

**“ESTUDIO TÉCNICO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN PARA LA  
MACROMEDICIÓN DE CAUDAL DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE  
BUCARAMANGA BASADO EN LA CONFIABILIDAD”**



**Autor:**

**EDWARDS LEANDRO RIVERA ARIZA**

**Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas  
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y Telecomunicaciones  
Bucaramanga**

**2009**

**“ESTUDIO TÉCNICO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN PARA LA  
MACROMEDICIÓN DE CAUDAL DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE  
BUCARAMANGA BASADO EN LA CONFIABILIDAD”**



**Autor:  
EDWARDS LEANDRO RIVERA ARIZA**

**Tesis de Grado para optar por el Título de Ingeniero Electrónico**

**Director:  
Mie. José Alejandro Amaya Palacio  
Codirector:  
Ing. Jhovanny Suárez Jaimes**

**Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas  
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y Telecomunicaciones  
Bucaramanga  
2009**

## DEDICATORIA

**Quiero dedicar la consecución de este logro a:**

*Dios que con su permanente presencia en mi vida me guía por el camino del éxito, por ser mi fuente de sabiduría, de salud, de protección y refugio en todo momento, porque me escucha y me perdona concediéndome mis peticiones y porque simplemente me colma de bendiciones*

*Mi madre por ser la mejor madre del mundo, porque siempre está conmigo, por brindarme su infinito amor, cariño y apoyo incondicional.*

*Mi papá por su ejemplo de vida y por orientarme en busca de un futuro mejor.*

*Mis hermanos Cesar Alberto, Diyi Bioledy, Jhon Jairo y Sergio Leonardo, quienes son fuente de amor, compañía y servicio.*

*Edwards L. Rivera Ariza.*

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Mis más sinceros agradecimientos a:**

La universidad por brindarme las herramientas y el aval necesarios para ser de mí un profesional.

Los docentes, que a lo largo de este proceso me han aportado información valiosa y de calidad para crecer como persona y para descubrir y entender muchas de las cosas que existen para mejorar la calidad de vida de los seres humanos.

Al amb SA, pero en especial a la sección de mantenimiento electrónico por darme la oportunidad de poner en práctica y fortalecer mis conocimientos siendo partícipe en sus actividades.

A todos mis amigos, compañeros y aquellas personas con las que he compartido en este andar de mi vida.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	3
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	3
<b>1. GENERALIDADES</b> .....	4
<b>1.1 MACROMEDICIÓN</b> .....	4
1.1.1 Objetivos de la macromedición .....	4
1.1.2 Estructuración del programa de medición .....	5
1.1.3 Elementos componentes de la macromedición .....	7
1.1.4 Selección de equipos .....	9
1.1.5 Materialización de la macromedición.....	13
<b>1.2 SISTEMA SCADA</b> .....	15
1.2.1 Descripción del sistema SCADA del amb SA.....	16
1.2.2 Descripción general del sistema de programas.....	19
<b>1.3 TRANSMISORES</b> .....	21
1.3.1 Variable de medición .....	22
1.3.2 Características dinámicas (respuesta de señal).....	27
1.3.3 Fuente de alimentación .....	27
1.3.4 Funcionalidades del transmisor .....	28
1.3.5 Instalación eléctrica .....	28
<b>1.4 ULTRASONIDO</b> .....	30
<b>2. PRINCIPIOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL</b> .....	32
<b>2.1 CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS</b> .....	32
2.1.1 Ventajas e inconvenientes.....	34
2.1.2 Manera de generar un campo magnético.....	35
2.1.3 Aplicaciones .....	37
<b>2.2 CAUDALÍMÉROS ULTRASÓNICOS</b> .....	38
2.2.1 Método de efecto Doppler .....	38
2.2.2 Método de tiempo de tránsito de la señal.....	40
2.2.3 Tipo se señores / Diseños .....	41
2.2.4 Ventajas e inconvenientes.....	43
<b>2.3 EVALUACIÓN DEL PRINCIPIO DE MACROMEDICIÓN</b> .....	45
<b>3. FUNDAMENTOS DE METROLOGÍA</b> .....	48
<b>3.1 CONCEPTOS INTRODUCTORIOS</b> .....	48

<b>3.2 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD</b> .....	49
3.2.1 Distribución de probabilidad rectangular .....	50
3.2.2 Distribución de probabilidad tipo t-student.....	51
3.2.3 Distribución de probabilidad tipo normal o gaussiana .....	54
3.2.4 Distribución de probabilidad tipo triangular.....	58
<b>3.3 INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN</b> .....	59
<b>3.4 CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE</b> .....	61
3.4.1 Evaluación de la incertidumbre estándar tipo A .....	62
3.4.2 Evaluación de la incertidumbre estándar tipo B .....	64
<b>3.5 PROCEDIMIENTO PARA ESTIMAR LA INCERTIDUMBRE</b> .....	65
<b>4. EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD</b> .....	70
<b>4.1 CARACTERÍSTICAS EQUIPO PATRÓN</b> .....	70
<b>4.2 CARACTERÍSTICAS EQUIPO INSTALADO</b> .....	75
<b>4.3 VERIFICACIÓN DE CAUDAL</b> .....	77
4.3.1 Procedimiento de la macromedición.....	77
4.3.2 Resultados de la verificación de caudal .....	82
<b>4.4 ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE</b> .....	85
4.4.1 Sitio de medición Girón .....	86
4.4.2 Sitio de medición Anillo vial .....	89
4.4.3 Sitio de medición Mutis.....	92
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	94
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	98

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Variables que determinan el método de tránsito de la señal .....	10
<b>Figura 2.</b> Sitio de macromedición amb SA.....	14
<b>Figura 3.</b> Esquema básico del sistema SCADA en el sitio de medición .....	16
<b>Figura 4.</b> Sitios remotos del sistema SCADA amb SA.....	18
<b>Figura 5.</b> Unidad compacta transmisor y sensor .....	22
<b>Figura 6.</b> Transferencia de datos HART con modulación FSK .....	26
<b>Figura 7.</b> Cristal piezoeléctrico .....	31
<b>Figura 8.</b> Principio de inducción electromagnética según la formulación de M. Faraday .....	33
<b>Figura 9.</b> Principio de medición electromagnética del caudal .....	34
<b>Figura 10.</b> Procesamiento de señal y generación de campo magnético por impulso de CC.....	36
<b>Figura 11.</b> Medición de caudal por efecto Doppler con ultrasonidos. La frecuencia de las ondas emitidas ( $f_1$ ) y reflejadas ( $f_2$ ) varía en función de la velocidad del caudal de las partículas / burbujas transportadas .....	39
<b>Figura 12.</b> Medición del caudal por ultrasonidos a partir del tiempo de tránsito de la señal. La velocidad a la cual se propagan las ondas sonoras varía según la velocidad fluido y su dirección .....	40
<b>Figura 13.</b> Los sensores de fijación externa se montan directamente en el exterior de la tubería. Un riel especial de montaje facilita su posicionamiento exacto.....	42
<b>Figura 14.</b> Los sensores de inserción están inmersos en el fluido. El soporte de instalación del sensor está soldado a la tubería.....	42
<b>Figura 15.</b> Tubo de medición prefabricado con cuatro sensores de inserción y dos caminos acústicos de medición .....	43
<b>Figura 16.</b> Histograma de una distribución uniforme rectangular .....	50
<b>Figura 17.</b> Distribución de probabilidad normal .....	55
<b>Figura 18.</b> Distribución de probabilidad triangular .....	58
<b>Figura 19.</b> Definición de incertidumbre en la medición .....	59
<b>Figura 20.</b> Equipo patrón Prosonic Flow 93, (a) transmisor y (b) sensores Prosonic Flow (clamp-on). .....	70
<b>Figura 21.</b> Condiciones de operación para los sensores Prosonic Flow (de fijación externa) del equipo patrón .....	71
<b>Figura 22.</b> Vista longitudinal en la tubería.....	72
<b>Figura 23.</b> Opciones de número de travesos para la macromedición de caudal con el equipo patrón. ....	72

<b>Figura 24.</b> Terminales para la Conexión eléctrica del equipo de medición Prosonic Flow 93.....	74
<b>Figura 25.</b> Condiciones hidráulicas equipo patrón, sensores de fijación externa (A) sensores de inserción (B); (1) válvula, (2) unidad de bombeo, (3) tubería con curvatura. ....	74
<b>Figura 26.</b> Equipo instalado en el sitio de medición, Optosonic 6300, transmisor y sensores. ....	75
<b>Figura 27.</b> Principio de medición por ultrasonido del equipo instalado.....	75
<b>Figura 28.</b> Especificación de los diámetros nominales de la tubería según la versión del equipo instalado.....	76
<b>Figura 29.</b> Especificación del número de tramos en la tubería según la versión del equipo instalado.....	76
<b>Figura 30.</b> Condiciones hidráulicas para el equipo instalado en los sitios (Optisonic 6300).....	76
<b>Figura 31.</b> Tubería de macromedición tipo PVC 4”, sector Ruitoque.....	78
<b>Figura 32.</b> Indicación de la pared o grosor de la tubería. ....	79
<b>Figura 33.</b> Panel display transmisor Prosonic Flow 93. ....	81
<b>Figura 34.</b> Ubicación de los sensores en la tubería con la distancia obtenida en el transmisor.....	81
<b>Figura 35.</b> Montaje verificación de caudal en Anillo Vial.....	83
<b>Figura 36.</b> Montaje verificación de caudal en Girón.....	84
<b>Figura 37.</b> Montaje verificación de caudal en Mutis.....	85
<b>Figura 38.</b> Interfaz gráfica para la función de selección del software Applicator de Endress+Hauser.....	92
<b>Figura 39.</b> Equipos recomendados para ser instalado en la cámara de macromedición Mutis.....	93

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Señales analógicas estándares más importantes .....	24
<b>Tabla 2.</b> Velocidad del sonido en algunos medios .....	31
<b>Tabla 3.</b> Características del equipo patrón para la macromedición de caudal del amb SA.....	70
<b>Tabla 4.</b> Características del equipo instalado para la macromedición de caudal del amb SA .....	75
<b>Tabla 5.</b> Resultados de la verificación de caudal Anillo vial .....	82
<b>Tabla 6.</b> Resultados de la verificación de caudal Girón .....	83
<b>Tabla 7.</b> Resultados de la verificación de caudal Mutis .....	84
<b>Tabla 8.</b> Valores de caudal equipo patrón Girón.....	86
<b>Tabla 9.</b> Valores de caudal equipo instalado en el sitio Girón.....	86
<b>Tabla 10.</b> Cálculo del error de caudal Girón.....	87
<b>Tabla 11.</b> Valores de caudal equipo patrón Anillo vial .....	89
<b>Tabla 12.</b> Valores de caudal equipo instalado en el sitio Anillo vial .....	89
<b>Tabla 13.</b> Cálculo del error de caudal Anillo vial .....	90

## **LISTA DE ANEXOS**

**Anexo A.** Tabla t-student.

**Anexo B.** Certificado de calibración del equipo patrón.

**Anexo C.** Propiedades físicas del agua.

**Anexo D.** Velocidad del sonido en diferentes medios.

**Anexo E.** Características de ejecución de los caudalímetros.

## RESUMEN

**TITULO: “ESTUDIO TÉCNICO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN PARA LA MACROMEDICIÓN DE CAUDAL DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA BASADO EN LA CONFIABILIDAD”.\***

**AUTOR:** Edwards Leandro Rivera Ariza.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Macromedición, ultrasonido, mensurando, incertidumbre, caudal.

### CONTENIDO:

Este trabajo de grado presenta el estudio técnico al sistema de macromedición de caudal del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, desarrollado con la finalidad de establecer la confiabilidad en la medida de caudal y el estado de los equipos de macromedición, permitiendo de igual forma realizar aportes que contribuyan al mejoramiento del mismo.

En primera instancia se revisaron conceptos relevantes para el desarrollo del estudio, dentro de los cuales se enmarca la teoría de macromedición, la descripción básica del sistema SCADA del amb SA, los principios de medición más apropiados para la macromedición de caudal y algunas consideraciones de la teoría de ultrasonido. De esta forma se logra evidenciar la importancia que logra los procesos de macromedición en el alcance de los propósitos de la compañía e igualmente se resaltan las características más importantes que determinan la viabilidad del principio y método de macromedición de caudal para las aplicaciones del amb SA.

Se introducen las nociones de metrología, que darán soporte a la determinación y evaluación de la confiabilidad de las mediciones, en la que las distribuciones de probabilidad y la estimación de la incertidumbre son las que más se indagan.

Se describe el procedimiento del montaje y la programación del equipo patrón para realizar la verificación de caudal utilizando el método de comparación directo en los sitios de macromedición definidos por la sección de mantenimiento electrónico. Esta actividad permite recolectar información pertinente para evaluar la confiabilidad de las mediciones estimando la incertidumbre mediante la metodología volumétrica.

A través de la herramienta sizing flow del software Applicator, los datos técnicos de los equipos de macromedición y las características del sitio de macromedición Mutis facilitaron la selección del equipo de macromedición de caudal apropiado para instalar en este sitio.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Mie. José Alejandro Amaya Palacio. Codirector: Ing. Jhovanny Suárez Jaimés.

## ABSTRACT

**TITLE: "TECHNICAL STUDY OF THE SYSTEM OF INSTRUMENTATION FOR THE MACROMEASUREMENT OF WEALTH OF THE METROPOLITAN AQUEDUCT OF BUCARAMANGA BASED ON THE RELIABILITY." , \***

**AUTHOR:** Edwards Leandro Rivera Ariza.\*\*

**KEY WORDS:** Macro measurement, ultrasound, mensurando, uncertainty, flow.

### CONTENTS:

This grade's work presents the technical study to the system of macro measurement of wealth of the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga. It was developed with the purpose of establishing the reliability in the measurement of wealth, and the state of the teams of macro measurement; allowing of equal form to realize contributions that they contribute to the improvement of the same one.

At first instance, excellent concepts were checked for the development of the study, inside which there are framed the theory of macro measurement. The basic description of the system SCADA of the amb SA, the beginning of measurement more adapted for the macro measurement of wealth and some considerations of the ultrasound theory. In this way can be demonstrate the importance that achieves the processes of macro measurement in the scope of the intentions of the company and equally there are highlighted; the most important characteristics that determine the viability of the beginning and method of macro measurement of wealth for the applications of the amb SA.

There interfere the notions of metrology, which will give support to the determination and evaluation of the reliability of the measurements; which the distributions of probability and the estimation of the uncertainty are those who more are investigated.

There is described the procedure of the assembly and the programming of the team boss to realize the cross-check of wealth using the direct method of comparison in the places of macro measurement defined by the section of electronic maintenance. This activity allows gathering pertinent information to evaluate the reliability of the measurements estimating the uncertainty by means of the methodology volumetric.

Through the tool sizing flow of the software Applicator, the technical information of the teams of macro measurement, and the characteristics of the place of macro measurement Mutis; facilitated the selection of the team of flow macro measurement appropriate to install in this place.

---

\* Work of Graduation

\*\* Faculty of Physical –Mechanical, School of Engineer Electric, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: Mie. José Alejandro Amaya Palacio. Codirector: Ing. Jhovanny Suárez Jaimés.

## INTRODUCCIÓN

La medición de caudal es considerada como una de las variables que se mide con mayor frecuencia en la industria. Las muchas publicaciones e informes que aparecen constantemente son un indicativo de la importancia que ha adquirido la medición de caudal. Razón por la cual, se da trascendencia al aprendizaje e investigación de esta aplicación en establecimientos educativos universitarios para diferentes ramas de la ingeniería y en diversas organizaciones industriales a nivel mundial.

De manera global, algunas de las funciones que se pueden llevar a cabo a través de la medición de caudales son: Conocimiento de la producción de un proceso o planta, conocimiento de los diferentes consumos, distribución en forma prefijada de una corriente, mezcla de varias corrientes en determinadas proporciones, realización de balance de materia alrededor de un equipo y el control y la supervisión en tiempo real de procesos subordinados de este.

La medición de caudal en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga se realiza con el propósito de cuantificar la cantidad de agua que pasa por las plantas de tratamiento y la cantidad que se está entregando a los usuarios. Los datos obtenidos de la medición de caudales en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga se emplean en:

- Cálculo de agua bombeada desde el Bombeo Bosconia
- Cálculo de agua potable producida por las plantas
- Cantidad de agua suministrada a los usuarios del sistema de acueducto en el área metropolitana
- Cálculo la demanda de un determinado distrito

- Para realizar simulaciones
- Procesos de facturación
- Calculo de balance de aguas: Agua potable producida / agua potable entregada al usuario
- Diseño: Caudales por tiempos (horas, días, semanas), Capacidad de tanques, Redes de distribución.

En la mayoría de los casos medir con exactitud es indispensable, y aun mas cuando los resultados de las mediciones son tan influyentes en el desarrollo de otras actividades como las mencionadas anteriormente para el caso del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Dar cumplimiento a los objetivos operativos y comerciales, conservar los requerimientos legítimos de seguridad y de salud tanto para empleados como para usuarios, garantizar productos y servicios de calidad resguardando el ambiente y los recursos naturales están relacionados directamente con la calidad en los procesos de medición de una organización.

La evaluación de la confiabilidad de un sistema de medición se realiza en función de las mediciones efectuadas. Estas mediciones dependen de las condiciones de operación del sistema y de las características de los equipos. Por lo tanto, para obtener productos de calidad es indispensable que las mediciones también sean de calidad.

El concepto de trazabilidad y la estimación de la **incertidumbre** son conceptos esenciales en el campo de la metrología para realizar estudios de confiabilidad. Si la incertidumbre es bien calculada y es suficientemente pequeña podemos decir que la medición es de buena calidad. Además en este mundo tan globalizado donde el comercio es cada vez más grande, la competencia por la calidad se incrementa y por ende la supervivencia o frustración de muchas industrias.

## **OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio técnico al sistema para la macromedición de caudal del Acueducto metropolitano de Bucaramanga, basado en la evaluación de la confiabilidad en la medida.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Evaluar el principio de macromedición de caudal en los equipos de macromedición del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga para sus aplicaciones de interés.

Determinar el estado y funcionamiento de los equipos de macromedición de caudal basados en su valoración geométrica, hidráulica y eléctrica.

Estimar la confiabilidad en la medida de caudal de los sitios significativos Girón, anillo vial y mutis a través de la determinación de la incertidumbre.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 MACROMEDICIÓN<sup>1</sup>

La macromedición es el proceso mediante el cual se obtienen, procesan, analizan y divulgan los datos de producción, conducción y distribución, relativos a caudales, presiones y niveles de los puntos significativos del sistema de acueducto.

Como herramienta de control, la macromedición facilita la eficiente operación del sistema de acueducto, contribuye a determinar la distribución de caudales entre las diferentes zonas y sectores de la ciudad, permite la evaluación del comportamiento hidráulico ordinario de los componentes del sistema, tanto para la planeación como para el diseño de la sectorización operativa de la red de distribución.

Las inversiones en macromedición tienen incidencia en el control de pérdidas tanto operativas como comerciales, puesto que la información capturada contribuye a desagregar las pérdidas por diversas causas y a la consecuente formulación de proyectos de reducción por tipo de pérdidas, facilitando el seguimiento a las inversiones realizadas. [2]

#### 1.1.1 Objetivos de la macromedición

**Operativos:** La macromedición está encaminada a determinar los caudales entregados a la ciudad y a los diferentes sectores hidráulicos. Su propósito puede ser operativo, para orientar la actuación técnica sobre la red, manejo temporal de

---

<sup>1</sup> Referenciado. [2] La sectorización hidráulica, estrategia de control de pérdidas en sistemas de acueducto

almacenamientos y alternativas de suministros, o bien para determinar el grado de utilización y periodo de saturación de los elementos del sistema.

La macromedición con propósitos operativos se apoya también en trabajos de tipometría, con tecnología portátil, para realizar diagnósticos específicos de elementos de la red de acueducto, tales como capacidad de conducciones, pérdidas de carga, coeficientes de rugosidad, medidas de consumos y detección de fugas.

**Comerciales:** La macromedición puede tener un propósito de carácter comercial para controlar las actividades de lectura y facturación, en una unidad hidráulica determinada. De otro lado mediante el cálculo de los volúmenes suministrados puede utilizarse para el control comercial de concesiones de sistemas de acueducto completos ó unidades separadas.

