición de dichas simplificaciones se presenta a continuación.

Existen dos clasificaciones temporales: flujo permanente y no permanente. El flujo permanente ocurre cuando las condiciones en cualquier punto del fluido no cambian con el tiempo; además no existe cambio en la densidad, la presión, la temperatura o la concentración en ningún punto.

Debido al movimiento errático de las partículas del fluido en un flujo turbulento, siempre existen fluctuaciones en cualquier punto. La definición de flujo permanente debe generalizarse, de alguna forma, para tener en cuenta esas fluctuaciones.

El flujo es no permanente cuando en cualquier punto las condiciones cambian con el tiempo.

2.4.4 Flujo uniforme y no uniforme

Un flujo uniforme ocurre cuando, en cualquier punto, el vector velocidad u otra variable del flujo es siempre la misma (en magnitud y dirección), para cualquier instante.

El flujo en el que el vector velocidad u otra variable varía de un lado a otro, en cualquier instante, es un flujo no uniforme. Un líquido que se bombea por un tubo recto largo tiene flujo uniforme. Un líquido que fluye a través de una sección reducida o de un tubo curvo es un flujo no uniforme.

2.4.1 Fluidos bifásicos

Son aquellos flujos que están constituidos por dos fases, líquidos y gases, o líquidos que fluyen conjuntamente.

Se habla de caudal de dos componentes cuando los líquidos que fluyen conjuntamente no suelen mezclarse, como el agua y el aceite, que permanecen separados y circulan en la práctica como fluidos independientes.

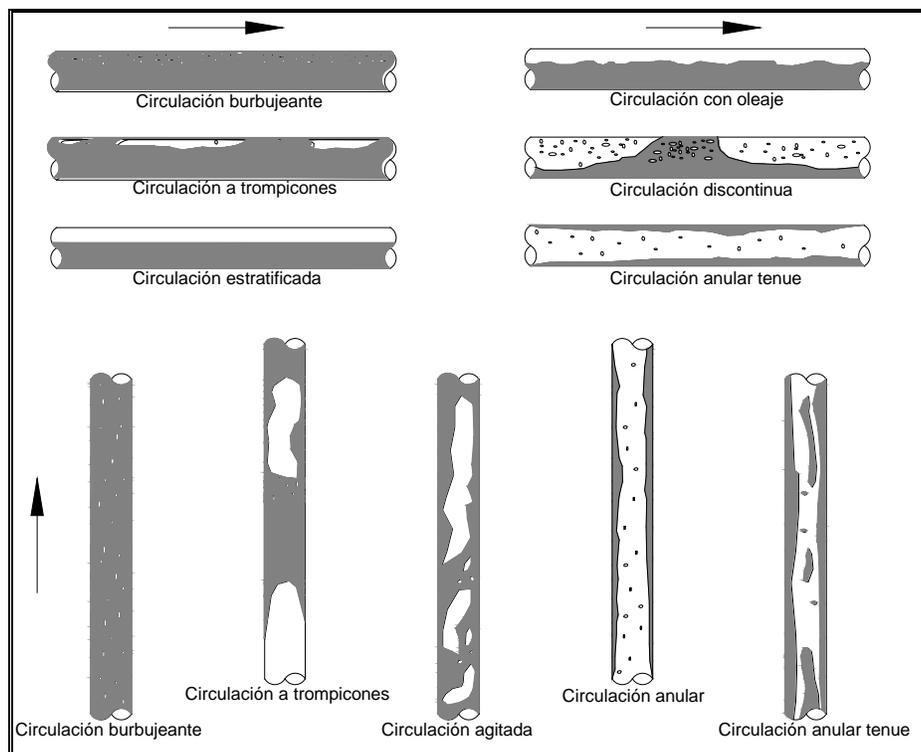
Los líquidos que fluyen conjuntamente y se mezclan, se conocen como miscibles y su medición no tiene ningún problema, mientras que en los fluidos no miscibles los resultados pueden ser erróneos por la presencia de regímenes de flujos distintos en un mismo espacio y tiempo. En los casos donde un líquido fluye con una gran cantidad de gas en disolución y experimenta un descenso brusco de presión; por ejemplo, al pasar por un cambio súbito en la sección transversal de una tubería o a través de un orificio, puede darse una situación de acumulación de gases, generando la aparición repentina de un fenómeno llamado cavitación.

Los regímenes de flujo de un caudal de dos componentes dependen de varios factores, entre los cuales se pueden mencionar la orientación de la tubería, la velocidad del caudal y el porcentaje del segundo componente gaseoso o líquido que contenga.

En la Figura 8 se muestran los regímenes para caudales bifásicos en tuberías horizontales y verticales cuando su contenido de gas aumenta.

Altendorf, Matthias & otros (2005) afirma que es importante resaltar que los equipos de medición de caudal pueden arrojar resultados erróneos hasta de un 50% respecto al valor real cuando se mide un fluido no miscible, y su mejor precisión se da cuando los fluidos son miscibles.

Figura 8. Caudales bifásicos en tuberías vs. contenido de gas



Fuente: Altendorf, Matthias & otros, 2005.



3. TECNOLOGÍAS EN EQUIPOS DE MEDICIÓN EN TUBERÍAS CERRADAS Y A PRESIÓN

3.1 APARATOS O DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL

Un equipo de medición de caudal es un contador que determina la cantidad de agua en peso o volumen y por unidad de tiempo que pasa por una sección transversal dada. También son equipos que miden la magnitud de la velocidad con datos que se integran en un plano, tal como la sección transversal de una tubería que transporta agua, con el fin de determinar el flujo por una sección determinada.

Existen muchos documentos, manuales, normas y códigos que involucran la medición de caudales, los cuales describen procedimientos, aplicaciones, guías o directivas para la instalación, mantenimiento, funcionamiento, calibración y selección del caudalímetro.

Las principales organizaciones internacionales involucradas en la generación de normas estándares para la medición de caudales de líquidos y conducciones cerradas y a presión son las siguientes:

- ISO: International Standards Organization (Organización Internacional de Estándares).
- ASME: American National Standards Institute (Sociedad Americana de Ingeniería Mecánica).
- IEC: International Electrotechnical Commission (Comisión Electrónica Internacional).
- OIML: World Organization of Legal Metrology (Organización Mundial de Metrología Legal).
- AWWA: American Water Work Association (Asociación de Trabajo Americana del Agua).
- BS EN: British Standards, normas del grupo BSI para el Reino Unido.

Para la aplicación de equipos de medición de caudal en fluidos (líquido, gas y vapor) en conductos cerrados, se consultó la norma BS EN 7405 (British Standard), la cual propone diez grupos básicos que clasifican todas las formas de medición de caudales en sistemas cerrados de tuberías. En la Tabla 1 se presenta una clasificación con base en las técnicas de medición, de la más antigua a la más moderna.



Tabla 1. Clasificación de equipos de medición de caudal, según norma BS EN 7405 (British Standard)

Grupo	Descripción	Categoría por (energía)	Categoría por	
			(tipo de medición)	(método)
A	Equipos de presión diferencial (PD)	Extraen	Volumétrico	Indirecto
B	Equipos de sección variable (rotámetros)	Extraen	Volumétrico	Indirecto
C	Equipos volumétricos o de desplazamiento positivo (DP)	Extraen	Volumétrico	Directo
D	Equipos de turbina	Extraen	Volumétrico	Indirecto
E	Equipos de vortex	Extraen	Volumétrico	Indirecto
F	Equipos electromagnéticos	Añaden	Volumétrico	Indirecto
G	Equipos por ultrasonido	Añaden	Volumétrico	Indirecto
H	Equipos de caudal másico de efecto coriolis	Añaden/extraen	Másico	Directo
I	Equipos térmicos	Añaden	Másico	Directo
J	Otros tipos	Añaden/extraen	-----	-----

Fuente: autor.

Entre los tipos básicos de equipos para la medición de caudal en tuberías cerradas, la Tabla 1 establece dos categorías relacionada con la energía:

- La que extrae energía del flujo. Una extracción de energía lleva asociada una caída de presión. La mayoría de los equipos y las tecnologías más antiguas pertenecen a esta categoría. Este método consisten en colocar en la corriente un estrangulamiento, un cuerpo sólido o un rotor, los cuales convierten la energía potencial del fluido en energía cinética que se emplea para deducir la velocidad del fluido.
- La que añade energía al flujo. Los equipos que añaden energía corresponden a las tecnologías más modernas, donde introducen energía en forma de flujo magnético (equipos magnéticos), de ondas sonoras (equipos ultrasónicos) o de calor (equipos térmicos para caudal másico). El fluido reacciona ante este incremento de energía y este cambio permite deducir o medir el caudal.

La Tabla 1 también clasifica en dos categorías los equipos de medición de caudal, dependiendo del tipo de medida que involucra (volumétrico o másico) y el método de su medida (directa o indirecta).

Los equipos volumétricos o de desplazamiento positivo son los únicos que indican directamente el caudal volumétrico, mientras que los equipos coriolis y térmicos indican el caudal másico.

Los equipos de medición de caudal másico se utilizan en procesos industriales, donde suelen medir el peso y no el volumen, porque en la mayoría de los líquidos industriales como los productos alimenticios (pastas, yogur, sopas, entre otros) el volumen puede variar notablemente por influencia de las condiciones físicas de



presión, temperatura y densidad; por lo tanto, la industria requiere medir el peso del producto en lugar de su volumen.

3.1.1 Funcionamiento, ventajas y desventajas

A continuación se describen los principios de funcionamiento, ventajas y desventajas de los equipos de medición de caudal, de acuerdo con la clasificación de la Tabla 1, y las potenciales que se pueden utilizar en las redes de un sistema de acueducto urbano para el control de agua circundante por las conducciones cerradas y a presión, filtrando los equipos de medición de caudal que se aplican para industrias o en la medición de elementos diferentes al agua.

3.1.1.1 Equipos de presión diferencial “PD”

Estos equipos de medición de caudal utilizan la diferencia de presiones provocada por dispositivos como placas de orificio, toberas, tubos venturi y tubos pitot para determinar el caudal que en un momento dado circula por una tubería cerrada y a presión.

Estos dispositivos, conocidos comúnmente como de presión diferencial (PD), se consideran como la primera tecnología en la medición de caudal en conductos cerrados y a presión. Existen los siguientes tipos:

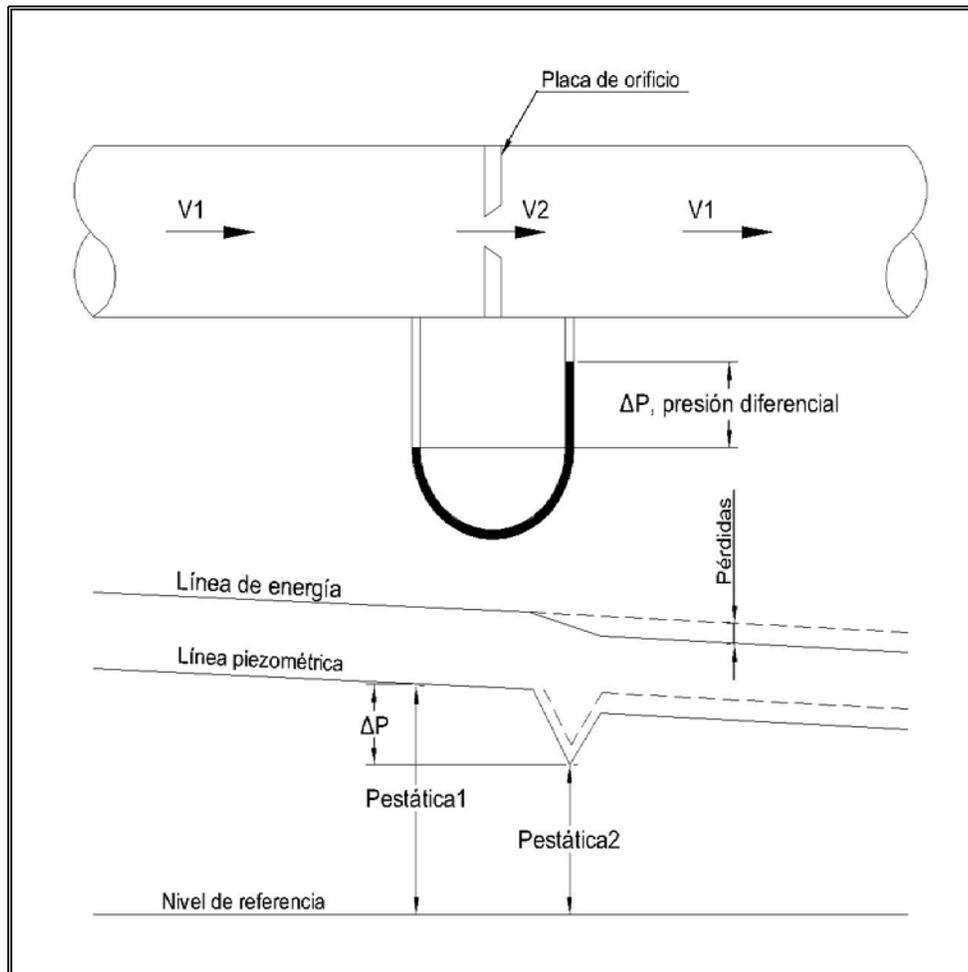
- Dispositivos de paso reducido: placas de orificio, toberas, tubos venturi o veturímetro.
- Dispositivo tubo pitot.

a) Dispositivos de paso reducido

Estos dispositivos restringen el fluido provocando una caída de presión denominada comúnmente “presión diferencial”. Su funcionamiento hidráulico se basa en aumentar la velocidad del fluido, al pasar de una sección inicial correspondiente al diámetro de la tubería general a una sección menor o por un paso estrecho que provoca la disminución de la presión estática en relación con las diferentes velocidades del fluido.

En la Figura 9 se esquematiza la anterior explicación, utilizando como ejemplo el dispositivo placa de orificio.

Figura 9. Esquema típico medidor de caudal de placa de orificio



Fuente: Altendorf, Matthias & otros, 2005.

Como resultado de la presión diferencial en función de la velocidad del fluido se genera una herramienta directa para medir el caudal de un líquido incompresible que pasa por la tubería utilizando la combinación de la ecuación de Bernoulli y los correspondientes coeficientes empíricos de corrección, obteniendo la siguiente fórmula para calcular el caudal volumétrico:

$$Q = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot A_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}$$

Donde:

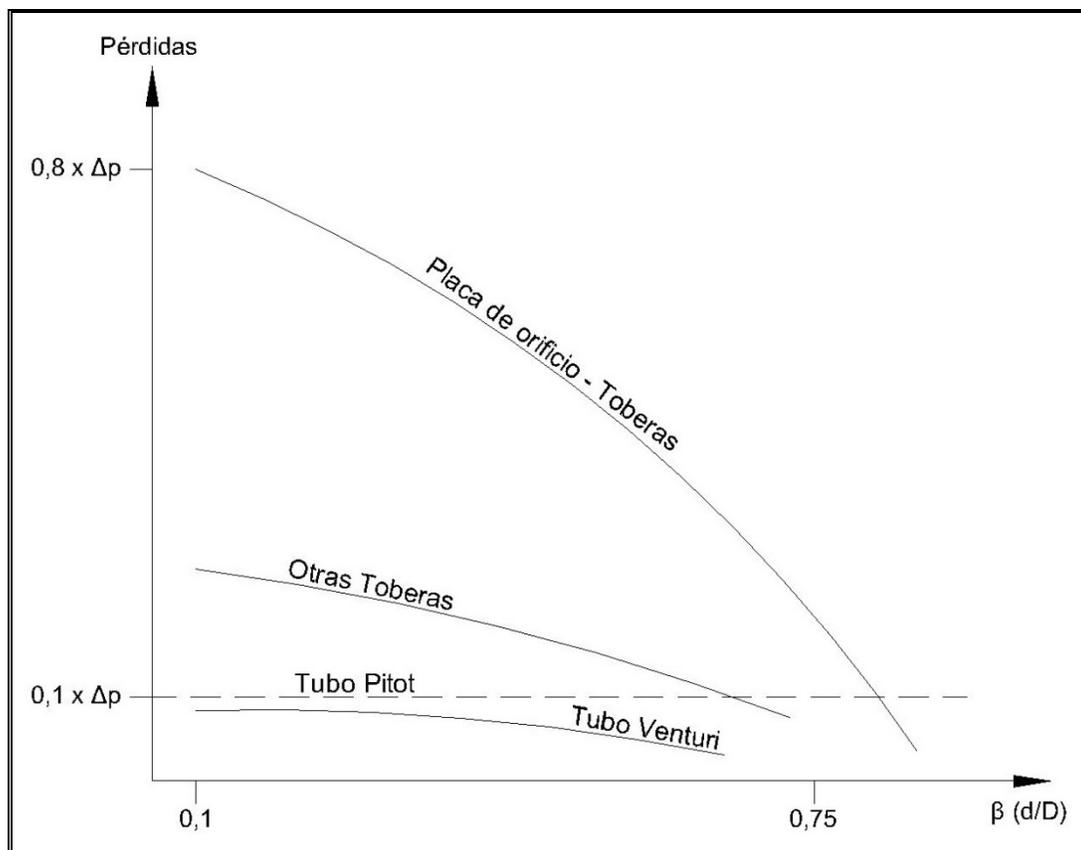
- Q = caudal volumétrico
- C = coeficiente de descarga
- E = coeficiente de velocidad de aproximación (dependiente de la relación β)
- ε = coeficiente de expansión
- β = relación de diámetros d/D ; d es el diámetro del orificio y D el diámetro interior de la tubería

A_2 = área de la sección del orificio
 Δp = presión diferencial
 ρ = densidad del fluido

La pérdida provocada en un sistema de tubería a presión producto de los dispositivos de paso reducido depende de la razón entre los diámetros (β) y, en consecuencia, de la geometría particular del estrechamiento.

La relación que se presenta entre la pérdida producida por un dispositivo de paso reducido y la relación de diámetros d/D (β) se esquematiza en la Figura 10.

Figura 10. Pérdida en dispositivo de paso reducido vs. relación de diámetros d/D (β)



Fuente: Altendorf, Matthias & otros, 2005.

El campo de medida de los equipos de presión diferencial se estima con la rangeabilidad del dispositivo, el cual es la razón entre el valor del caudal máximo y el caudal mínimo, donde la incertidumbre en la medición de un caudal tiende a ser superior en el extremo inferior del campo de medida por la raíz cuadrada que aparece en la expresión del cálculo del caudal volumétrico. Se debe entender por caudal mínimo al valor más bajo que se puede medir con una exactitud específica.



En la mayoría de los equipos de presión diferencial los valores típicos de rangeabilidad se hallan comprendidos entre 3:1 y 6:1, donde es posible ampliar significativamente si se conecta en paralelo un segundo transmisor de presión diferencial con una rangeabilidad mas reducida, llegando a valores de 36:1.

Los dispositivos de **placa de orificio** se emplean principalmente para medir gases y vapor, aunque también para medir caudales de líquidos y su aplicación es especialmente adecuada cuando no se tienen grandes limitaciones de caída de presión.

Existe una amplia variedad de modelos de placas de orificio descritos en las normas DIN 19205 Parte I y ISO 5167, entre los cuales se destacan los siguientes:

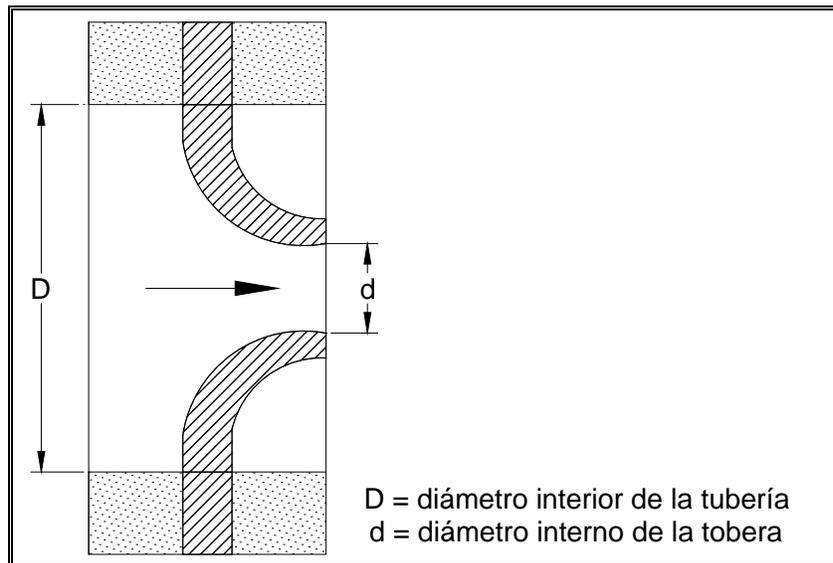
- Modelo placa de orificio de toma rasante en una pieza: la norma DIN 19205 Parte I destaca su rango de aplicación para diámetros nominales entre DN 50 y 2.000 (2" a 80") y presiones nominales ente PN 1 y 400 (96,53 a 39.989,59 Kpa). Para este modelo la toma de presiones son colocadas inmediatamente antes y después del disco diafragma.
- Modelo placa de orificio con toma en brida: la norma ISO 5167 destaca su utilización por ser un modelo que facilita el reemplazo de la placa de orificio al utilizar las bridas de las tuberías adyacentes aguas arriba y aguas abajo del diafragma. Por lo tanto, este modelo facilita el reemplazo de la placa de orificio por otras de diámetros distintos (d), aumentando el campo de valores de medida del equipo de medición de caudal. Según la norma, las tomas de presiones están ubicadas 25 mm (1") aguas arriba del disco y 25 mm (1") aguas abajo.
- Modelo sustitución del disco de diafragma: la norma ISO 5167 destaca su utilización con las mismas ventajas del modelo anterior, el cual permite cambiar el disco o la placa de orificio, solo que en este caso el operador debe realizar las perforaciones en la tubería para la toma de presiones a distancias de D y D/2 (D=diámetro interior de la tubería) aguas arriba y aguas abajo, respectivamente; donde deben estar perpendiculares al eje de la tubería y sobre longitudes libres de accesorios.

Los dispositivos **toberas** son un punto intermedio ente las placas de orificio y los tubos venturi porque combinan un diseño particular y característico de estas dos tecnologías.

La pérdida de presión provocada por este dispositivo se presenta en un punto intermedio entre las pérdidas que puede causar un dispositivo de placa de orificio y un tubo venturi.

Las toberas pueden tolerar velocidades del fluido muy altas y resultan una buena elección para fluidos abrasivos por su sección de entrada, el cual corresponde a un acceso redondeado con radio, como se esquematiza en la Figura 11.

Figura 11. Sección transversal típica dispositivos de tobera



Fuente: Altendorf, Matthias & otros, 2005.

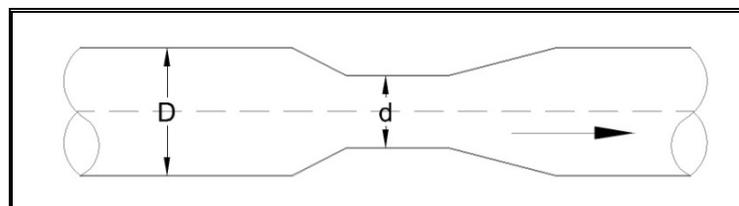
La incertidumbre en la medición de un caudal volumétrico con una tobera es ligeramente superior comparada con la de un equipo de medición de placa de orificio, al considerar que la presión diferencial es inferior incrementando el rango de valores entre los cuales se halla el valor real.

Los dispositivos **tubos o toberas venturi** se emplean principalmente para medir caudales de líquidos o gases. Disponen de un estrangulamiento brusco de la sección original del tubo principal, acompañado de una ampliación hasta la sección original, lo cual se hace de una manera gradual.

Este dispositivo genera pérdidas mucho menores que los de placa de orificio y toberas, originando una presión diferencial inferior que involucra mayor incertidumbre en la medición del caudal volumétrico.

En la Figura 12 se esquematiza una sección transversal típica de estos dispositivos.

Figura 12. Sección transversal típica dispositivos toberas venturi



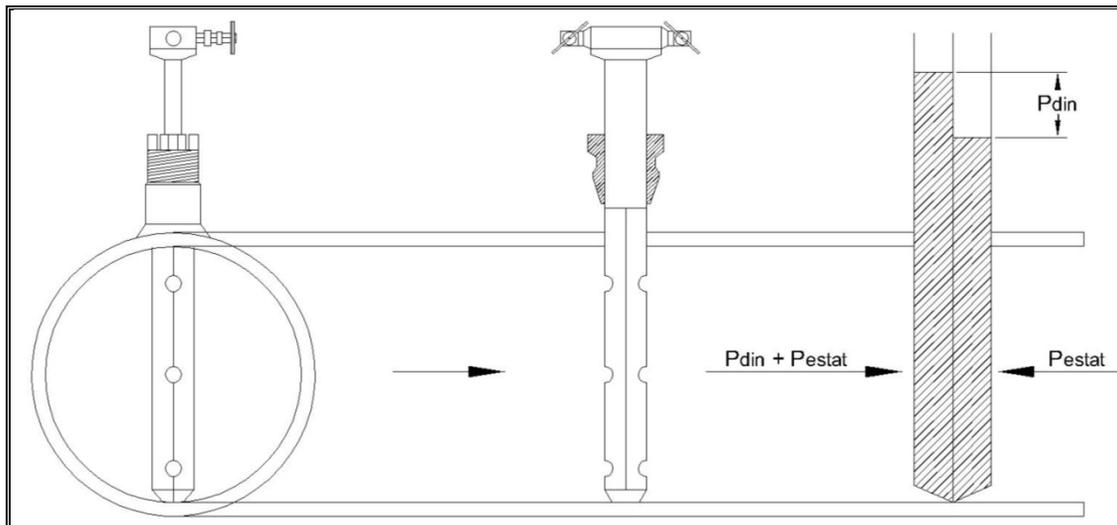
Fuente: Altendorf, Matthias & otros, 2005.

b) Dispositivos tubo pitot

Este es otro instrumento capaz de medir el caudal que pasa por una tubería a presión utilizando la presión diferencial entre dos puntos.

El tubo pitot tiene un detector en forma de varilla, que tiene una o varias hendiduras en las partes anterior y posterior, conectadas a un transmisor de presiones diferenciales por dos canales independientes, como se aprecia en la Figura 13.

Figura 13. Sección transversal típica de los dispositivos tubos pitot



Fuente: Altendorf, Matthias & otros, 2005.

Como se observa en la Figura 13, las hendiduras de la parte anterior registran la suma de la presión dinámica más la presión estática, mientras que las hendiduras de la parte posterior sólo detectan la presión estática; por lo tanto, con su diferencia se puede estimar la presión dinámica y, por consiguiente, determinar el caudal que pasa por la tubería.

El tubo pitot se instala de manera transversal a la dirección de circulación del flujo, atravesando todo el diámetro de la tubería, donde las hendiduras se encuentran distribuidas, de tal forma que el equipo calcule un promedio representativo de la velocidad del flujo.

A diferencia de las placas de orificio, para el tubo pitot las pérdidas de carga son significativamente inferiores, no obstante los efectos debidos al perfil de velocidad y turbulencia pueden ser significativos en diámetros grandes o mayores a un metro.



Ventajas y desventajas

A continuación se describen las principales ventajas y desventajas de los equipos de presión diferencial. Esta información corresponde a las características y valores típicos del mercado.

Tabla 2. Ventajas de los equipos de presión diferencial (PD)

VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - Aptos para la medición de líquidos, gases y vapor. - Los dispositivos tubo venturi son la mejor elección cuando en un líquido hay presencia de aire o burbujas, ya que el gas no afecta de forma significativa a la medición de la presión. - Los efectos de la temperatura y presión no implican límites en su operación o funcionamiento para el caso de la medición de líquidos, claro está siempre y cuando no se provoquen cambios en la densidad del fluido o cuando el fabricante limita su uso dependiendo de las propiedades del material y otras características particulares del equipo. - Dispositivos disponibles y preparados para soportar durante su operación o funcionamiento temperaturas y presiones máximas de 1,000 °C y 7,000 PSI, respectivamente. - Los dispositivos de placas de orificio pueden operar para números de Reynolds bajos comparado con las otras tecnologías. - La conductividad del fluido es indiferente a los resultados de las mediciones para los equipos de presión diferencial. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dispositivos que dependiendo de su clase pueden operar en sentidos horizontal, vertical o inclinado, con algunas limitaciones en su orientación. - Amplia variedad en diámetros nominales disponibles: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Placa de orificio: ½" a 40". ▪ Tuberías y tubos venturi: 1" a 160". ▪ Tubos pitot: 1" a 80". 	<p>Para el dispositivo placa de orificio los valores típicos son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisión: $\pm 0,6$ a 2% ▪ Repetibilidad: 0,5% <p>Para el tubo venturi los valores típicos son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisión: 0,6 a 2% ▪ Repetibilidad: 0,5% <p>Para el tubo pitot los valores típicos son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisión: 1,5 a 4% ▪ Repetibilidad: 0,5% <p>Los valores típicos de rangeabilidad de los equipos de presión diferencial son: Rangeabilidad: 3:1 y 6:1 hasta 36:1</p> <ul style="list-style-type: none"> - La precisión disminuye en los dispositivos de placa de orificio, toberas y tubo pitot por la acción de la abrasión, que es directamente proporcional al porcentaje de sólidos en suspensión que transporte el líquido. - Con normas estándares de ámbito mundial y perfeccionadas por un periodo de más de 60 años para líquidos (ISO 5167-1, ASME MFC3M). - Los dispositivos tubos pitot se utilizan como equipos de respaldo de dispositivos más sofisticados, ante emergencias como la falla de suministro eléctrico y se emplean como contadores secundarios por su fácil operatividad en terreno para mantenimientos y verificaciones metrológicas 	<ul style="list-style-type: none"> - Amplio surtido de modelos y materiales disponibles en el mercado, lo que implica variedad de precios en el costo del equipo. - Dispositivo que no utilizan partes móviles, lo que implica mayor vida útil. - Se pueden instalar en cualquier tipo de tubería. - Método económico de medición de caudal con la utilización de tubos pitot, fáciles de transportar e instalar. - Permite sustituir los transmisores de presión diferencial sin necesidad de retirar el equipo o la suspensión parcial del servicio. - Su diseño es simple.



VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
		en el sitio de instalación del equipo principal.	

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.

Tabla 3. Desventajas de los equipos de presión diferencial (PD)

DESVENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - Los dispositivos de placa de orificio, toberas y tubo pitot pueden presentar altos índices de abrasión por el contenido de sólidos que transporte el fluido, por tal motivo el contenido de sólidos en el líquido debe ser nulo. - Los equipos de presión diferencial son incapaces de tomar medidas de caudal en condiciones no presurizadas o si la tubería no está totalmente llena. - Las mediciones de caudal efectuadas con dispositivos de placas de orificio con número de Reynold inferiores a 3,000 en la práctica será poco significativa o simplemente imposible. - Las mediciones de caudal efectuadas con dispositivos de tubos venturi con número de Reynold inferiores a 10,000 en la práctica será poco significativa o simplemente imposible. - Equipos con un campo de aplicación limitado por su requerimiento de operar sólo sobre fluidos turbulentos. - Los dispositivos de placa de orificio, toberas y tubos venturi son sensibles a las variaciones del perfil de velocidad y turbulencias. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere condiciones físicas adicionales a la entrada y salida del equipo con tramos rectos y libres de accesorios. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Placa de orificio: 40 veces el diámetro nominal a la entrada y 10 veces a la salida. ▪ Tuberías y tubos venturi y pitot: 20 veces el diámetro nominal a la entrada y 10 veces a la salida. ▪ La presencia de válvulas parcialmente abiertas a una distancia inferior a 50 veces el diámetro nominar corriente aguas arriba del equipo de medición puede generar errores inaceptables. - Existen limitaciones en su orientación si no se dispone el equipo sobre puntos bajos o altos en la red o en descensos verticales. - La mayoría de los equipos de presión diferencial son unidireccionales, sólo algunos dispositivos especiales de placa de orificio y los tubos pitot son la excepción. 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos de baja precisión y repetibilidad comparado con otras tecnologías. - Algunos modelos tienen un campo de aplicación limitado por su máxima rangeabilidad (3:1 y 6:1). - Altas pérdidas de carga (alrededor de 4 a $8xV^2/2g$) y mucho mayores que otras tecnologías. - La presión diferencial calculada debe ser mayor a 1 mbar y en la medición de caudales mínimos debe alcanzarse por lo menos una presión diferencial de 0,5 mbar o, por lo contrario, se podría adquirir una alta incertidumbre en las mediciones tomadas. - El límite superior del caudal posible medido está dado por la velocidad del fluido, el cual no debe sobrepasar los 12 m/s o en circunstancias que se asegure de que no haya cavitación. 	<ul style="list-style-type: none"> - El costo para las placas de orificio, tuberías y tubos venturi depende del tamaño del conducto donde se instale. - Los costos en la instalación de dispositivos como toberas y tubos venturi se incrementan por su peso y longitud, que son considerables para grandes diámetros. - Los costos de instalación son superiores a las otras tecnologías. - Es necesario cortar la tubería para su instalación, excluyendo el tubo pitot. - Los costos de mantenimiento son superiores a las otras tecnologías por el efecto de abrasión que puede causar el transporte de sedimentos, al garantizar que los bordes de un disco de orificio y la rugosidad de la superficie en los tubos y toberas venturi sean constantes. - Durante su operación se puede provocar distorsión de las mediciones de caudal por efecto de la abrasión en los equipos de presión diferencial. - En la manipulación adecuada de los tubos pitot un alineamiento correcto es fundamental.

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.

3.1.1.2 Equipos de sección variable (rotámetros)

Estos equipos de medición se utilizan para medir caudales de gases y fluidos, manejan el mismo principio que los equipos de presión diferencial pero en un sentido

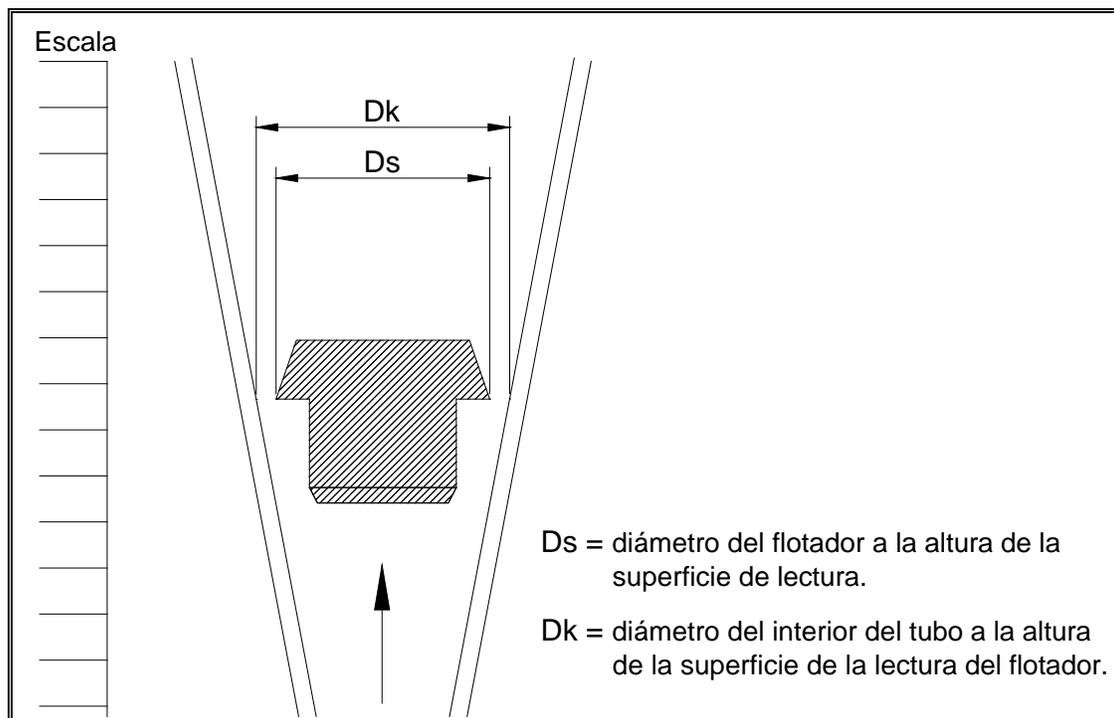
opuesto. Los de presión diferencial utilizan secciones constantes para estimar una presión diferencial donde una variación en ésta indica una variación en la velocidad del caudal, mientras que en los equipos de sección variable la presión diferencial es constante y una variación en la sección transversal indica una variación en la velocidad del caudal.

Resumiendo, un equipo de sección variable consiste en un tubo dispuesto verticalmente y graduado hacia arriba, en cuyo interior existe un flotador en suspensión dentro del medio a medir, el cual se encuentra correctamente centrado en el tubo de medición y gira por la circulación del fluido que entra desde abajo para mantener su estabilidad inherente.

El equipo actúa de la siguiente manera, cuando mayor es la velocidad del fluido sobre el flotador, éste flota más alto en el interior del tubo graduado y el espacio entre el flotador y las paredes del tubo se ensanchan a medida que el flotador se desplaza hacia arriba, hasta que las fuerzas actuantes en el medio se equilibran y el flotador permanece suspendido a una altura constante.

En la Figura 14 se esquematiza una sección transversal típica de estos dispositivos:

Figura 14. Sección transversal típica de los equipos de sección variable (rotámetros)



Fuente: Altendorf, Matthias & otros, 2005.



La siguiente fórmula se emplea para calcular el caudal volumétrico con equipos de sección variable:

$$Q = \frac{\alpha}{\rho_m} \cdot D_s \cdot \sqrt{g \cdot m_s \cdot \rho_m \cdot \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s}\right)}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{1}{C_w}}$$

- Donde:
- α = coeficiente de flujo
 - C_w = coeficiente de arrastre (depende de la geometría del flotador y del número de Reynolds)
 - ρ_m = densidad del fluido
 - ρ_s = densidad del flotador
 - m_s = masa del flotador
 - g = aceleración de la gravedad

En el mercado existen dispositivos de este tipo que permiten leer el caudal directamente, ya que el tubo que contiene el flotador es de vidrio y deja ver su acción.

Existen otros dispositivos totalmente herméticos, donde la posición del flotador se transmite por medios magnéticos a una escala en el exterior del tubo, convertida en señal eléctrica.

Ventajas y desventajas

A continuación se describen las principales ventajas y desventajas de los equipos de sección variable. Esta información corresponde a las características y valores típicos del mercado.

Tabla 4. Ventajas de los equipos de sección variable (rotámetros)

VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - Aptos para la medición de líquidos y gases. - Dispositivos disponibles y preparados para soportar durante su operación o funcionamiento temperaturas y presiones máximas de 450 °C y 1,400 PSI, respectivamente. - Dispositivos que pueden operar para números de Reynolds bajos, comparado con las otras tecnologías. - Adecuado para medir caudales mínimos. - La conductividad del fluido 	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere condiciones físicas adicionales a la entrada y salida del equipo con tramos rectos y libres de accesorios. 	<p>Sus valores típicos son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisión: ± 1 a 4% ▪ Repetibilidad: 0,5 a 1% ▪ Rangeabilidad: 10:1 <ul style="list-style-type: none"> - Con normas estándares de ámbito mundial y para líquidos (ISO 11605, ASME MFC.18M). - Se usan como equipos de respaldo de dispositivos más sofisticados, ante emergencias como la falla de suministro eléctrico. - La escala dispuesta en los equipos permite una 	<ul style="list-style-type: none"> - Su diseño es simple. - Método económico de medición para caudales bajos comparado con las otras tecnologías. - Fácil de transportar. - No requiere fuentes de alimentación para su funcionamiento. - Su instalación y mantenimiento es simple.



VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<p>es indiferente a los resultados de las mediciones para los equipos de sección variable.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aplicables para fluidos de baja densidad. 		<p>supervisión directa en su instalación y operación.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dispositivos altamente utilizados en la aplicación de sustancias químicas durante los procesos de las plantas de tratamiento de agua potable. 	

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.

Tabla 5. Desventajas de los equipos de sección variable (rotámetros)

DESVENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - El fluido que se mide debe ser de una sola fase, si es líquido no debe contener mezcla de gases o sólidos. - Equipos aptos sólo para tomar medidas de caudal en condiciones presurizadas o donde la tubería esté totalmente llena. - Las mediciones de caudal con número de Reynold inferiores a 2,000 en la práctica es poco significativa o simplemente imposibles. - Equipos con un campo de aplicación limitado por su requerimiento de operar sólo sobre fluidos turbulentos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aptos para instalarse en una tubería vertical con una circulación del flujo de aguas abajo a aguas arriba. - Equipos de uso unidireccional únicamente. En un único sentido: vertical y de aguas abajo a aguas arriba. - Baja disponibilidad en diámetros nominales de 0.08" a 6". - No hay disponibilidad de rotámetros para tuberías grandes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos de baja precisión y repetibilidad comparados con otras tecnologías. - La precisión depende de los estados del fluido, los cuales deben estar bien definidos y ser constantes respecto a su densidad o viscosidad. - Equipos con un campo de aplicación limitado por su máxima rangeabilidad. - Mayores pérdidas de carga que otras tecnologías (alrededor de $3xV^2/2g$), pero menores a los dispositivos de presión diferencial. - Equipo que no dispone de funciones de totalización. 	<ul style="list-style-type: none"> - No es sencillo ni económico para estos dispositivos obtener señal eléctrica a partir de la indicación de la escala. - Es necesario cortar la tubería para su instalación. - Requieren calibración específica para cada fluido.

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.

3.1.1.3 Equipos volumétricos o de desplazamiento positivo (DP)

Es un equipo capaz de medir un caudal volumétrico sobre fluidos limpios y libres de sedimentos. Utiliza cámaras desplazables que dividen el fluido en volúmenes fijos conocidos.

Las cámaras desplazables corresponden a sistemas de engranajes, émbolos, hélices u otros elementos que se mueven o giran por la acción del flujo del agua que pasa sobre ellos en dirección axial, el número de giros indica el volumen circundante sobre el sistema medido.

Estos equipos de medición de volumen de caudal sólo pueden funcionar en una sola dirección (unidireccionales) y pueden operar sin ningún tipo de alimentación eléctrica externa.

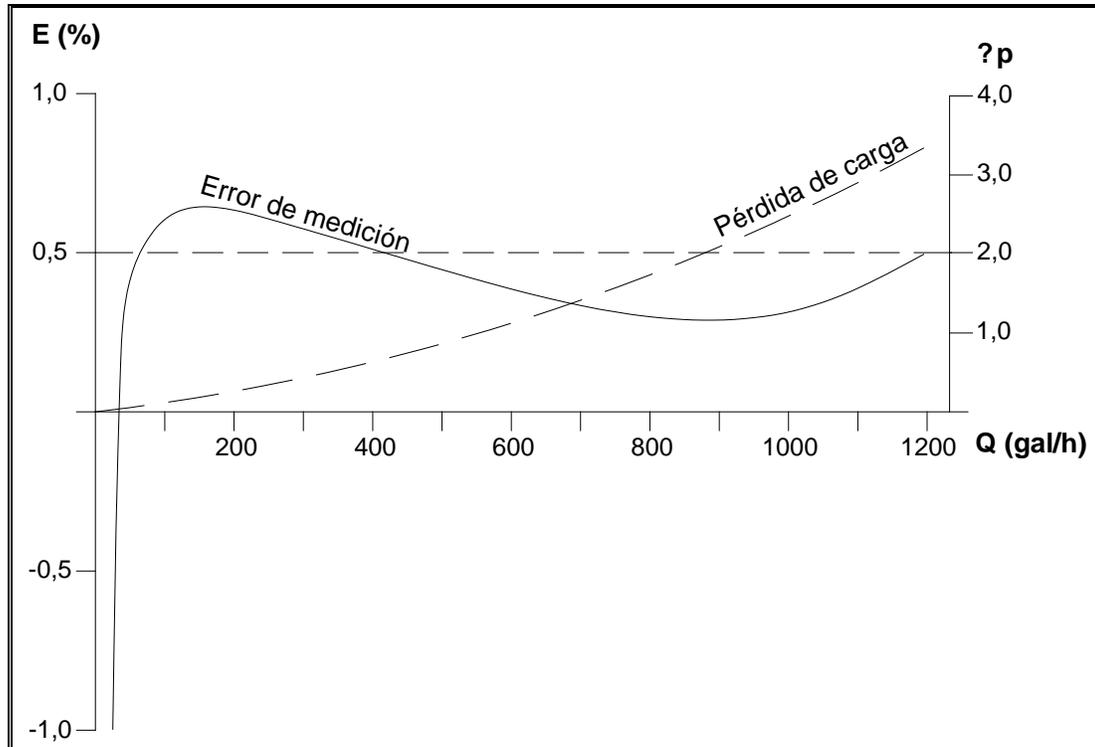
Un elemento fundamental de estos equipos es la inclusión de un filtro de red fina antes de la entrada a los elementos mecánicos del engranaje, que evita la entrada de cuerpos sólidos que impiden las acciones mecánicas de los equipos internos.

Su exactitud en la medición aumenta con el incremento del caudal; sin embargo, la presencia de aire o sólidos en el fluido puede perturbar esta exactitud. En la Figura 15 se puede apreciar el funcionamiento típico de un equipo volumétrico, también conocido como de desplazamiento positivo (DP).

De la Figura 15 se pueden concluir lo siguiente:

- Las pérdidas de carga aumentan con la velocidad del fluido y dependen del material de los elementos del engranaje.
- Para velocidades bajas, algunas partes del fluido pueden no registrarse si se escurren por los intersticios entre las partes mecánicas del equipo volumétrico. Estas pérdidas se conocen como deslizamiento del fluido.
- A medida que la velocidad del fluido aumenta, el error de la medición se incrementa hasta un valor máximo y luego vuelve a disminuir.

Figura 15. Funcionamiento típico de un equipo volumétrico, Error (%) vs. Δp vs. Caudal



Fuente: Altendorf, Matthias & otros, 2005.



- Para velocidades altas el error en la medición aumenta por los efectos inerciales que se producen en los elementos mecánicos del equipo, provocando, desgaste de los componentes y mayores deslizamientos del fluido.

Los equipos volumétricos se dividen en tres tipos o modelos generales, que depende del elemento o sistema de engranaje que utilizan para la medición del volumen de caudal. Éstos son los siguientes:

- Rotativos. Constan de un cuerpo de medición donde se alojan la cámara de volumen calibrado, el elemento rotativo y el plato de división. Los elementos rotativos para este tipo de equipos, por lo general pueden ser ruedas dentadas, un tornillo o un molinete, donde cada rotación implica el desplazamiento de un volumen de agua conocido.

Actualmente estos elementos están hechos de plástico de alta densidad, y antiguamente eran de latón y bronce.

El volumen de caudal del fluido se acumula mediante totalizadores de transmisión magnética o mecánica.

- Alternativo. Su elemento móvil es un émbolo de movimiento. Basa su principio de medición en el desplazamiento de un volumen fijo en cada revolución.
- De disco oscilante/nutación. Su elemento móvil es un disco que gira alrededor de un eje. Basa su principio de medición en el desplazamiento de un volumen fijo en cada revolución.

Ventajas y desventajas

A continuación se describen las principales ventajas y desventajas de los equipos volumétricos o de desplazamiento positivo. Esta información corresponde a características y valores típicos del mercado.

Tabla 6. Ventajas de los equipos volumétricos o de desplazamiento positivo (DP)

VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - Aptos para la medición de líquidos y gases. - Dispositivos disponibles y preparados para soportar durante su operación o funcionamiento temperaturas y presiones máximas de 250 °C. y 700 PSI, respectivamente. Este es uno de los dispositivos de medición que menos soporta temperaturas y presiones máximas, 	<ul style="list-style-type: none"> - No requieren condiciones físicas adicionales a la entrada y salida del equipo con tramos rectos y libres de accesorios. Aunque algunos fabricantes recomiendan distancias de 3 veces el diámetro nominal a la entrada y de 2 veces a la salida. - Se pueden instalar en cualquier posición, 	<p>Sus valores típicos son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisión: $\pm <0,1$ a 2% ▪ Repetibilidad: 0,02% ▪ Rangeabilidad: 50:1 <ul style="list-style-type: none"> - Equipos de alta precisión, repetibilidad y rangeabilidad, comparados con otras tecnologías. - Causal de pérdidas moderadas (alrededor de 	<ul style="list-style-type: none"> - Se pueden instalar en cualquier tipo de tubería. - Hay disponibilidad de equipos que no requieren alimentación eléctrica. - Amplia variedad de modelos y materiales disponibles en el mercado, lo que implica diversidad de precios en el costo.



VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<p>comparado con otras tecnologías.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Son los únicos dispositivos, comparados con otras tecnologías, que pueden medir flujos laminares o para números de Reynolds muy bajos. - Adecuados para medir caudales mínimos. - Empleados en líquidos conductivos y no conductivos. - Adecuados para la medición de fluidos altamente viscosos (excepto los dispositivos de medición de gas). - La medición es independiente de la viscosidad. 	<p>(horizontal, vertical o inclinado), aunque existen algunas limitaciones en su orientación.</p>	<p>$2xV^2/2g$), comparada con otras tecnologías, por los filtros aguas arriba, aumento de la viscosidad o velocidad del fluido.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Con normas estándares de ámbito mundial y perfeccionadas por un periodo de más de 100 años para líquidos (ISO 2714, AWWA C710 – M6). 	

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.

Tabla 7. Desventajas de los equipos volumétricos o de desplazamiento positivo (DP)

DESVENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - Equipos altamente afectados por la presencia de burbujas de aire en la medición de un líquido, ya que vuelven los fluidos compresibles. - Dispositivos sensibles a la intrusión de materiales por el contenido de sólidos que puede trasportar el fluido. Por tal motivo, es necesario un filtro aguas arriba. - La medición se vuelve problemática y con datos erróneos cuando el contenido de gas o burbujas de aire o el contenido de sólidos está entre el 2-5% en volumen o superior. - Equipos aptos para tomar medidas de caudal en condiciones presurizadas o donde la tubería esté totalmente llena. - Restricción de temperatura y presión mayores a las otras tecnologías, para evitar fugas intersticiales durante su operación y funcionamiento en el sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> - El equipo debe estar calibrado para operar en la condición dispuesta en terreno, por lo que si se instala en una orientación diferente para la cual fue calibrado pueden originarse errores en su medición. - Existen limitaciones en su orientación al no disponer el equipo sobre puntos bajos o altos en la red o en descensos verticales. - Aplicables únicamente para la medición en un único sentido. - Moderada disponibilidad en diámetros nominales de 0,2" a 16". - Riesgo de congelación a equipos mecánicos si se emplea al aire libre. 	<ul style="list-style-type: none"> - La precisión puede bajar con el uso del equipo si no se le hace el mantenimiento correctivo, debido al desgaste de las partes mecánicas. - La sedimentación en los intersticios pueden causar además de la pérdida de campo de valores de medida en el empeoramiento de la repetibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se puede causar pérdida parcial o total del equipo por la entrada de aire, vapor o sólidos. - Menor vida útil que las otras tecnologías por la abrasión o desgaste de sus partes móviles. - El costo del equipo es dependiente del tamaño del conducto donde se instale. - Se puede causar pérdida parcial o total del equipo por la entrada de aire, vapor o sólidos a su interior, lo que implica mayores costos en la operación y mantenimiento del sistema de macromedición a causa de las limpiezas rutinarias del dispositivo de medición. - Es necesario cortar la tubería para su instalación. - Requieren mantenimientos rutinarios, especialmente sobre las partes móviles para no perder su precisión. Por ello existen modelos que permiten un desmontaje fácil para las tareas de limpieza.



DESVENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
- Las mediciones de caudal con número de Reynold inferiores a 100 en la práctica es poco significativa o simplemente imposible.			

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.

3.1.1.4 Equipos de turbina

Estos equipos constan de un grupo de aspas giratorias con pivotes a un eje central que va montado en el centro. La medida de la velocidad para modelos nuevos o de volumen de caudal para modelos convencionales es producto del paso del fluido sobre la turbina, que gira una rueda o rotor con una velocidad proporcional a la del caudal que pasa por el sistema. Para los contadores de turbina convencional cada vez que una aspa de la hélice pasa por un sensor se genera un impulso, que corresponde a un volumen fijo del fluido.

La velocidad del rotor se mide por medios mecánicos o inductivos que generan una señal eléctrica, mientras que para los contadores de turbina convencional el número de impulsos de la cantidad de fluido que circula en un intervalo de tiempo conocido es un indicador de la velocidad del caudal.

Las aspas giratorias de los equipos de turbina se encuentran inclinadas un ángulo β respecto a la dirección del fluido para que ejerza una fuerza sobre el rotor, a partir de la rotación resultante se pueda calcular el caudal volumétrico con la siguiente expresión:

$$Q = V_m \cdot A = 2\pi \cdot n \cdot r_m \cdot \cot\beta \cdot A$$

Donde:

- Q = caudal volumétrico
- V_m = velocidad media del caudal
- A = área de la sección transversal
- n = numero de revoluciones del rotor
- r_m = radio del rotor
- β = inclinación de las aspas

Los modelos que miden consumos domésticos en un sistema de acueducto presentan problemas de deslizamiento de fluido, como lo que ocurre con los equipos volumétricos. Existen dos tipos de equipos de turbina, los que disponen el rotor en forma axial y los que lo hacen en forma vertical. Los dispuestos verticalmente presentan ciertas ventajas, mejora el efecto de los pivotes y del rozamiento y tienen una sensibilidad reforzada que les permite un campo de aplicación más alto.



Los equipos de turbina con rotor axial se emplean para medir medios líquidos y gases. Los de rotor vertical solo sirven para medir líquidos.

Los materiales de los elementos rotativos dependen del medio en los cuales se utilicen que pueden ser en acero inoxidable, carburos de tungsteno, incluso se fabrican en plástico de alta densidad u otro material de larga duración.

Existe un modelo de turbina de inserción que utiliza pequeñas turbinas o hélices al final de una vara. Estos dispositivos presentan una alta sensibilidad y repetibilidad local, además de que su aplicación es razonablemente buena para la supervisión de caudales de agua en tuberías de diámetro grande.

Ventajas y desventajas

A continuación se describen las principales ventajas y desventajas de los equipos de turbina. Esta información corresponde a las características y valores típicos del mercado.

Tabla 8. Ventajas de los equipos de turbina

VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - Aptos para la medición de líquidos, gases y vapor. - Los cambios de temperatura y presión no implican límites en su operación o funcionamiento, sólo en aquellos modelos que por recomendaciones del fabricante limitan su uso para estas condiciones, que dependen de las propiedades del material y otras características particulares del equipo. - Dispositivos disponibles y preparados para soportar durante su operación o funcionamiento temperaturas y presiones máximas de 500 °C. y 40,000 PSI, respectivamente. - Empleados en líquidos conductivos y no conductivos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se pueden instalar en cualquier posición, (horizontal, vertical o inclinada), aunque existen algunas limitaciones en su orientación. - Son bidireccionales, capaces de medir el flujo en ambas direcciones. - Amplia disponibilidad en diámetros nominales de 0,2" a 32". 	<p>Sus valores típicos son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisión: $\pm 0,1$ a 2% ▪ Repetibilidad: 0,02% ▪ Rangeabilidad: 25:1 <ul style="list-style-type: none"> - Equipos de alta precisión y repetibilidad, comparados con otras tecnologías. - Algunos modelos presentan un amplio campo de valores de medida y un buen comportamiento lineal. - Ofrecen pérdidas muy bajas alrededor de $2xV^2/2g$, comparadas con otras tecnologías. - Con normas estándares de ámbito mundial y para líquidos (ISO 4064-2, AWWA M33). - Se emplean como contadores secundarios por su alta repetibilidad, útiles para mantenimientos y test de calibración. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se pueden instalar en cualquier tipo de tubería. - Reducción de costos en tuberías de gran diámetro, con la utilización de tecnología con inserción. - Amplia variedad de modelos y materiales disponibles en el mercado, lo que implica variedad de precios en su costo.

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.



Tabla 9. Desventajas de los equipos de turbina

DESVENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - Equipos altamente afectados por la presencia de burbujas de aire en la medición de un líquido, ya que vuelven los fluidos compresibles. - Dispositivos sensibles a la intrusión de materiales por el contenido de sólidos que puede transportar el fluido. Por tal motivo, la necesidad de un filtro guas arriba. - La medición se vuelve problemática y con datos erróneos cuando el contenido de gas o burbujas de aire o el contenido de sólidos está entre el 2-5% en volumen o superior. - Equipos aptos para tomar medidas de caudal en condiciones presurizadas o donde la tubería esté totalmente llena. - Las mediciones de caudal con número de Reynolds inferiores a 5,000 en la práctica es poco significativa o simplemente imposible. - Equipos con un campo de aplicación limitado por su requerimiento de operar sólo sobre fluidos turbulentos. - Sus mediciones son afectadas parcialmente por los vórtices. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere condiciones físicas adicionales a la entrada y salida del equipo con tramos rectos y libres de accesorios, 20 veces el diámetro nominal a la entrada y 5 veces a la salida. - La presencia de válvulas parcialmente abiertas a una distancia inferior a 50 veces del diámetro nominal corriente aguas arriba del equipo de medición puede generar errores inaceptables. - El equipo debe estar calibrado para operar en la condición dispuesta en terreno, por lo que si se instala en una orientación diferente para la cual fue calibrado puede originar errores en su medición. - Existen limitaciones en su orientación al no disponer el equipo sobre puntos bajos o altos en la red o en descensos verticales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos con un campo de aplicación moderado por su máxima rangeabilidad, comparado con las otras tecnologías. - Para diámetros muy pequeños, menores a 0,2", presenta limitaciones en su campo de valores de medida. - Si el fluido tiene sólidos es necesario un filtro corriente aguas arriba, lo que implica pérdidas de presión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los pivotes pueden sufrir desgaste por la abrasión del fluido, lo que puede reducir la vida útil del equipo. - El costo del equipo depende del tamaño del conducto donde se instale, excluyendo la instalación por inserción, el cual baja los costos. - Altos costos de mantenimiento. - Es necesario cortar la tubería para su instalación, a excepción de aquellos modelos que se instalan por inserción. - Todo el equipo ha de estar perfectamente limpio antes de iniciar con su operación.