**De uso múltiple:** En caso de utilizar equipos de medición (error +/- 2%) en la macromedición de la(s) planta(s) de tratamiento, sus resultados pueden ser aprovechados para ajustar las formulas de calibración de las estructuras internas de medición, que se utilizan en el calculo del volumen utilizado en los procesos de producción de agua potable. De todas maneras, el volumen suministrado al sistema debe medirse en las tuberías de salida de la planta a la red de distribución. [2]

### **1.1.2 Estructuración del programa de macromedición**

El prestador del servicio debe definir los procedimientos de implementación de puntos de medición y las especificaciones de suministro, instalación y verificación metrológica de los macromedidores de caudal fijos o portátiles, estableciendo el principio tecnológico que aplicará, las características físicas,

electrónicas, de medida, procedimientos de calibración, incluido la calibración del cero, y el manejo e instalación de los aparatos.

El sistema de medición conformado por los puntos de medición y los equipos a utilizar, debe estar conformado al mínimo costo de manera que la exactitud del cálculo del volumen suministrado por sector, no afecte la calidad del índice que se desea establecer. En otras palabras, el orden de magnitud del error de medición debe ser menor que el orden de magnitud del parámetro a determinar.

La tecnología aplicada en la medición de caudales debe estar acorde también con las características de la localidad, del sistema particular de acueducto y de la etapa de desarrollo de la macromedición. El uso de tecnología apropiada y por sobre todo sostenible en el tiempo, debe ser condición a considerar en primer término. El uso de tecnologías de punta será una necesidad que la infraestructura disponible y la eficiencia alcanzada en los procesos, reclamarán en su momento.

Además de considerar la capacidad económica de su entidad prestadora del servicio en la decisión de adquirir o alquilar equipos electrónicos de medición, es conveniente considerar el rango en que, en principio se espera encontrar el IANC (índice de agua no contabilizada). Si es razonable esperar índices por encima del 40%, la tecnología apropiada en el corto plazo para medir el IANC puede ser principalmente la pitometría convencional, apoyada en unos puntos críticos por otras tecnologías.

En el mediano plazo, cuando se alcanzan indicadores en el rango del 30% al 40%, podrá ser oportuno aplicar medición electrónica en puntos específicos y apoyarse en pitometría convencional para monitorear la mayor extensión de la red. Como en los demás tipos de proyectos, las inversiones en macromedición deben responder a una racionalidad económica. Dado que la macromedición no genera

un beneficio distinto al control del sistema, el análisis económico debe ser del tipo costo-eficiencia.

**Gestión de la información** La efectividad de la macromedición está definida por el cumplimiento bajo condiciones de eficiencia de las siguientes tres etapas:

- Entrada: recolección y recibo de datos
- Proceso: cálculos, procesamiento y almacenamiento de datos
- Salida: disponibilidad, análisis y divulgación de la información.

Como resultado de la macromedición se debe generar el siguiente tipo de informes:

- Suministro de agua por sector hidráulico
- Caudales medidos en estructuras de control
- Caudales medidos en líneas matrices
- Caudales a la salida de las plantas
- Caudales utilizados en procesos unitarios de potabilización

### **1.1.3 Elementos componentes en la macromedición**

**Macromedición en plantas:** En el inicio de una campaña de medición de caudales, es posible utilizar únicamente equipos portátiles e instalaciones provisionales para monitorear los caudales presentes en los puntos de la red a la salida de las plantas de tratamiento de tal manera que sea posible ajustar el cálculo de los caudales empleados en los procesos unitarios de tratamiento, para cerrar con el registrado en sus tuberías de distribución.

Como resultado se debe tener el cálculo de los siguientes caudales:

- Procesos unitarios de producción ajustados para cerrar con la medición a la salida de la planta.
- Caudales de salida de las plantas de tratamiento, que serán los utilizados como agua suministrada.

**Macromedición en redes:** Con el propósito de medir el suministro a zonas, sectores operativos específicos y permitir la desagregación del índice para esas entidades, el prestador puede ubicar equipos fijos o portátiles en diferentes puntos del sistema de distribución:

- Estructuras de control
- En estaciones de bombeo
- En tuberías de suministro de sectores hidráulicos
- En troncales de conducción
- En puntos de entrega de venta en bloque

El diseño del sistema de macromedición tiene que considerar que el error agregado del sector o zona que se desea medir, el cual se calcula como la sumatoria de los valores absolutos del error de los equipos utilizados ponderados por el caudal medido, debe mantenerse bien por debajo del orden de magnitud del índice de agua no contabilizada para no afectar la calidad de este indicador.

En un ejemplo de cálculo de error de medición de la actividad de mediciones de caudales y presiones, el error de una determinada entidad de sectorización podría lograr un  $\pm 10,83\%$ . Por tanto, aumentar indiscriminadamente el número de equipos de medición, sin considerar el error ponderado que aporta cada uno, puede acercar cada vez más el valor del error al valor del IANC, invalidando la utilidad del sistema de medición. En el mismo ejemplo se observaría

que, la ponderación del error y no simplemente el número de puntos es el parámetro que hay que controlar para minimizar el error agregado del sector. [2]

#### 1.1.4 Selección de equipos

A continuación se presentan los principios de funcionamiento de los principales aparatos usados en la medición de caudales. Si bien se hace referencia a la tecnología de ultrasonido se recomienda analizar también otras alternativas como la medición por principios electromagnéticos.

**Caudalímetro de ultrasonido:** Su principio operativo está basado sobre la modificación del tiempo de tránsito que sufre una señal de ultrasonido por la velocidad del flujo. El equipo mide la diferencia de tiempo de tránsito ( $\Delta T$ ) entre una onda proveniente del sensor A dirigiéndose a B y una onda proveniente de B dirigiéndose a A, como se muestra a continuación:

Con esta medición se puede calcular el caudal  $Q$  de la forma siguiente

$$Q = \frac{\pi \phi^2}{4} \times \frac{1}{Kh} \times \frac{L^2}{2d} \times \frac{\Delta t}{T^2} \quad (1.1)$$

En la cual

$\phi$ : Diámetro interior de la tubería

$L$ : Distancia entre sondas

$d$ : Distancia entre los planos de sondas

$T$ : Tiempo transitorio promedio de la señal entre las ondas A y B.

$\Delta t$ : Diferencia entre el tiempo de tránsito de A a B y de B a A.

$Kh$ : Coeficiente hidráulico

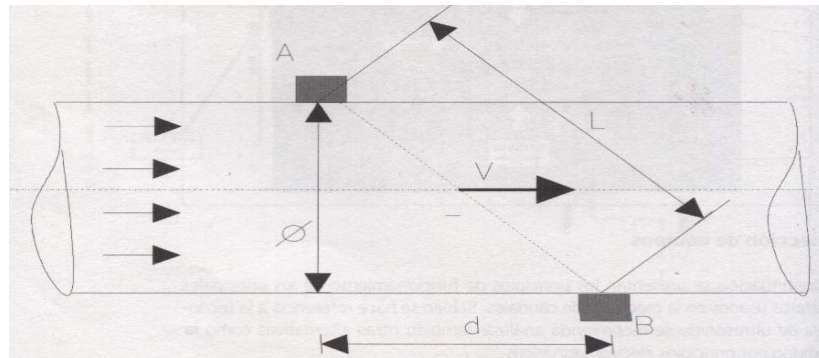


Figura 1. Variables que determinan el método de transito de la señal. [2]

En el caso de tuberías constituidas de material homogéneo, tales como PVC, asbesto cemento, hierro fundido, acero, entre otros, pueden utilizarse equipos con sensores externos que no requieren perforación en la tubería.

Para realizar una medición sobre tuberías conformadas por dos materiales, tales como tuberías de concreto con refuerzo de acero, se necesitara la instalación de sondas intrusivas con dos perforaciones en la tubería y la instalación de registros de incorporación. Las sondas estarán en este caso directamente en contacto con el agua.

- **Componentes del error de medición** La ecuación de medición de caudal señalada anteriormente demuestra que las causas de error están ligadas a las incertidumbres de:

- Geometría ( $\varnothing, L, d$ )
- Electrónica ( $T, \Delta T$ )
- Hidráulica ( $K_h$ )

Por lo tanto, las causas que inducen al error se describen a continuación.

**Incertidumbre geométrica:** La ecuación muestra que todo error sobre los parámetros geométricos introduce un error amplificado sobre el caudal  $Q$ . El error

depende directamente de la precisión en la instalación de los sensores y de las características geométricas de la tubería. Un tramo de tubería con sondas precolocadas en fábrica permite reducir el error, pero para tuberías de gran diámetro, la instalación en sitio es la solución económicamente viable.

**Incertidumbre electrónica:** Es el error del medidor mismo. Su precisión está ligada a la medición del término  $\Delta T$ , es decir a la calidad de los circuitos utilizados y los principios de su determinación. Los equipos actuales permiten medir el tiempo a más o menos 0,5 nanosegundos. El error de medición es inversamente proporcional al caudal. Constatando un error de cero por la electrónica, este error puede ser compensado por la introducción de un  $\Delta T$  (tiempo) con medición sin flujo y tubería llena.

**Error hidráulico:** Para garantizar condiciones hidráulicas favorables a la medición, es decir flujo uniforme sin presencia de aire, los fabricantes de equipos recomiendan seleccionar el punto de instalación del macromedidor de manera que se cuente con unas longitudes rectas aguas arriba y abajo del punto en función del diámetro de la tubería.

**Varilla electromagnética:** El principio operativo de medición de este dispositivo se basa en la ley de Faraday que anuncia: una carga eléctrica ( $q$ ) de ancho ( $L$ ) desplazándose a la velocidad ( $V$ ) perpendicularmente a un campo magnético ( $B$ ) crea una diferencia de potencial inducida según la fórmula:

$$U = B.L.v \quad (1.2)$$

Aplicado a un caudal de un fluido conductor en una tubería en carga se crea un campo electromagnético dentro del fluido con la varilla y se puede deducir que el líquido conductor, desplazándose en el campo electromagnético, producirá una diferencia de potencial que se podrá medir entre los dos electrodos de la varilla.

Estos equipos pueden ser instalados sobre todo tipo de tuberías, aunque necesitan la colocación de un registro de incorporación de 1". Permiten medir tuberías de 6" a 42".

Su tamaño de 900 mm a 1600 mm de longitud hace que en la mayoría de los casos, se necesite una tapa de acceso alineada con el registro de incorporación para poder insertarla en la cámara de medición y en la tubería.

- **Componentes de error de medición** La medición de caudal sobre una varilla electromagnética, se calcula como sigue:

$$Q = F_p \cdot F_i \cdot V \cdot S \quad (1.3)$$

En la cual:

$F_p$ : Factor de perfil

$F_i$ : Factor de inserción

$V$ : Velocidad del agua medida

$S$ : Sección=  $\pi D^2/4$

Por tanto, las causas de error están ligadas a las incertidumbres en los siguientes parámetros:

Geometría ( $D$ ,  $F_i$ ); electrónica ( $V$ ); hidráulica ( $F_p$ ).

Incertidumbre geométrica: La ecuación muestra que el error sobre los parámetros geométricos, en particular el diámetro interno ( $D$ ), introducirá un error amplificado sobre el caudal  $Q$ . El registro de incorporación de 1", que se utiliza

para instalar la varilla, facilita medir directamente el diámetro interno y reduce por tanto este tipo de error.

El error de colocación de la sonda en la tubería no tiene una influencia muy grande, porque generalmente se colocan los sensores en el centro del conducto donde la velocidad es máxima. Esta velocidad máxima se encuentra sobre una sección suficientemente grande para que el error de orden de milímetros no influya. En Bogotá se realizaron mediciones sobre una tubería de 14" simultáneamente con varilla electromagnética y caudalímetro de ultrasonido, confirmando lo anterior.

Incertidumbre electrónica: Es el error del medidor mismo. Su precisión está ligada a la medición de la velocidad, proporcional a la diferencia de potencial entre los sensores, y la constancia del campo electromagnético creado, es decir que depende de la calidad de los circuitos utilizados y los principios de su determinación.

Error hidráulico: De la misma manera que en el caso de los caudalímetros ultrasónicos, el fabricante recomienda respetar en el punto de instalación, unas longitudes rectas mínimas aguas arriba y abajo del punto con el propósito de lograr perfiles simétricos y estables. El no respetar estas especificaciones incrementa el error de medición e incluso imposibilita la medición. El factor de  $F_p$  (factor de perfil) puede ser calculado por un programa con coeficientes predeterminados dependiendo del diámetro interno de la tubería o puede ser calculado con una medición de perfil hidráulico del punto. [2]

### **1.1.5 Materialización de la macromedición**

La macromedición comprende la ejecución de las obras civiles, suministros e instalaciones de los equipos de macromedición de caudales en la red de

distribución al nivel de entidades definidas por el programa de sectorización, así como su puesta en funcionamiento, calibración, operación y mantenimiento. Los equipos de medición utilizados deben ser de un rango de precisión superior al  $\pm 2\%$ , robustos, prácticos de utilización y permitir el procesamiento de datos grabados. Para este propósito, es posible utilizar puntos de medición temporales o bien construir instalaciones definitivas desarrollando diseños detallados típicos.

Estas instalaciones consisten en cámaras sobre la alineación de la tubería en la que se quiere determinar el caudal. Se instalan sobre la tubería las ondas intrusivas o externas para el caso de medidores ultrasónicos o el niple para el caso de medidores electromagnéticos.

Como complemento de la instalación se construye un pozo auxiliar tipo alcantarillado, donde se alberga la unidad central de medición, las fuentes de alimentación principal y alterna y la unidad de transmisión de datos.

A continuación se presenta una vista superior de la instalación de macromedición. Se registra la cámara que aloja las sondas sonoras sobre el alineamiento de la tubería, rectangular en concreto rígido sobre la calzada, y la tapa válvula de seguridad del pozo auxiliar de la unidad de medición circular sobre el prado del andén. [2]



**Figura 2.** Sitio de macromedición amb SA.

## 1.2 SISTEMA SCADA

Los sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de datos) son aplicaciones de software, diseñadas con la finalidad de controlar y supervisar procesos a distancia. Se basan en la adquisición de datos de los procesos remotos.

Se trata de una aplicación de software, especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores en el control de producción, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, etc.) y controlando el proceso de forma automática desde una computadora. Además, envía la información generada en el proceso productivo a diversos usuarios, tanto del mismo nivel como hacia otros supervisores dentro de la empresa, es decir, que permite la participación de otras áreas como por ejemplo: control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc. [7]

Cada uno de los items de SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de datos) involucran muchos subsistemas, por ejemplo, la adquisición de los datos puede estar a cargo de un PLC (Controlador Lógico Programable) el cual toma las señales y las envía a las estaciones remotas usando un protocolo determinado, otra forma podría ser que una computadora realice la adquisición vía un hardware especializado y luego esa información la transmita hacia un equipo de radio vía su puerto serial, y así existen muchas otras alternativas. [7]

Las tareas de Supervisión y Control generalmente están más relacionadas con el software SCADA, en él, el operador puede visualizar en la pantalla del computador de cada una de las estaciones remotas que conforman el sistema, los estados de ésta, las situaciones de alarma y tomar acciones físicas sobre algún equipo lejano, la comunicación se realiza mediante buses especiales o redes LAN. Todo esto se ejecuta normalmente en tiempo real, y están diseñados para dar al operador de planta la posibilidad de supervisar y controlar dichos procesos. [7]

Estos sistemas actúan sobre los dispositivos instalados en la planta, como son los controladores, autómatas, sensores, actuadores, registradores, etc. Además permiten controlar el proceso desde una estación remota, para ello el software brinda una interfaz gráfica que muestra el comportamiento del proceso en tiempo real. [7]

### 1.2.1 Descripción del sistema SCADA del amb S.A

El modelo general de un punto o sitio de macromedición del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga se muestra en la figura 3. Este presenta la estructura y los elementos principales que lo conforman. El equipo para la macromedición de caudal (caudalímetro) es prioridad en el nivel de instrumentación, como la medición de presión y de nivel.

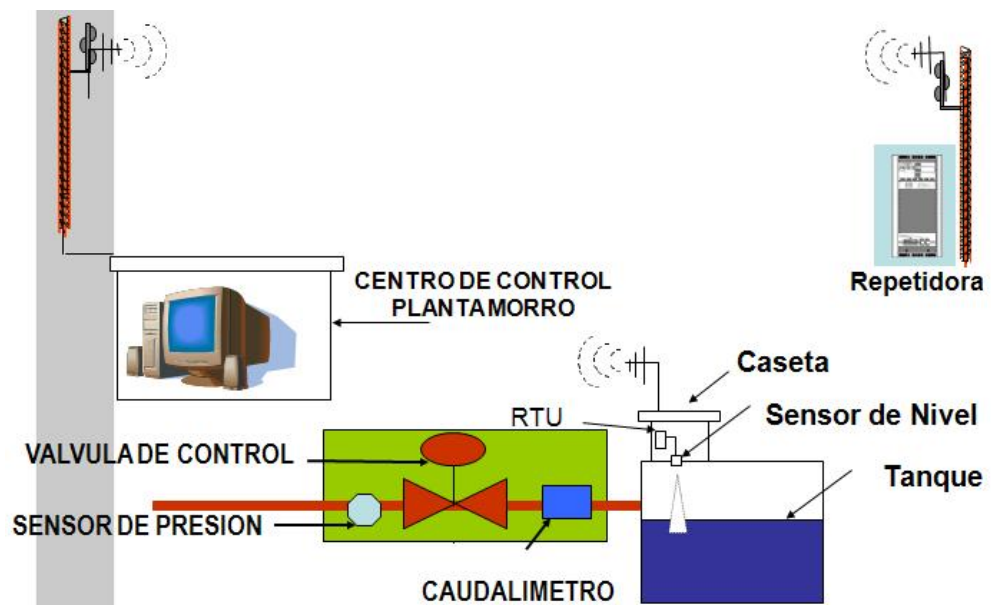


Figura 3. Esquema básico del sistema SCADA amb SA. [20]

El Sistema SCADA en el caso del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga tiene como finalidad realizar el monitoreo de variables tales como caudales, presiones, niveles de tanque, calidad del agua, variables eléctricas de

los equipos de bombeo y la operación remota de válvulas bombeos y pozos, como también:

- Controlar el nivel de los tanques, para evitar reboses o minimizar reboses, impedir el desabastecimiento de los sectores y trasegar agua entre zonas y tanques.
- Monitorear el comportamiento de la demanda y el almacenamiento en tanques.
- Registrar y monitorear la producción en las principales fuentes de abastecimiento, con el fin de decidir si es necesario bajar o subir la producción.
- Monitorear variables de calidad del agua, para asegurar dicha calidad a los consumidores del agua.
- Operar remotamente los dispositivos que se manipulan más frecuentemente con el fin de reducir costos operativos y aumentar la velocidad de respuesta del sistema.
- Llevar un registro del comportamiento del sistema, diariamente, mensual y estacionalmente.

El proceso del monitoreo se debe realizar en tiempo real, o sea que en el Centro de Control se observe el valor instantáneo de cada parámetro. Para ello existen estaciones remotas, que realizan constantemente las lecturas de las variables y luego las reportan al computador central (servidor de adquisición de datos), el cual almacena en una base de datos histórica, los diferentes valores de las variables monitoreadas.

La comunicación entre el servidor y las estaciones remotas es de dos vías: a) el Computador interroga a la estación remota y le transmite los comandos del operador (telemando) y b) la estación remota realiza las acciones, informa los valores solicitados por el computador y confirma la realización de los mandos.

Debido a la gran cantidad de estaciones remotas que se comunican con el computador central, el SCADA utiliza un protocolo de comunicaciones y un mecanismo de acceso al canal de comunicaciones, para que haya un orden en cuanto al envío de los mensajes, de lo contrario se causarían interferencia entre sí.

En un sistema SCADA inalámbrico (en el caso del SCADA del AMB) cada una de las estaciones remotas están comunicadas mediante radio UHF en sub banda 490 – 512 MHz con la estación maestra o servidor. Utilizando un protocolo de comunicaciones (MDLC), las remotas reportan las lecturas al servidor y el servidor envía las consignas de telemando a las remotas. Las remotas tienen una identificación única en la red y cuando el servidor envía una transmisión, todas las remotas “oyen” y solamente aquella para cual va destinada la transmisión responde. Con esta topología de red inalámbrica, el servidor transmite multidireccionalmente y las remotas transmiten unidireccionalmente.

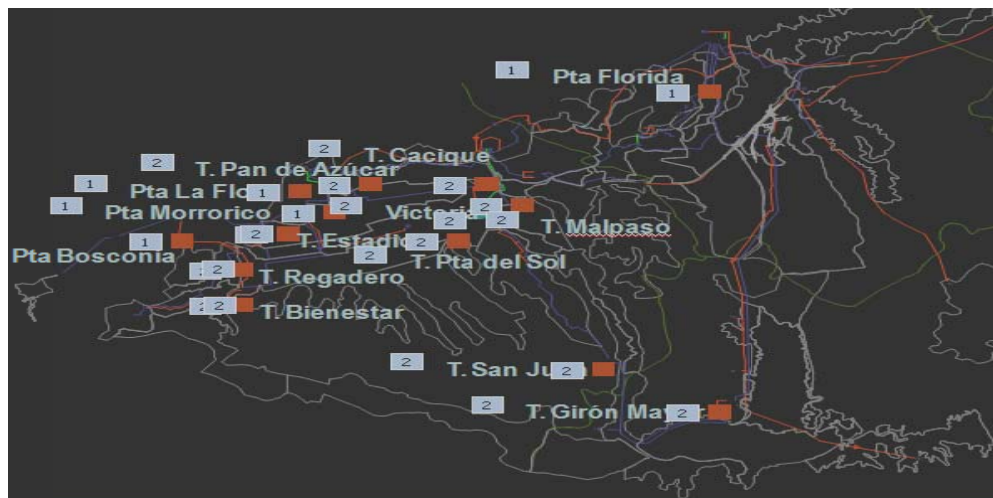


Figura 4. Sitios remotos del sistema SCADA amb SA. [20]

Cada estación remota está conformada por:

- Elementos primarios: son aquellos dispositivos que directa ó indirectamente miden la variable, entre estos se tienen: tubos de venturi, sensores de

presión, electrodos, sensores ultrasónicos de caudal y nivel, pitómetros, generadores de pulsos eléctricos, etc.

- Transductores: Equipos que convierten señal de los elementos primarios en señales apropiadas para dispositivos de entrada /salida.
- Actuadores: dispositivos que accionan válvulas y motores.
- PLC (Controladores Lógicos Programables): son equipos que convierten, procesan, almacenan y transmiten los datos, por medio de un protocolo de comunicaciones digital reciben los mandos y los ejecutan.
- RTU- “Remote Terminal Unit” (Unidad Terminal Remota). Nombre genérico de la industria para estados remotos y unidades de control. Unidad modular inteligente diseñada para operar como un controlador autosuficiente o como parte de un sistema con cualquier numero de RTUs, centrales de control y subcentrales conectadas a través de una red de comunicaciones con varios enlaces y nodos.
- Enlaces de radio: compuesto por el radio-módem, el panel y antena, constituyen el canal físico por donde se transfiere la información.

El SCADA además puede contar con una estación maestra, conectada a un computador, el cual controla las comunicaciones, registra tiempos, almacena datos y posee una interfaz visual con el usuario, la cual entrega reportes y consultas.

### **1.2.2 Descripción general del sistema de programas**

Cada uno de los sitios del sistema SCADA instalados en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga está encargado de recibir y procesar los datos de la instrumentación de campo y ejecutar los comandos provenientes del centro de control, que transmite la información vía radio. Para esta comunicación se requiere de un sistema en UHF (Ultra High Frequency) con un sitio de repetición ubicado en el cerro Palonegro. La comunicación entre las diferentes RTUs y/o los FEPs

(Front End Processor) emplea el protocolo MDCL (Motorola Data Link Communication) el cual está basado en los 7 niveles del modelo OSI (Open System Interconnection) recomendado por la organización internacional de estándares. Este protocolo está orientado a operar en enlaces punto a multipunto, también como en redes de comunicación punto a punto. En el centro de control la comunicación será por protocolo TCP/IP en una red LAN interna que comunica FEPs, computadores de ingeniería y supervisión, e impresoras. Finalmente, cada RTU se podrá comunicar con un computador portátil para programación por medio de un puerto serial.

Para poder realizar la comunicación, supervisión y control entre computador central y RTU final, deben existir diversos programas y equipos que ayudan a transportar esta señal entre medios de comunicación y protocolos. Para ello se utilizan tres software de aplicación básicos: Programming toolbox versión 8.50, IP Gateway toolbox 3.6 y factory link 7, además de software secundarios para programación de radios.

**Programming Toolbox versión 8.50.** El Toolbox, es el software básico para la programación de RTUs en sitios remotos. Con este, se puede designar a las diferentes RTUs tareas para que realicen un control específico, almacenar bases de datos útiles en el sistema, crear la configuración para la red de comunicaciones y sus diferentes enlaces, además de cargar o descargar los programas de aplicación a las RTUs y desarrollar el respectivo monitoreo del sistema.

**IP Gateway Toolbox 3.6:** Las RTUs MOSCAD y los Gateway pueden usar la tecnología de protocolo IP (Internet Protocol) como red privada. El protocolo MDLC que es la comunicación entre RTUs y FEP, puede ser integrada con el protocolo IP que se maneja en el centro de control por medio de este IP Gateway que actúa como compuerta entre protocolos.

**Factory Link 7:** Es el software de aplicación que sirve como interface entre hombre y maquina, tiene comunicación con la red local por medio del protocolo TCP/IP, es orientado a objetos, reduciendo configuraciones repetitivas, en este se pueden visualizar alarmas, estados, realizar bases de datos, despliegues, históricos. Es el que reúne finalmente todos los datos provenientes de las RTUs para procesarlos, almacenarlos y generar reportes u órdenes a los diferentes sitios. [4]

### 1.3 TRANSMISORES<sup>2</sup>

Los transmisores son dispositivos electrónicos que procesan la señal que representa la variable física medida por el sensor y la convierten en un a señal de salida estandarizada para su registro, control o manipulación por el sistema. También disponen de un indicador local que muestra la lectura de los valores medidos.

Además, están equipados con funciones de software que permiten adaptar el contador a las condiciones de trabajo y al proceso en general. El empleo de transmisores presenta las ventajas siguientes:

- Ofrecen señales estandarizadas, lo cual permite transmitir sin dificultad los valores medidos.
- Presentan un diseño unificado de recepción de los dispositivos de control y medición.
- Los transmisores modulares son como los ladrillos que permiten al usuario adaptar su equipo a todo tipo de tareas de control de procesos altamente complejas.

---

<sup>2</sup> Referenciado. [1] Endress+Hauser, people for process Automation, medición de caudal, Guía práctica

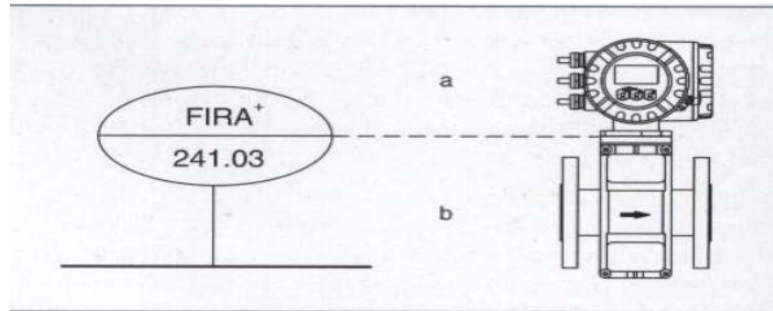


Figura 5. Unidad compacta, transmisor (a) y sensor (b). [1]

Los transmisores y los sensores empleados en la medición de variables “no eléctricas” suelen tener niveles de salida de señal bajos que es necesario amplificar. Por otra parte, es conveniente amplificar la señal lo más cerca posible del sensor para evitar interferencias contra señales de origen eléctrico.

Además, cada sensor activo necesita su propia fuente de alimentación. Por lo tanto, es razonable combinar los componentes electrónicos de la fuente de alimentación y del amplificador en un único cabezal.

Cuando se miden variables “no eléctricas” el sensor y el transmisor suelen formar una única unidad mecánica (versión compacta).

Por otra parte está la “versión remota”, que consiste en un sensor y un transmisor remoto, que se utiliza, por ejemplo, en situaciones en que todos los controles de una planta están combinados en un control central y una sala de control. Actualmente, el tipo más común de transmisores de versión remota son los modelos diseñados para ser montados sobre perfiles DIN (tipo de montaje).

### 1.3.1 Variable de medición

La generación de la variable de medición en el transmisor es un proceso de tres etapas. El sensor envía su señal al transmisor, que la procesa y la convierte en una señal de salida estandarizada que ya puede ser utilizada con cualquier

propósito. Es preciso consensuar la exactitud que se pretende alcanzar con los costes económicos que implica.

**Medición de las variables de proceso:** Hay transmisores para la medición de variables eléctricas (incluidas tensiones, intensidades, potencias, resistencias) y de variables no eléctricas (propiedades mecánicas, neumáticas, térmicas, ópticas o químicas). El sensor genera una señal primaria que mas tarde se procesará.

**Procesamiento de la señal (procesamiento inicial / conversión):** La señal sin tratar registrada por el sensor a partir del principio de medición es lo que hasta cierto punto determina la dificultad de procesamiento de la variable (física) en el transmisor. El transmisor amplifica la señal y, en general, la convierte de analógica a digital. Los transmisores modernos suelen incorporar microprocesadores que ofrecen toda una variedad de funciones configurables muy útiles:

- Verificación y ajuste del punto cero
- Verificación y ajuste del nivel de amplificación de la señal de medición
- Corrección de desviaciones de producción (por ejemplo, el factor de calibración)
- Linealización de la función característica del valor de medición
- Corrección de interferencias durante la medición
- Corrección del error sistemático del equipo
- Selección por frecuencia de la señal de medición mediante filtros
- Calculo de variables de medición indirecta (por ejemplo, la viscosidad)
- Autocontrol y verificación de plausibilidad
- Generación de valores limite y umbrales de alarma
- Cálculos matemáticos complejos (por ejemplo, funciones de densidad)

Tras ser procesada en el transmisor, la señal se convierte en una señal eléctrica estandarizada.

**TABLA 1**  
SEÑALES ANALOGICAS ESTÁNDARES MÁS IMPORTANTES

<b>Modo de la señal</b> <b>Tipo de la señal</b>	<b>Descripción</b>
Intensidad (salida de señal)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Campo de valores: 0/4-20 [mA]</li> <li>- Función: la intensidad de corriente es proporcional a la variable medida</li> <li>- Uso / aplicación: salida de señal preferida en todo el mundo para la variable medida sobre un campo de valores definido</li> </ul>
Frecuencia (salida de señal)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Campo de valores: 0 a 10 [KHz]</li> <li>- Función: la frecuencia es proporcional a la variable medida</li> <li>- Uso / aplicación: el mismo que la señal de intensidad, salida de señal para la variable medida sobre un campo de valores definido</li> </ul>
Impulso (salida de señal)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Campo de valores: 0 a 10.000 [p/s]</li> <li>- Función: un impulso de valor definido</li> <li>- Uso / aplicación: como función de totalización en varias industrias.</li> </ul>
Relé (salida de conmutación)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Campo de valores de tensión: típicamente 24/230 [v]</li> <li>- Valor de conmutación: típicamente hasta 1[A]</li> <li>- Función: un contacto de conmutación determinado</li> <li>- Uso / aplicación: por ejemplo, función de valor límite (respuesta desfasada).</li> </ul>
Optoacoplador (salida de conmutación)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Campo de valores de tensión: típicamente 24 [V]</li> <li>- valor de conmutación: típicamente hasta 500 [mA]</li> <li>- Función: un contacto de conmutación determinado.</li> <li>- Uso / aplicación: por ejemplo, función de alarma de baja potencia</li> </ul>
Intensidad (entrada de señal)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Campo de valores: 4-20 mA</li> <li>- Función: la intensidad de corriente es proporcional a la variable medida (por ejemplo, una señal procedente de un transductor de temperatura)</li> <li>- Uso / aplicación: señal para cálculos de orden superior, por ejemplo, cantidad de calor.</li> </ul>
Optoacoplador (entrada de conmutación)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Campo de valores de tensión: típicamente 24 [V]</li> <li>- Función: una función de contacto determinado</li> <li>- Uso / aplicación: por ejemplo, reiniciar un totalizador o disparar procesos de procesamiento por lotes (batching)</li> </ul>

**Salida de señal (señal estandarizada):** El valor de la variable medida se puede leer directamente en el indicador del contador (indicación) y/o se puede obtener como una salida de señal estandarizada. La disponibilidad de señales estandarizadas en campo contribuye significativamente a la enorme versatilidad de transmisión de los valores medidos a todo el mundo. La estandarización de las interfaces de transmisión permite conectar a los transmisores dispositivos de indicación, registro y control y controladores de orden superior de cualquier tipo y de todas partes del mundo.

**Señales analógicas estándar:** Cada vez es más común que los transmisores vayan provistos de un conversor de señales analógico / digital como una función integrada, de modo que, a parte de (o incluso, en lugar de) la señal analógica convencional, también disponen de una salida de señal digital. (La tabla 1 presenta un resumen de las señales analógicas estándares más importantes y habituales).

**Señales digitales estándar:** HART (Highway Addressable Remote Transducer, es decir: transductor remoto direccionable de alta velocidad) representa un primer intento de superar las restricciones de la transmisión analógica de señales. Permite la comunicación digital entre el equipo de campo y un controlador (portátil o en un PC). La comunicación se superpone sobre la señal de corriente analógica. Esto significa que la señal convencional y la señal de comunicación digital se pueden procesar al mismo tiempo.

HART se acompaña de otras tecnologías digitales. Estas y HART suelen agruparse bajo el concepto de "tecnología SMART". Al contrario que HART, otras tecnologías (como el protocolo DE de Honeywell, BRAIN de Yokogawa y Foxcom de Foxboro) no son abiertas, sino de código propietario. Esto significa a su vez que restringen la elección de la instrumentación a los equipos de un solo

fabricante. Éste es el motivo por el cual las soluciones específicas de un fabricante tienen cada vez menos relevancia.

Transferencia de datos: El protocolo HART superpone una señal de frecuencia sobre la señal de corriente analógica de 4-20 mA. La señal de frecuencia está modulada entre 1.200 y 2.400 Hz. La frecuencia alta corresponde a un cero (0) lógico, mientras que la frecuencia baja representa un uno (1) lógico. Esta simple conmutación de frecuencias (Frequency Shift Keying, FSK) corresponde al estándar americano de comunicaciones Bell 202. La superposición no afecta en absoluto a la señal de corriente analógica. Y tampoco los componentes convencionales, por ejemplo los instrumentos de lazo de corriente o los módulos de entrada analógica lenta de los sistemas de control de proceso perciben esta señal frecuencia superpuesta.

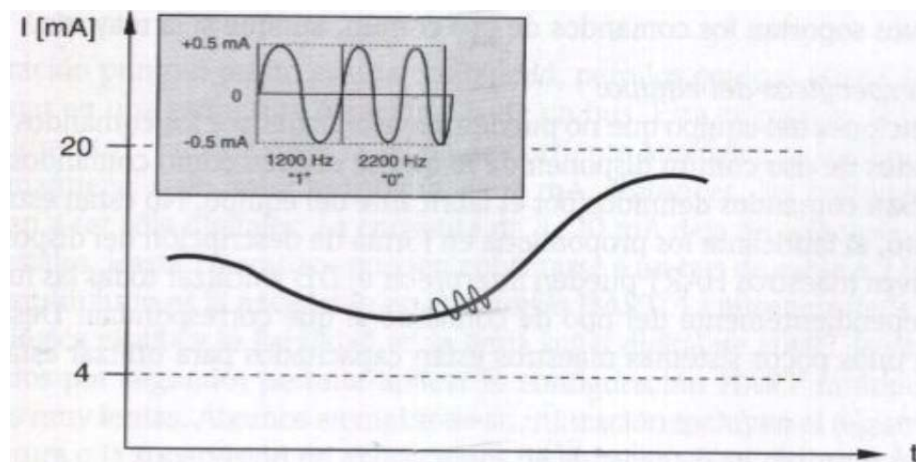


Figura 6. Transferencia de datos HART con modulación FSK. [1]

Ventajas de las comunicaciones HART: Gracias a su compatibilidad inherente con la transmisión de señales analógicas a 4-20 mA, muchos equipos analógicos están siendo sustituidos por equipos HART cuando aquellos tienen que ser retirados por reparación o por tareas de mantenimiento. Vale la pena tener presente que un equipo HART permite el ajuste del rango de valores de medida y

la autocalibración, y que puede ejecutar autodiagnósticos como tarea de mantenimiento en tiempo real. El protocolo HART ofrece ventajas significativas para una puesta en marcha rápida y para obtener diagnósticos detallados en caso de presentarse problemas.

### **1.3.2 Características dinámicas (Respuesta de señal)**

La respuesta de señal es el tiempo de transmisión (o retardo), es decir, el tiempo que transcurre desde el instante en que se registra una variable de proceso (o su cambio) hasta que el valor medido se actualiza. La respuesta de señal es una medida de la ejecución dinámica de un caudalímetro. Los transmisores empleados para control de realimentación, por ejemplo, suelen funcionar solo en una parte del campo de valores de medición máximo posible. En la práctica, sólo es significativa su respuesta en este campo de valores parcial, por ello, un dispositivo que ofrezca una buena repetibilidad y un error de histéresis bajo, puede ser preferible a un contador caracterizado por una linealidad excelente.

### **1.3.3 Fuente de alimentación**

La mayoría de los transmisores necesitan una fuente de alimentación externa. En una configuración a cuatro hilos, dos de los cables son para la alimentación, mientras que los otros dos son para la transmisión de la señal de salida. Un sistema a dos hilos carece de fuente de alimentación (es alimentado por el propio circuito de la señal). Los mismos cables pueden servir para la alimentación y la transmisión de la señal. Pero ello requiere trabajar con un "punto cero activo", por ejemplo, con una corriente de salida entre el campo de valores 4-20 mA. Las electrónicas del transmisor se alimentan con una tensión derivada de la corriente de línea básica de 4 mA. Las ventajas de las configuraciones del circuito alimentado son:

- No se requiere cables de alimentación para el transmisor.
- Son fáciles y baratos de instalar y mantener.
- El transmisor es intrínsecamente seguro (para uso en zonas de riesgo).
- Los circuitos abiertos interrumpen la alimentación, por lo que se detectan inmediatamente.

#### **1.3.4 Funcionalidades del transmisor**

Los transmisores modernos han de cumplir las normativas y estándares industriales y legales en curso. Ello ha propiciado un cambio y una ampliación constante en los modos de indicación y funcionamiento, sobre todo en el ámbito de las funcionalidades. Antes, los instrumentos mecánicos representaban la norma, pero hoy en día la mayoría de caudalímetros disponen de indicadores digitales, multi-línea o incluso con pantalla gráfica. Los potenciómetros han simplemente desaparecido, así como los puentes; los transmisores modernos van provistos de paneles de control y teclas de control de interfaz amigable.

Lo mismo podemos decir de la parametrización remota, por ejemplo con comunicación asistida por ordenador. Algunos transmisores de nueva generación disponen de funciones de alarma con herramientas de apoyo como correo electrónico o mensajes de texto que permiten mandar valores a bases de datos remotas. Los requisitos de seguridad pueden ser a menudo extremadamente estrictos, de modo que los transmisores digitales disponen de protección por contraseña para impedir accesos no autorizados a las funciones parametrizadas.

#### **1.3.5 Instalación eléctrica**

Como se ha visto los sistemas de medición pueden ser sensibles a interferencias eléctricas. Los elementos esenciales para la prevención de este fenómeno son una correcta puesta a tierra del caudalímetro y la provisión de un

apantallamiento adecuado de los cables de señal, sobre todo si se transmiten señales de baja potencia.