Fuente: tomado de los catálogos suministrados por los fabricantes de equipos de medición.

3.1.1.5 Equipos de vortex

El principio de medición se basa en que la frecuencia de desprendimiento de los vórtices es proporcional a la velocidad media de circulación del fluido y, por lo tanto, al caudal volumétrico.

Con el número de Strouhal se describe la relación entre la frecuencia de desplazamiento de vórtices, la velocidad del fluido y el diámetro del cuerpo sólido, como se presenta en la siguiente fórmula:

$$S_t = \frac{f \cdot d}{v}$$



Donde: S_t = número de Strouhal
 f = frecuencia de desplazamiento de vórtices
 d = diámetro del cuerpo sólido
 v = velocidad del fluido

Finalmente, con las bases teóricas o zona de turbulencia dispuestas por Theodore Von Kármán en el año 1912, se definió el uso de los equipos vortex para la estimación de caudales, que con su análisis de doble hilera de vórtices formados detrás de un cuerpo sólido en un flujo de fluido reveló una relación fija entre la distancia transversal de separación de las dos hileras y la distancia longitudinal de separación entre vórtices en una misma hilera, concluyendo entonces que con el recuento del número de vórtices por unidad de tiempo nos da directamente una estimación del caudal.

Los obstáculos en estos equipos varían según el fabricante. Existen de sección rectangular, triangular, esférica, en delta y de otras formas; sin embargo, en forma de delta presentan un comportamiento lineal casi ideal, llegando a exactitudes en la medición de $\pm 1\%$ y una repetibilidad alrededor del 0,2%.

Los fabricantes de estos equipos definen un parámetro K, que representa el número de vórtices que se detectan por unidad de tiempo (impulsos por unidad de volumen), que se obtienen del proceso de calibración del aparato y se incluye en las placas de sus características.

Los tipos o modelos de esta tecnología que existen en el mercado no tienen partes móviles, por lo que no se desgastan y no requieren mantenimiento rutinario. Se ofrecen en diámetros de $\frac{1}{2}$ " a 18" a petición del cliente. Para diámetros superiores a 12" la frecuencia de desprendimiento de vórtices son muy bajas y requieren cierto tratamiento de la señal para que sea estable y son costosos comparados con otras tecnologías.

Ventajas y desventajas

A continuación se describen las principales ventajas y desventajas de los equipos vortex. Esta información corresponde a las características y valores típicos del mercado.

Tabla 10. Ventajas de los equipos vortex

VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - Aptos para la medición de líquidos, gases y vapor. - Los cambios de temperatura, presión y viscosidad no implican límites en su operación o funcionamiento, sólo en 	<ul style="list-style-type: none"> - Se pueden instalar en cualquier posición (horizontal, vertical o inclinada), aunque existen algunas limitaciones en su orientación. 	<p>Sus valores típicos son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisión: $\pm 0,5$ a 1,0% ▪ Repetibilidad: 0,1 a 0,2% ▪ Rangeabilidad: 25:1 	<ul style="list-style-type: none"> - Dispositivos sin partes móviles en la zona de incidencia directa con el paso del fluido, lo que implica mayor vida útil. - Se pueden instalar en cualquier tipo de tubería.



VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<p>aquellos modelos que por recomendaciones del fabricante limitan su uso para estas condiciones, que depende de las propiedades del material y otras características particulares del equipo.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dispositivos disponibles y preparados para soportar durante su operación o funcionamiento temperaturas y presiones máximas de 400 °C. y 3,500 PSI, respectivamente. - Empleados en líquidos conductivos y no conductivos. 		<ul style="list-style-type: none"> - Equipos de alta precisión y moderada repetibilidad, comparados con otras tecnologías. - Presentan un buen comportamiento lineal y alta estabilidad a largo plazo. - Ofrecen pérdidas muy bajas alrededor de $2xv^2/2g$, comparadas con otras tecnologías. - Con normas estándares de ámbito mundial y para líquidos (ISO/TR 12764, ASME MFC-6M, OIML D25). 	<ul style="list-style-type: none"> - Su instalación es sencilla, lo que implica bajos costos de instalación.

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.

Tabla 11. Desventajas de los equipos vortex

DESVENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - El fluido que se mide debe ser de una sola fase, si es líquido no debe contener mezcla de gases o sólidos. - Son dispositivos incapaces de tomar medidas de caudal en condiciones no presurizadas o si la tubería no está totalmente llena. - Las mediciones de caudal con número de Reynold inferiores a 5,000 en la práctica es poco significativa o simplemente imposible. - Equipos con un campo de aplicación limitado por su requerimiento de operar sólo sobre fluidos turbulentos. - No sirven para operar sobre flujos altamente viscosos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere de condiciones físicas adicionales a la entrada y salida del equipo, con tramos rectos y libres de accesorios, 25 veces el diámetro nominal a la entrada y de 5 veces a la salida. - La presencia de válvulas parcialmente abiertas a una distancia inferior a 50 veces el diámetro nominal corriente aguas arriba del equipo de medición puede generar errores inaceptables. - Existen limitaciones en su orientación el no disponer el equipo sobre puntos bajos o altos en la red o en descensos verticales. - Aplicables únicamente para la medición en un único sentido. - Moderada disponibilidad en diámetros nominales de ½" a 18" a petición del cliente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Durante la operación se debe garantizar que el cuerpo del equipo esté libre de sólidos, ya que su acumulación cambia la geometría de los componentes como del parámetro k, lo que provoca errores en la medición. - Equipos con un campo de aplicación moderado por su máxima rangeabilidad, comparado con las otras tecnologías. - Si el fluido tiene sólidos es necesario un filtro corriente aguas arriba, lo que implica pérdidas de presión. - Las mediciones del caudal a velocidades superiores de 9 m/s provocan errores debido a la cavitación. 	<ul style="list-style-type: none"> - El costo del equipo depende del tamaño del conducto donde se instale, excluyendo la instalación por inserción, el cual baja los costos. - Es necesario cortar la tubería para su instalación. - Los pivotes pueden sufrir desgaste por la abrasión del fluido, lo que puede reducir su vida útil.

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.



3.1.1.6 Equipos electromagnéticos

El funcionamiento de un equipo electromagnético se basa en la ley de Faraday, enunciada en el año de 1832 por el físico inglés Michael Faraday, donde se percató que al mover una barra metálica conductora de longitud (L) con velocidad (V) en el seno de un campo magnético (B), se induce una corriente eléctrica que genera entre los dos extremos de la barra una tensión (U_e) de algunos mili/voltios. De esta forma, Faraday descubrió también que la magnitud de la tensión inducida de este modo es proporcional a la velocidad (v) de movimiento del conductor y a la intensidad (B) del campo magnético que atraviesa, atendiendo a la siguiente expresión:

$$U_e = B \cdot L \cdot v$$

Donde: U_e = tensión inducida
 B = intensidad del campo magnético
 L = longitud del conductor eléctrico, correspondiente a la distancia entre los electrodos en el tubo de medición
 v = velocidad de movimiento del conductor, correspondiente a la velocidad del flujo en el tubo de medición

Con la fórmula anterior es posible estimar el caudal volumétrico que circula por una tubería de sección transversal conocida (A), un campo magnético de intensidad constante (B) y una velocidad del fluido (v), que es directamente proporcional a la tensión de medición inducida (U_e), resultando la siguiente expresión:

$$Q = v \cdot A = \frac{U_e}{B \cdot L} \cdot A$$

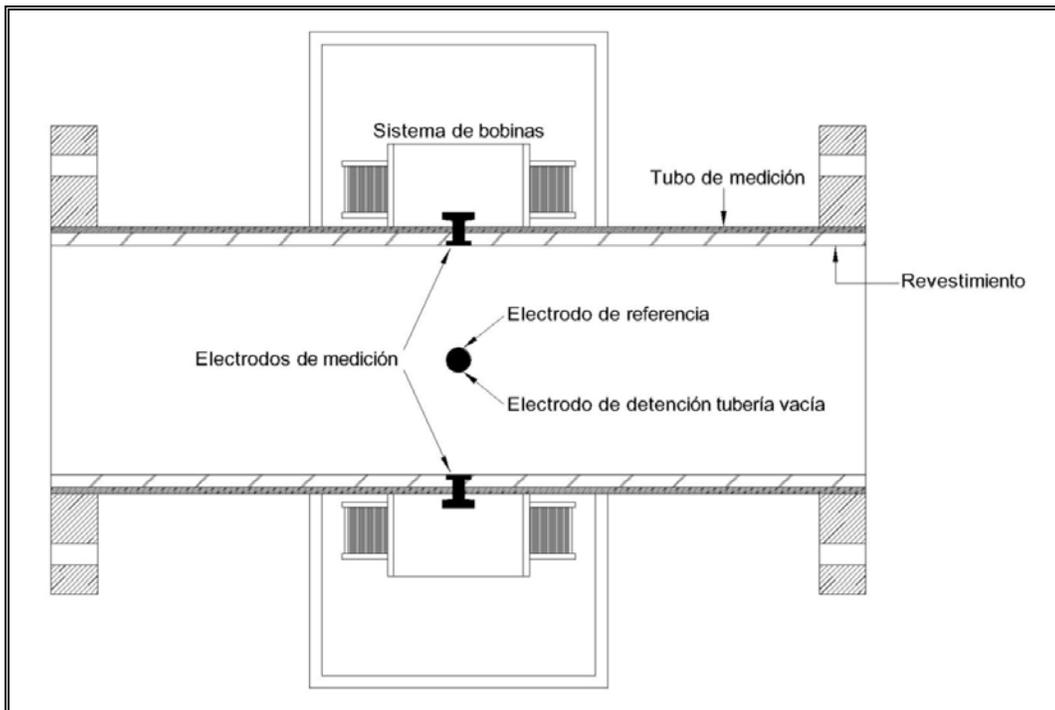
El equipo electromagnético está formado por un tubo, revestido interiormente con un material aislante. Sobre dos puntos directamente opuestos de la superficie interna se colocan dos electrodos metálicos, entre los cuales se genera la señal eléctrica de medida. En la parte externa se colocan los dispositivos para generar el campo magnético (bobinas) y se cubre.

En la Figura 16 se aprecia el diseño y constitución típica de un equipo electromagnético.

Algunos fabricantes ofrecen algunos tipos de electrodos especiales, como el de referencia o tierra para unión equipotencial entre el caudalímetro y el fluido, o el electrodo de tubería vacía para detectar si el tubo de medición está vacío o parcialmente lleno.

Una gran ventaja de estos dispositivos es que son insensibles a la presión, la temperatura y la viscosidad, donde el perfil de velocidad del flujo tiene un efecto mínimo sobre los resultados de la medición.

Figura 16. Sección transversal típica de un equipo electromagnético



Fuente: Altendorf, Matthias & otros, 2005.

Ventajas y desventajas

A continuación se describen las principales ventajas y desventajas de los equipos electromagnéticos. Esta información corresponde a las características y valores típicos del mercado.

Tabla 12. Ventajas de los equipos electromagnéticos

VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - Aptos para la medición de líquidos. - Se pueden obtener buenos resultados para caudales bifásicos que transportan líquido más burbujas de aire, siempre y cuando el gas no supere el 5% en volumen. - Permiten la medición en medios de comunicación con alto contenido de sólidos (por ejemplo, lodos), con mínimo riesgo de abrasión, dependiendo únicamente del tipo de 	<ul style="list-style-type: none"> - Se pueden instalar en cualquier posición (horizontal, vertical o inclinada), aunque existen algunas limitaciones en su orientación. - Son bidireccionales, capaces de medir el flujo en ambas direcciones. - Amplia disponibilidad en diámetros nominales de 0,04" a 120". 	<p>Sus valores típicos son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisión: $\pm 0,2$ a 1% ▪ Repetibilidad: 0,1 a 0,2% ▪ Rangeabilidad: >100:1 <ul style="list-style-type: none"> - Equipos de alta precisión y moderada repetibilidad, comparados con otras tecnologías. - Presentan un buen comportamiento lineal y alta estabilidad a largo plazo. - Tecnología con la mejor 	<ul style="list-style-type: none"> - Dispositivos sin partes móviles, lo que implica mayor vida útil. - El tamaño del equipo suele ser el mismo que el diámetro nominal de la tubería; por lo tanto, no requiere estrangulamiento en la sección transversal de la tubería. - Se pueden instalar en cualquier tipo de tubería. - Su instalación es sencilla, lo que implica bajos costos. - De bajo gasto en mantenimiento y



VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<p>material de revestimiento del sensor.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tienen una aplicación sobre sedimentos fangosos (lodos) con bajo contenido acuoso, de hasta un 25% en volumen. - Son dispositivos diseñados para trabajar en condiciones presurizadas, pero existen algunos modelos que podrían operar sobre una tubería parcialmente vacía pero lo suficientemente llena, donde los electrodos de medición puedan estar siempre en contacto con el fluido y donde el error de medición sea proporcional al contenido del aire. - Los cambios de temperatura, presión y viscosidad no implican límites en su operación o funcionamiento, sólo en aquellos modelos que por recomendación del fabricante limitan su uso para estas condiciones, que dependen de las propiedades del material de revestimiento y otras características particulares del equipo. - Dispositivos disponibles y preparados para soportar durante su operación o funcionamiento temperaturas y presiones máximas de 250 °C. y 2,000 PSI, respectivamente. - Dispersivos que pueden operar para números de Reynolds bajos comparado con las otras tecnologías. 		<p>rangeabilidad del mercado.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Equipos con un campo de aplicación muy amplio por su rangeabilidad de más de 100:1). - No experimentan caída de pérdidas adicional, es muy cercana a cero. - Con normas estándares de ámbito mundial y para líquidos (ISO 6817 – 9104 - 13359, ASME MFC-16M). 	<p>renovación.</p>

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.

Tabla 13. Desventajas de los equipos electromagnéticos

DESVENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - Las mediciones de caudal con números de Reynolds inferiores a 2,000 en la práctica es poco significativa o simplemente imposible. - Equipos con un campo de 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren condiciones físicas adicionales a la entrada y salida del equipo con tramos rectos y libres de accesorios, 10 veces el diámetro nominal a la entrada y 5 veces a la 	<ul style="list-style-type: none"> - Se pueden producir problemas de medición (errores de medición, inestable lecturas) por debajo del mínimo especificado en los niveles de conductividad (Según 	<ul style="list-style-type: none"> - El costo del equipo depende del tamaño del conducto donde se instale. - Es necesario cortar la tubería para su instalación.



DESVENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
aplicación limitado por su requerimiento de operar sólo sobre fluidos turbulentos. - Sólo sirven para operar sobre líquidos conductores. El líquido medido debe tener un mínimo de conductividad eléctrica entre un rango de 0,05 a 50 $\mu\text{S/cm}$.	salida. - La presencia de válvulas parcialmente abiertas a una distancia inferior a 50 veces el diámetro nominal corriente aguas arriba del equipo de medición puede generar errores inaceptables. - Existen limitaciones en su orientación en no disponer el equipo sobre puntos bajos o altos en la red o en descensos verticales.	los fabricantes, en sus detalles este nivel mínimo de conductividad debe estar comprendido entre los 0,05 a 50 microsiemens/cm ($\mu\text{S/cm}$), dependiendo de la versión y del líquido). Para niveles altos de conductividad no se afectan las mediciones producto de los equipo de medición electromagnéticos. - Durante la operación se debe garantizar que los electrodos estén libres de deposiciones de sólidos, ya que su acumulación puede provocar errores en la medición.	

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.

3.1.1.7 Equipos ultrasónicos

Un equipo que mide la velocidad del caudal por medio de ultrasonidos la puede realizar por los siguientes métodos:

- Método efecto Doppler.
- Método por tiempo de tránsito.

El método efecto Doppler se basa en el resultado que se produce cuando un frente de onda se refleja en un objeto en movimiento, es un incremento o disminución de la frecuencia de las ondas sonoras a medida que la distancia entre una fuente sonora y su receptor aumenta o disminuye.

Con base en lo anterior, para que un equipo de medición ultrasónico que utiliza el método efecto Doppler funcione el líquido debe contener partículas, burbujas de gas u otras sustancias homogéneas similares que reflejen las ondas de sonido; además, requiere dos sensores, donde el primero emite por el fluido una onda de ultrasonido a una frecuencia determinada y el segundo recibe la onda reflejada.

Para estos equipos la variación producida en la frecuencia del haz de onda sonora reflejada es directamente proporcional a la velocidad de las partículas o burbujas del fluido en movimiento, asumiendo que es la misma velocidad del fluido. Por lo tanto, el cálculo del caudal es resultado de la siguiente expresión:

$$Q = K \cdot \Delta f, \quad \Delta f = f_1 - f_2$$

Donde: Q= caudal volumétrico



Δf = variación de la frecuencia

K = contante que depende del ángulo de incidencia/refracción, posición de la partícula reflejada, sección transversal

Los equipos ultrasónicos que utilizan el efecto Doppler emplean sensores de fijación externa, donde las ondas sonoras pueden atravesar el material de la tubería.

El método por tiempo de tránsito se basa en el hecho de que la velocidad del fluido influye directamente en la velocidad de propagación de las ondas sonoras en dicho fluido. Para describir el principio de operación de los sensores de flujo por tiempo de tránsito usaremos una descripción simple.

Una canoa en posición diagonal requiere menos tiempo para cruzar el río si viaja en el sentido de flujo de la corriente, que si viaja en el sentido contrario a la corriente. Por lo cual resulta más rápido cruzar el río en el sentido de la corriente que en contra de él. Por lo tanto, la diferencia entre el tiempo de tránsito en el sentido y en contra de la corriente depende directamente de la velocidad de flujo del río.

Este efecto se exporta a los medidores de caudal ultrasónico para determinar la velocidad y la rata de flujo. Conversores electroacústicos (sensores) emiten y reciben pulsos cortos, los cuales fluyen dentro del tubo a través del producto. Los sensores se encuentran en dirección longitudinal y se ubican de manera diagonal a cada lado de la tubería. Posteriormente, un convertidor de señal, que opera los sensores por medio de pulsos y evalúa las señales recibidas, es el encargado de garantizar una resolución alta, la cual está ligada al método que use cada fabricante para este propósito.

Cuando un caudal es cero, ambos sensores instalados en la tubería reciben las ondas sonoras transmitidas al mismo tiempo, esto quiere decir que no se presenta ningún retardo en los tiempos de transito de la señal, pero cuando hay fluido en circulación las ondas sonoras transmiten en diferentes tiempos, sabiendo que la diferencia en los tiempos de tránsito de la señal es directamente proporcional a la velocidad del fluido y conociendo, además, la distancia entre los sensores es posible estimar el caudal. Por lo tanto, el cálculo del caudal es resultado de la siguiente expresión:

$$Q = K \cdot \frac{t_1 - t_2}{t_1 \cdot t_2}$$

Donde: Q = caudal volumétrico

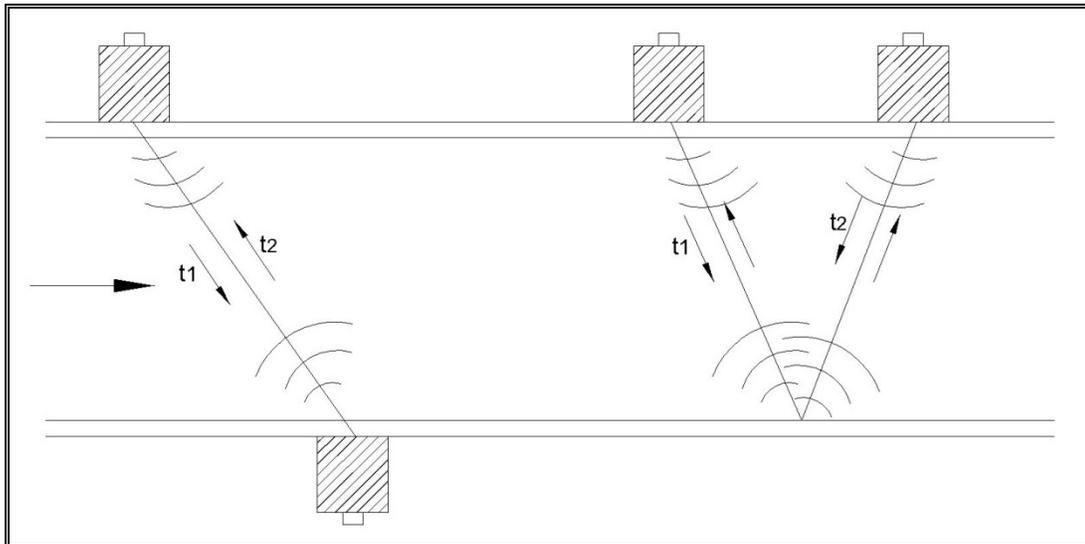
t_1 = tiempo de tránsito de la señal (en el sentido de la corriente)

t_2 = tiempo de tránsito de la señal (contra la corriente)

K = contante que será función de la longitud del camino acústico, razón entra las distancias radiales y axiales de los sensores, distribución de velocidades, sección transversal de la tubería

En la Figura 17 se aprecia esquemáticamente el funcionamiento de un equipo ultrasónico a partir del tiempo de tránsito.

Figura 17. Funcionamiento de un equipo ultrasónico a partir del tiempo de tránsito



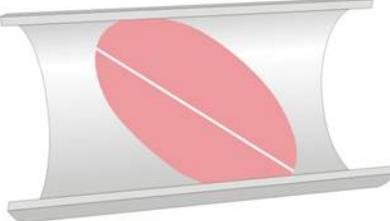
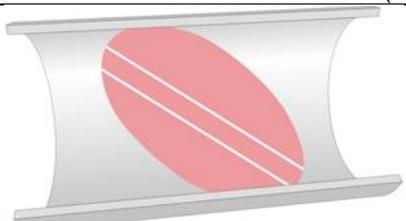
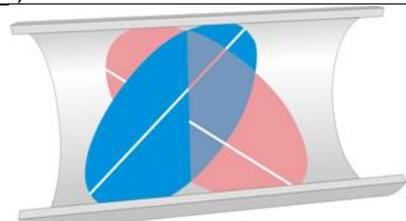
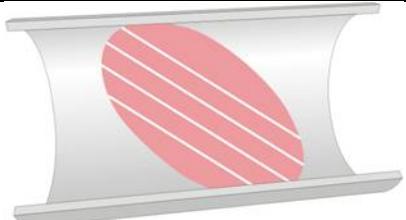
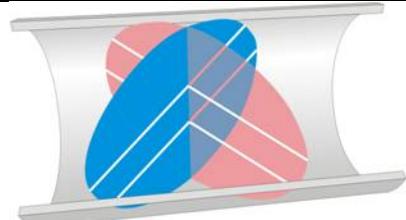
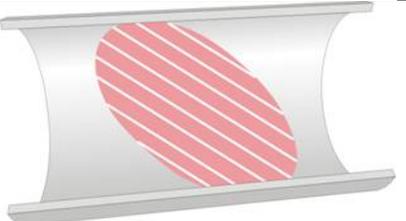
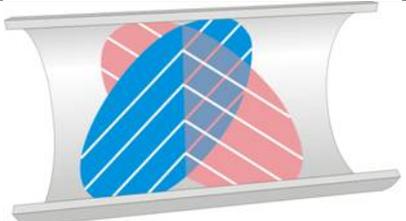
Fuente: Altendorf, Matthias & otros, 2005.

Los equipos ultrasónicos que utilizan el método por tiempo de tránsito emplean sensores de inspección, los cuales se hallan en contacto directo con el fluido. Estos sensores de inserción se utilizan también cuando el material de la tubería impide el paso de las ondas ultrasonoras, como es el caso de una tubería en hormigón. También se emplean las sondas de inspección en la conformación de un equipo ultrasónico de múltiples caminos, que actualmente se utiliza mucho debido a que permite realizar la evaluación de la velocidad en diferentes trayectorias, de acuerdo con el número de caminos (cada camino corresponde a un par de sensores de inserción), de esta manera se reconstruye el perfil de velocidad y se compensan las imperfecciones en el perfil de velocidad, que afectan directamente el número de Reynolds, tal como la rugosidad en la tubería, insuficiente distancia aguas arriba y abajo del medidor, accesorios como codos, válvulas, uniones a distancias menores que las ideales, que finalmente alteran el perfil de velocidad y adicionan error en las mediciones de caudal.

El método de tiempo de tránsito de múltiples caminos cuenta con la norma internacional (IEC 41), que regula la posición de los sensores, el peso de cada trayectoria dentro del cálculo de la velocidad media, lo cual permite que los profesionales en el campo de la medición de caudal cuenten con una tecnología que brinda respuesta a eternos interrogantes sobre incertidumbre, confiabilidad y precisión cuando se realizan mediciones de caudal. De acuerdo con estudios de diferentes centros de investigación en hidráulica y universidades en Europa y Estados Unidos, se han establecido las precisiones esperadas utilizando la

tecnología de equipos ultrasónicos de múltiples caminos cumpliendo con la regulación de la norma IEC 41 (Tabla 14).

Tabla 14. Precisión de los equipos ultrasónicos de múltiples caminos

NÚMERO DE CAMINOS	DIAGRAMA DE POSIBLES CONFIGURACIONES DE INSTALACIÓN	LÍMITE DE ERROR (SENSORES INSTALADOS)
1 camino	 (1E1P)	$\pm 3 - 5 \%$
2 caminos	  (1E2P) (2E2P)	$\pm 2 - 4 \%$
4 caminos	  (1E4P) (2E4P)	$\pm 1 - 2 \%$
8 caminos	  (1E8P) (2E8P)	$\pm 0,5 - 1 \%$

Fuente: Biosciences Ltda, 2009.

Ventajas y desventajas

A continuación se describen las principales ventajas y desventajas de los equipos ultrasónicos. Esta información corresponde a las características y valores típicos del mercado.



Tabla 15. Ventajas de los equipos ultrasónicos

VENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - Aptos para la medición de líquidos y gases. Y se incluye el vapor para los dispositivos de ultrasonido de tiempo de tránsito. - Los dispositivos ultrasónicos que utilizan el método efecto Doppler son adecuados para fluidos con presencia de gas o sólidos en contenidos superiores al 1% en volumen. - Los cambios de temperatura y presión no implican límites en su operación o funcionamiento, sólo en aquellos modelos que por recomendaciones del fabricante limitan su uso para estas condiciones, que dependen de las propiedades del material y otras características particulares del equipo. - Dispositivos disponibles y preparados para soportar durante su operación o funcionamiento temperaturas y presiones máximas de 200 °C y 2,900 PSI respectivamente. Empleados en líquidos conductivos y no conductivos. - Permite la medición en medios muy corrosivos sin que haya contacto directo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se pueden instalar en cualquier posición (horizontal, vertical o inclinada), aunque existen algunas limitaciones en su orientación. - Son bidireccionales, capaces de medir el flujo en ambas direcciones. - Amplia disponibilidad en diámetros nominales, equipo ultrasónico doppler > 0,2" y equipo ultrasónico de tiempo de tránsito > 0,08". 	<p>Para el dispositivo Ultrasónico Doppler los valores típicos son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisión: 1 a 2% ▪ Repetibilidad: 0,5% ▪ Rangeabilidad: >20:1 <p>Para el dispositivo Ultrasónico de Tiempo de Tránsito los valores típicos son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisión: ± 0,5 a 5% ▪ Repetibilidad: 0,25% ▪ Rangeabilidad: >20:1 <ul style="list-style-type: none"> - Algunos equipos pueden generar alta precisión, comparados con otras tecnologías (Ultrasónico de tiempo de tránsito con múltiples caminos). - Los dispositivos ultrasónicos tiempo de tránsito son empleados para mediciones de exactitud con fluidos limpios, mientras que los dispositivos de efecto Doppler se emplean para estimaciones de velocidades y mediciones de caudal. - Equipos con un campo de aplicación muy amplio por su rangeabilidad, el cual puede superar los 20:1. - No experimentan caída de pérdidas adicional, muy cercana a cero. - Con normas estándares de ámbito mundial y para líquidos (IEC 41, ISO/TR 12765). - Los dispositivos ultrasónicos de sondas externas son empleados como contadores secundarios por su fácil operatividad en terreno para mantenimientos y verificaciones metrológicas en el sitio de instalación del equipo principal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dispositivos sin partes móviles, lo que implica mayor vida útil. - Su costo es casi independiente del tamaño del conducto donde se instale. - En diámetros grandes se considera como la tecnología más económica en el suministro e instalación. - Son muy fáciles de transportar. - Su instalación es sencilla, lo que implica bajos costo. - Los sensores se pueden instalar a posteriori, tanto los de fijación externa como los intrusivos. - Reducción de costos en tuberías de gran diámetro con la utilización de tecnología con inserción. - No es necesario cortar la tubería para su instalación. - Dispositivos con alta esperanza de vida útil. - Se pueden instalar sin la interrupción del servicio, con la fijación de sondas externas.

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.