**Puesta a tierra:** Todos los equipos eléctricos, con la excepción de aquellos clasificados en las categorías clase I y III, han de estar conectados a una toma de tierra de protección. La mayoría de caudalímetros requieren una apuesta a tierra para evitar la acumulación de cargas electrostáticas y garantizar que no se establezcan diferencias de potencial eléctrico. Hay que aplicar sistemáticamente la filosofía de puesta a tierra de las plantas de proceso. Por ejemplo, los caudalímetros electromagnéticos requieren que haya contacto eléctrico entre el tubo de metal por donde circula el fluido y el fluido circulante para establecer un valor de referencia conocido para la señal de medición. La falta de conductividad o la presencia de diferencias de potencial introducirían un sesgo en el sistema. Una puesta a tierra incorrecta puede causar una corrosión electroquímica en los electrodos que origina fallas en el caudalímetro, fugas, etc.

**Apantallamiento de los cables:** Para garantizar la claridad de las señales es conveniente emplear cables apantallados, con un apantallamiento independiente para cada línea de señal. Los cables de par trenzado apantallados suelen ser adecuados y la mayoría de procesos industriales sólo establecen una toma de tierra, ya sea en un extremo del sensor o del transmisor, para evitar que se creen circuitos de puesta a tierra. Normalmente se hace en el extremo receptor (es decir, el datalogger, el registrador, la sala de control, etc.). Sin embargo, la tendencia moderna sobre compatibilidad electromagnética sugiere establecer tomas de tierra en ambos extremos.

**Fuente de alimentación:** La mayoría de caudalímetros reciben la energía de la red eléctrica general (110 V CA / 60Hz en Norteamérica y 220 V CA / 50 Hz en Europa) o de generadores CC de baja tensión (12 ó 24 V CC). Algunos modelos modernos también funcionan con baterías de litio de baja tensión o con

células fotovoltaicas en algunas partes del mundo. Si la fuente de alimentación es la red general, es preferible mantener los cables de señal y de alimentación separados los unos de los otros. En cambio, si se utilizan generadores de baja tensión, los efectos son más débiles y no es tan importante la separación de los cables. En cualquier caso, es importante disponer de fuentes de alimentación fijas y estables (denominadas “de suministro limpio”) para evitar incertidumbres debidas a las variaciones de tensión. Es recomendable que la zona alrededor del sensor y el transmisor sea accesible para evitar obstáculos que incidan en la seguridad de las actividades de mantenimiento [1]

#### **1.4 ULTRASONIDO**

Los sonidos generados por encima del rango perceptible por el oído humano (típicamente 20 KHz) son llamados ultrasonidos. Sin embargo, el rango de frecuencias normalmente empleado en ensayos no destructivos y en medidas de espesor es de 100 KHz a 500 MHz. Aunque los ultrasonidos se comportan de manera similar al sonido audible, tienen una longitud de onda muchísimo menor. Esto significa que puede ser reflejada por superficies extremadamente pequeñas como defectos en el interior de diversos materiales, lo que los hace muy apropiados para ensayos no destructivos sobre tales materiales. [14]

El sonido es una forma de transmisión de energía descrita por medio de las diferencias de presión que se producen en un medio, adoptando las características de una onda en su propagación. Este tipo de ondas se denominan *ondas mecánicas* y una de sus principales características es que para su propagación necesitan de un medio transmisor, cuyas características influirán principalmente en su velocidad de propagación.

De esta forma, el sonido se propaga a través de un medio a una velocidad dependiente de su composición y temperatura principalmente. La tabla 2 presenta

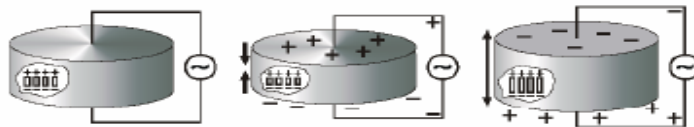
una lista de la velocidad de propagación del sonido en distintos medios a una temperatura dada. [12]

**TABLA 2**  
VELOCIDAD DEL SONIDO EN ALGUNOS MEDIOS.

Medio	Aire (0°C)	Aire (20°C)	Helio	Agua (0°C)	Agua (20°C)	Aluminio
Velocidad (m/s)	331	343	965	1402	1482	6420

Las vibraciones viajan en forma de onda, similar a la manera en que lo hace la luz. Sin embargo, al contrario que las ondas de luz, que pueden viajar en el vacío, los ultrasonidos requieren un medio elástico como un líquido o un sólido. [14]

Para implementar los métodos como el tiempo de transito de la señal y efecto Doppler para el caso de medición de caudal se hace uso de los *cristales piezoeléctricos*. Estos cristales tienen la propiedad de expandirse o contraerse al excitarlos con un determinado voltaje de polarización. La figura 7 ilustra esta situación.



**Figura 7.** Cristal piezoeléctrico. [12]

En estado natural, el cristal se encuentra polarizado, al aplicar un voltaje en sentido directo, el cristal se contrae. Por el contrario, si se aplica un voltaje inverso, el cristal se expande. De esta forma, al excitar el cristal con una señal de voltaje alterna de frecuencia determinada, el cristal provee la fuente de vibración mecánica a dicha frecuencia necesaria para generar la onda sonora. Sin embargo, no es suficiente la amplitud de la vibración como para generar la onda sonora por sí misma, es necesario realizar una amplificación mecánica. [12]

## 2. PRINCIPIOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL

### 2.1 CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS

El funcionamiento para este tipo de caudalímetros se basa en el principio de inducción electromagnética establecido por Michael Faraday. Este principio indica que un cuerpo sólido conductor de longitud ( $L$ ), al moverse perpendicularmente a un campo magnético a una determinada velocidad ( $v$ ), inducirá una corriente que produce una diferencia de tensión ( $U_e$ ) en los extremos del sólido conductor.

La diferencia de tensión que aparece en los extremos del sólido conductor es directamente proporcional a la velocidad de movimiento del sólido, a la intensidad del campo magnético y a la longitud del sólido conductor, de esta manera podemos relacionar matemáticamente la tensión inducida como:

$$U_e = B.L.v \quad (2.1)$$

$U_e$ : Tensión inducida

$B$ : Intensidad del campo magnético

$L$ : Longitud del conductor eléctrico (corresponde a la distancia entre los electrodos en el tubo de medición)

$v$ : Velocidad de movimiento del conductor (corresponde a la velocidad del fluido en el tubo de medición)

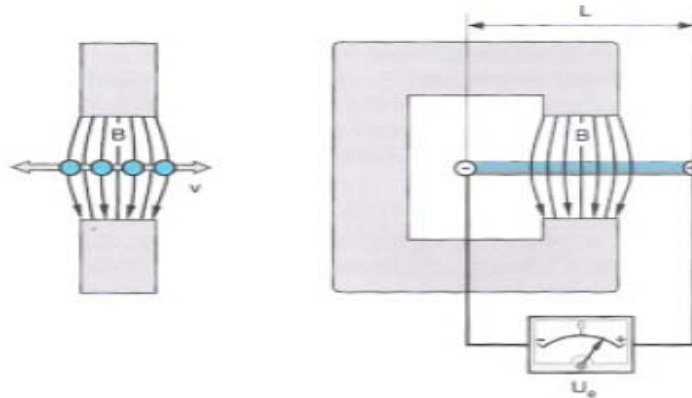


Figura 8. Principio de inducción electromagnética según la formulación de M. Faraday. [1]

Para el caso de un caudalímetro electromagnético como lo muestra la (Fig. 9) definimos el líquido o fluido conductor que fluye internamente por la tubería como el cuerpo solido conductor que mencionamos anteriormente en el principio de inducción de Faraday. Generalmente en un caudalímetro electromagnético la intensidad de campo magnético es generada por dos bobinas situados en la parte externa de la tubería. La manera de cuantificar la tensión inducida en el líquido conductor en movimiento se realiza por medio de dos electrodos ubicados en la pared interior de la tubería. El tubo de medición está eléctricamente aislado del fluido y del electrodo por un revestimiento no conductor (por ejemplo, goma, teflón etc.).

La ecuación de continuidad expresa la relación entre la velocidad del fluido dentro de la tubería y la sección transversal de la misma a través de ( $Q = A.v$ ). El caudal volumétrico ( $Q_v$ ) para este tipo de caudalímetro se calcula directamente a partir de la siguiente expresión:

$$Q_v = v.A = \frac{U_e}{B.L}.A \quad (2.2)$$

El valor de (A) corresponde al valor de la sección transversal de la tubería.

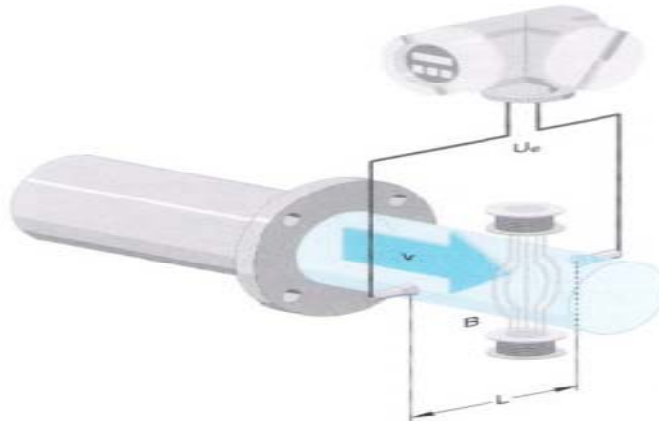


Figura 9. Principio de medición electromagnética del caudal. [1]

En un montaje real de un caudalímetro electromagnético, es posible encontrar diversidad de fuentes que contribuyen a la tensión que registra los electrodos. Por esto es indispensable filtrarla antes de ser procesada.

La ventaja principal de este principio de medición es que es insensible a la presión, la temperatura y la viscosidad. El perfil de velocidades del flujo tiene un efecto mínimo en el resultado de la medición. Estas propiedades hacen a los caudalímetros magnéticos extremadamente atractivos para un amplio abanico de aplicaciones industriales. En realidad, este principio de medición se emplea en todo el mundo. [1]

### 2.1.1 Ventajas e inconvenientes<sup>3</sup>

Los caudalímetros basados en este principio se emplean en todos los ámbitos de la industria y en todos los países del mundo.

Las posibles limitaciones de presión y temperatura que puedan presentar se deben fundamentalmente a las propiedades del material de revestimiento o a las características particulares de algunos modelos de caudalímetros específicos.

<sup>3</sup> Referenciado. [1] Endress+Hauser, people for process Automation, medición de caudal, Guía práctica: Tecnologías de medición – Aplicaciones – Soluciones. Edición española 2005.

Ventajas:

- El principio de medición en que están basados es virtualmente independiente de la presión, la temperatura y la viscosidad.
- Permiten mediciones incluso en presencia de partículas sólidas (por ejemplo, lodos de menas).
- Disponen de un amplio rango de diámetros nominales: DN 2 (1/12") hasta 3.000 (120").
- Tubo de medición de instalación longitudinal sin partes móviles.
- No experimenta pérdidas de carga.
- No requiere estrangulamientos en la sección transversal de la tubería (de fácil limpieza-CIP- y esterilización –SIP-, apto para limpieza con cepillo).
- Alto grado de fiabilidad y reproducibilidad de medición, buena estabilidad a largo plazo.
- Gasto mínimo en mantenimiento y renovación.

Inconvenientes:

- Sólo funciona con líquidos conductores.
- Las mediciones son menos exactas y más difíciles con líquidos poco conductores, por ejemplo con agua desmineralizada.
- Las deposiciones en el interior del tubo de medición o en los electrodos pueden generar errores.

### **2.1.2 Maneras de generar un campo magnético**

Mencionamos que un caudalímetro electromagnético requiere de un campo magnético para su operación, la manera de generarlo y controlarlo contribuye a este realice una buena medición.

En la actualidad se emplean dos métodos.

**Generación de campo magnético a partir de impulsos de corriente continua:** Utilizando impulsos de corriente continua (CC), se genera lo que se denomina como “campo CC por impulsos”. La figura 10, muestra el cambio de polaridad del campo magnético que con lleva a que las tensiones de medición en los electrodos ( $U_+$ ,  $U_-$ ) tengan signos opuestos. La tensión inducida ( $U_{caudal}$ ) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$U_{caudal} = \frac{U_+ - U_-}{2} \quad (2.3)$$

El sistema electrónico del caudalímetro transforma el valor de esta tensión resultante relacionada con la velocidad media del fluido al valor de caudal volumétrico correspondiente y lo convierte en una señal de salida estandarizada (por ejemplo, una intensidad de corriente entre 4-20 mA).

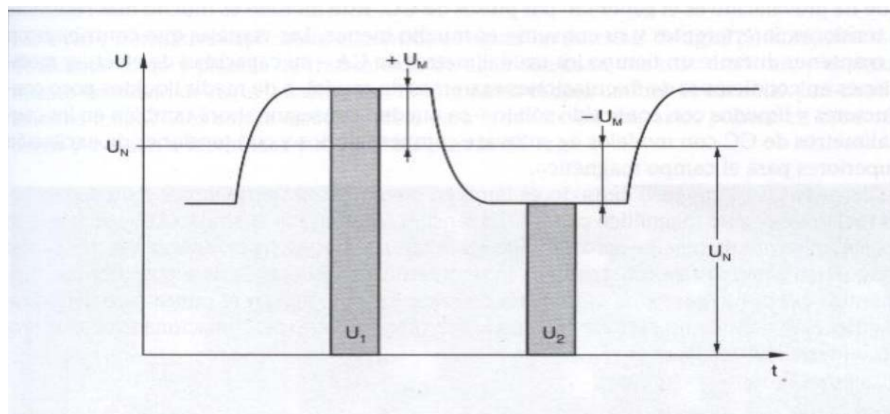


Figura 10. Procesamiento de señal y generación de campo magnético por impulso de CC. [1]

**Campos magnéticos por impulsos de CA:** Al conectar una fuente de alimentación CA sinusoidal directamente a unas bobinas, las excita y genera un campo magnético. El campo magnético obtenido de este modo es intenso y ofrece un amplio margen para distinguir lo que es señal de tensión de lo que es ruido.

El valor tensión medido al ser muy bajo puede ser interferido por la tensión CA de alimentación. Estas interferencias pueden originarse en el transformador del caudalímetro o en el mismo cable de alimentación, si éste se halla cerca de los cables de salida de señal y tienden a falsear los resultados de la medición.

El sistema de apantallamiento proporciona una medida para reducir estos efectos, como los circuitos auxiliares para la misma necesidad, sin embargo estas tensiones nunca pueden ser eliminadas por completo.

**Ventajas e inconvenientes** El método de generación de campo magnético por pulsos de CC es mucho más resistente a tensiones interferentes y su consumo es mucho menor. La previa permanencia de los caudalímetros de CA estaba fundamentada en la capacidad de efectuar mediciones en condiciones de fluctuaciones extremas de caudal, o de medir líquidos poco conductores y líquidos con contenido sólido. Los caudalímetros de CC con modelos de software compensatorios y con tensiones de excitación superiores para el campo magnético, logran ahora estas aplicaciones

La falta de un punto cero definido es también otro inconveniente de los métodos de generación de campo magnético por CA. [1]

### **2.1.3 Aplicaciones**

Los caudalímetros magnéticos son los más frecuentes en instalaciones de gestión de aguas, en la industria de procesos, en el sector farmacéutico y en la

industria alimentaria, también en aplicaciones de minería y construcción de túneles, en las condiciones ambientales más duras. Sin embargo la utilidad más frecuente se da en la medición y el control de flujos continuos, de llenado y dosimetría.

Estos caudalímetros permiten medir muchos fluidos acuosos: agua, aguas residuales, lodos, pulpas, pastas, ácidos, álcalis, zumos, puré de frutas, etc. No pueden medir, por el contrario, ni líquidos no conductores, ni gases ni vapor. [1]

## **2.2 CAUDALÍMETROS ULTRASÓNICOS**

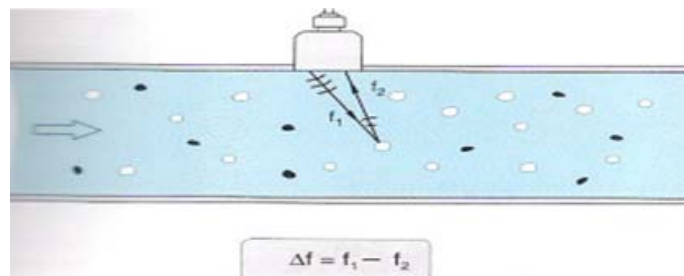
Este tipo de caudalímetros funcionan bajo el principio de ultrasonido. Como se menciona en el primer capítulo, las señales sonoras a una frecuencia mayor a 20khz se denominan ultrasonidos. Para el caso de los caudalímetros de ultrasonido se utilizan para establecer la velocidad del caudal. Existen dos métodos elementales que utilizan este principio en la medición de caudal. Ultrasonidos.

- El método del efecto Doppler
- El método por tiempo de tránsito de la señal

### **2.2.1 El método del efecto Doppler**

La variación de la frecuencia de una onda sonora en función de la variación de la distancia entre un emisor y receptor se conoce como efecto Doppler. Bajo este fenómeno se basan los caudalímetros de ultrasonido para determinar caudales. Para medir el caudal bajo este método se requiere de la presencia de ciertas inhomogeneidades, es decir de la presencia de partículas (en movimiento) que servirán de elementos reflectores para las señales ultrasónicas emitidas por el sensor. Con este propósito, un caudalímetro de efecto Doppler requiere dos

sensores. El primero emite por el fluido una onda de ultrasonidos a una frecuencia determinada y el segundo recibe la onda reflejada (Fig. 11). [1]



**Figura 11.** Medición de caudal por efecto Doppler con ultrasonidos. La frecuencia de las ondas emitidas ( $f_1$ ) y reflejadas ( $f_2$ ) varía en función de la velocidad del caudal de las partículas / burbujas transportadas. [1]

La frecuencia de la onda reflejada depende directamente de la velocidad de las partículas, que para este caso se asume que es la misma velocidad del fluido. Para determinar el caudal entonces utilizamos la expresión siguiente:

$$Q = K \cdot \Delta f \quad (2.4)$$

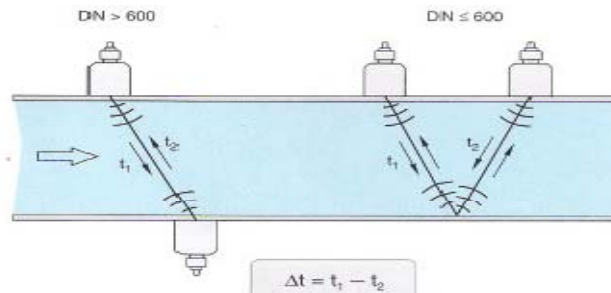
$\Delta f$  : Variación de la frecuencia ( $f_1 - f_2$ )

$K$  :  $K = \text{constante} = f$  (ángulo de incidencia/reflexión, posición de la partícula reflejante, sección transversal)

El método del efecto Doppler es simple y bastante exacto cuando se mide la velocidad de una sola partícula. Pero la velocidad de cada partícula es distinta según su orientación y su posición en el perfil de velocidades del fluido.

Calcular el caudal exige hacer un promedio ponderado de los resultados de cada medición en función de la posición de cada partícula en el fluido. Además,

hay que tener en cuenta que una señal reflejada puede verse afectada por más partículas /burbujas en su camino de vuelta. [1]



**Figura 12.** Medición del caudal por ultrasonidos a partir del tiempo de tránsito de la señal. La velocidad a la cual se propagan las ondas sonoras varía según la velocidad fluido y su dirección. [1]

### 2.2.2 Método del tiempo de tránsito de la señal

En el método del efecto Doppler, la frecuencia de la señal de ultrasonido variaba en función del movimiento de las partículas del caudal. Para el método de tiempo de tránsito de la señal, se genera un tiempo de retardo en la señal de ultrasonido enviada (en el sentido del fluido), con la señal de ultrasonido reflejada (en dirección opuesta al fluido) dependiente de la velocidad del caudal en la tubería. (Véase la Fig. 12).