Tabla 16. Desventajas de los equipos ultrasónicos

DESVENTAJAS			
SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	SOBRE SU LOCALIZACIÓN	SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ECONÓMICAS
<ul style="list-style-type: none"> - La presencia de sólidos y gases es necesaria en 1% del volumen para los dispositivos del método efecto Doppler. - La presencia de sólidos y gases atenúa la señal de ultrasonidos con el método de tiempo de tránsito. A partir del 1% en volumen de contenido de sólidos y gases la medición se vuelve problemática y a partir del 2% en volumen la medición es prácticamente imposible. - Durante la operación se debe garantizar que tanto la tubería como los sensores estén libres de deposiciones de sólidos, ya que su acumulación puede provocar errores en la medición. - Se debe garantizar que la tubería esté totalmente llena, si no se debe medir el nivel de agua por algún método para calcular el caudal mientras que el método de tiempo de tránsito de la señal nos proporciona la velocidad del fluido. - Las mediciones de caudal efectuadas con dispositivos de ultrasonido Doppler con número de Reynolds inferiores a 5,000 en la práctica es poco significativa o simplemente imposible. - Las mediciones de caudal efectuadas con dispositivos de ultrasonido de tiempo de tránsito con número de Reynolds inferiores a 10,000 en la práctica es poco significativa o simplemente imposible. - Equipos con un campo de aplicación limitado por su requerimiento de operar sólo sobre fluidos turbulentos. - Son altamente dependientes del perfil de velocidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren condiciones físicas adicionales a la entrada y salida del equipo con tramos rectos y libres de accesorios, 20 veces el diámetro nominal a la entrada y 5 veces a la salida para los dispositivos ultrasónicos Doppler y 15 veces el diámetro nominal a la entrada y 5 veces a la salida para los dispositivos ultrasónicos de tiempo de tránsito. - La presencia de válvulas parcialmente abiertas a una distancia inferior a 50 veces el diámetro nominal corriente aguas arriba del equipo de medición puede generar errores inaceptables. - Existen limitaciones en su orientación al no disponer el equipo sobre puntos bajos o altos en la red o en descensos verticales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los fluidos bifásicos con alto contenido de partículas sólidas en suspensión pueden atenuar significativamente las ondas de ultrasonido y, por ende, la precisión en la medición. - Equipos que presentan una repetibilidad baja a moderada, comparado con las otras tecnologías. 	<ul style="list-style-type: none"> - En la instalación de equipos de fijación externa se debe garantizar que la señal pase el material de la tubería, conociendo necesariamente el grosor de la tubería y material de recubrimiento.

Fuente: tomado de los catálogos de los fabricantes de equipos de medición.



4. IMPLEMENTACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN

La implementación de la macromedición en un sistema de acueducto urbano comprende la ejecución de diseños, obras civiles y suministro e instalación de los equipos, que consecuentemente genera para el operador actividades de operación y control sobre el sistema implementado.

Este capítulo hace referencia a los requisitos técnicos y las recomendaciones en la implementación de la macromedición sobre un sistema de acueducto urbano.

4.1 DISEÑO DE LA SECTORIZACIÓN Y UN SISTEMA DE MACROMEDICIÓN

El diseño de un sistema de macromedición en un sistema de acueducto urbano empieza con la finalización de un diseño o concepción de una sectorización, que define la localización de la tubería sobre la cual se debe instalar el equipo y el área aferente que se va a medir o la unidad de distribución. Es por ello que en los siguientes apartados amplía el concepto de diseño de la sectorización, pues la culminación de este es prerrequisito para la implementación de la macromedición.

4.1.1 La sectorización

La importancia de una buena configuración topológica de las redes de un sistema de acueducto radica en la optimización y control de la operación del servicio. Esto se logra con la implementación de la sectorización, que es la segmentación, parcelación, delimitación o división del área de servicio de un sistema de acueducto en unidades de distribución homogéneas, aisladas e independientes, útiles para macromedir volúmenes suministrados, optimizar las condiciones de servicio, calcular el índice de agua no contabilizada (IANC), formular proyectos de control de pérdidas y establecer sus causas. Sus divisiones se conocen como zona, sector, subsector, distrito, circuito, subcuenca, cuenca o microcuenca, entre otras (Jiménez, 2003).

La operación de redes de acueducto no es una labor complicada cuando el tamaño o nivel de complejidad de los sistemas de acueducto es pequeño. Sin embargo, a medida que la dimensión del sistema de acueducto crece, comienzan a presentarse dificultades, ya que con el aumento del tamaño se presenta un incremento en su complejidad. Una solución a este tipo de problemas es dividir la red en unidades de distribución, simplificando la operación. Obrar de esta manera tiene la ventaja adicional de medir presiones, parámetros de calidad de agua y el consumo en el sistema por unidad de distribución, lo cual permite cuantificar presiones de servicio, indicadores de calidad de agua y demandas con la estimación de sus pérdidas, lo que se convierte en un apoyo invaluable para la optimización y control, tanto comercial como técnico de un sistema de acueducto urbano.



4.1.1.1 Catastro de redes y la sectorización

En la operación de sistemas y redes de acueducto es de suma importancia tener un buen conocimiento físico de la infraestructura que se desea manejar. Este conocimiento permite tomar decisiones importantes, tanto técnicas como económicas, respaldado por un marco de seguridad y de certeza en cuanto a su idoneidad. En el caso de redes de acueducto es importante contar con un conocimiento profundo de los elementos que las componen, como las tuberías (diámetro, material, alineamiento, antigüedad, profundidad, etc.) y los accesorios (válvulas, conexiones en T, conexiones en Y, tapones, hidrantes, etc.). Cuando esta información se encuentra en planos, se dice que se cuenta con un catastro de redes de acueducto. Para realizar el planteamiento de una sectorización es absolutamente indispensable tener un buen catastro de redes sobre el cual planear los cierres y definir las alimentaciones de cada sector, así como los puntos de macromedición, válvulas de purgas, ventosas, hidrantes y demás elementos hidráulicos complementarios necesarios para el buen funcionamiento del sistema.

4.1.1.2 La modelación hidráulica y la sectorización

Barreto (2002) refiere que aún teniendo el catastro de redes del sistema de acueducto no es nada fácil la toma de decisiones de tipo técnico, como puede ser el planteamiento de un esquema de sectorización que implica instalación de válvulas, construcción de nuevas redes matrices o secundarias, cierre de tuberías, aislamiento de unidades de distribución, construcción de nuevos empalmes y by-passes, entre otras actividades. Esto ocurre debido a la incertidumbre sobre la forma cómo un cambio en un punto puede afectar el funcionamiento de toda la red. Afortunadamente la tecnología informática, con el desarrollo de software, da solución a este problema, permitiendo la construcción de modelos hidráulicos, que no es más que una representación matemática de la realidad que permite predecir su comportamiento.

Un modelo de simulación de redes es una herramienta informática aplicable en la solución de problemas hidráulicos en tuberías, accesorios y demás componentes de un sistema de acueducto, tales como bombas, tanques, válvulas, reservorios, etc. Es una representación matemática de la realidad y funciona con las mismas leyes físicas que rigen a ésta, por lo que sus resultados son similares a los que ocurren materialmente.

Realizando modelación hidráulica de redes de tuberías es posible calcular con excelente precisión las presiones, caudales, velocidades, pérdidas hidráulicas, cloro residual, etc., que se presentan en una red real. Cualquier modificación que se desee realizar sobre la red se puede ensayar previamente sobre el modelo hidráulico para predecir lo que sucederá en la realidad. De este modo, un modelo hidráulico se convierte en una herramienta de apoyo invaluable, que permite tomar decisiones operativas, constructivas y de mantenimiento en forma rápida y acertada.



Es importante aclarar que un modelo hidráulico no resuelve el problema, ya que quien da las soluciones es el ingeniero que lo manipula. El modelo permite determinar cuál de las posibles soluciones planteadas para un problema dará el mejor resultado desde el punto de vista hidráulico. También es una importante herramienta de apoyo en la toma de decisiones de tipo económico.

La implementación de un modelo de simulación hidráulica en una red de acueducto tiene aplicaciones en los siguientes escenarios:

- Análisis de operación de redes existentes.
- Diseño de sectorización
- Diseño de futuras redes.
- Evaluación de funcionamiento en condiciones de contingencia.

Siendo un modelo hidráulico una representación de la realidad, sus datos de entrada deben ser las características que describen cada uno de los elementos de una red. Los datos de entrada requeridos para la realización de un modelo hidráulico son:

- Datos físicos de los elementos:
 - Tubería: diámetro, material y rugosidad.
 - Bombas: curvas características.
 - Tanques: volúmenes de almacenamiento, niveles de operación.
 - Válvulas: diámetro y operación (abierta, cerrada, calibrada).
- Datos topográficos de los elementos puntuales (nodos, tanques, válvulas, etc.):
 - Cota.
 - Coordenadas.
- Datos operativos:
 - Escenarios de consumo (curvas de presión y de caudal).
 - Controles de bombas y válvulas.

La información de salida o presentación de resultados del modelo utiliza una interface gráfica del software, que a su vez facilita la interpretación de resultados numéricos que se pueden visualizar a través de tablas de resultados, curvas y gráficas esquemáticas, tanto generales del sistema como individuales de cada uno de los elementos que lo constituyen.



4.1.1.3 Diseño de la sectorización

Generalmente, un modelo hidráulico calibrado de la red de distribución del sistema de acueducto que represente satisfactoriamente la situación actual, se emplea como base para el diseño y análisis de una sectorización.

Jiménez (2003) refiere que en el diseño de la sectorización, segmentación, parcelación, delimitación o división de las áreas de servicio de un sistema de acueducto en unidades de distribución homogéneas, aisladas e independientes, en lo posible se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las unidades de distribución se deben conformar de acuerdo con las condiciones topográficas similares por unidad de distribución.
- Las unidades de distribución se deben conformar de acuerdo con condiciones topológicas existentes en el sistema de redes de distribución y ante la menor instalación o proyección de válvulas de cierre permanente y menor número de salidas y entradas por unidad de distribución.
- En lo posible, las unidades de distribución se deben conformar con límites o trazos rectos que conformen áreas de forma regular, sin proyectar líneas imaginarias e irregulares de difícil materialización.
- Las unidades de distribución se deben adecuar, en lo posible, a límites que respeten los accidentes geográficos, tales como ríos y cambios topográficos importantes y a construcciones relevantes como avenidas principales, vías férreas, entre otros.
- Las unidades de distribución se deben conformar respetando, en lo posible, los límites de operación de servicio.
- En la construcción de los límites de las unidades de distribución debe evitarse el cierre de válvulas en tuberías definidas como red matriz.
- Los límites de las unidades de distribución se deben ajustar respetando los accidentes topográficos en la inclusión de áreas de desarrollo o proyección futura urbanística.

Con el fin de concebir una sectorización hidráulica las variantes o alternativas al modelo hidráulico en el sistema de redes matrices de acueducto, deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Las redes matrices o primarias que hacen parte de la red de distribución y conforman la malla principal de servicio de transporte de agua tratada a los usuarios del sistema de acueducto, ya que su función principal es mantener las presiones básicas de servicio para el correcto funcionamiento de todo el sistema



de acueducto, las cuales generalmente son líneas expresas que no reparten agua durante su recorrido.

- Líneas de refuerzo que a juicio del ingeniero hidráulico diseñador garanticen para las unidades hidráulicas la demanda y presión de servicio requeridas.
- Los replanteos necesarios a las unidades de distribución que garantice la demanda de acuerdo con la nueva configuración del sistema de acueducto.
- Los elementos hidráulicos complementarios, tales como puntos de macromedición, válvulas de purgas, válvulas ventosas, válvulas reductoras de presión, válvulas sostenedoras de presión e hidrantes requeridos para el buen funcionamiento del sistema con la nueva configuración del sistema de acueducto.

4.1.2 Diseño de un sistema de macromedición

En el diseño de un sistema de macromedición es necesario identificar, en primera instancia, la ubicación exacta o más probable del punto de medición sobre la tubería delimitada por la sectorización, que puede sufrir modificaciones con la elección de la tecnología en su Fase 2 (véase Capítulo 6. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS DE MACROMEDICIÓN).

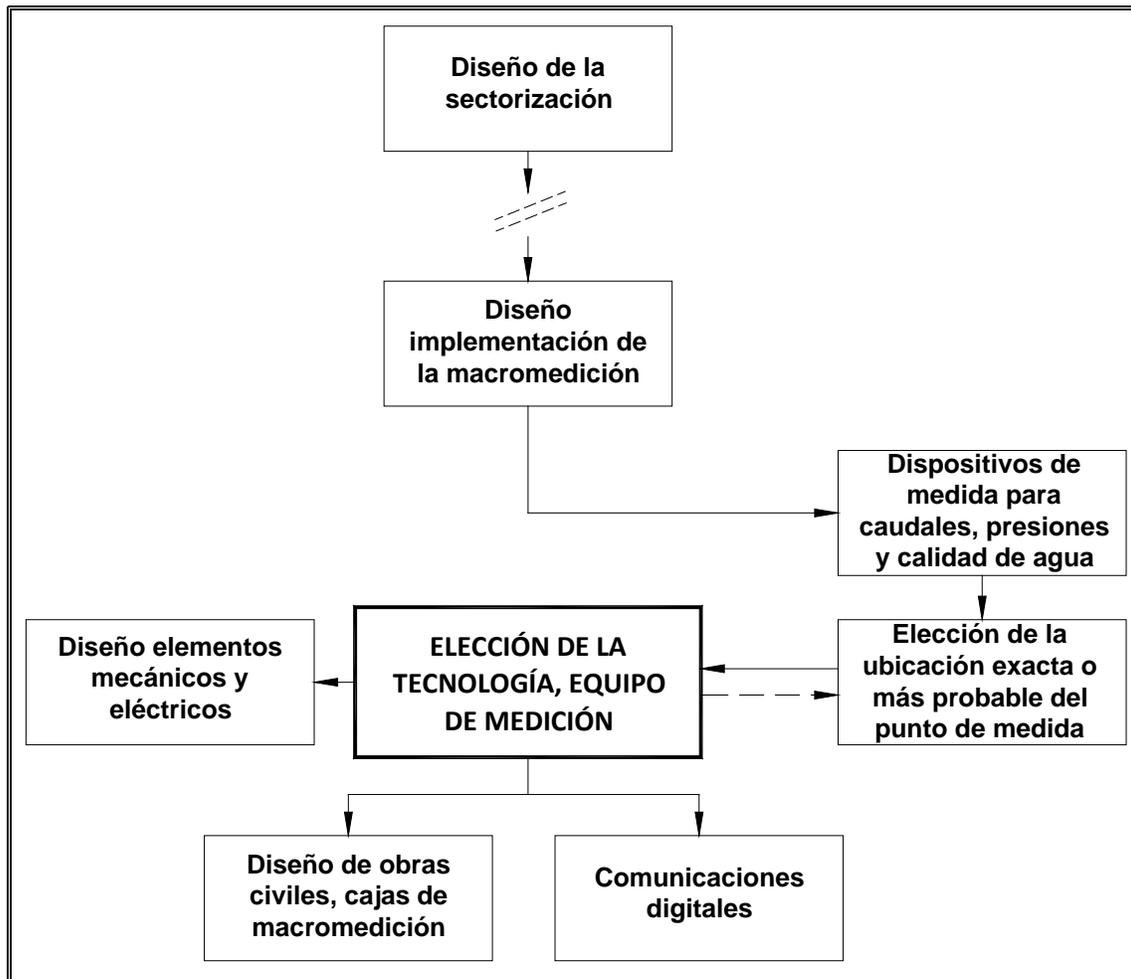
Con la primera elección de la ubicación del punto de medida se procede a la selección de la tecnología del equipo de macromedición, evaluando varios puntos de vista, como propiedades del fluido que se va a medir, localización del punto de medida, especificaciones técnicas del dispositivo de medida y criterios económicos, siguiendo la metodología que se describe este documento (Capítulo 6. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS DE MACROMEDICIÓN).

Definida la ubicación exacta y seleccionada la tecnología del equipo de macromedición se procede con el diseño de las obras civiles de la caja de macromedición y demás elementos eléctricos y mecánicos, incluyendo el sistema de comunicación o control en la emisión y recepción de datos, según aplique para cada caso en particular.

El Flujograma 4 explica el proceso descrito en la realización de un diseño de un sistema de macromedición (véase también Flujograma 1).

Conociendo la secuencia lógica del diseño de un sistema de macromedición, a continuación se presentan las recomendaciones particulares en el desarrollo del diseño, las obras civiles y los elementos mecánicos y eléctricos.

Flujograma 4. Diseño de un sistema de macromedición



Fuente: autor.

4.1.3 Consideraciones a los diseños

Para diseñar la infraestructura, los elementos mecánicos y eléctricos del sistema de macromedición se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones, para mitigar dificultades durante las actividades de construcción y disminuir los efectos negativos durante la operación y control.

- A través de una investigación en campo y la realización de un levantamiento topográfico y catastro, el diseñador debe elaborar una ficha con el detalle del sitio de implantación del punto de macromedición, con el objeto de ubicar correctamente en el sitio la infraestructura que se proyecte, verificando el diámetro de la tubería y el material en el cual se debe instalar el equipo, antecedido los requerimientos técnicos del fabricante, como distancia libre de accesorios aguas arriba y aguas abajo (libres de codos, tees, reducciones, ampliaciones, válvulas, bombas), orientación del equipo, dirección del flujo, entre



otros (véase Capítulo 3. TECNOLOGÍAS EN EQUIPOS DE MEDICIÓN EN TUBERÍAS CERRADAS Y A PRESIÓN), proyección de la acometida eléctrica en la estimación de distancias de la fuente eléctrica más cercana y en la concepción de diseños adicionales al sistema de macromedición por la intervención de otras redes existentes o infraestructura que cause interferencia.

- El diseñador debe verificar y validar la unidad de distribución (zona, sector, subsector, distrito, circuito, subcuenca, cuenca o microcuenca) sobre la cual diseña el sistema de macromedición, garantizando medir un área de servicio debidamente delimitada con válvulas de cierre permanente (VCP) o tapones y puntos de alimentación o entradas y salida(s).

La verificación y validación de una unidad de distribución se realiza, con la consulta del modelo hidráulico matemático que esquematiza la sectorización y ejecución de pruebas de aseguramiento (véase numeral 5.2. ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN), que garantiza las condiciones de estanqueidad, aislamiento e identificación de los puntos de entrada y salida del área de servicio, de tal manera que no se presenten alimentaciones o salidas imprevistas.

- El diseñador debe realizar campañas de medición en el sitio seleccionado para la implementación de los equipos de macromedición, con el objeto de verificar las condiciones del flujo y de la medida y garantizar que el punto de implantación del equipo sea fiable.

Las campañas de medición de caudal se pueden hacer con equipos de medición portátil, que emplean sensores de fijación externa y no afectan la integridad estructural de la tubería.

Las campañas deben tener una vigencia continua de registro y almacenamiento de datos mínimo de 24 horas por punto de medición.

Con la ejecución de esta actividad el diseñador debe concluir lo siguiente:

- Validación de la localización del punto de medida, con el cumplimiento de las condiciones técnicas que exige el equipo de medición y expuestas por el fabricante. Por ejemplo, garantía de punto presurizado, lecturas de medición (caudal o presión) aceptables a lo esperado, según operación del sistema o unidad de distribución, estimación de velocidad promedio en la selección del modelo del equipo con previa selección de la tecnología, entre otros.
- Rechazo de la localización del punto de medida, por condiciones contrarias al apartado anterior, definiendo una nueva ubicación del punto de medida.



- En la selección de la tecnología del equipo de medición (caudal o presión) el diseñador debe considerar el procedimiento metodológico dispuesto en este documento (véase Capítulo 6. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS DE MACROMEDICIÓN), para conocer la disponibilidad tecnológica en el mercado y seleccionar la mejor opción a los requerimientos particulares del cliente u operador y del sitio de instalación (propiedades del fluido, localización del punto de medida, criterios básicos del punto de medida y económicos).
- Los diseños hidráulicos, geotécnicos, estructurales, eléctricos y mecánicos de las cajas de macromedición y demás obras civiles proyectadas en el sistema de macromedición deben cumplir la normatividad vigente.
- El dimensionamiento o geometría de la cámara de macromedición puede variar dependiendo de las condiciones particulares de cada sitio y está sujeto a las siguientes consideraciones:
 - Si la caja está dispuesta sobre una vía vehicular o un sendero peatonal.
 - Por el tipo de accesorios (diseño de elementos mecánicos), diámetro de la tubería.
 - Requerimientos mínimos en dimensiones internas para la buena operatividad e instalación de los equipos.
 - Uso de bypass o no sobre el punto de medición, que depende de la operatividad requerida y la relación coste/efectividad.
- El diseñador debe incluir un sistema de transmisión de datos conforme a las condiciones técnicas, que permita el envío de datos de forma centralizada.
- El diseño del sistema eléctrico del sistema de macromedición dispuesto en terreno debe considerar un sistema de respaldo de alimentación eléctrica con la autonomía requerida.
- El diseñador debe contar con un sistema de bombeo de achique en la cámara del equipo de medición de caudal, para evitar inundaciones en el interior y reducir daños en los armarios o tableros eléctricos.
- La cámara de macromedición debe garantizar al máximo una seguridad ante robo o intrusión de personal no autorizado.
- El diseño mecánico debe garantizar un fácil desmonte del equipo de medición, así como los elementos mecánicos necesarios para realizar las labores de mantenimiento preventivo (verificaciones metrológicas, inspección al interior de la tubería, limpieza y lubricación del equipo) y calibración en campo.



- En los diseños de los elementos mecánicos y eléctricos del sistema de macromedición se deben tener en cuenta los efectos de la temperatura ambiente, las interferencias eléctricas, las vibraciones de la tubería y los efectos de la humedad.
- Si se requiere, por el peso del equipo de macromedición y demás accesorios mecánicos (válvulas, nipples, uniones especiales, etc.) en el diseño de la cámara se debe considerar un pedestal en concreto fijado al piso, como soporte de estos elementos.

Cumpliendo a las anteriores recomendaciones y para diseñar un buen sistema de macromedición, se puede verificar el siguiente listado de comprobaciones:

- ✓ ¿El equipo de medición es acorde a las dimensiones del diámetro y material de la tubería sobre el cual se debe instalar?
- ✓ ¿La localización dispuesta para el equipo de medición cumple con los requerimientos técnicos exigidos por el fabricante, como tramos de entrada y salida, rectos y libres de accesorios, orientación, dirección, zona libre de vibraciones externas, garantía de punto presurizado, entre otros?
- ✓ ¿Se garantiza que la unidad de distribución sobre el cual se diseñó el sistema de macromedición está debidamente delimitada e identificada con sus puntos de entrada y salida?
- ✓ ¿Se dispone de una proyección en la instalación de equipos de medida de caudal y presión sobre cada una de las entradas y salidas de la unidad de distribución sobre el cual se diseña el sistema de macromedición, garantizando un diseño integral por unidad de distribución?
- ✓ ¿Se siguió un procedimiento metodológico en la selección de la tecnología de los equipos de macromedición?
- ✓ ¿Se verificó con campañas que el punto de implantación del equipo es totalmente fiable?
- ✓ ¿Los diseños hidráulicos, geotécnicos, estructurales, eléctricos y mecánicos cumplen con la normatividad vigente y otras consideraciones técnicas del cliente?
- ✓ ¿El diseño de la cama de macromedición dispone de espacio suficiente para efectuar las tareas de mantenimiento e incorporación de todos los aditamentos mecánicos (válvulas, uniones especiales o de desmonte, bridas, etc.) y eléctricos (armarios, sistema de respaldo de alimentación, etc.)?
- ✓ ¿La instalación del equipo de medición previó un bypass o línea de derivación, para beneficio de la operatividad en mantenimientos como en el posible retiro o



sustitución del equipo de medición?, ¿Es rentable en términos de relación coste/efectividad?

- ✓ ¿Se dispone de un sistema de transmisión de datos que permita el envío de datos de forma centralizada?. ¿Es rentable en términos de relación coste/efectividad?
- ✓ ¿Se dispone de un sistema de respaldo de alimentación eléctrica para evitar vacíos o interrupciones de medición de lecturas?
- ✓ ¿La cámara que contiene el equipo de medición de caudal dispone de un correcto sistema que evite las inundaciones?
- ✓ ¿Las cámaras de macromedición son seguras ante robos o intrusión de personal no autorizado?
- ✓ ¿El diseño mecánico en el sitio de instalación del equipo está acorde con las actividades de mantenimiento preventivo y calibración en campo?
- ✓ ¿Los elementos mecánicos y eléctricos del sistema de macromedición cubren las necesidades de efectos adversos por temperatura ambiente, interferencias eléctricas, vibraciones de la tubería y efectos de la humedad?
- ✓ ¿Se contempla el diseño de obras adicionales por la interferencia con otras redes de servicios públicos o demás infraestructuras?

4.2 OBRAS CIVILES Y SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS

El Flujograma 5 explica el proceso de la implementación de un sistema de macromedición para un sistema del acueducto urbano (véase también Flujograma 2).

Al realizar las obras civiles y el suministro e instalación de los elementos mecánicos y eléctricos para un sistema de macromedición se deben tener en cuenta las consideraciones que se describen en los siguientes apartados y presentados en el Flujograma 5.

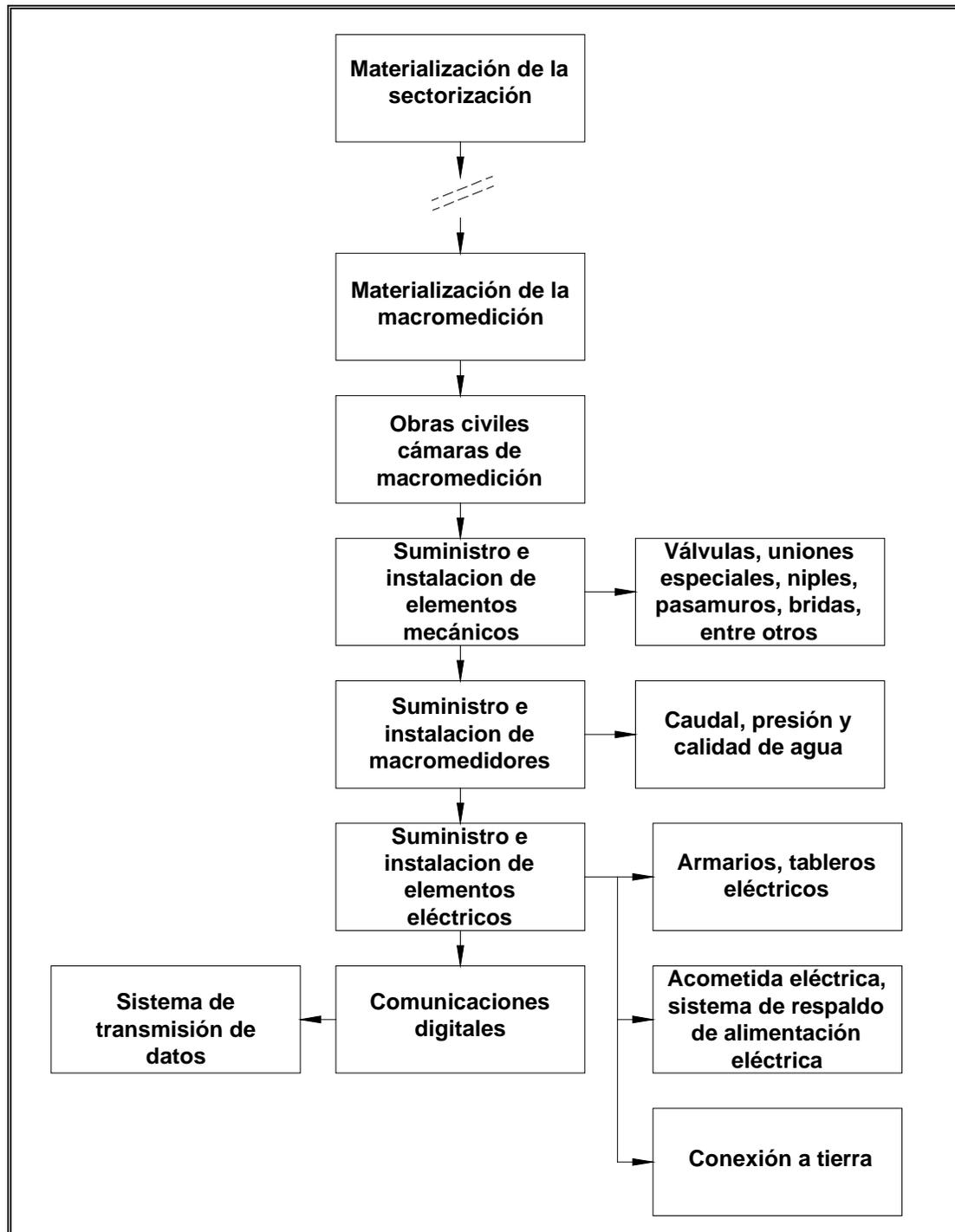
4.2.1 Obras civiles cámaras de macromedición

- Revisión del sitio destinado para la instalación del macromedidor, que depende de la comparación que se haga en topología (disposición, diámetros y materiales de redes), entre el diseño y las características encontradas en terreno, esto con el objeto de garantizar que los diseños sean acordes a las condiciones reales en el sitio, para los casos donde los diseños son de tiempo atrás a las actividades



de construcción e implementación. Si se encuentran discrepancias se debe proceder a un rediseño.