Dos sensores instalados en la tubería emiten y reciben impulsos de ultrasonidos simultáneamente. A “caudal cero”, ambos sensores reciben las ondas sonoras transmitidas al mismo tiempo, es decir, sin ningún retardo en los tiempos de tránsito de la señal. Pero con un fluido en circulación, las ondas sonoras procedentes de cada sensor necesitan intervalos de tiempo distintos (dependencia en el caudal) para llegar al otro sensor. Si la distancia entre los dos sensores es conocida, la diferencia en los tiempos de tránsito de la señal es directamente proporcional a la velocidad del fluido. Ambos sensores están conectados a un transmisor. El transmisor induce a los sensores a generar ondas

sonoras y medir el tiempo de tránsito de estas ondas que se propagan de uno a otro sensor. [1]

$$Q = k \cdot \frac{t1 - t2}{t1 \cdot t2} \quad (2.5)$$

$t1$ : Tiempo de transito de la señal  $t1$  (en el sentido de la corriente)

$t2$ : Tiempo de transito de la señal  $t2$  (contra corriente)

$k$ :  $K$  = Constante =  $f$  (longitud del camino acústico, razón entre las distancias radiales y axiales de los sensores, distribución de velocidades (perfil de velocidades de flujo), sección transversal) [1]

### 2.2.3 Tipos de sensores / Diseños

Existen varios tipos de sensores de ultrasonidos, que pueden ser instalados directamente en la tubería o que pueden venir ya preinstalados en un tubo de medición. Según se empleen con el método del efecto Doppler o con el método de tiempo de tránsito de la señal tenemos:

- Los sensores de fijación externa, tipo “clamp-on”
- Los sensores de inserción

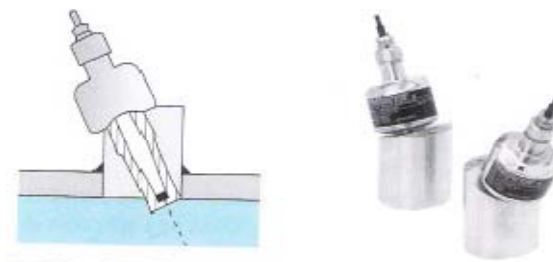
**Sensores de fijación externa, tipo “clamp-on”**: Las ondas sonoras pueden atravesar la materia sin causarle efectos perjudiciales. Gracias a esta propiedad, las ondas sonoras resultan de gran utilidad para aplicaciones en diagnósticos médicos, en prueba de resistencia de materiales y en medición de caudales. En lo que concierne a la medición de caudales, dicha propiedad permite que el sensor pueda hallarse en el exterior de la tubería y no tenga que estar necesariamente en contacto con el fluido. Nos referimos normalmente a los

dispositivos montados de esta manera como sensores de fijación externa (Fig.13). Una característica de los sensores de fijación externa es que las ondas ultrasonoras siempre atraviesan todo el diámetro central de la tubería porque la pared de la tubería permite el paso de las ondas ultrasonoras. [1]



**Figura 13.** Los sensores de fijación externa se montan directamente en el exterior de la tubería. Un riel especial de montaje facilita su posicionamiento exacto. [1]

**Sensores de inserción:** Los sensores que se hallan en contacto directo con el fluido se conocen como sensores de inserción o de inmersión. Los sensores de inserción se emplean cuando la tubería está hecha de materiales como el hormigón granular, que no dejan pasar las ondas sonoras. También se emplean en caudalímetros con sistema por tiempo de tránsito de la señal multicamino, es decir, que miden caminos acústicos distintos del que pasa por el plano medio de la tubería. Un ejemplo de ello son los sistemas de camino acústico dual (Fig.14). Los sistemas multicamino ofrecen un mejor comportamiento lineal y son menos susceptibles a las perturbaciones en el perfil de velocidades de flujo. [1]



**Figura 14.** Los sensores de inserción están inmersos en el fluido. El soporte de instalación del sensor está soldado a la tubería. [1]

**Tubo de medición / sensor en línea:** Los sensores de ultrasonidos pueden sujetarse directamente a la tubería (sensores de fijación externa) o bien pueden ir

soldados a la pared de la tubería (sensores de inserción). Así, los tubos de medición prefabricados no resultan imprescindibles para los caudalímetros de ultrasonidos. Un tubo de medición actúa básicamente como soporte para los sensores. [1]

Los tubos de medición prefabricados (véase la Fig. 15) resultan ideales para trasladar exactitudes de medición determinadas en el laboratorio directamente al lugar de ejecución. Un sensor en línea consiste en un tubo de medición prefabricado completo con sensores de inserción preinstalados. Las configuraciones de este tipo suelen emplear sensores en línea con un sistema multicamino que consta de dos, tres o cinco pares de sensores. [1]



Figura 15. Tubo de medición prefabricado con cuatro sensores de inserción y dos caminos acústicos de medición. [1]

#### 2.2.4 Ventajas e inconvenientes<sup>4</sup>

Ventajas:

- Se pueden emplear con diámetros nominales muy pequeños (DN desde 15 hasta 4000 / desde ½ hasta 160”).
- Permiten medir fluidos muy corrosivos sin que haya contacto directo.

---

<sup>4</sup> Referenciado. [1] Endress+Hauser, people for process Automation, medición de caudal, Guía práctica: Tecnologías de medición – Aplicaciones – Soluciones. Edición española 2005.

- No experimenta pérdidas de carga.
- Esperanza de vida útil alta.
- Constante de tiempo mínima: 1 a 20 ms caudalímetros de alto nivel.
- Los sensores de ultrasonidos pueden ser montados a posteriori, tanto los de fijación externa como los soldados a la tubería.
- El principio de medición es independiente de las propiedades físicas del fluido, si este es homogéneo.

Inconvenientes:

- Los resultados de la medición son altamente dependientes del perfil de velocidades del flujo porque la velocidad del fluido se mide a lo largo de un estrecho camino acústico, o pequeña zona en que se lleva a cabo la medición.
- Grado de exactitud intermedio a bajo. La exactitud es fuertemente dependiente de las propiedades de propagación de las ondas sonoras del fluido.
- Las deposiciones en la tubería o en el sensor provocan fallos del equipo y errores de medición.
- El método de medición por efecto Doppler sirve sólo para algunos tipos de aplicaciones, por ejemplo, el control de caudales.

Limitaciones:

- Grandes cantidades de materia intrusa en el fluido.
- Campos de valores de temperatura del fluido.
- Perfiles de velocidades de flujo excesivamente perturbados

### 2.3 EVALUACIÓN DEL PRINCIPIO DE MACROMEDICIÓN

Los equipos de macromedición de caudal del amb SA, funcionan bajo el principio de ultrasonido. Existen varios parámetros que definen las prestaciones de este principio de macromedición. Los conceptos presentados previamente y otras fuentes de información relacionados con esta temática permiten mencionar algunas:

El ultrasonido permite su propagación en líquidos, gases y vapor. En el agua a (20°C) lo hace a 1482 m/s. Además, las ondas de ultrasonido atraviesan cuerpos sólidos sin causar efectos perjudiciales en ellos. Para el caso de la macromedición de caudal, donde la tubería permite el paso del ultrasonido es factible realizar la instalación de los sensores en la parte externa de la tubería.

El proceso de macromedición con el principio de ultrasonido al no ser invasivo, facilita la sustitución del equipo y las labores de mantenimiento sin que haya interrupción del servicio, reduciendo costos y tiempos de operación.

Las ondas procedentes de un emisor de ultrasonidos se transmiten con mayor velocidad en el agua que en el aire, y por ello circulan primero por el líquido antes que hacia el exterior. Además, los emisores de ultrasonido suelen estar contenidos en el interior de un cabezal de acero que bloquea la transmisión del sonido hacia el exterior. Por lo tanto la intensidad de las ondas sonoras que escapan al aire es muy baja y no constituye ningún riesgo para la salud de los operarios.

El agua que circula por las tuberías del amb SA, se considera como una sustancia homogénea, es decir, que contiene un porcentaje mínimo de otras partículas, lo cual hace que el principio de ultrasonido para la macromedición por medio del método de tiempo de tránsito de la señal sea el más apropiado. De otro

modo, a causa de la presencia de partículas, se generarían interferencias de las ondas sonoras, viendo la necesidad de recurrir a caudalímetros ultrasónicos que utilicen el método del efecto Doppler.

Un caudalímetro bajo el principio de medición electromagnético requiere que el líquido sea conductor, situación que no ocurre para el ultrasónico. En términos de instalación, se diferencia con el caudalímetro de ultrasonido en que debe existir corte de suministro de agua cuando el caudalímetro falle para realizar labores de mantenimiento o cuando se realice la instalación de alguno.

Otra consideración para resaltar en favor del caudalímetro ultrasónico, son los valores del diámetro nominal de las tuberías que admite cada uno y los rangos de medición del caudal. En el caso de un caudalímetro electromagnético como se mencionó en el primer capítulo el rango en pulgadas es de 6" a 42" y para el caudalímetro ultrasónico el rango se encuentra entre 2" Y 120".

En el análisis de las propiedades del fluido se consideran criterios como: Tipo de fluido (agua), medición de tuberías cerradas o canales abiertos, presión y temperatura de trabajo, gas en el líquido y el número de Reynolds. Si revisamos el anexo E, se puede ver claramente que los caudalímetros ultrasónicos cumplen a cabalidad las expectativas para las propiedades mencionadas. Es decir, la medición de agua en tuberías cerradas es una aplicación que cumplen totalmente estos caudalímetros. El anexo C, muestra que a diferentes valores de temperatura y presión, la densidad del agua es casi el mismo valor (1000 kg/m<sup>3</sup>). Esto permite inferir que los efectos de temperatura como ya habías mencionado y de presión no aportan cambios considerables en fluido que perturben o modifiquen las señales de ultrasonido. En teoría un flujo con número de Reynolds por debajo de 2000 se denomina flujo laminar, por encima de 4000 el flujo se considera turbulento. Nuevamente haciendo énfasis en el anexo E, los caudalímetros de ultrasonido funcionan a más de un número de Reynolds de 5000, lo cual indica que estos

caudalímetros son diseñados para operar en flujos turbulentos, situación que ocurre para el caso de macromedición de caudal.

Según las características técnicas del contador se puede realizar otro análisis de viabilidad para el caudalímetro ultrasónico. La precisión, los rangos de medida, tiempos de respuestas y las señales de salida son las características más destacadas para cuestionar. Una descripción de las características de los equipos de macromedición en el cuarto capítulo, permite evidenciar algunas de estas características. Por ejemplo, el rango de medición para el equipo patrón logra 10000 litros/s, y el máximo caudal en una tubería de macromedición del amb SA, es de 2100 litros/s en el bombeo Bosconia cuando tres de las cuatro unidades de bombeo están encendidas, y es algo que generalmente casi no ocurre. El tiempo de respuesta expresado como una constante de tiempo, es un parámetro muy importante para los equipos ultrasónicos del amb SA por hacer parte del sistema de supervisión y control (SCADA). Los equipos de macromedición al ser alimentados con 120 Vac, presentan facilidad de acceso a esta red que está disponible en todos los sitios de macromedición facilitando su conexión eléctrica.

Son varias las señales de salida que entregan estos equipos, la experiencia en la compañía, permitió visualizar la intensidad de la señal ultrasónica, el volumen de caudal medido, la dirección del fluido, el tiempo de medición y el caudal medido (litros/s). De igual forma, estos equipos contienen una gran base de datos que logran configurarlos a diferentes puntos de medición; los tipos de tubería, de fluido, temperatura son algunas de ellas.

Este análisis permite establecer que los equipos de macromedición de caudal del amb SA, cumplen de manera amplia y a cabalidad los requerimientos necesarios para las aplicaciones de interés. Sin embargo, se puede revisar el anexo E para inspeccionar otras características de ejecución y compararlas con el rendimiento con otros principios de caudal existentes.

### 3. FUNDAMENTOS DE METROLOGÍA

#### 3.1 CONCEPTOS INTRODUCTORIOS

En general una medición tiene imperfecciones que dan origen a un error en el resultado de una medición. Algunos conceptos previos contribuirán a comprender los factores que generan estas imperfecciones.

**Mensurando:** Los mensurandos son las magnitudes particulares objeto de una medición. Un mensurando puede ser medido directamente (por ejemplo la medición de la temperatura de un cuerpo con un termómetro) o bien en forma indirecta a partir de otras magnitudes de entrada que se relacionan con él a través de un modelo matemático o relación funcional (por ejemplo la medición de la densidad a partir de mediciones de masa y volumen utilizando el modelo matemático  $\text{densidad} = \text{masa} / \text{volumen}$ ). [18]

**Trazabilidad.** Propiedad del resultado de una medición o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencias determinadas, generalmente a patrones nacionales o internacionales por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas. [3]

**Error aleatorio** Un error aleatorio se presenta por variaciones impredecibles o estocásticas, temporales y espaciales de las magnitudes de influencia (magnitudes que pueden afectar el resultado de una medición y que no se mantienen necesariamente constantes). Los efectos de estas variaciones llamadas efectos aleatorios, dan origen a las variaciones en observaciones repetidas del mensurando. En este caso, no se es posible una compensación del

error aleatorio en el resultado de una medición, sin embargo puede ser reducido incrementando el número de observaciones. [3]

**Error sistemático** El error sistemático como el error aleatorio, no pueden ser eliminado, pero puede también ser reducido. Si un error sistemático se presenta como consecuencia de un efecto reconocido de una magnitud de influencia en el resultado de una medición, en adelante llamado efecto sistemático, el efecto puede ser cuantificado y, si este es significativo e relación a la exactitud requerida de la medición, una corrección o un factor de corrección puede aplicarse para compensar el efecto. El resultado de una medición después de la corrección por efectos sistemáticos es, aún, solo una estimación del valor del mensurando debido a la presencia de la incertidumbre por efecto aleatorios y de correcciones imperfectas de los resultados por efectos sistemáticos. [3]

### 3.2 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD<sup>5</sup>

Estas son distribuciones teóricas que sirven como modelos matemáticos de poblaciones, a partir de los cuales se puede extraer información estadística de las muestras obtenidas de mediciones u observaciones y hacer conclusiones sobre las poblaciones correspondientes.

Una distribución de probabilidad es un resumen de datos donde se muestra la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno específico que ha sido representado mediante esta herramienta estadística. Existen innumerables posibilidades de representación. Las distribuciones propuestas a continuación, están definidas en orden de conocimiento del mensurando, de tal forma que están designadas como uniforme rectangular, t-student y normal o gaussiana. [3]

A continuación, los diferentes conceptos básicos sobre distribuciones de probabilidad aplicables a procesos de medición.

---

<sup>5</sup> Referenciado. [3] Incertidumbre de la medición, CCOLSMI

### 3.2.1 Distribución de probabilidad uniforme o rectangular

Con frecuencia se presenta que es necesario asociar un parámetro general y sin mayor información, dentro de marco de una distribución de probabilidad y evaluar este, dentro de una estimación de duda e incertidumbre en una medida. Es allí donde encontramos en esta herramienta, el modo perfecto de cuantificar este parámetro como un incremento al cálculo total que estamos realizando.

Considérese el caso en el cual solo sea posible estimar los límites superior  $a+$  e inferior  $a-$ , de la variable aleatoria  $X_i$ . Si no existe un conocimiento específico acerca de los posibles valores de  $X_i$  dentro del intervalo de  $a+$  hasta  $a-$ , uno puede únicamente suponer que es igualmente probable para  $X_i$  tomar cualquier valor dentro del intervalo. La probabilidad de que el valor de  $X_i$  esté dentro del intervalo es igual a uno, con probabilidad cero de caer fuera del intervalo.

La incertidumbre estándar correspondiente a esta distribución está dada por la expresión:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

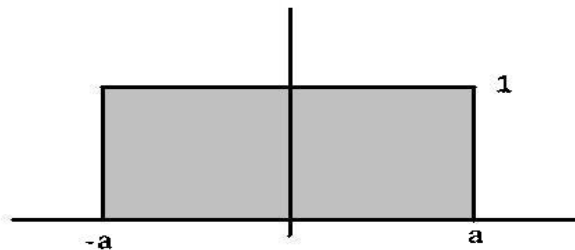


Figura 16. Histograma de una distribución uniforme rectangular. [3]

Es importante aclarar, que la eficacia en el uso de esta distribución de probabilidad, está en la buena selección de los límites planteado como  $a+$  y  $a-$ , y esto es posible solo con la agilidad y experiencia que posea el metrólogo que realiza la medición.

[3]

La función de distribución rectangular se utiliza en el cálculo de la incertidumbre cuando:

- Un certificado u otra especificación ofrecen los límites sin especificar un nivel de confianza.
- Es hecho un estimado en la forma de un rango máximo con desconocimiento de la forma de la distribución. [8]

### 3.2.2 Distribución de probabilidad tipo t-student

Cuando se aplican distribuciones o se construyen intervalos de confianza para la media aritmética  $\mu$  de una población, pueden usarse como procedimientos viables consideraciones de tipo normal, siempre que el tamaño de la muestra sea grande (se recomienda  $n > 32$ ), debido al teorema del límite central. Sin embargo, cuando la muestra es pequeña, debe hacerse un supuesto acerca de la forma de la distribución fundamental como axioma para el desarrollo de la estimación. Cuando este supuesto no es razonable, por el comportamiento no repetible de la muestra, una alternativa es usar procedimientos con distribuciones diferentes a la normal, como es el caso de la calibración de medidores de agua. Una buena recomendación, es la utilización de la distribución tipo t cuya apariencia es similar a la de la distribución normal estándar, por cuanto ambas distribuciones son simétricas y unimodales, y el valor máximo de las ordenadas se alcanza cuando la media  $\mu = 0$ . Sin embargo, la distribución t tiene colas de mayor peso que la normal. Cuando el número de grados de libertad  $k \rightarrow \infty$ , la forma límite de la distribución t es la distribución normal estándar. Entre las principales características de esta distribución, tenemos:

- Se recomienda utilizar en muestras de 32 o menos elementos o medidas.
- La desviación estándar de la población no se conoce o no es caracterizada con total claridad. En estos casos, se puede utilizar la desviación estándar de la muestra como una estimación de s.

- La distribución t-student es menor en la media y más alta en los extremos que una distribución normal.
- Tiene proporcionalmente mayor parte de su área en los extremos que la distribución normal.
- Existe una distribución t para cada tamaño de la muestra, por lo que "existe una distribución para cada uno de los grados de libertad.
- Los grados de libertad son el número de valores elegidos libremente.
- Dentro de una muestra para distribución t-student los grados de libertad se calculan de la siguiente manera: como  $n - 1$ , siendo n el número de muestras o mediciones cuando se considera solo una distribución proveniente de una información puntual y repetible a través de la fórmula de Welch-Satterthwaite, la cual se indicará más adelante. Cuando trabajamos en conjunto con otras contribuciones, será necesario el cálculo de los grados efectivos de libertad junto con otras contribuciones de incertidumbre a través de la misma fórmula.
- segunda diferencia de la tabla es que no se centra en la probabilidad de que el parámetro de la población que está siendo estimado caiga dentro del intervalo de confianza. Por el contrario, mide la probabilidad de que este parámetro no caiga dentro del intervalo de confianza.
- Una tercera diferencia en el empleo de la tabla consiste en es necesario especificar los grados de libertad con que estamos trabajando.
- Al igual que la distribución Z (de origen gaussiano), es una distribución continua.
- Tiene forma acampanada y simétrica.
- No hay una distribución t, sino una "familia" de distribuciones t. todas con la misma media que normalmente es cero, pero con su respectiva desviación estándar diferente de acuerdo con el tamaño de la muestra n. Existe una distribución t para una muestra de 20, otra para una muestra de 22, y así sucesivamente.

- La distribución t es más ancha y más plana en el centro que la distribución normal estándar, como resultado de ello se tiene una mayor variabilidad en las medias de muestra calculadas a partir de muestras más pequeñas. Sin embargo, a medida que aumenta el tamaño de la muestra, la distribución t se aproxima a la distribución normal estándar.

El aspecto clave tener en cuenta en esta distribución es la desviación estándar de la muestra cuya expresión está dada por:

$$\sigma_{muestra} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

La incertidumbre estándar correspondiente a esta distribución está dada por la expresión:

$$u(x_i) = \frac{\sigma_{muestra} * k_{nivel\ de\ confianza\ deseado}}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

Donde k es un factor de amplificación que varía según una tabla de herramienta estadística dada en el anexo, dependiente del número de grados efectivos de libertad y del nivel de confianza deseado en la medición. Usando el software Excel como herramienta de búsqueda estadística, podemos usar la función DISTR.T.INV para la búsqueda del factor k deseado.

Para evaluar este valor, es necesario definir el término grados efectivos de libertad  $V_{eff}$ , el cual nos permite identificar de manera práctica, qué tan seguro se encuentra el metrólogo para tomar una decisión. Entre mayor sea este valor, así también mayor será su seguridad, ya que esta medida viene condicionada por la repetibilidad de la medición, el número de medidas y la capacidad del sistema a

ser óptimo para garantizar que es no vulnerable, de tal forma que caracterice correctamente el comportamiento del objeto de prueba de manera ideal.

Cuando queremos identificar este factor, y este proviene de la suma de diversas distribuciones (convolución de funciones), inclusive de igual naturaleza estadística, es usada la herramienta dada por la fórmula de Welch-Satterthwaite, definida en el siguiente capítulo, según se mencionó anteriormente. Para el caso de evaluar solo la función estadística por separado, este término de grados efectivos de libertad, está dado por la ecuación:

$$V_{eff} = n - 1 \quad (3.4)$$

Luego de los  $V_{eff}$ , calcularnos remitimos a la tabla t-student. En el anexo A, encontramos una tabla con una selección de factores k, con algunas columnas de diferente dato de nivel de confianza específico.

Si la herramienta usada es un texto estadístico y no encontramos el valor de  $V_{eff}$  solicitado por el cálculo, es posible realizar una interpolación y extraer este valor por regresión lineal o seleccionar entre los valores extremos que poseemos, dejando a criterio del metrólogo la selección entre estos dos valores de k. En tal caso, se recomienda trabajar con el menor valor de grados efectivos de libertad disponible. En el Anexo, encontramos una tabla t-student guía con algunos valores de k en algunos diferentes valores de nivel de seguridad. [3]

### 3.2.3 Distribución de probabilidad tipo normal o gaussiana

La distribución normal, también llamada distribución de Gauss o distribución gaussiana, es la distribución de probabilidad que con más frecuencia aparece en estadística y teoría de probabilidades.

Muchas variables aleatorias continuas presentan una función de densidad cuya gráfica tiene forma de campana.

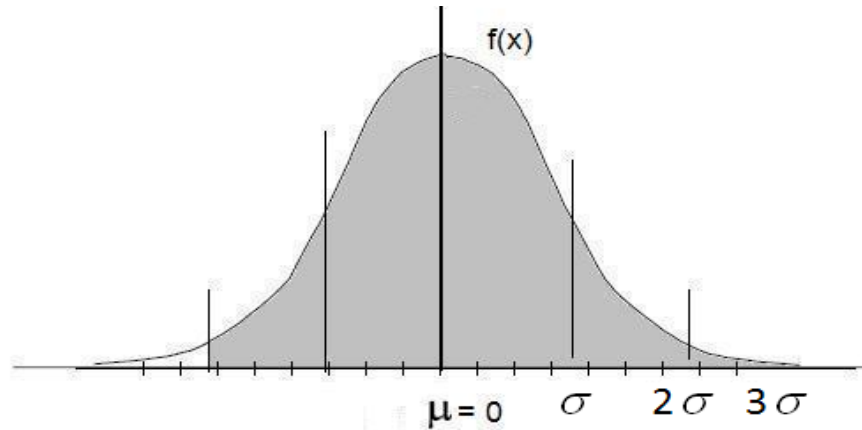


Figura 17. Distribución de probabilidad normal. [8]

Se le llama así a la curva que representa a  $f(x)$ , que es simétrica con respecto a  $x = \mu$ , siendo  $\mu$  el valor promedio de la población. **La figura** muestra la función de densidad  $f(x)$  para  $\mu = 0$  y diferentes valores de  $\sigma$ . Para  $\mu > 0$  o  $\mu < 0$ , las curvas tienen la misma forma, pero se desplazan  $\mu$  unidades a la derecha o a la izquierda respectivamente. La función  $f(x)$  está descrita por su función de densidad de probabilidad de la siguiente manera:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}{2}} \quad (3.5)$$

La importancia de la distribución normal se debe principalmente a que hay muchas variables asociadas a fenómenos naturales que siguen el modelo de la normal.

La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, denotadas por  $\mu$  y  $\sigma$ . Las expresiones correspondientes son:

- Media aritmética o promedio:

$$\bar{X} = \sum_{i=0}^n \frac{X_i}{n} \quad (3.6)$$

Donde  $n$  es el número de medidas o de integrantes de la población a la cual se le quiere evaluar su media aritmética.

- Desviación estándar de población:  $\sigma_{población} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\bar{X} - X_i)^2}{n}}$  (3.7)

Notemos que la desviación estándar propuesta por la distribución gaussiana, tiene en cuenta la población, debido a que, se asume un gran número de medidas (sugerido que sean mayor a 32), de tal forma que es posible realizar una aproximación en el término divisor del radical y cambiar  $n-1$  por  $n$ , sin llevar a diferencias sustanciales.

La distribución normal posee ciertas propiedades importantes que conviene destacar:

- a. La curva normal es asintótica al eje de abscisas. Por ello, cualquier valor entre  $-\infty$  y  $+\infty$  es posible. El área total bajo la curva es, por tanto, igual a 1.
- b. Es simétrica con respecto a su media  $\mu$ . Según esto, para este tipo de variables existe una probabilidad de un 50% de observar un dato mayor que la media, y un 50% de observar un dato menor que la misma.
- c. La distancia entre la línea trazada en la media y el punto de inflexión de la curva es igual a una desviación típica  $\sigma$ . Cuanto mayor sea  $\sigma$ , más aplanada será la curva de función de la densidad.
- d. El área bajo la curva comprendida entre los valores situados aproximadamente a dos desviaciones estándar de la media es igual a 0,9545. En concreto, existe un 95,45% de posibilidades de observar un valor comprendido en este intervalo.

- e. La forma de la campana de Gauss depende de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  como se muestra en la figura. La media indica la posición central de la gráfica, tal que para diferentes valores de  $\mu$ , la gráfica es desplazada a lo largo de las abscisas. Por otra parte, la desviación estándar determina el grado de dispersión. Cuanto mayor sea el valor de  $\sigma$ , más se dispersarán los datos en torno a la media y la curva será más plana. Un valor pequeño de este parámetro indica, por tanto, una gran probabilidad de obtener datos cercanos al valor medio de la distribución.

Como se deduce de este último apartado, no existe una única distribución normal, sino una familia de distribuciones con una forma común, diferenciadas por los valores de su media y su varianza. Entre todas ellas, la más utilizada es la distribución normal estándar, que corresponde a una distribución de media 0 y varianza 1.

En general, buscando no profundizar en la teoría concerniente a la distribución, con límites a y b, existe una seguridad en la medida, dada por los siguientes casos:

1. Si  $a = \mu - \sigma$  y  $b = \mu + \sigma$ , entonces la seguridad de que el valor reportado esté dentro de este intervalo es aproximadamente del 68,27%.
2. Si  $a = \mu - 2\sigma$  y  $b = \mu + 2\sigma$ , la seguridad de que el valor reportado esté dentro de este intervalo es aproximadamente del 95,45%.
3. Si  $a = \mu - 3\sigma$  y  $b = \mu + 3\sigma$ , la seguridad de que el valor reportado esté dentro de este intervalo es aproximadamente del 99,73%.

La incertidumbre estándar correspondiente a esta distribución, está dada por la expresión:

$$u(X_i) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.8)$$

En general, las expresiones dadas en este capítulo son el resumen básico de cada una de ellas. Existen muchas distribuciones de probabilidad aplicables a nuestros procesos. Si se desea consultar al respecto de ellas o profundizar en cuanto a las propuestas, se sugiere consultar libros de estadística y probabilidad, donde se expiden conceptos más profundos y de aplicación diversa. [3]

### 3.2.4 Distribución de probabilidad tipo triangular<sup>6</sup>

En el caso que la probabilidad de la variable aleatoria tome los valores en el intervalo  $-a$  y  $a$ , tenga un valor máximo en el centro del intervalo y disminuya linealmente hacia los extremos del mismo hasta cero, estamos en presencia de una función de distribución triangular (figura 18).

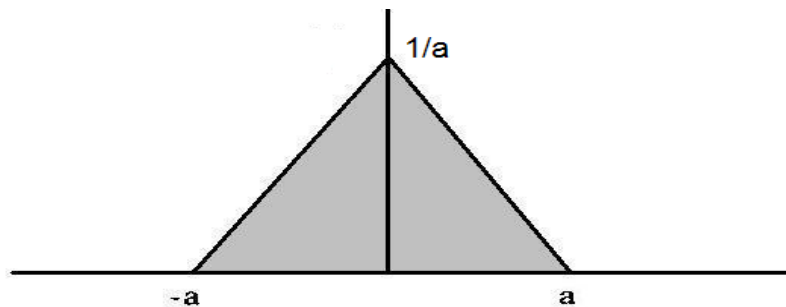


Figura 18. Distribución de probabilidad triangular. [8]

Si el intervalo es simétrico, la varianza de la variable aleatoria  $X$  será en este caso:

$\sigma^2(x) = \frac{a^2}{6}$ , y la incertidumbre estándar expresada como la desviación estándar

será:

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (3.9)$$

La función de distribución triangular se utiliza en el cálculo de la incertidumbre cuando:

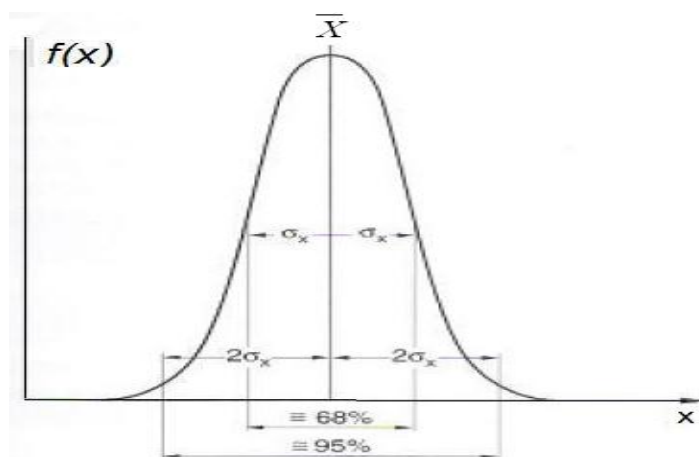
<sup>6</sup> Referenciado. [8] Sáez Ruiz, Sifredo.J. Font Ávila, Luis. "Incertidumbre de la medición.

- La información disponible concerniente a X esta menos limitada que para una función de distribución rectangular.
- Es hecho un estimado en la forma de un rango máximo descrito por una distribución simétrica.

### 3.3 INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN

Se define como el rango de valores entre los cuales se halla el valor real con una probabilidad determinada (véase la Fig. 19). En la medición de caudales no es posible medir nada con precisión absoluta (es decir, con un error de cero) porque el caudal no es nunca estable. Pequeñas perturbaciones en la presión y la temperatura afectan a la respuesta del instrumento, que nunca es perfecta, además de multitud de otros efectos externos y de tipo electrónico. Un valor de lectura estable en el tiempo y el concepto de incertidumbre constituyen conjuntamente una manera de identificar y combinar todos estos factores, de modo que la variable que se pretende medir quede bien definida. [1]

Obsérvese que el valor cuantitativo de la “exactitud” debería expresarse en términos de incertidumbre. Una buena exactitud es, en el fondo, una baja incertidumbre, pero siempre existen pequeños errores, tanto de origen aleatorio como sistemático.



**Figura 19.** Definición de “incertidumbre en la medición”.  $\bar{X}$  = valor medio de todos los valores medidos,  $f(x)$ = frecuencia,  $\sigma$  =Desviación típica. [1]

Los métodos de medición empleados son igual de significativos que la infraestructura técnica utilizada para la calibración. Entre estos podemos incluir, por ejemplo, el método utilizado para evaluar la incertidumbre de la medición en un sistema de calibración.

La incertidumbre de la medición es un parámetro fuertemente asociado al resultado de la medida; caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser razonablemente asignados a la variable medida.

La incertidumbre de medición más pequeña definible es uno de los parámetros empleados para definir el ámbito de acreditación de un laboratorio de calibración. Otros parámetros involucrados son:

- Variables físicas ( sistema de unidades, masa volumen)
- Método de calibración
- Tipo de dispositivo (“equipo bajo prueba”)
- Campo de medida.

La incertidumbre de medición más pequeña definible suele estar especificada en el formulario de registro de la entidad de calibración o en otros documentos. Este es el valor sobre el que se basa la acreditación y se especifica en todos los certificados de acreditación. La expedición de estos certificados remite a una prueba de acreditación.

La finalidad de las entidades de acreditación es confirmar la incertidumbre de medición más pequeña definible. Sin embargo, aunque la incertidumbre de medición ha de definirse según los términos especificados por la GUM (Guías para la expresión de las incertidumbres de medición en calibración), parece evidente que la incertidumbre de medición más pequeña definible ha de permitir normalmente su confirmación experimental. Este requisito implica que el ente acreditador no puede simplemente quedarse en calcular la incertidumbre de medición, sino que ha de supervisar o comisionar comparaciones suficientes para

verificar los resultados obtenidos mediante cálculo. Los laboratorios de calibración de alta precisión como los Endress+Hauser alcanzan incertidumbres inferiores al 0,05% v.l. para los caudalímetros, frente a las cifras normales de aproximadamente entre 0,1 y 0,5% v.l.

En la calibración de los instrumentos de medición hay que tener en cuenta dos hechos fundamentales:

- Un instrumento de medición no puede ser calibrado para una incertidumbre de medición superior a su valor de repetibilidad.
- El error de medición incluye todos los errores sistemáticos y aleatorios inherentes al mismo estándar de calibración.

Las condiciones en las que transcurre el proceso de calibración son de importancia crítica a la hora de obtener un resultado razonable. Uno de los factores principales es la estabilidad del caudal durante todo el proceso de calibración.

La infraestructura de verificación puede disponer de tanques de estabilización de presión y equipamiento para mantener el caudal estable. Ello ayuda a garantizar que el equipo por verificar funciona en condiciones estables (o virtualmente estables). Estrictamente hablando, la curva de error obtenida durante el proceso de calibración solo sirve para las mediciones siguientes si el contador en cuestión funciona en las mismas condiciones con las que se llevó a cabo la prueba de verificación. [1]

### **3.4 CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE**

La guía colombiana GTC-51 para la expresión de la incertidumbre en las mediciones, recomienda con base en los métodos de evaluación empleados, agrupar a las componentes de incertidumbre en dos categorías: Tipo A y tipo B.

Estas categorías se aplican a la incertidumbre y no son sinónimos o sustitutos de las palabras aleatorio y sistemático. [3]

Se distinguen entonces dos métodos principales para cuantificar las fuentes de incertidumbre: El *método de evaluación tipo A* está basado en un análisis estadístico de una serie de mediciones, mientras el *método de evaluación tipo B* comprende todas las demás maneras de estimar la incertidumbre.

Cabe mencionar que esta clasificación no significa que exista alguna diferencia en la naturaleza de los componentes que resultan de cada uno de los tipos de evaluación, puesto que ambos tipos están basados en distribuciones de probabilidad. La única diferencia es que en una evaluación tipo A se estima esta distribución basándose en mediciones repetidas obtenidas del mismo proceso de medición mientras en el caso de tipo B se supone una distribución con base en experiencia o información externa al metrologo. En la práctica esta clasificación no tiene consecuencia alguna en las etapas para obtener una estimación de la incertidumbre combinada. [5]

#### **3.4.1 Evaluación de la incertidumbre estándar tipo A.**

La incertidumbre de una magnitud de entrada obtenida a partir de  $n$  observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima sobre la base de la dispersión de los resultados de mediciones individuales. Solo cuando existe suficiente resolución en el proceso de medición, la dispersión de las observaciones podrá advertirse, puesto que se obtendrán un grupo de valores diferentes al repetir la medición en condiciones prácticamente iguales, algunos de los cuales pueden o no volver a aparecer. El valor esperado o el mejor estimado de la magnitud es la media aritmética o promedio de las  $n$  observaciones: [3], [5]

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.10)$$

Las observaciones individuales  $X_i$  difieren en valor debido a que existen variaciones aleatorias en las magnitudes que las afectan. La desviación estándar caracteriza la variabilidad de los valores observados  $X_i$  o más específicamente su dispersión alrededor de la media  $\bar{X}$ . La desviación estándar está dada por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.11)$$

La mejor estimación de los factores cuantificadores de dispersión tales como la varianza de la media y la desviación estándar experimental cuantifican qué tan bien se estima el valor esperado de  $\bar{X}$  y cualquiera puede usarse como una medida de la incertidumbre de  $\bar{X}$ .

Cuando el número de datos es relativamente pequeño (menos de 10), se recomienda utilizar una desviación estándar histórica en lugar de la expresión dada, siempre y cuando la medición este bien caracterizada y bajo control estadístico.

Otra posibilidad en este caso es el uso de una distribución estadística tipo t-student, la cual será aplicada para este caso.

Luego concluimos que la mejor estimación de la desviación estándar, es llamada incertidumbre estándar tipo A así:

$$U_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} * k_1 \quad (3.12)$$

Donde  $k_1$  se evalúa con un nivel de seguridad del 68,28%. [3]

### 3.4.2 Evaluación de la incertidumbre estándar tipo B.

Una evaluación tipo B de la incertidumbre estándar se realiza cuando no se dispone información sobre la posible variabilidad de la magnitud dada para hacer un análisis estadístico. En tal caso, la incertidumbre estándar  $U_B(X_i)$  se evalúa mediante juicios y criterios científicos, basados en toda la información disponible sobre la variabilidad de  $X_i$ .

Las fuentes de información pueden ser:

- Certificados de calibración;
- Manuales de los instrumentos de medición;
- Normas o literatura;
- Valores de mediciones anteriores;
- Conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

Al evaluar las componentes individuales de incertidumbre en un proceso de medición se consideran, al menos, las siguientes posibles fuentes:

- Incertidumbre reportada en los certificados de calibración de los instrumentos patrones y cualquier deriva o inestabilidad en sus valores o lecturas;
- Los equipos de medición; por ejemplo, su resolución, histéresis e inestabilidad durante la realización de las mediciones;
- El efecto de las condiciones ambientales;
- El método y el procedimiento de medición;
- Los equipos auxiliares, como las líneas de conexión, fuentes de alimentación, baños termostáticos, etc., y cualquier deriva o inestabilidad en sus valores o lecturas;
- El observador;

La evaluación tipo B de la incertidumbre estándar es en esencia al igual que la evaluación tipo A, una determinación de la desviación estándar, pero la evaluación tipo B no se basa en un análisis estadístico, sino que en la mayoría de los casos se asume una función de distribución a priori a partir de la cual se realiza la evaluación. En la práctica se nos pueden presentar los siguientes casos:

- Si la estimación  $X_i$  se toma se toma de una especificación del fabricante, de un certificado de calibración, manual u otra fuente, y su incertidumbre asignada se establece como un múltiplo de una desviación estándar, la incertidumbre estándar  $U_B(X_i)$  es simplemente el valor asignado dividido por el multiplicador (factor de cobertura).
- La incertidumbre asignada a  $X_i$  no necesariamente está dada como un múltiplo de una desviación estándar. En lugar de eso, puede encontrarse que la incertidumbre asignada define un intervalo con un nivel de confianza de (90, 95 o 99)%. A menos que se indique otra cosa, se asume que se usó una distribución normal y se recupera la incertidumbre estándar dividiendo la incertidumbre asignada por el factor apropiado. Los factores correspondientes a los tres niveles de confianza mencionados son: 1,64; 1,96; y 2,58. [8]

### **3.5 PROCEDIMIENTO PARA ESTIMAR LA INCERTIDUMBRE (método volumétrico)<sup>7</sup>**

A continuación, se mencionan los pasos a seguir en forma resumida para estimar el valor de la incertidumbre siguiendo las directrices establecidas por la Guía para la expresión de la incertidumbre.