Flujograma 5. Construcción de un sistema de macromedición



Fuente: autor.



- La cámara donde se alojen los armarios, tableros eléctricos y equipos de macromedición debe estar provista de mortero impermeable, pañete interior y exterior; impermeabilizante en caso de realizar obras con ladrillo prensado y de concreto; e impermeable si se construyen cajas con concreto reforzado, cuyo objeto es evitar la entrada de agua.
- Las placas de fondo y superior de la cámara de macromedición deben ser en concreto reforzado impermeabilizado y en la resistencia que arrojen los resultados de diseño de estas.
- El lado exterior de las paredes de la cámara debe estar recubierto con un geotextil no tejido que confine los finos y evite el tránsito de éstos hacia el interior.
- La cámara de macromedición debe estar provista de escalones para el fácil acceso del personal de mantenimiento y operación, localizado de tal forma que en un descenso al interior no se interfiera con los armarios, tableros o equipos.
- Durante la construcción de la losa de fondo de la cámara de macromedición se debe garantizar la estanqueidad del pozo de succión para facilitar el desagüe.

4.2.2 Suministro e instalación de elementos mecánicos

- Las válvulas, uniones especiales, niples, pasamuros, bridas, entre otros accesorios que complementan la instalación del equipo de macromedición, si no son de acero inoxidable, deben estar protegidos con una pintura o película que minimice su corrosión.
- Los elementos mecánicos como arandelas, tuercas, tornillos de las válvulas, uniones especiales, niples, etc., deben ser de acero inoxidable, que garantice su vida útil y el manejo de las tareas de mantenimiento.
- Todos los accesorios o elementos mecánicos, válvulas, uniones especiales, niples, pasamuros, bridas, entre otros, deben soportar las presiones hidrostáticas exigidas por el sistema de redes de acueducto.
- Se deben suministrar e instalar dos pasamuros, uno a la entrada y otro a la salida de la cámara de macromedición, con el diámetro adecuado, para poder realizar desmontes totales al interior de la cámara, si se requiere una actividad de mantenimiento o restitución de equipos o accesorios.
- Para instalar los dos pasamuros se debe emplear una tubería como guía, que garantice su perfecto alineamiento.



- En los casos que aplique se aconseja disponer de un segundo punto de medición de caudal con la instalación de un equipo de sondas externas o de intrusión como la varilla pitot para realizar labores de calibración o verificaciones metrológicas, el niple que se suministre e instale antecedido del equipo de macromedición debe disponer de una salida vertical de 1" en acero, para conexión de registro de incorporación o derivación de cobre o bronce corregido para varilla pitométrica

4.2.3 Suministro e instalación de macromedidores

- Antes de instalar cualquier equipo de macromedición (caudal o presión) se debe revisar su calidad a través del certificado de calibración.
- No se debe afectar la precisión del equipo de macromedición durante las labores de instalación.
- Una vez instalado el equipo de macromedición se deben ejecutar las respectivas pruebas en campo para su puesta en marcha.
- Se debe entregar toda la documentación pertinente al sistema de macromedición, como planos record de las obras civiles, sistema eléctrico, mecánico y de comunicación digital, certificado de calibración, manuales de instalación, de operación y de mantenimiento e inventario de los materiales.
- El constructor debe definir y prever las actividades de suspensión del servicio de agua potable con el fin de minimizar el impacto sobre los usuarios, en términos de continuidad y movilidad urbana; así mismo, debe definir la secuencia de instalación y regreso a operación del servicio, de tal manera que no se afecte la continuidad y adecuada prestación del servicio durante prolongados periodos de tiempo o con una frecuencia tal que genere reclamos de los usuarios del sistema.
- El contratista debe disponer de los equipos de bombeo suficientes en los diferentes frentes de trabajo cuando se ejecuten intervenciones de redes en servicio para conexión de las nuevas obras, los cuales deben operar desde el momento que se confirme el cierre, de tal manera que se pueda detectar rápidamente si existe la necesidad de rectificación del cierre o ejecutar un manejo permanente de las aguas que llegan a través de la tubería.

4.2.4 Suministro e instalación de armarios eléctricos

- Los armarios donde se instalan los equipos eléctricos de macromedición, sistemas de alimentación, sistemas de transmisión de datos (comunicación digital) y demás elementos necesarios para su funcionamiento, deben ofrecer



una protección contra el polvo y el agua, esto último en el caso inevitable de que se inunde la cámara y evitar el paso del agua hacia su interior.

- La parte delantera de los armarios debe ser transparente para poder realizar lecturas o chequeos rápidos.
- Se debe considerar la construcción de un pollo que sirva como base para los armarios, como protección integral ante la intrusión de agua al interior de la cámara y que corra al pozo de succión.

Cumplimiento a las anteriores recomendaciones en la implantación de un sistema de macromedición sobre cualquier unidad de distribución de un sistema de acueducto urbano, pueden verificarse las obras civiles y el suministro e instalación de los elementos mecánicos y eléctricos en respuesta al siguiente listado de comprobaciones:

- ✓ ¿El diseño del sistema de macromedición está acorde con las condiciones topológicas (disposición, diámetros y materiales de redes existentes) encontradas en terreno?
- ✓ ¿Se dispone de cámaras de macromedición impermeables que eviten la entrada de agua a través de las paredes, las placas de fondo y superior de la estructura?
- ✓ ¿La construcción de las cámaras de macromedición incluyó la disposición de escalones de acceso? ¿Se requieren escalones de acceso?
- ✓ ¿El ingreso al interior de las cámaras de macromedición es de fácil acceso para el personal de mantenimiento?
- ✓ ¿Se garantiza la estanqueidad del pozo de succión dispuesta en la losa de fondo de la cámara de macromedición? ¿Las pendientes en la losa de fondo garantizan la intersección del agua que pudiese infiltrarse en el pozo de succión?
- ✓ ¿Los elementos mecánicos del sistema de macromedición y los dispuestos en terreno están protegidos contra la corrosión?
- ✓ ¿Los elementos mecánicos del sistema de macromedición y los dispuestos en terreno soportan las presiones hidrostáticas máximas exigidas por el sistema de redes de acueducto?
- ✓ ¿Es posible realizar desmontes totales de los elementos mecánicos al interior de la cámara?
- ✓ ¿Con la infraestructura dispuesta en terreno es posible instalar un segundo equipo de medición de caudal para medir la misma cantidad que calcula el equipo principal instalado en el sitio, ya sea con la utilización de un equipo de sondas externas o uno de intrusión como la varilla pitot?



- ✓ ¿Se verificó la presentación del certificado de calibración del equipo de medición (caudal o presión) instalado en terreno?
- ✓ ¿Se verificó la calidad de la instalación del equipo de medición (caudal o presión) con las pruebas respectiva de campo?
- ✓ ¿Se dispone de toda la documentación pertinente del sistema de macromedición implementado, como planos record de las obras civiles, sistema eléctrico, mecánico y de comunicación digital, certificado de calibración, manuales de instalación, de operación y de mantenimiento e inventario de los materiales?
- ✓ ¿Los armarios donde se deben instalar los equipos eléctricos de macromedición son impermeables para evitar la entrada de agua?

4.3 COMUNICACIONES DIGITALES

El diseño y la implantación de las comunicaciones digitales en un sistema de macromedición señaladas en el Flujograma 1 y Flujograma 2 de este documento conciernen a un sistema de transmisión de datos, alarmas y salidas que se pueden manejar de manera remota y permiten contar con la información centralizada en un punto de control u operación por intermedio de una plataforma (*software*) o un sistema Scada, *Supervisory Control And Data Acquisition* (Supervisión, Control y Adquisición de Datos).

El desarrollo de un sistema de transmisión de datos o comunicaciones digitales en cualquier sistema de macromedición le permite al operador reducir costos económicos y mejorar la calidad para controlar cualquier proceso.

Las comunicaciones digitales y, por consiguiente, el sistema de transmisión de datos es posible gracias a los transmisores de los equipos de macromedición, que convierten la señal de entrada que genera el sensor en una señal de salida equivalente a una corriente eléctrica transmisible (véase Figura 21).

La comunicación de los transmisores de los equipos de macromedición al sistema de automatización o Scada y de este a los actuadores se puede efectuar mediante señales análogas 4-20mA o digitales por intermedio de cables o red inalámbrica, en este último caso por bluetooth para distancias cortas (menores a 200 metros) o utilizando la red de telefonía celular de tecnología GPRS (*General packet radio service*), enlaces de bandas del espectro electromagnético VHF (*Very High Frequency*) o UHF (*Ultra High Frequency*).

4.3.1 Señales análogas

La señal análoga es un tipo de señal, signo, caracter u otro tipo que informa o avisa algo en particular y se genera por algún tipo de fenómeno electromagnético,

representado por una función matemática continua en la que es variable su amplitud y periodo (representando un dato de la información) en función del tiempo (wikipedia, 2013)⁹. En el caso de un sistema de macromedición las magnitudes físicas e hidráulicas como presión, caudal, volúmenes, temperaturas, entre otros, se pueden transmitir de un lugar a otro con una señal de este tipo.

Por ejemplo, en las señales análogas 4-20mA, que es la salida analógica más empleada por los equipos de medición, la medida 4mA corresponde al valor inicial y 20mA al valor final de fondo de la escala, lo que comprende un intervalo manejable de 16mA para las variables del proceso y las acciones sobre los actuadores en un sistema de macromedición.

Un manejo de esta señal análoga 4-20mA es el siguiente, donde un intervalo de medida de caudal entre 0 y 50 l/s se distribuye como se presenta en la Tabla 17.

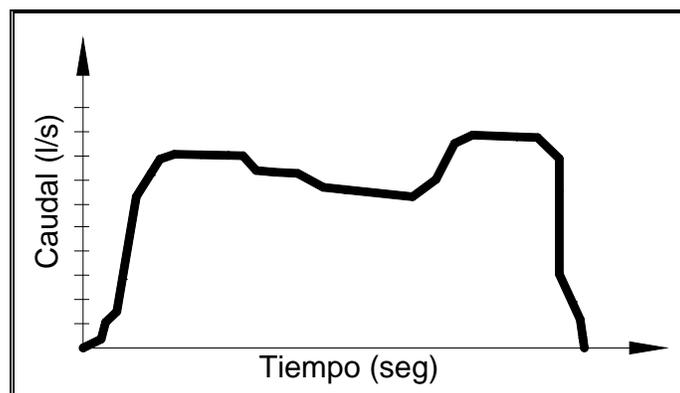
Tabla 17. Manejo de una señal análoga 4-20mA

Valor	Valor de caudal	Valor de intensidad
Inicial	0 l/s	4mA
Medio	25 l/s	16mA
Final	50 l/s	50mA
Otro	10,5 l/s	6,72mA

Fuente: autor.

La representación gráfica como resultado de una señal análoga se presenta en la Figura 18.

Figura 18. Señal análoga



Fuente: autor.

⁹ Texto tomado de la referencia Wikipedia (2013, 25 de julio). *Señal análoga*. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Se%C3%B1al_anal%C3%B3gica.

Las desventajas de una señal analógica frente a la digital radican en los siguientes puntos:

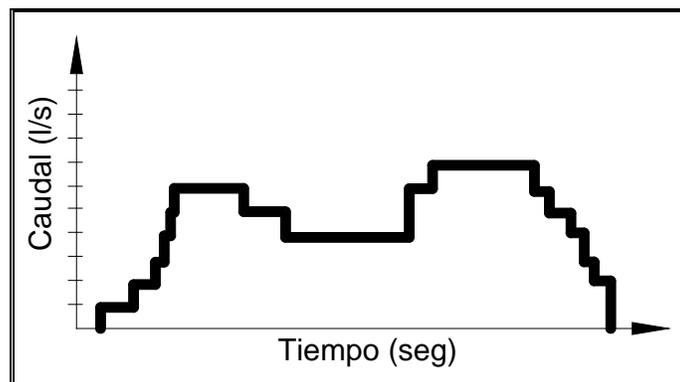
- El contenido de una señal analógica es muy restringida, tan sólo se puede transmitir por cada señal 4-20mA una única variable.
- La transmisión de señales analógicas se restringe con la utilización de cables de dos hilos, donde sólo se puede transmitir una señal por cada par de hilos, lo que implica altos costos con un esquema de cableado robusto.
- La transmisión de señales análogas necesita un convertidor adicional, analógico a digital, por lo que un sistema de automatización no tiene la capacidad para trabajar con estas señales.

4.3.2 Señales digitales

La señal digital es un tipo de señal, signo o caracter que informa o avisa algo en particular y se genera por algún tipo de fenómeno electromagnético, en el cual cada signo que codifica su contenido se puede analizar en término de algunas magnitudes que representan valores discretos, en lugar de valores dentro de un cierto rango (wikipedia, 2013)¹⁰. En el caso de un sistema de macromedición las magnitudes físicas e hidráulicas como presión, caudal, volúmenes, temperaturas, entre otros, se pueden transmitir de un lugar a otro con una señal de este tipo.

Un ejemplo de una representación gráfica de una medición de caudal en un periodo de 24 horas y como resultado de una señal digital se presenta en la Figura 19 (véase y compárase con la Figura 18).

Figura 19. Señal digital



Fuente: autor.

¹⁰ Texto tomado de la referencia Wikipedia (2013, 25 de julio). *Señal digital*. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Se%C3%B1al_anal%C3%B3gica.



Las ventajas de la señal digital frente a la análoga radican en los siguientes puntos:

- El contenido de una señal digital puede transmitir muchas variables simultáneamente.
- La transmisión de señales digitales a través de cables, en este caso un bus de datos, se puede hacer en un mismo medio, lo que implica menos cableado, incluso se puede transportar mas información que con la transmisión de señales análogas.

4.3.3 Suministro e instalación de un sistema de comunicación digital

4.3.3.1 Esquema general de funcionamiento

La tecnología en el desarrollo de sistemas de comunicación digital avanza año tras año. Primero, se integraron las señales para los equipos dispuestos en campo utilizando las señales análogas, que demandaban una infraestructura compleja empleando muchos caminos o cables de dos hilos para transmitir las variables requeridas a un sistema de automatización o control; posteriormente, un avance tecnológico fue la definición de señales digitales utilizando cables o bus de datos para transmitir una gran cantidad de información por un único medio.

Con este avance tecnológico se difundieron diversos protocolos de comunicaciones como Foundation Fieldbus y Profibus, que combinan el manejo de señales análogas y digitales y utilizan una gran variedad de bus de datos que dependen de la definición de su aplicación; Hart, que trabaja con interfaz de comunicaciones de equipos de campo inteligentes y no involucra la utilización de bus de datos. El sistema de comunicación más moderno que existe es el Modbus RTU, que utiliza red inalámbrica para transmitir las variables al sistema de automatización o control y de éste a los actuadores.

- Protocolo Modbus RTU

Este protocolo permite controlar una red de dispositivos; por ejemplo, un sistema de medida de caudales volumétricos y presión y comunicación entre el equipo instalado en campo y el ordenador (portátil o PC). Modbus también se emplea para conectar un ordenador de supervisión con una Remote Terminal Unit (Unidad Terminal Remota, RTU) en sistemas de supervisión, adquisición de datos o sistema Scada.

Modbus satisface los requisitos que exige la automatización de un proceso, ya que cada dispositivo instalado en terreno posee una dirección única y puede enviar órdenes a Modbus, de esta forma cada comando contiene la dirección del dispositivo donde se origina la orden.



Los comandos Modbus permiten controlar una Unidad Terminal Remota (RTU) para modificar el valor de alguno de sus registros, o bien, solicitar el contenido de dichos registros.

La Unidad Terminal Remota es un dispositivo que se basa en microprocesadores, el cual permite obtener señales independientes de los procesos y enviar la información a un sitio remoto de supervisión, adquisición de datos o sistema Scada, que visualiza finalmente las variables enviadas.

Los dispositivos RTU surgieron en el mundo de las comunicaciones ante la necesidad de los sistemas Scada para la gestionar un gran número de señales con precisión de milisegundos, trabajo que es imposible realizar con los Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable, PLC).

En el manejo del protocolo Modbus RTU las comunicaciones o conexiones se pueden hacer por cable o comunicación inalámbrica, bluetooth o GPRS, que se explican a continuación:

- La comunicación bluetooth es un sistema de comunicación inalámbrica de área personal que posibilita la transmisión de datos entre diferentes dispositivos, aunque tiene una restricción de alrededor de 200 metros de distancia para su rango de aplicación.
- La comunicación General Packet Radio Service (Servicio General de Paquetes Vía Radio, GPRS) es un sistema de comunicación inalámbrica que utiliza una extensión de la red de telefonía celular (Global System for Mobile Communications o GSM) para transmitir datos entre diferentes dispositivos mediante la conmutación de paquetes.

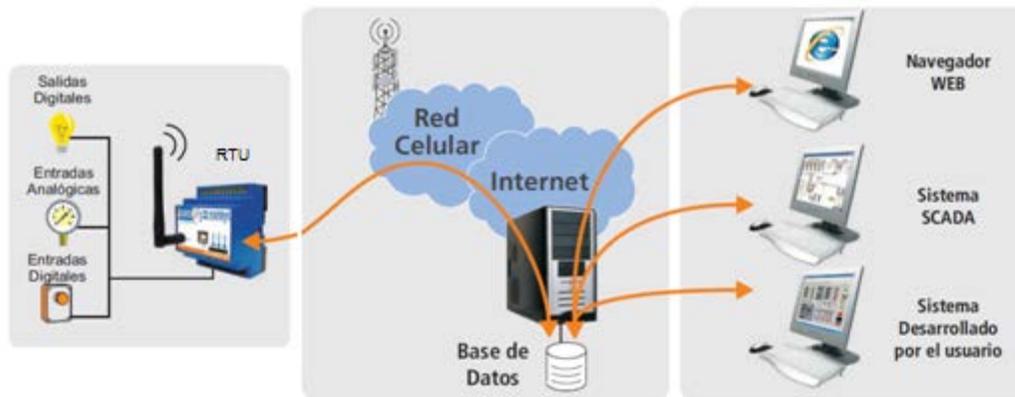
Para fijar una conexión de GPRS y poder transmitir los datos de los puntos remotos a la central es necesario que el usuario especifique un Access Point Network (APN) a través de la red GSM, la cual canaliza todos los datos hacia un punto central o hacia varios, según la disposición de los equipos del proveedor de servicio.

- Arquitectura del sistema

La arquitectura básica del sistema Modbus RTU consta de las Unidades Terminales Remotas (RTU), el servidor de telemetría o comunicación inalámbrica y la base donde se puede consultar por diversas aplicaciones la información transmitida. En la Figura 20 se esquematiza este proceso.

En el servidor de telemetría se instala un software, que se encarga de comunicarse con los dispositivos remotos y depositar la información en una base de datos, para que otras aplicaciones tomen los resultados y los publiquen en un navegador o página web, en un sistema Scada o en un sistema de software desarrollada por el usuario.

Figura 20. Arquitectura básica en un sistema Modbus RTU



Fuente: Exemys, 2013.

4.3.3.2 Consideraciones a los diseños, suministro e instalación

Después de conocer el esquema general de funcionamiento de un sistema de comunicación digital e implementar la tecnología actual (módulos de comunicación que utilizan el protocolo Modbus RTU), se procede con las consideraciones que se deben tener en cuenta en el momento de diseñar, suministrar e instalar el sistema de comunicación digital para un sistema de macromedición.

- La programación de las Unidades Terminales Remotas (RTU) debe almacenar los datos y el tiempo de grabado. Adicionalmente, el dato de caudal o presión u otra variable debe corresponder con el lapso de tiempo especificado o el producto del promedio en el periodo definido para la grabación de datos, así como el acumulado en las unidades que determine el cliente u operador.
- El constructor debe entregar las licencias de todos los softwares que intervienen en el proceso de comunicación digital.
- El software debe contener el listado de puntos de registro de las mediciones extraídos de las bases de datos y presentados en forma numérica o gráfica en los periodos solicitados. De igual manera debe tener una interface con un plano de distribución de zonas que permita obtener la información mediante el posicionamiento del puntero del "mouse" sobre la unidad de distribución de la cual se requiere la información.
- El sistema de comunicación debe contener las siguientes funciones:
 - Lectura en tiempo real del valor medido en el sitio y en forma remota.
 - Descarga de programas y datos locales en tablas.
 - Software con posibilidad de reprogramación y flexibilidad.



- Para el registro de las variables o mediciones todas las Unidades Terminales Remotas (RTU) deben llevar una placa con las características técnicas, marca y serial del equipo.
- Todas las Unidades Terminales Remotas deben estar integradas y diseñadas específicamente para el funcionamiento sin vigilancia permanente en ambientes con grandes rangos de temperatura, humedad, ruido eléctrico y vibraciones.
- Todas las Unidades Terminales Remotas deben estar provistas de un reloj interno de tiempo real con resolución en segundos, minutos, horas, día, mes, año.
- Cada entrada y salida análoga y digital debe ir equipada con un circuito para proteger contra impulsos transitorios. Además, las entradas análogas deben emplear filtros ante ruidos y resistencias limitadoras.
- El constructor y su proveedor deben entregar la garantía del fabricante de los elementos suministrados, certificando la procedencia y fabricación del elemento como nuevo (no remanufacturado).
- Los servidores que almacenen la información o bases de datos deben disponer de las especificaciones mínimas para su buen funcionamiento en cuanto a velocidad, capacidad, memoria RAM y sistema operativo.
- Las interfaces del sistema Scada que se desarrollen para el operador o cliente deben permitir como mínimo las siguientes tareas:
 - Diseño y desarrollo de una pantalla general que muestre el sistema de sectorización con el nombre de cada una de las unidad de distribución.
 - Creación de una plantilla para mostrar información detallada de cada cámara de macromedición. Esta pantalla se debe activar cuando el operador haga clic en el nombre de la estación, mostrado el sitio y toda la información enviada desde éste.
 - Todos los mímicos y pantallas requeridos y aprobados por el cliente.
 - Todos las alarmas requeridas y aprobadas por el cliente con entradas digitales; por ejemplo, pérdida de energía principal (alimentación principal); falla de comunicación entre el sistema de transmisión inalámbrica y el equipo de medición, por niveles alto o bajo en el flujo dentro de la cámara (según niveles prefijados por el operador); detención de apertura de la tapa de la cámara, etc.; y salidas digitales, como por ejemplo para la activación remota y el manejo de señales auditivas o lumínicas en caso de alarmas.
 - Definición de usuarios y contraseñas, grupos y permisos para el ingreso al sistema Scada o información particular.



- Disposición de una plataforma de reportes.
- Disposición de una plataforma de proceso de datos, que permita calcular caudales mínimos, máximos, promedios diarios, etc.
- Suministro de manuales de cada software instalado en el sistema de comunicación.

Con estas consideraciones básicas se puede garantizar un funcionamiento fiable del sistema de comunicación.



5. METODOLOGÍA PARA EL MANTENIMIENTO Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN

A continuación se definen los fundamentos generales para el mantenimiento de los equipos de macromedición y las actividades que aseguran la calidad de la información transmitida por este sistema, para aumentar la confiabilidad de las mediciones captadas en campo sobre un sistema de acueducto urbano.

5.1 MANTENIMIENTO

Un plan de mantenimiento de un sistema de macromedición implica garantizar la seguridad permanente y el funcionamiento fiable sobre los instrumentos de medida, que varía en su diseño por la definición de la periodicidad de las tareas de mantenimiento, dependiendo del tipo de tecnología instalada en campo y de los planes detallados por cada operador en aspectos como seguridad, procesos en la operación, continuidad del servicio, planes de trabajo, disponibilidad de personal técnico, registros históricos, aspectos ambientales, entre otros, que cambian con el tiempo y afectan directamente las lecturas de los equipos de medición.

Todas las tareas de mantenimiento son esenciales para garantizar un funcionamiento óptimo y fiable de los instrumentos de medida, esto se puede volver una práctica básica teniendo en cuenta las siguientes tareas esenciales que se relacionan en el Flujograma 6.

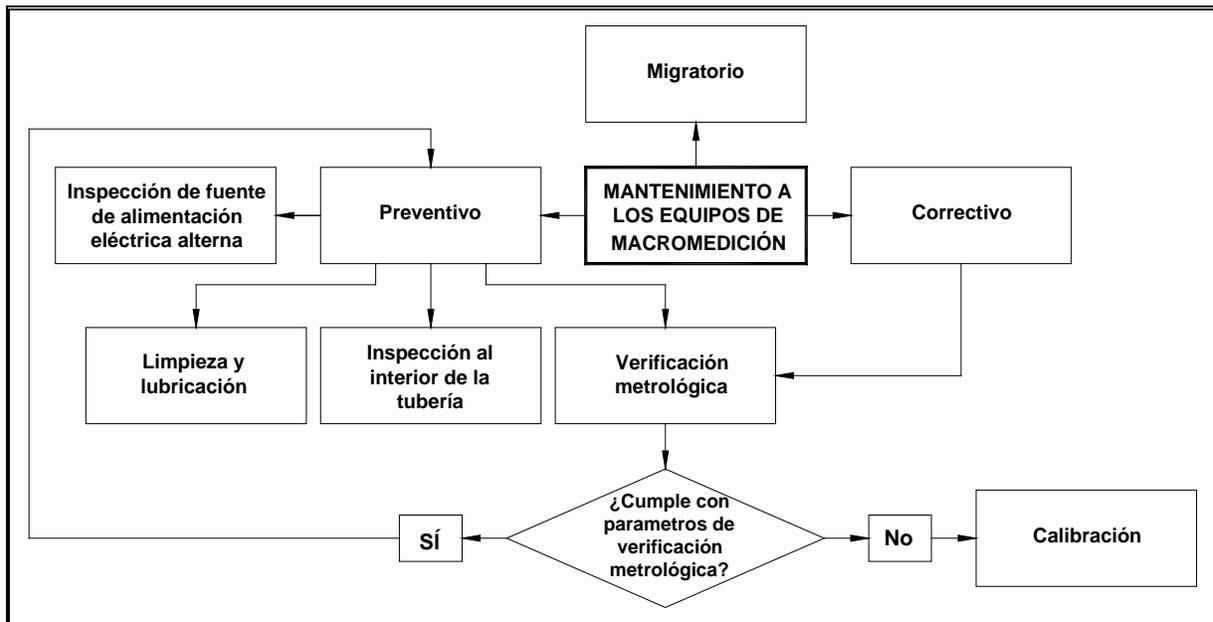
Las tareas operativas y de mantenimiento relacionadas en el Flujograma 6 se explican a continuación.

5.1.1 Mantenimiento preventivo

Hace referencia a una inspección periódica de los dispositivos de medición para evitar tareas de mantenimientos correctivos e innecesarios, lo cual reduce costos en el proceso de operación y evita el riesgo de paros en el proceso de producción.

La periodicidad del mantenimiento preventivo está definida en función de los requisitos específicos de cada dispositivo o tecnología y de los procesos de operación del sistema de acueducto urbano. Por ejemplo, en procesos particulares y aspectos ambientales donde la abrasión es importante por la cantidad considerable de sólidos en suspensión que transporta y que los de equipos de macromedición disponen de partes móviles como los equipos volumétricos o de desplazamiento positivo en la medida de caudal, la periodicidad en el mantenimiento preventivo debe ser más exigente con inspecciones, mantenimientos y calibraciones más regulares, comparado con la disposición de otras tecnologías y bajo estas mismas condiciones.

Flujograma 6. Metodología para el mantenimiento de los equipos de macromedición



Fuente: autor.

Como observamos, definir la periodicidad del mantenimiento preventivo para los dispositivos de medición depende de diversos factores, que con el tiempo afectan directamente las lecturas de los equipos, lo cual obedece básicamente a la tecnología instalada en campo y a los procesos de cada operador, de ahí la importancia de una buena práctica en la selección de la tecnología e instalación de los equipos de medición.

Las actividades que involucran una buena práctica de mantenimiento preventivo son las siguientes:

- Verificación metrológica. En el desarrollo de un mantenimiento preventivo para cada instrumento de medida, de acuerdo con sus condiciones de uso y recomendaciones del fabricante, debe establecerse un programa de verificación metrológica que evidencie una señal estable o si existe desviaciones respecto a su correcto funcionamiento.
- Inspección al interior de la tubería. Esta actividad garantiza la fiabilidad de cualquier equipo de medición, certificando la no presencia de partículas extrañas que se adhieren a los accesorios de los equipos, lo cual puede ocasionar efectos perjudiciales en los resultados de las lecturas o evidenciar desgastes internos por efectos de la abrasión al interior de la tubería.

Con esta actividad se puede identificar la causa de las desviaciones en las lecturas del equipo de medición, cuyo resultado no siempre es culpa del dispositivo si no que se debe a problemas de disposición de partículas que



perturban el normal funcionamiento del dispositivo o alteran la forma y el diámetro de la tubería, que en los equipos de medición de caudal cualquier cambio en sus condiciones aguas arriba o aguas abajo provoca perturbaciones en las lecturas.

- Limpieza y lubricación. Durante su funcionamiento cualquier equipo de medición requiere de limpieza o lubricación periódica de sus partes mecánicas y eléctricas, en especial para los equipos que disponen de partes móviles. Si esta actividad no se realiza periódicamente se pueden acelerar los procesos de desgaste e incluso en la reducción de la vida útil del equipo de medición dispuesto en terreno.
- Inspección de la fuente de alimentación eléctrica alterna. Para los equipos que requieren una fuente de alimentación alterna para dar continuidad a su funcionamiento en caso de que se suspenda el fluido eléctrico de la fuente principal, es necesario chequear periódicamente esta fuente de alimentación para evitar vacíos y garantizar una continuidad del 100% en las lecturas de medición.

Con el registro histórico y el análisis de las tareas de mantenimiento preventivo es posible reprogramar la periodicidad de las tareas y con los resultados establecer las verificaciones metrológicas del programa de calibración del instrumento de medida.

5.1.1.1 Calibración

Consiste en realizar los ajustes necesarios al equipo de medición, ya sean mecánicos o eléctricos, hasta garantizar una discrepancia mínima con la escala de medida del laboratorio de calibración.

La calibración consta, en general, de dos etapas: la primera es la verificación del cero, es decir, el valor de la medida igual a cero y se determina su estabilidad. La segunda etapa consiste en elegir por lo menos dos puntos del campo de valores para verificar la linealidad del equipo. Si el resultado determina que en las señales emitidas por el equipo no hay estabilidad o linealidad deseables, se efectúan los ajustes necesarios hasta garantizar las condiciones óptimas.

Se distinguen tres prácticas de calibración, que son:

- Calibración en laboratorio. Consiste en retirar el equipo de su emplazamiento y llevarlo a un laboratorio de calibración debidamente autorizado.

Esta práctica es la menos deseable, porque dependiendo de la infraestructura del sistema de macromedición (disposición de bypass) o el tipo de equipo (equipos electromagnéticos) es necesario suspender el servicio, que se agudiza cuando son tuberías de gran diámetro o redes matrices.



Cabe anotar que esta práctica se complica aún más en Colombia, por la no existencia de laboratorios certificados por el Ministerio de Desarrollo Económico y la Superintendencia de Industria y Comercio en el proceso de calibración de macromedidores de agua.

- Calibración en campo con herramientas semi-inteligentes. Consiste en comprobar en campo la ejecución correcta de un contador con herramientas eléctricas y simuladores, desarrollando un proceso operativo normalizado que se ajusta para cada condición dispuesta en terreno y la tecnología del dispositivo.

Este proceso lo deben desarrollar técnicos capacitados y debe contemplar detalles particulares como operación de válvulas de cierre, procedimientos de trabajo, registros de datos, entre otros.

- Calibración en campo con diferencia. Es el método más común y consiste en disponer equipos no intrusivos como los ultrasónicos de fijación externa o sondas externas y verificar las funciones de entrada y salida del transmisor. Si se identifican problemas de linealidad o repetibilidad en el dispositivo bajo prueba y no es posible su calibración en campo, el equipo se debe retirar y calibrar en un laboratorio certificado.

5.1.2 Mantenimiento correctivo

Este mantenimiento se presenta en los casos donde se identifica discontinuidad en la medición o ausencia de datos, fallas técnicas, evidencia de una señal inestable o desviaciones en el desarrollo de una verificación metrológica, problemas de descargue de datos, incluso durante el desarrollo de mantenimientos preventivos, que el dispositivo no funciona correctamente y es necesario sustituirlo por completo o retirar y reparar alguna de sus partes o piezas.

Durante el mantenimiento correctivo es necesario disponer de personal técnico preparado y de piezas de repuesto o en stock listas para reemplazar las averiadas, de tal forma que los tiempos de reparación y discontinuidad en el servicio sean lo más corto posibles.

Al terminar cualquier reparación o mantenimiento correctivo es conveniente realizar una verificación metrológica del dispositivo para garantizar la medición y el error del mismo.

5.1.3 Mantenimiento migratorio

El mantenimiento migratorio hace referencia a la necesidad de renovar el equipo de medición existente por uno de nueva generación o la implementación de otra tecnología, por cumplimiento de su vida útil o para mejorar las condiciones operativas, tales como la precisión en las lecturas, reducir costos en el



mantenimiento al no disponer fácilmente de las piezas de repuesto, reducir costos en el consumo eléctrico, que con las nuevas tecnologías podría implicar reducción en el consumo eléctrico, o por innovación.

Este mantenimiento también implica la actualización del software de los equipos de macromedición o de los transmisores en el sistema Scada.

5.1.4 Plan de mantenimiento

La Tabla 18 muestra una comparación de los diversos tipos de tecnología y equipos de macromedición (véase numeral 3.1) frente a los tiempos recomendados en periodos de mantenimientos preventivos, correctivos o migratorios, el cual ayuda en el desarrollo de una primera versión del diseño de un plan de mantenimiento para los equipos de macromedición dispuestos en terreno.

5.2 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE LA MACROMEDICIÓN

Además de del las actividades de mantenimiento al sistema de macromedición (véase numeral 5.1) existe otro proceso que asegura la calidad de su información, que es garantizar que las unidades de distribución macromedidas cumplan las condiciones de ser hidráulicamente estancas, de tal manera que no existan alimentaciones imprevistas y se realicen cuantificaciones con una calidad óptima y de precisión en la estimación de índices, ejemplo índice de agua no contabilizada (IANC).

Esto implica que, además de tener unos equipos en óptimas condiciones por el desarrollo de un plan de mantenimiento, es necesario garantizar y saber qué se está midiendo, esto se logra únicamente con el funcionamiento correcto de las unidades de distribución y, por ende, de la sectorización hidráulica del sistema de acueducto.

Para garantizar un funcionamiento correcto de las unidades de distribución es necesario que el operador del sistema de acueducto realice las siguientes actividades, garantizando que las unidades de distribución macromedidas sean hidráulicamente estancas:

- Pruebas de aislamiento preliminar. Esta actividad concierne a una revisión periódica de todos los límites de las unidades de distribución, donde el operador realiza pruebas de aislamiento preliminar para establecer las condiciones de aislamiento de las válvulas de cierre permanente (VCP) o tapones que constituyen el límite, verificando que no tengan paso hacia o desde la unidad de distribución aledaña.



Tabla 18. Plan de mantenimiento equipos de macromedición

Tipo de mantenimiento		Grupos (caudal)								Grupos (presión)	
		A	B	C	D	E	F	G		H	I
								G1	G2		
Preventivo	Verificación metrológica	Cada año	Cada año	Cada año	Cada año	Cada año	Cada 2 años	Cada año	Cada año (*)	N/A	N/A
	Calibración	Cada 3 años o cuando amerite	Cada 3 años o cuando amerite	Cada 5 años o cuando amerite	Cada 5 años o cuando amerite	Cada 7 años o cuando amerite	Cada año	Cada 5 años			
	Inspección al interior de la tubería	Cada año	N/A	Cada año	Cada año	Cada año	Cada 2 años	Cada 2 años	Cada 2 años	N/A	N/A
	Limpieza o lubricación	Cada año	Cada año	Cada año	Cada año	Cada año	Cada 2 años	Cada año	Cada 2 años	N/A	Cada año
	Inspección de fuente de alimentación eléctrica alterna	Cada año	Cada año	Cada año	Cada año	Cada año	Cada año	Cada año	Cada 3 meses	N/A	Cada año
Correctivo	Mantenimiento por fallo completo del equipo o reparación de alguna de sus partes o piezas.	Cuando amerite	Cuando amerite	Cuando amerite	Cuando amerite	Cuando amerite	Cuando amerite	Cuando amerite	Cuando amerite	Cuando amerite	Cuando amerite
	Verificación metrológica	Se debe efectuar cada vez que aplique el mantenimiento correctivo									
Migratorio	Renovación de equipo por nueva generación	Se debe evaluar la renovación del equipo entre los 5 y 10 años de funcionamiento									
	Implementación de otra tecnología	Se debe justificar después de los 10 años de uso o funcionamiento del equipo									
	Actualización de software	Cada 6 meses									

Fuente: autor.

Leyenda:

N/A	No Aplica	Grupo A: equipos de presión diferencial (PD)	Grupo F: equipos electromagnéticos
		Grupo B: equipos de sección variable (rotámetros)	Grupo G1: equipos ultrasónicos método Doppler
		Grupo C: equipos volumétricos o de desplazamiento positivo (PD)	Grupo G2: equipos ultrasónicos método tiempo de tránsito
		Grupo D: equipos de turbina	Grupo H: manómetros
		Grupo E: equipos vortex	Grupo H: data Logger de presión

Nota:

(*) Para los equipos ultrasónicos de fijación externa o sondas externas se recomienda una verificación metrológica cada seis meses.



- Pruebas de aislamiento total. Esta prueba también es de uso periódico y consiste en verificar la ausencia de servicio de los usuarios localizados al interior y a lo largo del límite de la una unidad de distribución.

Esta prueba se inicia con el cierre de las alimentaciones principales de la unidad de distribución, seguido de la apertura de los hidrantes o purgas predefinidos para el drenaje total y, si no existen suficientes puntos de drenaje, se procede a realizar la prueba en horas diurnas y se efectúa el drenaje únicamente a través de las acometidas domiciliarias.

Con la instalación de manómetros al interior de la unidad de distribución y otros por fuera del límite y finalizado el vaciado del agua contenida en las tuberías internas se verifican las lecturas de presión en los manómetros internos preinstalados. Con un chequeo de mediciones iguales a cero (0) m.c.a. se garantiza el aislamiento total de la unidad de distribución, en caso contrario, si algún manómetro registra una presión remanente significa que puede existir un cruce o pase no identificado que debe controlarse para garantizar el aislamiento total o la estanqueidad total de la unidad de distribución.

5.2.1 Plan de aseguramiento de la calidad de la información macromedida

La Tabla 19 muestra los periodos recomendados para garantizar que las unidades de distribución macromedidas sean hidráulicamente estancas y de esta forma se aumente la confiabilidad de las lecturas transmitidas por el sistema de macromedición.

Tabla 19. Plan de aseguramiento de calidad de información macromedida

Actividad	Recomendación
Pruebas de aislamiento preliminar	Revisión bimestral de las válvulas de cierre permanente (VCP) de la unidad de distribución medida o cuando el análisis a las desviaciones presentadas en las macromediciones lo amerite.
Pruebas de aislamiento total	Ejecución bianual de pruebas de aislamiento total de la unidad de distribución medida o cuando el análisis a las desviaciones presentadas en las macromediciones lo amerite.

Fuente: autor.



6. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS DE MACROMEDICIÓN

El estado del arte de los equipos de medición en tuberías cerradas y a presión (véase Capítulo 3) permite desarrollar un nuevo tema, encaminado a establecer una metodología para la selección de equipos o tecnologías de macromedición en un sistema de acueducto urbano, procedimiento que se desarrolla en el presente capítulo.

6.1 SELECCIÓN DE UN EQUIPO DE MEDICIÓN DE CAUDAL

A continuación se presenta una metodología para la selección del equipo o dispositivo de medición de caudal para un sistema de acueducto urbano, que está definido por las siguientes fases, las cuales se desarrollan con claridad más adelante:

- Fase 1: selección por propiedades del fluido.
- Fase 2: selección por localización del punto de medida.
- Fase 3: selección por especificaciones técnicas del dispositivo de medida.
- Fase 4: selección por criterios económicos.

El proceso de selección está definido por estas fases, que se relacionan como se presenta en el Flujograma 7, donde cada una representa un filtro en la selección de la tecnología de un equipo de medición de caudal.

6.1.1 Fase 1: selección por propiedades del fluido

Un primer filtro en la selección de un equipo de medición de caudal para la medición de agua circundante por las conducciones cerradas y a presión de un sistema de acueducto urbano consiste en identificar y conocer como mínimo las siguientes propiedades del fluido de trabajo, que implica una primera selección entre las tecnologías disponibles:

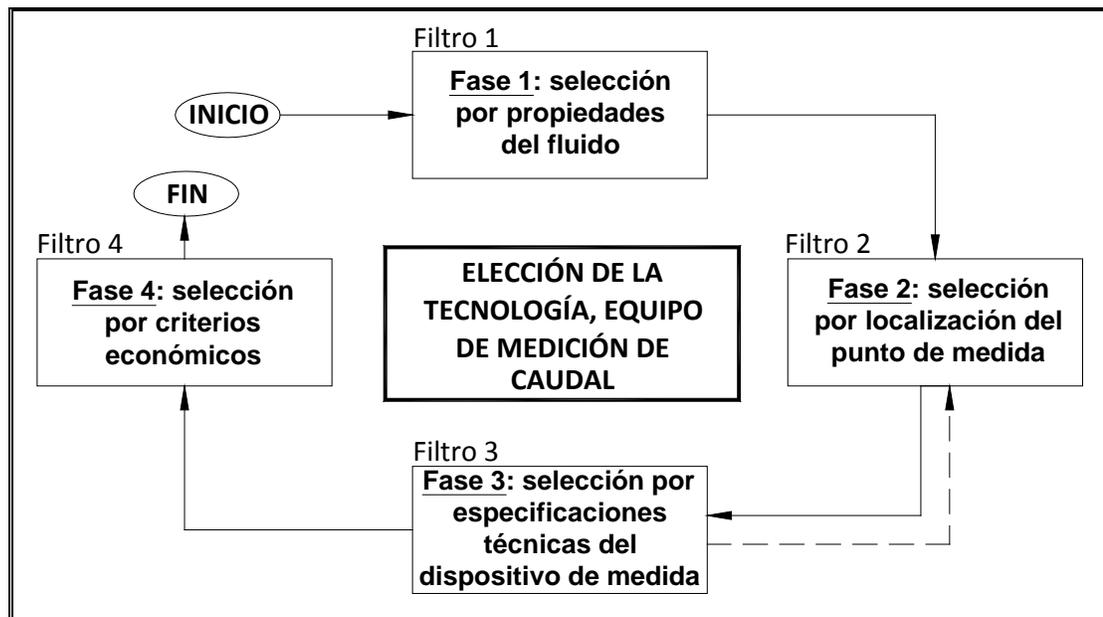
- Tipo de fluido. Esta propiedad determina si el tipo de fluido es líquido, gas, vapor o mixto. Es obvio que este parámetro será siempre un líquido por el alcance de este documento, pero es trascendente si se designa un líquido como mixto, en este caso agua que transporte sólidos o burbujas de aire, donde fluyen conjuntamente y no se mezclan (fluidos no miscibles). Por ejemplo, en un sistema de acueducto urbano el agua que llega antes de pasar por el proceso de tratamiento puede contener sólidos en suspensión o aire, mientras que el agua

que pasa por un sistema de tratamiento será más limpio, “sin sólidos en suspensión”, pero probablemente con burbujas de aire.

Por lo tanto, este parámetro es relevante en la medida en que caracteriza un líquido mixto (agua + sólidos o aire), al considerando que no todos los equipos de medición de caudal de un líquido como el agua operan con la presencia de gases (burbujas de aire) o sólidos en suspensión.

Todos los dispositivos de medición están diseñados para trabajar con una sola fase o tipo de fluido, líquido o gaseoso, pero no con ambos a la vez, lo cual reportaría resultados erróneos. Soló en casos especiales como en la medición del agua se aceptan cantidades mínimas de burbujas de aire o sólidos en suspensión, cuyo rango de admisibilidad varía dependiendo de cada tecnología.

Flujograma 7. Metodología para la selección de equipos de medición de caudal



Fuente: autor.

- Porcentaje de aire o burbujas en volumen. Es importante identificar el porcentaje de aire que puede estar presente en el volumen del líquido o agua, como en este caso, debido a que para algunas tecnologías es importante la presencia de partículas, burbujas de gas u otras sustancias homogéneas, así como para los equipos de medición ultrasónico, que utilizan el efecto Doppler y son adecuados para fluidos con presencia de gas o sólidos en contenido superior al 1% en volumen, debido a que las burbujas de aire afectan la velocidad de propagación del sonido en el fluido, mientras que para los equipos volumétricos o de desplazamiento positivo y de turbina es crítica la presencia de estas burbujas en



la medición de un líquido, arrojando resultados erróneos con un contenido del 2 a 5% en volumen o superior, al volver los fluidos compresibles.

- Porcentaje de partículas sólidas en suspensión en volumen. Es importante identificar el porcentaje de sólidos en suspensión que puede estar presente en el volumen del líquido o agua, en este caso, debido a que para algunas tecnologías es importante la presencia de partículas, burbujas de gas u otras sustancias homogéneas, así como para el equipo de medición ultrasónico que utiliza el efecto Doppler y son adecuados para fluidos con presencia de gas o sólidos en contenido superior al 1% en volumen, mientras que para los equipos ultrasónicos que utilizan el método de tiempo de tránsito es crítica la medición a partir del 1% en volumen de contenido de sólidos y gases en la modificación de inyección de ultrasonidos y prácticamente imposible a partir del 2% de presencia en volumen.
- Tipo de escenario de trabajo. Hace referencia al punto de medida del caudal si es sobre un escenario de una tubería cerrada y a presión, considerando que el alcance de este documento es únicamente para equipos de macromedición que operan sobre esta condición.

Los dispositivos de medición de caudal caracterizados en este documento (véase Capítulo 3) son incapaces de tomar medidas en condiciones no presurizadas o si la tubería no está totalmente llena, con la excepción de algunos equipos electromagnéticos que pueden operar sobre una tubería parcialmente vacía pero lo suficientemente llena, donde los electrodos de medición puedan estar siempre en contacto con el fluido y el error de medición es proporcional al contenido del aire.

- Temperatura y presión máxima de trabajo. Es necesario conocer los valores máximos de trabajo en temperatura y presión del punto de medición del sistema de acueducto, debido a que cada tecnología opera para condiciones máximas diferentes, dependiendo del material con el cual esté fabricado y disponible en el mercado.
- Número de Reynolds mínimo de trabajo. Se debe conocer el valor mínimo de operación del número de Reynolds, debido a que cada tecnología funciona de una forma eficiente para números de Reynolds mínimos diferentes, donde las tecnologías que operan para números de Reynolds bajos y recomendados por los fabricantes son los dispositivos volumétricos o de desplazamiento positivo, seguido de los electromagnéticos y de placas de orificio.
- Conductividad. Conocer esta propiedad del fluido sólo es importante para los equipos de medición electromagnéticos, ya que pueden generar problemas de medición (errores y lecturas inestables) por debajo del mínimo especificado en los niveles de conductividad (0,05 a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$).



Para las demás tecnologías el nivel de conductividad del fluido es indiferente a los resultados de sus mediciones.

La Tabla 20 muestra una comparación entre los diversos tipos de tecnologías de medida de caudal (véase numeral 3.1) y las propiedades del fluido requeridos para cada tecnología y descritos anteriormente, lo cual ayuda a una primera selección de los equipos de medida aptos para el usuario, según sea el caso en particular que se derive dentro del sistema de acueducto urbano.

Además se realiza una calificación cualitativa para cada uno de los criterios, como resultado de la comparación con las demás tecnologías, definiendo tres niveles básicos: bajo, moderado y alto.

6.1.2 Fase 2: selección por localización del punto de medida

Desarrollada la Fase 1, se define un nuevo filtro en la selección de tecnologías para la medición de agua circundante por las conducciones cerradas y a presión de un sistema de acueducto urbano, limitada por los requerimientos y recomendaciones de la localización del punto de medida de caudal, que varía dependiendo de cada tecnología disponible en el mercado (véase numeral 3.1).

Los requerimientos y recomendaciones que se deben tener en cuenta en esta fase son los siguientes:

- Tramos de entrada y salida rectos y libres de accesorios. Se recomienda disponer de una longitud recta y libre de accesorios antes y después del equipo de medida del caudal, para garantizar buenos resultados y disminución de errores en la medida.

Cada proveedor acepta diversas longitudes de tramos libres, existiendo diferencias en las recomendaciones según la tecnología del dispositivo. Mientras que para algunos son indiferentes para otros son altos los efectos en los errores en la medida del caudal que pueden causar los codos, las reducciones, las válvulas y demás accesorios en una perturbación del perfil de velocidad.

- Orientación del equipo de caudal. Es importante conocer la orientación (horizontal, vertical o inclinado) que tendrá el equipo en el sitio de instalación con el que puede operar el dispositivo según el tipo de tecnología, ya que no todos los dispositivos de medida de caudal funcionan en tuberías orientadas arbitrariamente, como es el caso de los equipos de sección variable o rotámetros que sólo operan en forma vertical.



Tabla 20. Selección de equipos de caudal de acuerdo con las propiedades del fluido, Fase 1

Aplicación		Grupo							
		A	B	C	D	E	F	G	
								G1	G2
Tipo de fluido	Líquido	√	√	√	√	√	√	√	√
	Gas	√	√	√	√	√	--	√	√
	Vapor	√	--	--	√	√	--	--	√
	Mixto (Líquido + aire)	√	--	√	√	--	√	√	√
	Mixto (Líquido + sólidos)	--	--	√	√	--	√	√	√
	Calificación en su aplicación en acueductos urbanos por la variedad del tipo de flujo de trabajo permitido.	Moderado	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto
Porcentaje de aire o burbujas en volumen	Rango de admisibilidad en la medición de líquidos.	> 0%	0%	< 2% a 5%	< 2% a 5%	0%	< 5%	> 1%	< 1% a 2%
	Calificación en su aplicación en acueductos urbanos por el porcentaje de aire permitido en el líquido o agua.	Alto	Bajo	Moderado	Moderado	Bajo	Alto	Alto	Moderado
Porcentaje de partículas sólidas en suspensión en volumen	Rango de admisibilidad en la medición de líquidos.	0%	0%	< 2% a 5%	< 2% a 5%	0%	< 25%	> 1%	< 1% a 2%
	Calificación en su aplicación en acueductos urbanos por el porcentaje de partículas sólidas permitido en el agua.	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo
Tipo de escenario de trabajo	Medición de caudal sobre una tubería cerrada, totalmente llena o presurizada.	√	√	√	√	√	√	√	√
	Medición de caudal sobre una tubería cerrada, parcialmente vacía pero lo suficientemente llena.	--	--	--	--	--	√*	--	--
	Calificación en su aplicación según los tipos de escenarios analizados.	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado
Temperatura máxima de trabajo (°C)	Límites máximos disponibles.	1,000	450	250	500	400	250	200	200
	Calificación en su aplicación según su temperatura máxima de trabajo permitido.	Alto	Moderado	Bajo	Moderado	Moderado	Bajo	Bajo	Bajo



Aplicación		Grupo							
		A	B	C	D	E	F	G	
								G1	G2
Presión de trabajo máxima (PSI)	Límites máximos disponibles.	7,000	1,400	700	40,000	3,500	2,000	2,900	2,900
	Calificación en su aplicación según su temperatura máxima de trabajo permitido.	Moderado	Moderado	Bajo	Alto	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado
Número de Reynolds mínimo de trabajo	Límites mínimos aconsejables.	3,000	2,000	100	5,000	5,000	2,000	5,000	10,000
	Flujo laminar.	--	--	√	--	--	--	--	--
	Flujo turbulento.	√	√	√	√	√	√	√	√
	Calificación en su aplicación según su número de Reynolds mínimo de trabajo permitido.	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Conductividad	Líquidos conductivos.	√	√	√	√	√	√	√	√
	Líquidos no conductivos.	√	√	√	√	√	--	√	√
	Rango de admisibilidad en $\mu\text{S/cm}$.	/	/	/	/	/	0,05 a 50	/	/
	Calificación en su aplicación según su dependencia de líquidos conductivos y no conductivos.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Alta	N/A	N/A

Fuente: tomado de manuales, cartillas y demás documentos que publican los fabricantes de equipos de medición de caudal, (véase capítulo de referencias).

Leyenda:

√	Apto	Grupo A: equipos de presión diferencial (PD)	Grupo E: equipos vortex
--	No apto	Grupo B: equipos de sección variable (rotámetros)	Grupo F: equipos electromagnéticos
N/A	No Aplica	Grupo C: equipos volumétricos o de desplazamiento positivo (PD)	Grupo G1: equipos ultrasónicos método Doppler
		Grupo D: equipos de turbina	Grupo G2: equipos ultrasónicos método tiempo de tránsito

Notas:

(*) Aplicable únicamente para algunos modelos.



- Dirección de flujo (unidireccional / bidireccional). Es importante definir si el requerimiento del equipo de medición de caudal debe ser de uso unidireccional o bidireccional, ya que no todos los dispositivos son capaces de medir en los dos sentidos (directo e inverso).
- Diámetro nominal. Este requerimiento es de gran importancia en la selección del equipo de medición de caudal, ya que no todas las tecnologías disponen de la misma cobertura en diámetros nominales. Por ejemplo, los equipos de sección variable se califican como de baja disponibilidad en diámetros nominales comparados con otras tecnologías como los equipos electromagnéticos o ultrasónicos, cuya disponibilidad en el mercado es mucho más amplia.

La Tabla 21 muestra una comparación entre los diversos tipos de tecnologías de medida de caudal (véase sección 3.1) y los requerimientos y recomendaciones de localización descritos anteriormente, lo cual ayuda en el desarrollo de un segundo filtro para la selección de los equipos de medida aptos para el usuario, según sea el caso en particular que se derive dentro del sistema de acueducto urbano.

Además se realiza una calificación cualitativa para cada uno de los criterios, como resultado de la comparación con las demás tecnologías, definiendo tres niveles básicos: bajo, moderado y alto.

6.1.3 Fase 3: selección por especificaciones técnicas del dispositivo de medida

Los factores de selección de tecnologías para la medición del agua circundante por las conducciones cerradas y a presión de un sistema de acueducto urbano que involucra esta fase implican una gran importancia en la operación del servicio en sus costos de operación (incertidumbre en la cantidad del agua producida y vendida, estimación del agua no contabilizada – IANC), ante las características técnicas que requiere el usuario en el contador. Esta fase hace referencia a la precisión y repetibilidad, entre otros parámetros de importancia, que se pueden alcanzar con cada tecnología disponible en el mercado.

Esta fase se ubica en un nivel tres, ya que sin la consideración o cumplimiento de las demás fases no se pueden garantizar algunas características de funcionamiento que se mencionan aquí, como la precisión del equipo de medición.

Las características que involucra esta fase son las siguientes:

- Precisión. Esta característica de los equipos de medición se define como la proximidad a la concordancia absoluta entre el valor medido y el valor real de lo que se mide, generalmente especificada por los fabricantes en porcentaje, en proporción respecto a la lectura o en términos de porcentaje respecto al valor de

fondo de escala, siendo para este último la variación que puede tener un equipo de macromedición respecto a un campo o valores de trabajo.

- **Repetibilidad:** Es la capacidad que tiene un equipo de macromedición para dar respuestas o resultados idénticos, repitiendo una situación con los mismos valores de la cantidad medida y las mismas condiciones de trabajo establecidas. La buena precisión de un equipo de macromedición garantiza una buena repetibilidad, pero una buena repetibilidad no garantiza una buena precisión.
- **Rangeabilidad o rango dinámico.** Se define como la habilidad de controlar una variable. Por ejemplo, la rangeabilidad de un equipo de medición de caudal de 100:1 significa que se puede llegar a controlar la centésima parte del rango de valores de la medida. Si el dispositivo mide hasta 100 litros por segundo máximo, se puede reducir el caudal hasta 1 litro por segundo, como mínimo.
- **Pérdidas de carga.** Cada tecnología ofrece una pérdida de carga diferente, unas más altas que otras. Su diferencia radica principalmente en si el dispositivo tiene piezas al interior del tubo de medición o no.

En la evaluación de esta característica es importante conocer la limitación del sistema de acueducto en presión y de esta forma seleccionar los equipos que tienen piezas en el interior del tubo de medición o no, que produzcan pérdidas de carga.

- **Señal de entrada.** El tipo de variable de medición o señal de entrada que genera el sensor para el transmisor que lo procesa y lo convierte en una señal de salida estandarizada, que puede utilizar para cualquier propósito el usuario o cliente del equipo de medición determina una opción en la elección de la tecnología del contador de caudal volumétrico.

La Figura 21 describe los diferentes tipos de señal de entrada, que dependen de la tecnología del sensor, y los usuales tipos de señales de salida, que dependen del transmisor, además exterioriza de una forma simplificada el equipamiento de un dispositivo de medición de caudal.

- **Normas estándares.** El tipo de norma que regula los estándares de medición de caudal, así como la existencia de una normatividad para cada tecnología generan un indicador de selección para el usuario, donde cada tecnología dispone de una serie de manuales, referencias estándares, documentos y demás fuentes de información.

En la Tabla 22 se describen las fuentes de información más importantes por cada tecnología, aclarando que actualmente existe una gran variedad de información relacionada con este contexto que puede causar confusión.