---

<sup>7</sup> Referenciado. [3] Incertidumbre de la medición, CCOLSMI

- Expresar matemáticamente la relación entre el argumento del mensurando y los argumento de los cuales depende.

$$\varepsilon = V_{OP} - V_{PATRÓN} \quad \text{Ecuación general} \quad (3.13)$$

- Determinar xi, el valor estimado del argumento Xi, ya sea sobre la base del análisis estadístico de una serie de observaciones o por otro método.
- Evaluar la incertidumbre estándar de cada estimación de xi. Para la estimación del argumento obtenida a partir del análisis estadístico de una serie de observaciones, la incertidumbre estándar se evalúa en la forma de evaluación de incertidumbre tipo A. Para el caso de una estimación obtenida por otros métodos, la incertidumbre estándar se evalúa en la forma de evaluación de incertidumbre tipo B.
- Estimación debida al equipo patrón.

$$U_{PATRÓN} = \sqrt{U_{A.patron}^2 + U_{B.certificadoPatrón}^2 + U_{B.resoluciónPatron}^2 + U_{B.derivaPatron}^2} \quad (3.14)$$

$$U_{A.patron}^{llenado} = \frac{\sigma_{llenado} \cdot k_{1.68,28\%}}{\sqrt{n}} \quad (3.15)$$

$$U_{B.CertificadoPatrón} = \frac{U_{ExpandidaCertificadoPATRON}}{k_{certificadoPatrón}} \quad (3.16)$$

$$U_{B.Re.soluciónPatrón} = \frac{Re.solución_{PATRON}}{\sqrt{12}} \quad (3.17)$$

$$U_{B.DerivaPatrón} = \frac{Deriva_{PATRON}}{\sqrt{3}} \quad (3.18)$$

- Estimación debido al llenado del objeto de prueba (OP).

$$U_{O.P} = \sqrt{U_{A.O.P}^2 + U_{B.resolución.O.P}^2} \quad (3.19)$$

$$U_{A.O.P \text{ llenado}} = \frac{\sigma_{\text{llenado}}}{\sqrt{n}} k_{1,68,28\%} \quad (3.20)$$

$$U_{B.Re \text{ solución } O.P} = \frac{Re \text{ solución } O.P}{\sqrt{12}} \quad (3.21)$$

- Estimación debida a la temperatura del agua (termómetro)

$$U_{TERMOMETRO} = \sqrt{U_{A.termometro}^2 + U_{B.certificadoTermometro}^2 + U_{B.resoluciónTermometro}^2 + U_{B.derivaTermometro}^2} \quad (3.22)$$

$$U_{A.termometro \text{ temperatura}} = \frac{\sigma_{\text{temperatura}}}{\sqrt{n}} k_{1,68,28\%} \quad (3.23)$$

$$U_{B.CertificadoTermometro} = \frac{U_{\text{ExpandidaCertificadoTERMOMETRO}}}{k_{\text{certificadoTermometro}}} \quad (3.24)$$

$$U_{B.Re \text{ solución } Termometro} = \frac{Re \text{ solución }_{TERMOMETRO}}{\sqrt{12}} \quad (3.25)$$

$$U_{B.DerivaTermometro} = \frac{Deriva_{TERMOMETRO}}{\sqrt{3}} \quad (3.26)$$

- Evaluar las covarianzas asociadas con cualesquiera estimaciones de los argumentos que estén correlacionados en el caso de que se aplique. Para el caso de la metodología volumétrica no es un factor que sea determinante, por lo tanto se desprecia este parámetro.
- Calcular el resultado de la medición, esto es la estimación del mensurando a partir de la relación funcional.

$$\varepsilon = V_{OP} - V_{PATRÓN}$$

- Determinar la incertidumbre estándar combinada  $U_c$  del resultado de la medición a partir de las incertidumbres estándar y de las covarianzas

asociadas con las estimaciones. Las diversas fuentes de incertidumbre son combinadas matemáticamente según la llamada “Ley de Propagación de la Incertidumbre” para obtener la llamada incertidumbre combinada  $U_c$ .

La incertidumbre combinada estándar  $U_c$  es la suma cuadrática de cada una de las incertidumbres tipo A y tipo B. Si la medición determina más de un resultado, calcule sus covarianzas. Para esta temática no se tiene en cuenta este último caso.

$$U_c = \sqrt{U_{PATRÓN}^2 + U_{O.P}^2 + U_{TERMOMETRO}^2} \quad (3.27)$$

- Calcular la incertidumbre expandida. Si es necesario proporcionar una medida de la incertidumbre que define un intervalo alrededor del resultado de la medición que de seguridad respecto a un nivel de confianza, es necesario calcular la incertidumbre expandida, denotada por  $U$  (mayúscula). Esta se obtiene al multiplicar la incertidumbre estándar combinada  $U_c$  por un factor de cobertura  $K$  de la siguiente manera:

$$U = K U_c \quad (3.28)$$

El resultado de una medición se expresa entonces como  $Y = y + U$  que se interpreta diciendo que la mejor estimación del valor atribuible al mensurando  $Y$  es  $y$ , y que se espera que el intervalo  $(y - U, y + U)$  abarque una fracción importante de la distribución de los valores que razonablemente pueden ser atribuidos a  $Y$ .

El valor del factor de cobertura  $K$  se elige con base en el nivel de confianza requerido para este intervalo dado. En general, con base en el teorema estadístico del límite central, es aceptable una aproximación del mensurando como una distribución de probabilidad t-student, y considerar que

$$K = t(V_{eff}) \quad (3.29)$$

Para calcular el número efectivo de grados de libertad ( $V_{eff}$ ) se utiliza la formula de Welch – Satterthwaite:

$$V_{eff} = \frac{Uc^4(y)}{\sum_i \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (3.30)$$

En donde  $v_i$  es el número efectivo de grados de libertad de cada incertidumbre componente  $u_i$ , cuyo valor se obtiene aplicando las siguientes reglas:

- $v_i = n - 1$  Para evaluación de incertidumbre tipo A, siendo  $n$  el número de mediciones.
- $v_i = \infty$  Para evaluación de incertidumbre tipo B, asumiendo la distribución rectangular.

Los valores del factor se encuentran en el anexo A, correspondiente a la distribución t de student.

Para expandir la incertidumbre combinada a un grado de confianza del 94,45%, es necesario multiplicar por el  $K$  resultante en la columna 94,45% de la tabla mencionada según los grados de libertad hallados.

- Informar el resultado de la medición y junto con su incertidumbre estándar combinada o expandida según el informe.

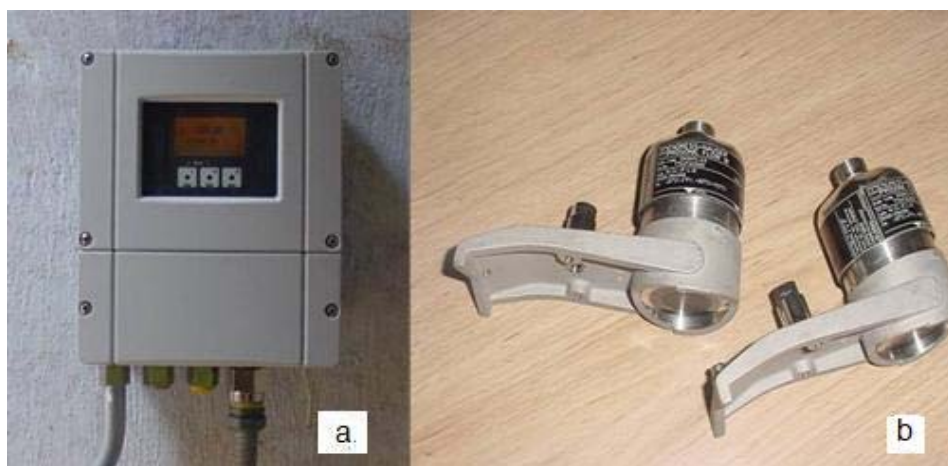
$$\bar{\varepsilon} \pm U_{EXPANDIDA} ; k_{95,45\%} \quad (3.31)$$

## 4. EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

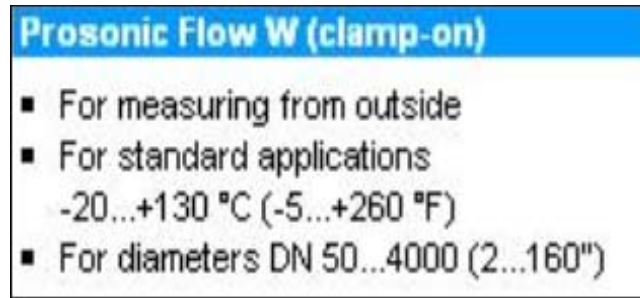
### 4.1 CARACTERÍSTICAS EQUIPO PATRÓN

**TABLA 3**  
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO PATRÓN PARA LA MACROMEDICIÓN DE CAUDAL

INFORME DE CALIBRACIÓN	
Ejecuta	SAYTEC COLOMBIA
Solicitante	amb SA
Dirección	Diag 32 N 30A-51
Mesurando	flujo volumétrico
Rango de medición	0 – 36.000 m <sup>3</sup> /h
Instrumento	ultrasónico
Resolución	0,001 m <sup>3</sup> /h
Fabricante	Endress+Hauser
Identificación	N/I
Modelo	93WA1-AB3B20ACB2AB
Número de serie	42005791000
Fecha de calibración	23 septiembre de 2008



**Figura 20.** Equipo patrón Prosonic Flow 93, (a) transmisor y (b) sensores Prosonic Flow (clamp-on).



**Figura 21.** Condiciones de operación para los sensores Prosonic Flow (de fijación externa) del equipo patrón.[15]

La figura 21, muestra claramente los requerimientos básicos para la operación de los sensores de fijación externa Prosonic Flow en el proceso de macromedición; Instalarlos en la parte exterior de la tubería, el rango de valores de temperatura del fluido y los diámetros permisibles de la tubería de macromedición son los más importantes.

### **Descripción equipo patrón (ENDRESS+HAUSER Prosonic Flow 93)**

**Principio de medición.** El Prosonic Flow funciona usando el principio de diferencia de tiempo de tránsito de la señal. Una señal (ultrasónica) acústica se transmite en ambas direcciones a partir de un sensor de medición al otro. La velocidad de propagación de la señal de las ondas es menor cuando las ondas viajan contra la dirección del flujo que a lo largo de la dirección del flujo, generando una diferencia de tiempo de tránsito de la señal. Esta diferencia es directamente proporcional a la velocidad de flujo. El Flow Prosonic calcula el flujo de la superficie transversal de la tubería y la diferencia de tiempo medida de tránsito de la señal.

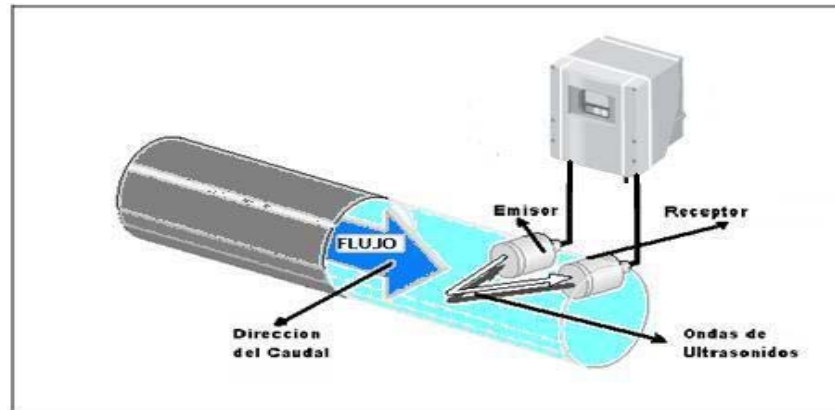


Figura 22. Vista longitudinal en la tubería.[15]

$$V \sim \Delta t$$

$$Q = V \cdot A$$

$V$  = Velocidad del fluido

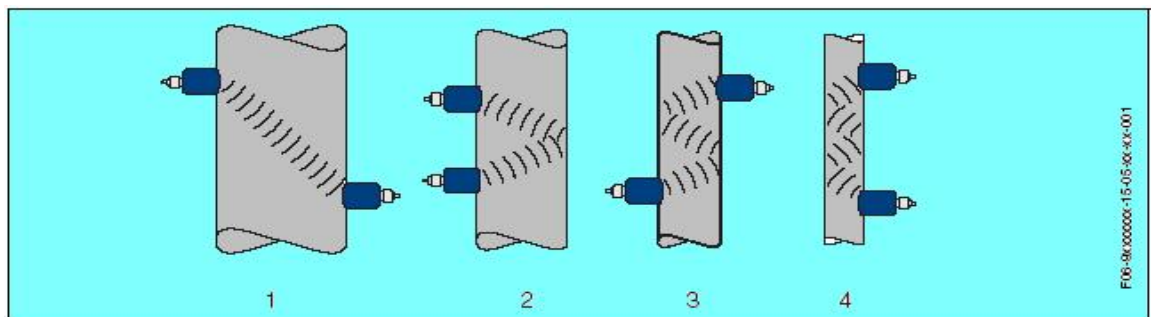
$\Delta t$  = Diferencia de tiempo de tránsito

$V$  = Volumen del fluido

$A$  = Área sección transversal tubería

Además del volumen de flujo, el sistema mide la velocidad del sonido en el líquido.

El transmisor estándar ofrece una opción entre 1 y 4 travesos. Cuantos más puntos de la reflexión hay en la tubería, la fuerza de señal será más débil.



1 = 1 traveso, 2 = 2 travesos, 3 = 3 travesos, 4 = 4 travesos

Figura 23. Opciones de número de travesos para la macromedición de caudal con el equipo patrón. [15]

Por lo tanto, para mantener una buena calidad e intensidad de la señal, se debe elegir el menor número de tramos que sea posible.

**Recomendaciones** Para obtener una intensidad de señal óptima y el del más alto nivel de la exactitud, recomendamos la siguiente elección en función del diámetro nominal de la tubería:

DN 50.....60 → 2....4 tramos  
DN 80.....600 → 2 tramos  
DN 650...4000 → 1 tramo

**Selección del sensor y intensidad de la señal** Durante el inicio de la programación, el equipo patrón Prosonic Flow 93 ajusta automáticamente la frecuencia de funcionamiento a la tubería y a los sensores usados. Esta función asegura que el sistema funcione siempre con la intensidad de señal más alta. Como estándar, ofrecemos un tipo del sensor para el rango nominal DN 50... 300 de diámetro y un tipo del sensor para el rango nominal DN 100... 4000 de diámetro.

Ambos tipos del sensor se pueden utilizar en el rango de DN 100...300.

El tipo de sensor para DN 50.....300 se debe utilizar para un grosor de pared de tubería < 4 milímetros

El sensor tipo DN 100... 4000 para un grosor de pared de tubería > 4 milímetros. [15]

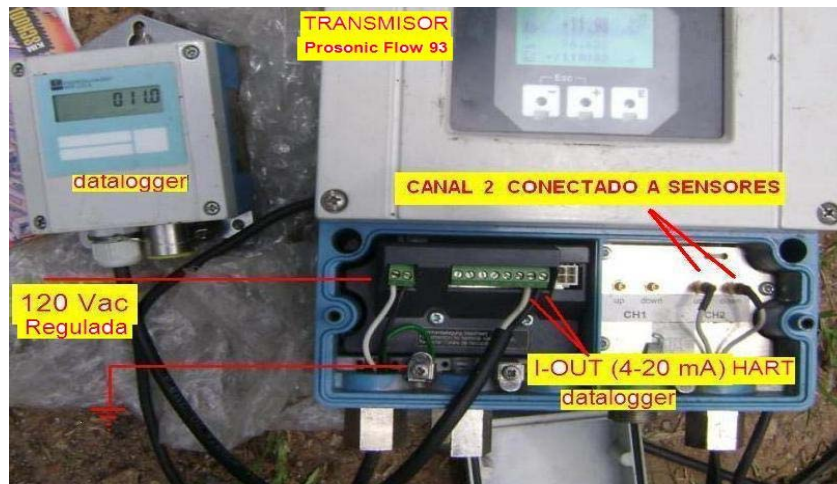


Figura 24. Terminales para la Conexión eléctrica del equipo de medición Prosonic Flow 93.

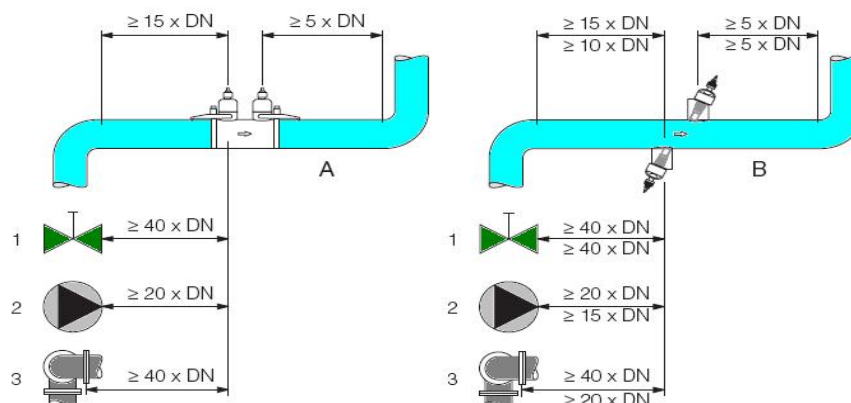


Figura 25. Condiciones hidráulicas equipo patrón, sensores de fijación externa (A) sensores de inserción (B); (1) válvula, (2) unidad de bombeo, (3) tubería con curvatura. [15]

Para garantizar condiciones hidráulicas favorables a la medición, es decir aproximar a obtener un flujo uniforme y sin presencia de aire, Endress+Hauser recomienda para el equipo Prosonic Flow 93 seleccionar el punto de instalación del macromedidor de manera que se cuente por lo menos 15 diámetros nominales de la tubería en longitud recta aguas arriba y por lo menos 5 diámetros nominales aguas abajo.

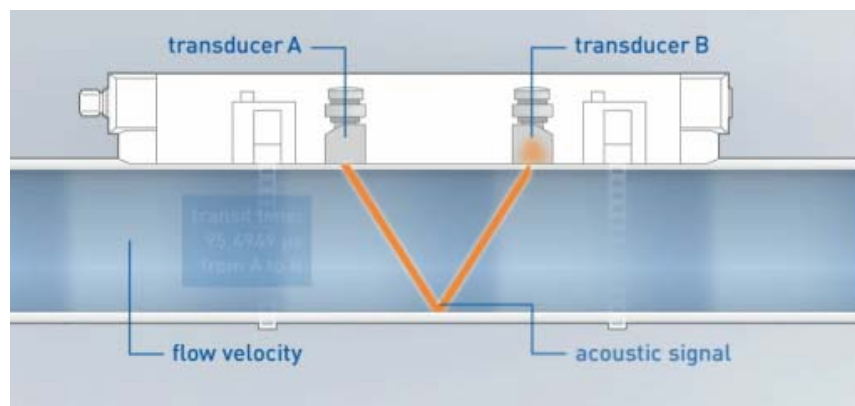
## 4.2 CARACTERÍSTICAS EQUIPO INSTALADO

**TABLA 4**  
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO INSTALADO PARA LA MACROMEDICIÓN DE CAUDAL

Empresa	amb SA
Mensurando	Flujo volumétrico
Instrumento	Ultrasónico
Resolución	0,001 litros/s
Fabricante	KROHNE
Modelo	Optisonic 6300 medium
Voltaje	110 - 230 Vac
Frecuencia	50 - 60 Hz



**Figura 26.** Equipo instalado en el sitio de medición, Optosonic 6300, transmisor y sensores. [16]



**Figura 27.** Principio de medición por ultrasonido del equipo instalado. [16]

La versión medium Optisonic 6300, es la que dispone el amb SA y la aplicación más importante son los procesos de macromedición de agua purificada.