Tabla 21. Selección de equipos de caudal de acuerdo con la localización del punto de medida, Fase 2

Aplicación		Grupo							
		A	B	C	D	E	F	G	
								G1	G2
Tramos de entrada y salida rectos y libres de accesorios	Antes del equipo de medición.	20 x DN a 40 x DN	0 x DN	3 x DN	20 x DN	25 x DN	10 x DN	20 x DN	15 x DN
	Después del equipo de medición.	10 x DN	0 x DN	2 x DN	5 x DN				
	Caso especial, antes del equipo de medición con presencia de válvulas parcialmente abiertas.	50 x DN	0 x DN	0 x DN	50 x DN	50 x DN	50 x DN	50 x DN	50 x DN
	Calificación en su requerimiento mínimo de disposición en terreno por tramos requeridos rectos y libres de accesorios a la entrada y salida del equipo de medición.	Alto	Bajo	Bajo	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado
Orientación del equipo de caudal	Horizontal.	√	--	√	√	√	√	√	√
	Vertical (*).	√	√	√	√	√	√	√	√
	Inclinado (**).	√	--	√	√	√	√	√	√
	Calificación por su flexibilidad en los requerimientos de orientación del equipo de caudal en terreno.	Alto	Bajo	Moderado	Moderado	Alto	Alto	Alto	Alto
Dirección de flujo	Unidireccional.	√	√	√	--	√	--	--	--
	Bidireccional.	√***	--	--	√	--	√	√	√
	Calificación por su flexibilidad en la medición del flujo en ambas direcciones.	Moderado	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto
Diámetro nominal	Rango de disponibilidad mínimo.	½"	0,08"	0,2"	0,2"	½"	0,04"	0,2"	0,08"
	Rango de disponibilidad máximo.	160"	6"	16"	32"	12"	120"	> 0,2"	> 0,08"
	Calificación en disponibilidad de diámetros en el mercado.	Alto	Bajo	Moderado	Alto	Moderado	Alto	Alto	Alto

Fuente: tomado de manuales, cartillas y demás documentos que publican los fabricantes de equipos de medición de caudal, (véase capítulo de referencias).

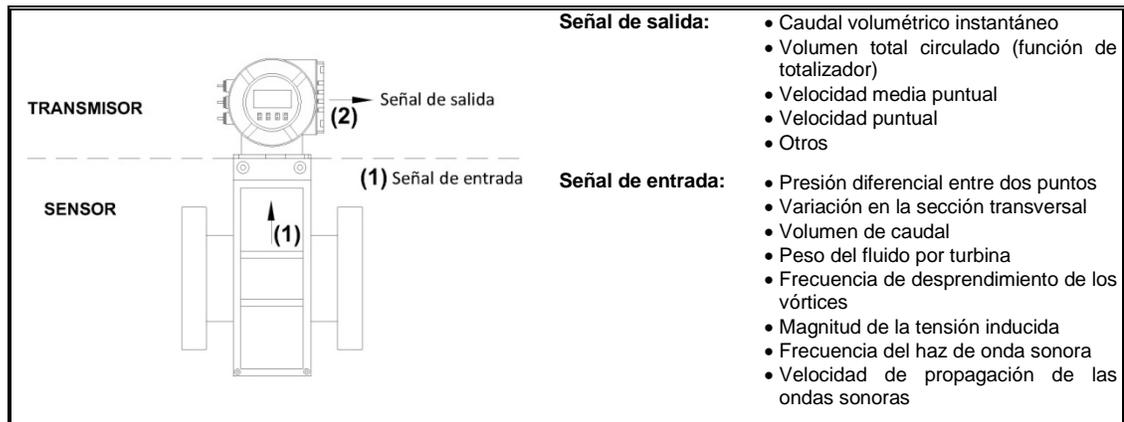
Leyenda:

√	Apto	Grupo A: equipos de presión diferencial (PD)	Grupo E: equipos vortex
--	No apto	Grupo B: equipos de sección variable (rotámetros)	Grupo F: equipos electromagnéticos
		Grupo C: equipos volumétricos o de desplazamiento positivo (PD)	Grupo G1: equipos ultrasónicos método Doppler
		Grupo D: equipos de turbina	Grupo G2: equipos ultrasónicos método tiempo de tránsito

Notas:

- (*) Las mediciones en las tuberías verticales descendentes no las recomiendan los fabricantes en ningún caso.
- (**) Dado el caso de que el agua contenga burbujas de aire o partículas sólidas en suspensión debe disponerse el equipo de medición en terreno siempre en ascenso vertical. Nunca debe ubicarse el equipo de medición en el punto más alto, por lo que en ese sitio se acumulan los gases o burbujas de aire, ni en el punto más bajo por lo que ahí se acumulan las partículas sólidas.
- (***) La mayoría de los equipos de presión diferencial son unidireccionales, sólo algunos dispositivos especiales de placa de orificio y los tubos pitot son la excepción.

Figura 21. Tipos de señales de entrada y salida. Sensor y transmisor



Fuente: autor.

En la Tabla 22 se muestra una comparación entre los diversos tipos de tecnologías de medida de caudal (véase numeral 3.1) y las especificaciones técnicas del dispositivo, el cual ayuda en el desarrollo de un tercer filtro para la selección de los equipos de medida aptos para el usuario, según sea el caso en particular que se derive dentro del sistema del acueducto urbano.

Además, se realiza una calificación cualitativa para cada uno de los criterios, como resultado de la comparación con las demás tecnologías y en la definición de tres niveles básicos: bajo, moderado y alto.

6.1.4 Fase 4: selección por criterios económicos

La fase que cierra el ciclo de selección de un equipo de medición de caudal para el uso en un sistema de acueducto urbano son los costos económicos que se generan con la adquisición del equipo, instalación, funcionamiento, mantenimiento, calibración, incertidumbre en la medición, entre otros parámetros que definen la selección final del contador, los cuales se describen a continuación:

- Costo de adquisición del equipo. El costo de estos equipos depende en gran medida de las especificaciones del contador en su precisión, repetibilidad, rangeabilidad, o por los materiales de su construcción y las funciones del transmisor, que dependiendo de la señal de salida requerida por el usuario podrían aumentar su costo adquisitivo.
- Costos de instalación. Estos costos hacen referencia a todas las actividades necesarias para la puesta en marcha de los equipos, actividad que comprende la construcción de las obras civiles, mecánicas o eléctricas, incluyendo el sistema de control.



Tabla 22. Selección de equipos de caudal de acuerdo con las especificaciones técnicas del dispositivo de medida, Fase 3

Aplicación		Grupo							
		A	B	C	D	E	F	G	
								G1	G2
Precisión	Precisión del contador típico según tecnología.	± 0,6 a 4,0%	± 1,0 a 4,0%	± <0,1 a 2,0%	± 0,1 a 2,0%	± 0,5 a 1,0%	± 0,2 a 1,0%	± 1,0 a 2,0%	± 0,5 a 5,0%
	Calificación comparada con las otras tecnologías.	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo
Repetibilidad	Repetibilidad del contador típico según tecnología.	0,5%	0,5 a 1,0%	0,02%	0,02%	0,1 a 0,2%	0,1 a 0,2%	0,5%	0,25%
	Calificación comparada con las otras tecnologías.	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Moderado	Moderado	Bajo	Moderado
Rangeabilidad	Rangeabilidad del contador típico según tecnología.	3:1 6:1 36:1	10:1	50:1	25:1	25:1	>100:1	>20:1	>20:1
	Calificación comparada con las otras tecnologías.	Bajo	Bajo	Alto	Moderado	Moderado	Alto	Alto	Alto
Pérdida de carga	Pérdida de carga ocasionada por el equipo de medición (*).	4 a 8xV ² /2g	3xV ² /2g	2xV ² /2g	2xV ² /2g	2xV ² /2g	0xV ² /2g (*)	0xV ² /2g (*)	0xV ² /2g (*)
	Calificación comparada con las otras tecnologías.	Alto	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Bajo	Bajo	Bajo
Señal de entrada	Medida que realiza el sensor.	Presión diferencial entre dos puntos	Variación en la sección transversal	Volumen de caudal	Paso del fluido por la turbina	Frecuencia de desprendimiento de los vórtices	Magnitud de la tensión inducida	Frecuencia del haz de onda sonora	Velocidad de propagación de las ondas sonoras
	Método de la medida del caudal volumétrico.	Indirecto	Indirecto	Directo	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto
Normas estándares	Descripción de normas estándares de ámbito mundial y para líquidos.	ISO 5167-1, ASME MFC3M	ISO 11605, ASME MFC.18M	ISO 2714, AWWA C710 – M6	ISO 4064-2, AWWA M33	ISO/TR.12764, ASME MFC-6M, OIML D25	ISO 6817-9104-13359, ASME MFC-16M	IEC 41, ISO/TR 12765	IEC 41, ISO/TR 12765

Fuente: tomado de manuales, cartillas y demás documentos que publican los fabricantes de equipos de medición de caudal, (véase capítulo de referencias).

Leyenda:

√	Apto	Grupo A: equipos de presión diferencial (PD)	Grupo E: equipos vortex
--	No apto	Grupo B: equipos de sección variable (rotámetros)	Grupo F: equipos electromagnéticos
		Grupo C: equipos volumétricos o de desplazamiento positivo (PD)	Grupo G1: equipos ultrasónicos método Doppler
		Grupo D: equipos de turbina	Grupo G2: equipos ultrasónicos método tiempo de tránsito

Notas:

(*) Las tecnologías de equipos de ultrasonido, electromagnéticos y equipos de inspección sólo ofrecen pérdidas de carga por rozamiento, las cuales se hacen casi indiferentes para el sistema de acueducto.



- Costos de funcionamiento. Los costos de funcionamiento de los equipos de medición de caudal hacen referencia principalmente a los costos eléctricos y a los del personal técnico y profesional necesario para su operación.
- Costos de mantenimiento. Los costos de mantenimiento de un equipo de medición de caudal comparados con otra tecnología pueden variar mucho. Esta variación se puede deber a que existen dispositivos con partes móviles, de mayor sensibilidad al desgaste, perturbación en la medición del caudal por la presencia de sólidos en suspensión en el líquido o por sedimentación de estos, lo cual requiere de mayor atención y mantenimiento rutinario.

Otro concepto que se debe tomar en cuenta en los costos de mantenimiento es el valor de las piezas de repuesto de los equipos, su disponibilidad, los tiempos de entrega, la adquisición de piezas equivalentes, entre otros.

- Costos de calibración. Cada tecnología requiere una re-calibración y verificaciones periódicas en campo o laboratorio diferentes. Los costos en que se puede incurrir en la calibración de un equipo instalado en campo y las verificaciones metrológicas rutinarias pueden ser demasiado altos.
- Costos de incertidumbre en la medición. Este parámetro hace referencia a los costos ocasionados por los errores sistemáticos en la precisión de los equipos de medición.

Ante la incertidumbre en la medición, el usuario o cliente seguramente preferirá adquirir e instalar el mejor instrumento de precisión, dejando en un segundo plano el costo del equipo.

Un ejemplo claro de esta situación es comparar los costos de incertidumbre de la medición con la toma de medidas de caudal sobre una red matriz o primaria con un equipo ultrasónico de método de tiempo de tránsito con múltiples caminos o con cuatro sondas que puede representar una incertidumbre del $\pm 2\%$, con un equipo electromagnético cuidadosamente calibrado e instalado en terreno con todas las consideraciones mínimas requeridas, que puede llegar a una precisión o incertidumbre del $\pm 0,2\%$.

En el primer caso la incertidumbre en los ingresos estaría por encima de los US\$182.500.000 por 1.000 galones americanos; y en el segundo caso, con la medición del equipo electromagnético, la incertidumbre de los ingresos estaría alrededor de los US\$18.250 por 1.000 galones americanos¹¹.

¹¹ Altendorf, Matthias & otros (2005). *Medición de caudal*. Barcelona, España: Endress + Hauser.



En la Tabla 23 se muestra una comparación entre los diversos tipos de tecnologías de medida de caudal (véase numeral 3.1) y los criterios económicos, el cual ayuda en el desarrollo final de la selección de equipo de medida de caudal apto para el usuario, según sea el caso en particular que se derive dentro del sistema del acueducto urbano.

Tabla 23. Selección de equipos de caudal de acuerdo con criterios económicos, Fase 4

Aplicación		Grupo							
		A	B	C	D	E	F	G	
								G1	G2
Costo de adquisición del equipo	¿Amplia variedad de modelos y materiales disponibles en el mercado? Con un "Sí" implicaría variedad de precios.	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	¿Disponibilidad de equipos de inserción? Lo que implica menores costos.	Sí (*)	No	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí
Costo de instalación	¿Se pueden instalar en cualquier tipo de tubería?	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No (**)	No (**)
	¿Fáciles de transportar e instalar?, ¿equipos de bajo peso y dimensiones?	No	Sí	No	No	No	No	Sí	Sí
	¿Para su instalación es necesario cortar la tubería, excluyendo los equipos de inspección o sondas externas?	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
Costo de funcionamiento	¿Hay disponibilidad de equipos que no requieren alimentación eléctrica?	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No
	Alimentación	2 hilos	Sin	Sin	Sin	2 hilos	Red o batería	Red o batería	Red o batería
Costo de mantenimiento	¿Dispositivos sin partes móviles?	Sí	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí
	¿Costos adicionales por efectos de abrasión, que puedan causar el transporte de sólidos en las partes internas de los equipos de medición?	Sí	No	Sí	Sí	Sí	No	No	No



Aplicación		Grupo							
		A	B	C	D	E	F	G	
								G1	G2
	¿Para su mantenimiento no requiere de suspensión del servicio?	No	No	No	No	No	No	Sí	Sí
Costo de calibración	¿Puede calibrarse en campo?	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Calificación comparada con las otras tecnologías, por periodicidad en rutinas de calibración y verificaciones metrológicas.	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Moderado	Bajo	Alto
Costo de incertidumbre en la medición	Calificación comparada con las otras tecnologías.	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto

Referencias: tomado de manuales, cartillas y demás documentos que publican los fabricantes de equipos de medición de caudal, (véase capítulo de referencias).

Grupo A: equipos de presión diferencial (PD)	Grupo E: equipos vortex
Grupo B: equipos de sección variable (rotámetros)	Grupo F: equipos electromagnéticos
Grupo C: equipos volumétricos o de desplazamiento positivo (PD)	Grupo G1: equipos ultrasónicos método Doppler
Grupo D: equipos de turbina	Grupo G2: equipos ultrasónicos método tiempo de transito

Notas:

(*) Aplica para el tubo pitot.

(**) En la instalación de equipos de fijación externa se debe garantizar que la señal pase el material de la tubería, conociendo necesariamente el grosor de la tubería y material de recubrimiento.

agua fisicoquímico y microbiológico, para Colombia véase Resolución 2115 de 2007).

- Columna 3. Dirección del punto de macromedición, según nomenclatura vial o descripción de lugares cercanos.
- Columna 4. Tipo de lectura, caudal, presión o de calidad de agua (parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, para Colombia véase Resolución 2115 de 2007).
- Columna 5. Fecha de la toma de lectura en formato DD/MM/AAAA.
- Columnas 6. Corresponde a los tiempos de registro con los cuales se guarda la información. Se recomiendan registros de medición de caudales y presión cada sesenta (60) segundos y para las mediciones de calidad de agua la frecuencia y el número de muestras de control se debe realizar según la normatividad ambiental vigente (para Colombia véase Resolución 2115 de 2007 – Capítulos V y VI).

En estas columnas se debe exigir la descripción de la unidad de medición de los datos dispuestos en la tabla.

7.2 CONSOLIDACIÓN DE DATOS

Registrada la información obtenida en terreno, como se describe en el numeral 7.1 REGISTRO DE DATOS BRUTOS, es fácil que el operador o supervisor del sistema de macromedición en el área de control identifiquen la ausencia de datos o vacíos de información.

Identificada la ausencia de información, producto de errores en el sistema de comunicación, interferencia en las mediciones causada por robos, fallas en la alimentación eléctrica principal y alterna o por actividades de mantenimiento, entre otros, se debe proceder a la completitud de datos faltantes, de acuerdo con el procedimiento que se plantea a continuación (Cruz, 2009)¹².

- Caso 1. A la cantidad de datos faltantes en el mes inferior o igual al 50%, para los equipos de medición de caudal o presión que se encuentren a la salida de un tanque de almacenamiento o sobre un punto de red matriz o de distribución, sin incluir puntos sobre las líneas de impulsión, se recomienda ajustar los valores ausentes con el promedio de las mismas horas y días de la semana del mismo mes considerado, y si existen días festivos en el periodo de ajuste se debe

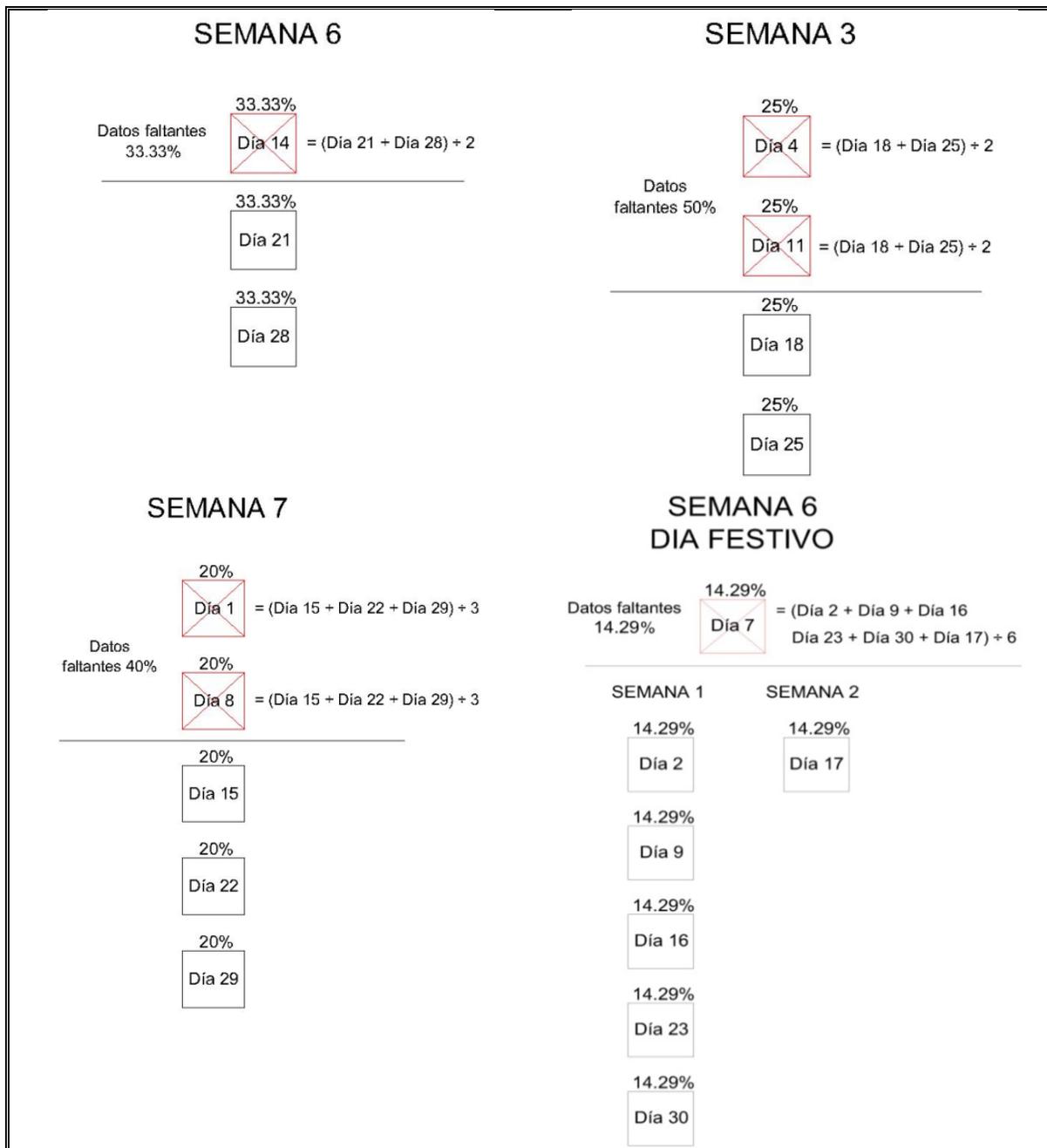
¹² Tomado de la referencia Cruz, M. (2009). *Protocolo informes de aprobación de la macromedición mensual de la sectorización*. Bogotá, Colombia: Unión Temporal Aqua 2008 – Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB E.S.P.



realizar el promedio de los datos usando los valores de caudal promedio de los días domingos y festivos del mes que se analiza.

En la Figura 23 se presentan cuatro ejemplos de completitud de datos típicos, que aplican para el caso de datos faltantes en el mes inferior o igual al 50%.

Figura 23. Ejemplos tipo, consolidación de datos para casos \leq al 50% en ausencia de datos



Fuente: Cruz, 2009.

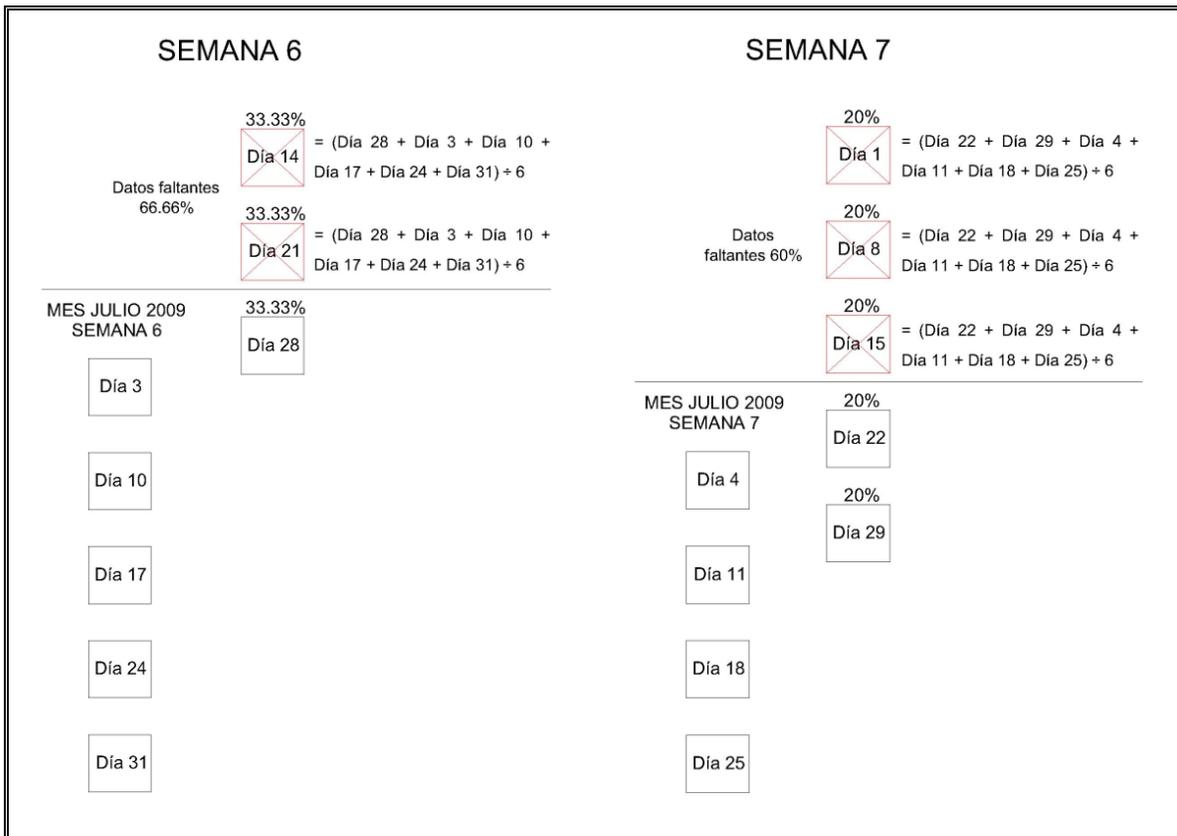
Figura 24. Tabla tipo, presentación de datos brutos ausentes

Unidad de distribución	Código del punto de macromedición	Dirección del macromedidor	Tipo de lectura (Caudal, presión, calidad de agua)	Fecha	Lecturas (describir la unidad)						
					00:00	00:30	00:60	....	....	23:00	23:30
					L1	L2	L3	....	....	L47	L48
XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	01/10/2003	120.1	125.5	130.7	.....	.....	122.2	111.3
XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	02/10/2003	126.2	125.2	122.3	.....	.....	134.2	132.1
XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	03/10/2003	140.0		143.2	.....	.....	148.0	112.6
.....
.....
.....
XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	29/10/2003	110.2	110.1	111.2	.....	.....	134.4	118.2
XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	30/10/2003	135.4	123.8	112.4	.....	.....	145.2	135.9
XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	31/10/2003	169.3	174.2	161.9	.....	.....	145.1	150.3

Fuente: Cruz, 2009.

- Caso 2. A la cantidad de datos faltantes en el mes superior al 50% y para los equipos de medición de caudal o presión que se encuentren a la salida de un tanque de almacenamiento o sobre un punto de la red matriz o de distribución, sin incluir los puntos sobre las líneas de impulsión, se recomienda ajustar los valores ausentes utilizando los promedios diarios de los registros históricos del mes anterior, teniendo en cuenta los mismos días y horas de la semana del mes analizado.
- En la Figura 25 se presentan dos ejemplos de completitud de datos típicos, que aplican para el caso de datos faltantes en el mes superior al 50%.
- Caso 3. Cuando por causas externas o propias del funcionamiento de un equipo de medición de caudal o presión ubicado a la salida de un bombeo o en una línea de impulsión se presenten datos faltantes en el mes inferior o igual al 50% en algunas horas del mes, se recomienda no realizar la completitud con el promedio de las mismas horas y días de la semana del mes de análisis, sino utilizar los promedios diarios resultado del promedio de todos los datos tomados por día (48 datos en el caso de almacenar mediciones cada 60 segundos), teniendo en cuenta los mismos días de la semana del mes analizado, en los cuales no haya faltado ningún dato para el cálculo del caudal promedio del día. Esta recomendación se debe a que en un bombeo los tiempos u horas de impulsión pueden ser diferentes de un día a otro, donde no es válido promediar datos en las mismas horas y días de la semana del mes de estudio.
- En la Figura 26 se presenta un ejemplo del procedimiento para la completitud de datos ausentes, tomando un punto de medición sobre una línea de impulsión.

Figura 25. Ejemplos tipo, consolidación de datos para casos > al 50% en ausencia de datos



Fuente: Cruz, 2009.

- Caso 4. Cuando por causas externas o propias del funcionamiento de un equipo de medición de caudal y presión ubicado a la salida de un bombeo o en una línea de impulsión se presenten datos faltantes en el mes superior al 50%, se recomienda no realizar la completitud con los promedios de las mismas horas de los registros históricos del mes anterior, teniendo en cuenta los mismos días de la semana del mes analizado, sino utilizar de una vez los promedios diarios resultado del promedio de todos los datos tomados por día (48 datos en el caso de almacenar mediciones cada 60 segundos) de los registros históricos del mes anterior, teniendo en cuenta los mismos días de la semana del mes analizado. Esta recomendación se debe a que en un bombeo los tiempos u horas de impulsión pueden ser diferentes de un día a otro, donde no es válido promediar datos en las mismas horas y días de la semana.

7.3 IDENTIFICACIÓN DE DATOS ATÍPICOS

Con la completitud para todos los datos ausentes en un registro histórico mensual con el procedimiento descrito en el numeral 7.2 CONSOLIDACIÓN DE DATOS, se pueden identificar los datos atípicos, como se expone a continuación.

Figura 26. Ejemplos tipo, consolidación de datos para casos ≤ al 50% en líneas de impulsión

Fecha	S1	S2		S47	S48	Caudal promedio diario (l/s)
	00:00	00:30		23:00	23:30	
01/09/2009	0.000	0.000		0.000	51.479	74.96
02/09/2009	134.880	167.658		0.000	0.000	87.62
03/09/2009	0.000	0.000		93.107	22.971	23.26
04/09/2009	44.704	128.139		3.755	95.649	113.46
05/09/2009	166.914	167.413		0.000	0.000	105.44
06/09/2009	0.000	0.000	Dato ausente en el mes	0.000	0.000	85.43
07/09/2009	34.202	121.990		0.000	0.000	101.77
08/09/2009	0.000	0.000		0.000	0.000	96.28
09/09/2009	0.000	0.000		0.000	0.000	92.47
10/09/2009	0.000	0.000		0.000	0.000	93.91
11/09/2009	0.000	0.000		167.734	167.759	75.62
12/09/2009	167.470	167.621		0.000	0.000	107.74
13/09/2009	0.000	0.000		0.000	0.000	85.85
14/09/2009	58.699	142.064		3.515	92.502	96.44
15/09/2009	169.779	170.826		178.732	156.684	110.96
16/09/2009	113.918	168.669		0.000	0.000	104.40
17/09/2009	36.570	123.461		31.036	7.657	94.74
18/09/2009	166.60	166.70		0.00	0.00	92.64
19/09/2009	0.00	0.00		0.00	0.00	96.23
20/09/2009	0.00	0.00		0.00	0.00	86.09
21/09/2009	0.00	0.00		0.00	0.00	89.80
22/09/2009	0.00	33.06		0.00	0.00	97.91
23/09/2009	0.00	0.00		0.00	0.00	94.30
24/09/2009	0.00	0.00		0.00	0.00	94.06
25/09/2009	0.00	0.00		0.00	0.00	96.22
26/09/2009	0.00	0.00		0.00	0.00	96.88
27/09/2009	0.00	0.00		0.00	0.00	83.54
28/09/2009	0.00	57.61		0.00	0.00	102.54
29/09/2009	0.00	0.00		0.00	0.00	80.37
30/09/2009	0.00	0.00		50.08	165.98	83.54
Caudal promedio diario - mes (l/s)						91.550

$$(87.62+104.40+97.91+83.54) \div 4$$

Fuente: Cruz, 2009.

El procedimiento que se recomienda para identificar datos atípicos, anómalos o extraños dentro de cualquier serie de medición de caudal, presión o calidad de agua es la utilización de la herramienta estadística denominada “Diagrama de Cajas”.

7.3.1 Desarrollo del método estadístico Diagrama de Cajas

El Diagrama de Caja es una presentación visual que describe al mismo tiempo varias características importantes de un conjunto de datos, tales como el centro, la dispersión, la simetría o asimetría y la identificación de observaciones atípicas.

Este diagrama representa los tres cuartiles y los valores mínimos y máximos de los datos sobre un rectángulo (caja), alineados horizontal o verticalmente. Un diagrama de caja se construye como sigue a continuación:

- Ordenar los datos de la muestra y obtener el valor mínimo, el máximo y los tres cuartiles Q1, Q2 y Q3, delimitando el rango intercuartílico con la arista izquierda

(o inferior), ubicada en el primer cuartil (Q_1), y la arista derecha (o superior) en el tercer cuartil (Q_3).

- Se dibuja una línea a través del rectángulo en la posición que corresponde al segundo cuartil (que es igual al percentil 50 o a la mediana), $Q_2 = Md$.
- De cualquiera de las aristas del rectángulo se extiende una línea o bigote, que va hacia los valores extremos (valor mínimo y valor máximo). Estas son observaciones que se encuentran entre 0 y 1,5 veces el rango intercuartílico, a partir de las aristas del rectángulo.
- Las observaciones que están entre 1,5 y 3 veces el rango intercuartílico, a partir de las aristas del rectángulo, reciben el nombre de valores atípicos, anómalos o extraños. Las que están más allá de tres veces el rango intercuartílico a partir de las aristas del rectángulo se conocen como valores atípicos extremos.
- El rectángulo o caja representa el 50% de los datos que particularmente están ubicados en la zona central de la distribución. La caja representa el cuerpo de la distribución y los bigotes sus colas.

El nombre original del gráfico introducido por Jhon Tukey en 1977 es Box and Whisker Plot. Tukey en 1977 sugiere una regla sencilla para determinar los límites de una serie de datos, tomando el rango intercuartílico (RQ) o diferencia entre el tercer y primer cuartil, para definir los límites inferiores y superiores ($LI=Q_1-1,5RQ$, $LS=Q_3+1,5RQ$). Estos límites definen los extremos del diagrama (bigotes). Si el valor sobrepasa esta barrera se considera atípico y si sobrepasa los límites, $LI=Q_1-3RQ$, $LS=Q_3+3RQ$, tres veces el rango intercuartílico, se considera muy atípico.

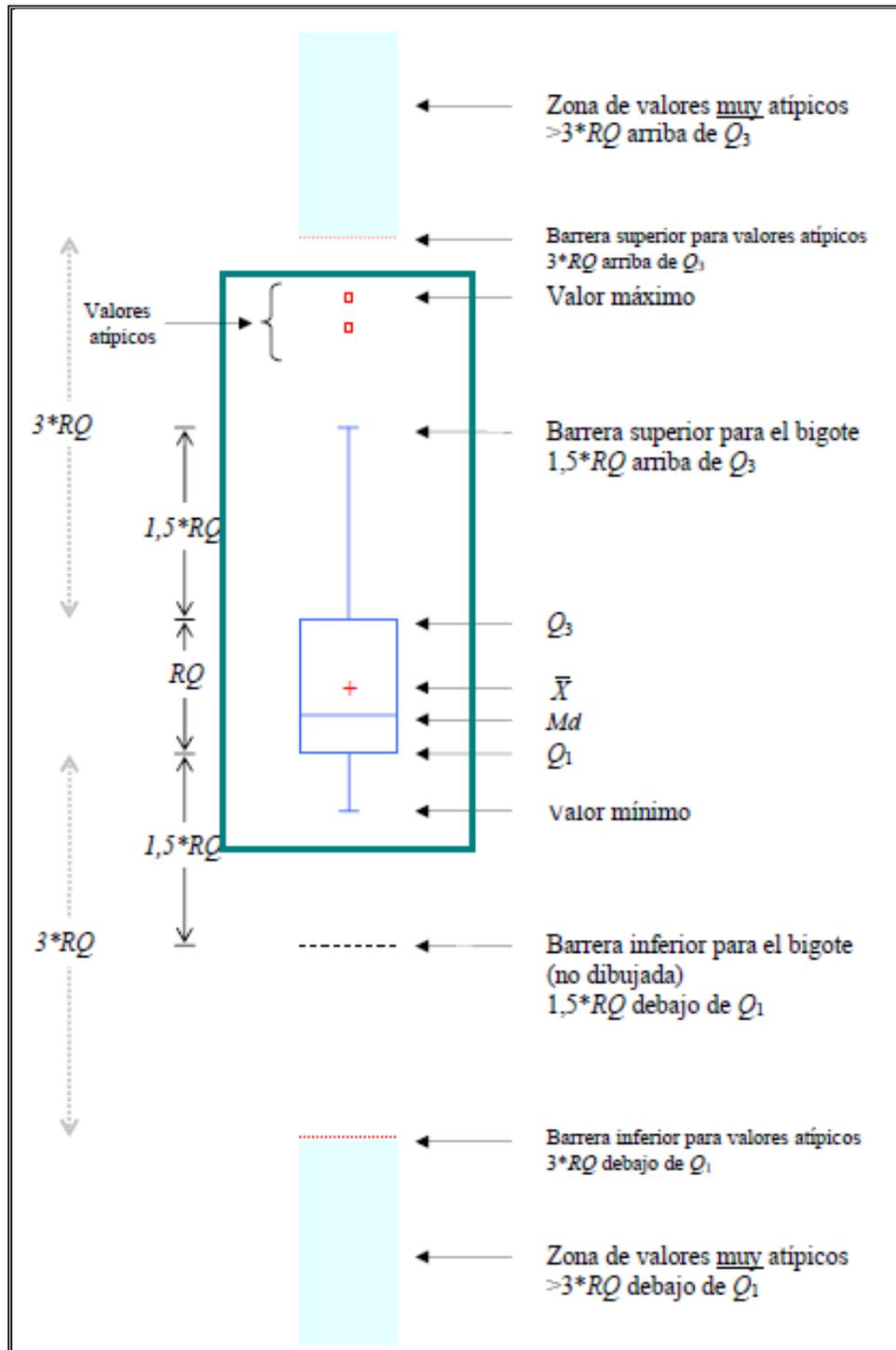
En la Figura 27 se muestra esquemáticamente un diagrama de caja indicando sus partes. En este diagrama se interpreta que la distribución de los datos es asimétrica por la derecha, ya que la longitud de los rectángulos por debajo y por encima de la mediana, así como los bigotes, indican que los datos están más agrupados en sus valores inferiores que en los superiores y, además, se observa que $X > Md$. También se destaca la existencia de dos valores atípicos en el extremo superior de los datos.

7.4 ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE DATOS ATÍPICOS, ANÓMALOS O EXTRAÑOS

Con la identificación de las lecturas de medición atípicas, anómalas o extrañas con el método estadístico Diagrama de Cajas (véase sección 7.3.1), se sugiere el siguiente proceso de análisis para la validación o no de un dato atípico.

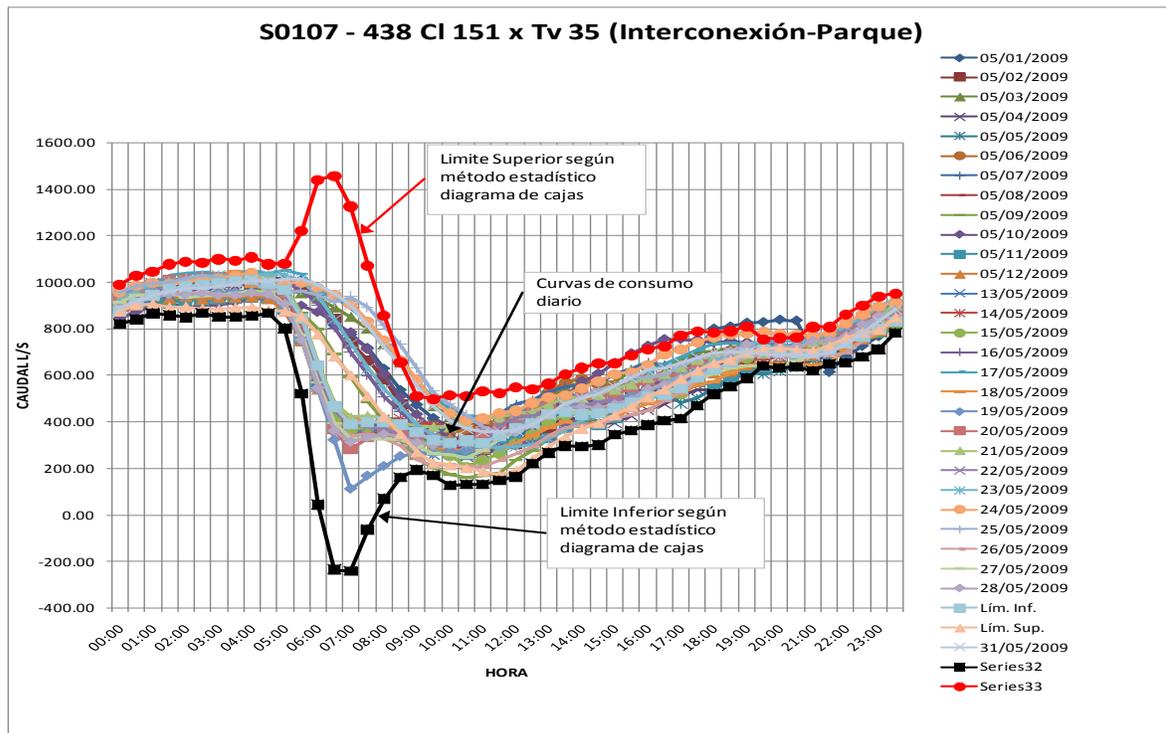
Se recomienda analizar cada uno de los puntos que se exponen a continuación, con el fin de que se pueda dar razón o explicación al dato atípico o a la desviación de la medición en el registro histórico mensual.

Figura 27. Partes de un diagrama de caja



Fuente: Cruz, 2009.

Figura 28. Gráfica tipo de un punto de medición ubicado a la salida de una unidad hidráulica



Fuente: Cruz, 2009.

- a) Análisis operacional por compensación. El propósito de este primer análisis es identificar si el dato atípico señalado, que se origina en un punto de la macromedición, se compensa o no con otro punto de macromedición que interviene en el mismo balance hidráulico de la unidad de distribución.

Si el dato atípico no se valida con este análisis, se continúa con el numeral siguiente.

- b) Análisis operacional por cambios en los límites de la sectorización. El propósito de este análisis es identificar si el dato atípico señalado se origina por las modificaciones a una sectorización definida; por ejemplo, en la apertura de una válvula de cierre permanente, en la unión de dos unidades de distribución para que uno supla la medida demandada del otro y demás cambios que se causen en los límites de la sectorización, que originan cambios en las lecturas de macromedición de las unidades de distribución intervenidas, actividades que se ejecutan habitualmente durante las labores de operación de un sistema de acueducto urbano sectorizado.

- c) Análisis operacional por ocurrencia de daños. Si el dato atípico señalado no se valida o no se explica su desviación con los dos análisis anteriores, se debe investigar si la desviación que se presenta para este dato atípico es producto de la ocurrencia de daños en la red.

- d) Análisis operacional por aumento en consumos técnicos. Si la causa de la desviación del dato atípico aún no se valida por las razones anteriores, se procede a analizar si esta desviación se presenta por un alto consumo técnico en el mes dentro de la unidad de distribución macromedida. Los consumos técnicos hacen referencia a los volúmenes de agua utilizados en lavados por hidrantes, daños presentados en la red del sistema de acueducto contabilizados desde el momento en que se reportan hasta que se reparan, incluyendo el volumen necesario desaguado para la reparación, suministro de agua a carrotanques y lavado de tanques de almacenamiento.
- e) Revisión de actividades sistemáticas. Evaluadas las condiciones anteriores y sin explicar aún la desviación del dato atípico, se procede a revisar el cumplimiento de las actividades de aseguramiento de la calidad de la información de la macromedición mencionadas en el numeral 5.2:
- Planes de mantenimiento preventivo, correctivo y migratorio.
 - Pruebas de aislamiento preliminar.
 - Pruebas de aislamiento total.
- Si no se cumplen estas actividades, se realiza el ajuste al dato atípico usando el procedimiento de completitud de datos presentado en el numeral 7.2.
- f) Caso especial. Si con esta última situación (véase el punto anterior) no se explica la razón de la desviación del dato atípico se valida.

7.5 INDICADORES DE GESTIÓN

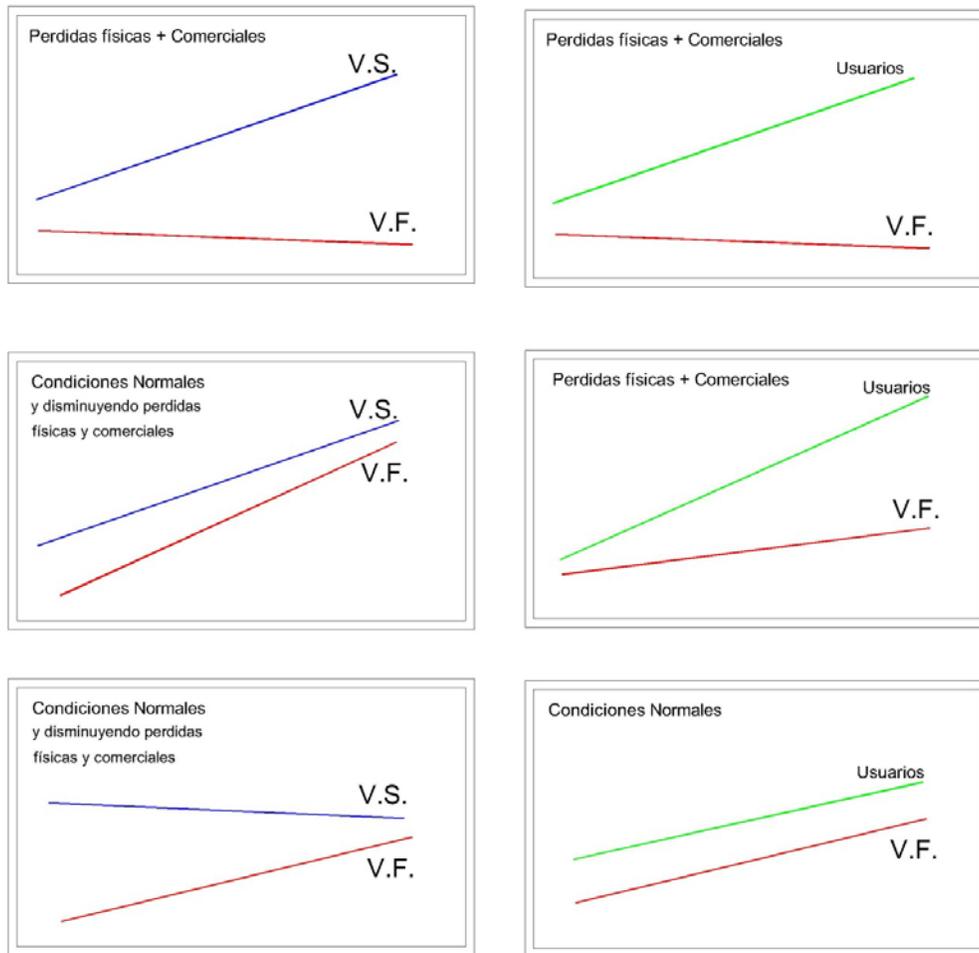
Para controlar la gestión de la producción de la información macromedida en un sistema de acueducto urbano es necesario que el operador establezca y cumpla ciertos indicadores de gestión, en los que pueda evaluar, por ejemplo, la variación de la medición por unidad de distribución y de unidades más grandes hasta toda la producción del sistema, la continuidad de la medición para cada punto de macromedición, el tiempo promedio de atención y reparación de daños a puntos de macromedición, el porcentaje de cumplimiento de las actividades de aseguramiento de la calidad de la información macromedida, entre otros.

7.6 COMPORTAMIENTOS HISTÓRICOS DE LA MEDICIÓN

El objetivo de esta sección es encontrar la causa de una variación en la medición si aún no se ha identificado, lo cual se explica, si es el caso, por un aumento de los usuarios o suscriptores para el periodo histórico analizado.

También se puede identificar la relación histórica entre los volúmenes suministrados, facturados y los usuarios suscritos a una unidad de distribución medida dependiendo su relación, como se explica a continuación (Figura 29).

Figura 29. Relaciones posibles entre volúmenes suministrados, facturados y usuarios suscritos



Fuente: autor.

Pueden presentarse más casos, los cuales se deben evaluar identificando problemas físicos + comerciales, o simplemente interpretando una condición normal.



8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La metodología desarrollada es una valiosa herramienta para implementar la macromedición en acueductos urbanos. Presenta procesos y procedimientos de mantenimiento y aseguramiento de la calidad de la información, plantea procedimientos de selección del tipo de equipo que se debería utilizar en el punto de medición particular de la red y propone una metodología para el procesamiento de la información de datos.
- El planteamiento y desarrollo metodológico concibe los siguientes propósitos generales de la macromedición: a) operar y controlar el sistema de acueducto con el monitoreo de la red, generando resultados de predicción y reacción rápida del sistema y estableciendo programas de mantenimiento y aseguramiento de la calidad de la información; b) diagnosticar el sistema con la implementación de un modelo hidráulico calibrado, evaluando el sistema, simulando eventos y desarrollando actividades de búsqueda de fugas, y c) optimizar el sistema con el planteamiento de alternativas, diseñando nuevas obras que lo optimicen y estableciendo proyectos en la reducción de pérdidas.
- Esta metodología facilita la elección del equipo de macromedición, ya que analiza el estado del arte y los avances tecnológicos en el diseño de estos aplicativos, lo cual permite observar la evolución que se presenta en el mercado para hacer menos compleja la elección del equipo adecuado. La metodología propone las siguientes cuatro fases:
 - a) Selección de un equipo de medición por las propiedades del fluido. Esta fase implica conocer el tipo de fluido, el porcentaje de aire presente en el volumen del líquido o agua, el porcentaje de partículas sólidas en suspensión que aparecen en el volumen del líquido, el tipo de escenario de medida (que se refiere a si el punto de trabajo es sobre una tubería a presión o no), los valores de trabajo máximos en temperatura y presión del punto de medición, el valor mínimo de operación del número de Reynolds y el nivel de conductividad presente en el líquido.
 - b) Selección de un equipo de medición por la localización del punto de medida. Esta fase se limita al conocimiento de los requerimientos y recomendaciones para disponer una longitud recta y libre de accesorios antes y después del equipo de medida, en el sentido de orientación (horizontal, vertical o inclinado) que tendrá el equipo en el sitio de instalación y con el que puede operar según el tipo de tecnología, el requerimiento de uso unidireccional o bidireccional del equipo de medición y la disposición en la cobertura de los diámetros nominales.
 - c) Selección por especificaciones técnicas del dispositivo de medida. Esta fase le corresponde al operador del servicio en cuanto a los costos operacionales



(incertidumbre en la cantidad del agua producida y vendida, y estimación del índice de agua no contabilizada – IANC) y de las características técnicas que requiere el usuario en el contador. Esta selección hace referencia a variables que cambian según el tipo de tecnología, como la precisión, la repetibilidad, la rangeabilidad, las pérdidas de carga, la señal de entrada y las normas que regulan los estándares de medición, así como la normatividad que regula cada tecnología.

d) Selección por criterios económicos. Esta fase filtra la última elección del equipo de medición y depende de los costos de adquisición, instalación, funcionamiento, mantenimiento, calibración e incertidumbre en la medición. Este último hace referencia a los costos en que se incurre por los propios errores sistemáticos en la precisión de los equipos de medición.

- La metodología desarrollada incluye recomendaciones para la implementación de la macromedición, teniendo en cuenta los procesos de diseño de la sectorización, la definición de características y particularidades de la infraestructura y la instrumentación que se requieren para la instalación in situ de un equipo y el diseño e implantación de las comunicaciones digitales.
- La sectorización, entendida como la segmentación, parcelación, delimitación o división del área de servicio de un sistema de acueducto en unidades de distribución homogéneas, aisladas e independientes, se requiere para la implementación de la macromedición, siendo una actividad precedente.
- El plan de mantenimiento recomendado para los equipos de macromedición es correctivo, preventivo y migratorio, que en conjunto garantiza la seguridad permanente y el funcionamiento fiable de los instrumentos de medida, el cual varía en la definición de la periodicidad de las tareas, dependiendo del tipo de tecnología instalada en campo y que, de acuerdo con los planes detallados por cada operador, se pueden modificar en aspectos como seguridad, procesos en la operación, continuidad del servicio, planes de trabajo, disponibilidad del personal técnico, entre otros.
- El mantenimiento preventivo propuesto hace referencia a una inspección periódica de los dispositivos de medición para evitar tareas de mantenimientos correctivos e innecesarios, lo cual reduce costos en la operación y evita el riesgo de paros en el proceso de producción. Las actividades que involucran una buena práctica de mantenimiento preventivo son la verificación metrológica de los instrumentos de medida, la inspección al interior de la tubería y de la fuente de alimentación eléctrica alterna, la limpieza o lubricación periódica de las partes mecánicas y eléctricas, en especial, para los equipos que disponen de partes móviles.
- El mantenimiento correctivo propuesto involucra los casos donde se identifica discontinuidad en la medición o ausencia de datos, fallas técnicas, evidencia de



una señal inestable o desviaciones en el desarrollo de una verificación metrológica, problemas de descargue de datos, incluso durante el desarrollo de mantenimientos preventivos, donde el dispositivo no funciona correctamente y se hace necesario sustituirlo o retirar y reparar alguna de sus partes.

- El mantenimiento migratorio desarrollado tiene que ver con la necesidad de renovación del equipo de medición existente por uno de nueva generación o la implementación de otra tecnología, por cumplimiento de su vida útil o para mejorar las condiciones operativas. También implica la actualización del software de los equipos de macromedición o de los transmisores en el sistema Scada.
- En Colombia no existen laboratorios certificados por el Ministerio de Desarrollo Económico y la Superintendencia de Industria y Comercio para llevar a cabo procesos de calibración en laboratorio para macromedidores de agua. No obstante, en el país la calibración para los equipos de medición de caudal se debe hacer en campo con herramientas semi-inteligentes o con diferencia.
- Para asegurar la calidad de la información de la macromedición, además del cumplimiento de las actividades de mantenimiento correctivo, preventivo y migratorio, es necesario garantizar que las unidades de distribución macromedidas cumplan la condición de ser hidráulicamente estancas, razón por la cual el operador del sistema de acueducto debe realizar periódicamente pruebas de aislamiento preliminar y total.
- El procesamiento de la información de datos desarrollado contempla el registro de datos brutos, la consolidación, identificación y validación de datos atípicos, anómalos o extraños, y recomendaciones para los indicadores de gestión. Con este último proceso el usuario puede evaluar comportamientos, tendencias y desviaciones de los registros históricos en la toma de acciones o correctivos en el sistema, lo cual repercute en su optimización.
- El procedimiento que se recomienda para la identificación de datos atípicos, anómalos o extraños dentro de cualquier serie de medición de caudal, presión o calidad de agua es la utilización de la herramienta estadística “Diagrama de Cajas”, la cual es una presentación visual que describe al mismo tiempo varias características importantes de un conjunto de datos, tales como el centro, la dispersión, la simetría o asimetría y la identificación de observaciones atípicas.
- En el desarrollo metodológico de la información se sugiere un procedimiento de análisis para la validación de datos atípicos, que va precedido del procedimiento recomendado para la identificación de las lecturas de medición atípicas, anómalas o extrañas con el método estadístico Diagrama de Cajas.
- Para controlar la gestión de la producción de la información macromedida en un sistema de acueducto urbano es necesario que el operador establezca y cumpla ciertos indicadores de gestión, en los que pueda evaluar, entre otros aspectos, la



variación de la medición por unidad de distribución y de unidades más grandes hasta toda la producción del sistema, la continuidad de la medición para cada punto de macromedición, el tiempo promedio de atención y reparación de daños a puntos de macromedición, el porcentaje de cumplimiento de las actividades de aseguramiento de la calidad de la información macromedida, entre otros.



REFERENCIAS

- Altendorf, Matthias & otros (2005). *Medición de caudal*. Barcelona, España: Endress + Hauser.
- Barreto, G. (2002). *Diseño de sectorización para los sectores de la Grama, Triunfo, Centro y Barzal e hidráulica para la ciudad de Villavicencio y verificación de esquinas límites de los sectores Esperanza, Popular y Parque La Llanura*. Villavicencio, Colombia: Aquadatos Ltda - Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio, EAAV E.S.P.
- Biosciences Ltda. (2009). *Medición ultrasónica de caudal y efectos de las distorsiones sobre la medida*. Bogotá, Colombia.
- Cruz, M. (2009). *Protocolo informes de aprobación de la macromedición mensual de la sectorización*. Bogotá, Colombia: Unión Temporal Aqua 2008 – Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB E.S.P.
- Exemys. (2013). *Sistema de telemetría*. Buenos Aires, Argentina.
- Jiménez, M. (2003). *La sectorización hidráulica como estrategia de control de pérdidas en sistemas de acueducto*. Bogotá, Colombia: Grafiq Editores Ltda.
- Ministerio de Desarrollo Económico (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS-2000. Título D*. Bogotá D.C.
- Sidney H. A. (2013, 10 de febrero). *Corrosión e integridad*. Recuperado de <http://www.monografias.com/trabajos3/corrosion/corrosion.shtml>.
- Streeter, V. L. (1988). *Mecánica de fluidos*. México: Editorial McGraw-Hill.
- Wikipedia. (2013, 10 de febrero). *Abrasión*. Recuperado de es.wikipedia.org/wiki/Abrasión.
- Wikipedia. (2013, 25 de julio). *Señal análoga*. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Se%C3%B1al_anal%C3%B3gica.
- Wikipedia. (2013, 25 de julio). *Señal digital*. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Se%C3%B1al_digital.
- Manuales, cartillas y demás documentos de fabricantes de equipos de medición de caudal y presión:
- ABB. (2013, 19 de mayo). *Tubos pitot*. Recuperado de [http://www05.abb.com/global/scot/scot203.nsf/veritydisplay/3aa32adfc75bb999c1257990004b8d57/\\$file/IM_TORBAR-ES_D.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot203.nsf/veritydisplay/3aa32adfc75bb999c1257990004b8d57/$file/IM_TORBAR-ES_D.pdf).



- BJ Furman. (2011, 18 de julio). *Flow measurement*. Recuperado de <http://www.engr.sjsu.edu/~bjfurman/courses/ME120/me120pdf/syllabus.pdf>.
- Bruno S. (2013, 19 de mayo). *Sensor de caudal insetubo*. Recuperado de http://www.e-bs.com.ar/hojas_de_datos/BS/inc-col.pdf.
- Dorot. (2011, 18 de julio). *Medidor de agua volumétrico Dorot*. Recuperado de <http://ocw.bib.upct.es/mod/url/view.php?id=9482&redirect=1>.
- Emerson Process Management. (2013, 8 de julio). *Instrumentación de la serie rosemount 8800 caudalímetros vortex*. Recuperado de <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00803-0109-4004.pdf>.
- Emerson Process Management. (2013, 8 de julio). *Medición de caudal y densidad de Emerson*. Recuperado de http://www.documentation.emersonprocess.com/groups/public_public_mmisami/documents/brochures/mc-001574.pdf.
- Esteban L. (2013, 21 de mayo). *Rotámetros. Fundamentos y calibración*. Recuperado de <http://www.efn.uncor.edu/departamentos/aero/Asignaturas/MecFluid/material/Teoria%20Rotametro.pdf>.
- Flow Handbook. (2011, 18 de julio). Recuperado de <http://www.lycee-saint-cricq.org/site/IMG/pdf/flowhandbook.pdf>.
- Friedrich Hofmann. (2011, 18 de julio). *Fundamental principles electromagnetic flow measurement*. Recuperado de <http://www.krohne-messtechnik.equip4ship.com/>.
- García, L. (2011, 18 de julio). *Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado*. Recuperado de http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/art2/pdf/teoria.pdf.
- Medidores de caudal. (2013, 21 de mayo). Recuperado de http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal_Sensores.pdf.
- Siemens AG. (2013, 8 de Julio). *Instrumentación de proceso*. Recuperado de <https://eb.automation.siemens.com/mall/es/es/catalog/products/1000000?tree=CatalogTree&activeTab=order>.
- Spirax Sarco. (2011, 18 de Julio). *Medidores de caudal vortex VFM3000*. Recuperado de <http://www.spiraxsarco.com/mx/pdfs/TI/p338-20.pdf>.