Diameter ranges	
Small	DN15...100 / ½...4"
	Outer diameter must be at least 20 mm / 0.79"
Medium	DN50...400 / 2...16"
Large	DN200...4000 / 8...160"
	Outer diameter must be smaller than 4300 mm / 169.29"

Figura 28. Especificación de los diámetros nominales de la tubería según la versión del equipo instalado. [16]

Rail version	Diameter range	Preferred measuring modes
Small	DN15...100 / 0.5...4"	< DN25: W-mode (4 traverses)
		≥ DN25: V-mode (2 traverses)
Medium	DN50...400 / 2...16"	V-mode (2 traverses)
Large	DN200...4000 / 8...160"	Z-mode (1 traverse)

Figura 29. Especificación del número de travesos en la tubería según la versión del equipo instalado. [16]

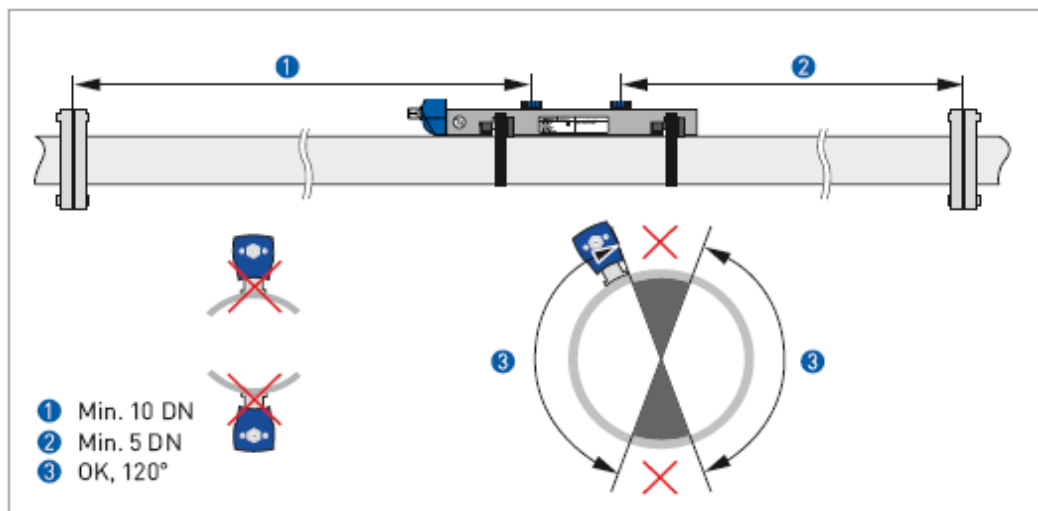


Figura 30. Condiciones hidráulicas para el equipo instalado en los sitios (Optisonic 6300). [16]

### 4.3 VERIFICACIÓN DE CAUDAL

La división de disponibilidad y distribución perteneciente a la Gerencia de Operaciones del amb SA, solicitan a la sección de mantenimiento electrónico, realizar macromedidas de caudal en diferentes puntos de la ciudad con el fin de realizar análisis de cobertura y suministro a diferentes sectores de la ciudad. En este caso específico de verificación en el sector Ruitoque de Floridablanca Santander, se realizó la macromedición de caudal por un periodo de 4 días.

#### 4.3.1 Procedimiento de la macromedición

**Elementos para la macromedición:** Los elementos necesarios para realizar una medición constan de: el transmisor, juego de sensores, sondas para sensores, fuente de alimentación regulada, dataloger, PC para descarga de datos, multímetro.

**Procedimiento de instalación:** El procedimiento elemental para la instalación del equipo de medición realizado en este punto de medición se describe bajo los siguientes pasos:

- Garantizar la tensión de alimentación para el equipo de medición. Por la facilidad de acceso y disponibilidad se conecta a la red (120 v ac) con su respectiva puesta a tierra.
- Tener presente las especificaciones hidráulicas del fabricante para la adecuada instalación. Se verifica 5 DN aguas arriba y 15 DN aguas abajo, respecto a la posición de los sensores, con la finalidad de mantener un flujo uniforme y sin presencia de aire.
- Asegurar condiciones ambientales dentro de las cuales opera el equipo de medición normalmente (temperatura, humedad).

- Determinar las características de la tubería. Para esta aplicación se requiere determinar el tipo de material (pvc, hierro dúctil, acero carbono, asbesto cemento etc.). La gráfica muestra la tubería tipo PVC con su valor nominal dado en pulgadas correspondiente al diámetro interno, para este caso 4". Para efectos de programación se requiere calcular el valor del espesor o pared del tubo determinado de la siguiente manera:

Se mide el perímetro exterior o circunferencia externa del tubo, se divide este valor por  $\pi$  obteniéndose el diámetro exterior. Posteriormente se realiza la diferencia diámetro exterior menos diámetro interior, este valor se divide en dos (2) resultando el espesor del la tubería.



**Figura 31.** Tubería de macromedición tipo PVC 4", sector Ruitoque.

$$pared = \frac{diámetro exterior - diámetro interior}{2}$$

$$diámetro interior = 4" = 101,66mm$$

$$perímetro exterior = 362mm = circunferencia \_ externa \_ medida$$

$$diámetro exterior = \frac{362mm}{\pi} = 115,22mm$$

$$espesor = \frac{115,22mm - 101,66mm}{2} = 6,80mm$$

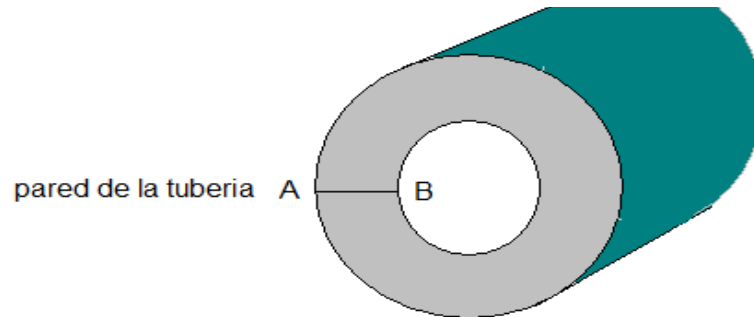


Figura 32. Indicación de la pared o grosor de la tubería.

### Programación del transmisor:

- Una vez conectado el transmisor a la fuente de alimentación se realiza la programación correspondiente del mismo.
- Se ingresa al menú para configurar el equipo oprimiendo la tecla (E). Desplazando las opciones de menú con las teclas (+) o (-) se selecciona “configuración rápida” con la tecla (E).
- Se ingresa la clave que permite el acceso a su programación, con un mensaje de respuesta (programación desbloqueada).
- En la primera opción se selecciona el lenguaje, en este caso español.
- Se elige el sistema de medida seleccionándose el internacional (SI).
- Selección del canal (CH1 o CH2). Con las teclas (+) o (-) se desplaza las dos opciones y con la tecla (E) se eligió el canal CH2.
- Aparece la opción del tipo de sensor y se elige la opción “sensor montaje exterior”.
- Seguidamente seleccionamos la referencia del sensor y se toma (W-CL-1F-L-B).
- Posteriormente se selecciona el número de travesos. Para esta aplicación (depende de la tubería) se selecciona dos (2) travesos.
- En la selección de la tubería aparecen dos opciones (tubería estándar y otros), se selecciona “otros” y se elige el tipo de tubería dentro de este

menú. Para esta aplicación con las teclas (+) o (-) se escoge el tipo PVC dando enter (tecla E).

- Por defecto en el siguiente paso aparece la velocidad del sonido en la tubería equivalente a 2400 m/s y se da enter.
- Para el ingreso del valor correspondiente a la medida del tubo se tienen dos (2) alternativas. 1) Diámetro del tubo ó 2) circunferencia medida (externa). La primera opción que aparece es el valor del diámetro externo, que equivale al valor de la circunferencia externa medida dividida en ( $\pi$ ) dado en mm, resultando en 1152 mm. Pero decidimos ingresar el valor de la circunferencia medida externa así que damos enter (E), apareciendo la opción valor de la circunferencia externa y con las teclas (+) y (-) se ingresa el valor de 362 mm. Luego de seleccionar la primera cifra, es decir el valor tres (3) con las teclas (+) o (-), se da enter (E) para ingresar la segunda cifra hasta terminar el valor total dando enter para seguir la programación.
- Se registra ahora el valor del espesor o pared del tubo de igual forma que la circunferencia externa con el valor de 6,80 mm calculado previamente.
- Seguidamente se visualiza el tipo de fluido que se va a medir dando sobre las teclas (+) o (-) y seleccionando “agua” con la tecla enter (E).
- Seguidamente se registra el valor de temperatura del agua de 20<sup>0</sup>c. Se toma este valor porque se ha determinado previamente que en el área metropolitana de Bucaramanga no sobrepasa este valor de temperatura en la red de distribución.
- Se toma la velocidad de sonido en el líquido (agua a 20<sup>0</sup>c) como 1487 m/s dando enter (E).
- En el siguiente paso el transmisor envía el dato de la distancia de separación de los sensores para la instalación de los mismos en la tubería de dos formas: la primera opción que aparece después de ingresar el valor de temperatura del fluido es la distancia entre sensores en función de una regleta que tiene letras y números en la parte izquierda y derecha respectivamente con el valor de K30. Si no se cuenta con la regleta se da

enter (E) mostrándonos la segunda alternativa de distancia en milímetros con valor de 219,46 mm.

- Dando enter (E) el transmisor pregunta “otra medida” se selecciona “NO” con enter (E) y queda programado el equipo.
- Oprimiendo simultáneamente las teclas (+) y (-) equivalente a ESC, un par de veces al oprimirlas se sale de la programación hasta que le display muestre el estado inicial o normal con la intención de validar o comprobar los datos ingresados. El estado inicial o normal del display concierne al registro del valor de caudal como lo muestra la siguiente figura. Iniciando nuevamente con enter (E), seleccionando “configuración rápida” se prosiguen los mismos pasos para la verificación de los datos registrados.



Figura 33. Panel display transmisor Prosonic Flow 93



Figura 34. Ubicación de los sensores en la tubería con la distancia obtenida en el transmisor.

En el cronograma anual de actividades de la sección de mantenimiento electrónico, se establecen las fechas y los sitios de macromedición para ejecutar la verificación de caudal. Esta es una de las tareas fundamentales a realizar puesto que permite determinar el estado de los macromedidores en el sitio. El mecanismo de verificación consiste en la comparación con un equipo patrón instalado junto al macromedidor, visualizándose los valores para cada equipo.

#### 4.3.2 Resultado de la verificación de caudal

La ejecución de la verificación de caudal se compone de dos partes: el montaje físico y la programación del transmisor, descrito anteriormente. Las siguientes tablas resumen los datos más relevantes de la macromedición para el sitio correspondiente.

#### Anillo vial

**TABLA 5**  
RESULTADOS DE LA VERIFICACION DE CAUDAL ANILLO VIAL

CARACTERISTICAS DE MEDICIÓN	EQUIPO PATRÓN	EQUIPO INSTALADO
MARCA	ENDRESS + HAUSER	KROHNE
UBICACIÓN	N/A	CAMARA 12"
DIAMETRO EXTERIOR (mm)	311,9	305,6
MATERIAL TUBO	ASBESTO CEMENTO	ASBESTO CEMENTO
ESPESOR TUBO (mm)	27,8	27,8
DIAMETRO INTERNO (mm)	304,8 (12")	304,8 (12")
INTENSIDAD SEÑAL (dB)	42	60
CAUDAL (l/s)	17,5	17
DISTANCIA SENSORES (mm)	365,6	198,1



Figura 35. Montaje verificación de caudal en Anillo Vial.

## Girón

**TABLA 6**  
RESULTADOS DE LA VERIFICACION DE CAUDAL GIRON

CARACTERISTICAS DE MEDICION	EQUIPO PATRON	EQUIPO INSTALADO
<b>MARCA</b>	ENDRESS + HAUSER	KROHNE
<b>UBICACIÓN</b>	N/A	CAMARA 10"
<b>DIAMETRO EXTERIOR (mm)</b>	299,21	300,6
<b>MATERIAL TUBO</b>	ASBESTO CEMENTO	ASBESTO CEMENTO
<b>ESPEJOR TUBO (mm)</b>	22,6	23
<b>DIAMETRO INTERNO (mm)</b>	254 (10")	254 (10")
<b>INTENSIDAD SEÑAL (dB)</b>	48,9	69,99
<b>CAUDAL (l/s)</b>	55,6	63
<b>DISTANCIA SENSORES (mm)</b>	361	195,7



Figura 36. Montaje verificación de caudal en Girón.

## Cámara Mutis

TABLA 7

RESULTADOS DE LA VERIFICACION DE CAUDAL CAMARA MUTIS

CARACTERISTICAS DE MEDICION	EQUIPO PATRON	EQUIPO INSTALADO
MARCA	ENDRESS + HAUSER	KROHNE
UBICACIÓN	N/A	CAMARA 18"
DIAMETRO EXTERIOR (mm)	460	460
MATERIAL TUBO	ASBESTO CEMENTO	ASBESTO CEMENTO
ESPEJOR TUBO (mm)	32	32
DIAMETRO INTERNO (mm)	457,2 (18")	457,2 (18")
INTENSIDAD SEÑAL (dB)	49,9	inestable
CAUDAL (l/s)	200	1 a 110
DISTANCIA SENSORES (mm)	48,88	198,1



Figura 37. Montaje verificación de caudal en Mutis.

La características del equipo de medición en el sitio define los rangos del diámetro para los tubos de conducción (ver Fig. 28), mostrando que para la versión **medium** del KROHNE el rango de operación se encuentra entre (2" – 16"). En la cámara Mutis el tubo de conducción es de 18", indicando que no está dentro del rango manifestando una inestabilidad en la intensidad de la señal y por supuesto una medición de caudal incoherente.

La herramienta Applicator Selection del software Applicator fabricado por Endress+Huser permite seleccionar el equipo de medición adecuado para este sitio de medición introduciendo las características representativas del sitio

#### 4.4 ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

El parámetro apropiado para determinar o establecer la confiabilidad de un sistema de medición es la incertidumbre. Este parámetro define el rango dentro del cual se consideran verdaderos los valores de la magnitud medida.

## 4.4.1 Cámara de Girón

**TABLA 8**  
VALORES DE CAUDAL EQUIPO PATRÓN GIRÓN

tiempo (seg)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
No Dato	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Caudal (Q) (l/s)	56,84	56,83	56,88	56,89	56,88	56,86	56,87	56,86	56,90	56,96

**TABLA 9**  
VALORES DE CAUDAL EQUIPO INSTALADO EN EL SITIO GIRÓN

tiempo (seg)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
No Dato	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Caudal (Q) (l/s)	67	66,8	66,9	67,7	67,3	67,6	67,4	66,7	66,5	65,9

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$$

$$\bar{Q}_{patrón} = 56,877 \text{ litros/s}$$

El valor medio del caudal patrón ( $\bar{Q}_{patrón}$ ) es considerado como el caudal que pasa por a tubería, es decir es el valor de referencia.

$$\overline{Error} = \bar{Q}_{op} - \bar{Q}_{Patrón} = 10.103 \text{ litros}$$

**TABLA 10**  
CÁLCULO DEL ERROR DE CAUDAL GIRÓN

$Q_{op}$	$\bar{Q}_{patrón}$	Error ( $Q_{op} - \bar{Q}_{patrón}$ )	Error	Error medio	Diferencia
67	56,877	10,123	10,123	10,103	0,02
66,8	56,877	9,923	9,923	10,103	-0,18
66,9	56,877	10,023	10,023	10,103	-0,08
67,7	56,877	10,823	10,823	10,103	0,72
67,3	56,877	10,423	10,423	10,103	0,32
67,6	56,877	10,723	10,723	10,103	0,62
67,4	56,877	10,523	10,523	10,103	0,42
66,7	56,877	9,823	9,823	10,103	-0,28
66,5	56,877	9,623	9,623	10,103	-0,48
65,9	56,877	9,023	9,023	10,103	-1,08

El valor medio del caudal patrón ( $\bar{Q}_{patrón}$ ) es considerado como el caudal que pasa por a tubería, es decir es el valor de referencia.

➤ Evaluación tipo A

$$\sigma = \sqrt{\frac{(0,02)^2 + (-0,18)^2 + (-0,08)^2 + (0,72)^2 + (0,32)^2 + (0,62)^2 + (0,42)^2 + (-0,28)^2 + (-0,48)^2 + (-1,08)^2}{n-1}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2,696}{n-1}} = \sqrt{\frac{2,696}{9}} = \sqrt{0,29955} = 0,5473$$

Por tanto la incertidumbre estándar correspondiente está dada por:

$$U_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{\sigma}{\sqrt{10}} = \frac{0,5473}{3,162277} = 0,173$$

Evaluando  $k_1$  con un nivel de seguridad del 68,28% en la tabla t-student se tiene:

$$U_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot K_1 = \frac{0,5473}{3,162277} \cdot 1,059 = 0,1832 \%$$

➤ Evaluación tipo B

$$U_{B\_CertificaaPATRON} = \frac{U_{Expandida\_certificaaPATRON}}{k_{certificaaPATRON}} = \frac{0.1378}{2.01} = 0.0685\%$$

Resolución equipo patrón = 0,001 m3/h = 0.000277 litros/s

$$U_{B\_ResoluciónPatrón} = \frac{Resolución_{PATRON}}{\sqrt{12}} = \frac{0.000277}{\sqrt{12}} = 8E - 5\%$$

La estimación de la incertidumbre por deriva se obtiene en función de la variación del error en los históricos de calibración.

$$U_{B\_DerivaPatrón} = \frac{Deriva_{PATRON}}{\sqrt{3}} = \frac{Deriva_{PATRON}}{\sqrt{3}} = \frac{0.3875}{\sqrt{3}} = 0.2237\%$$

Resolución del equipo de prueba = 0.001 litros/s

$$➤ U_{B\_Re solución\_O.P} = \frac{Re solución_{O.P}}{\sqrt{12}} = \frac{0.001}{\sqrt{12}} = 0.00028\%$$

➤ Incertidumbre combinada

$$U_c = \sqrt{0,1832^2 + 0,0685^2 + 0,00008^2 + 0,223^2 + 0,00028^2}$$

$$U_c = \sqrt{0,088} = 0,2966$$

➤ Estimación de la Incertidumbre expandida

$$V_{eff} = \frac{Uc^4(y)}{\sum_i \frac{u_i^4(y)}{v_i}} = \frac{Uc^4(y)}{n-1} = \frac{0,2966^4}{9} = 61,85$$

$$K = 2.04$$

$$U = 2,04 * 0,2966 = 0,605\%$$

Expresión de resultados de la medición de caudal en Girón

$$\bar{\varepsilon} \pm U_{EXPANDIDA} ; k_{95,45\%}$$

[ (----- / -----)]

9,498      10,103      10,708

#### 4.4.2 Cámara anillo vial

**TABLA 11**  
VALORES DE CAUDAL EQUIPO PATRÓN ANILLO VIAL

tiempo (seg)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
No Dato	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Caudal (Q) (l/s)	16,39	16,36	16,31	16,25	16,23	16,22	16,21	16,19	16,18	16,2

**TABLA 12**  
VALORES DE CAUDAL EQUIPO INSTALADO EN EL SITIO ANILLO VIAL

tiempo (seg)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
No Dato	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Caudal (Q) (l/s)	17,3	17,5	17,2	17	17,1	17,3	16,8	16,5	16,4	16,5

$$\bar{Q}_{\text{Patrón}} = 16,254 \text{ l/s}$$

$$\bar{Q}_{\text{op}} = 16,96 \text{ l/s}$$

$$\text{Error} = 16,96 - 16,254 = 0,706 \text{ litros}$$

**TABLA 13**  
CÁLCULO DEL ERROR DE CAUDAL ANILLO VIAL

<i>Qop</i>	<i>Q patrón</i>	<i>Error</i> ( <i>Q op - Q patrón</i> )	<i>Error</i>	<i>Error medio</i>	<i>Diferencia</i>
17,3	16,254	1,046	1,046	0,706	0,34
17,5	16,254	1,246	1,246	0,706	0,54
17,2	16,254	0,946	0,946	0,706	0,24
17	16,254	0,746	0,746	0,706	0,04
17,1	16,254	0,846	0,846	0,706	0,14
17,3	16,254	1,046	1,046	0,706	0,34
16,8	16,254	0,546	0,546	0,706	-0,16
16,5	16,254	0,246	0,246	0,706	-0,46
16,4	16,254	0,146	0,146	0,706	-0,56
16,5	16,254	0,246	0,246	0,706	-0,46

El valor medio del caudal patrón ( $\bar{Q}$  patrón) es considerado como el caudal que pasa por a tubería, es decir es el valor de referencia.

➤ **Evaluación tipo A**

$$\sigma = \sqrt{\frac{(0,34)^2 + (0,54)^2 + (0,24)^2 + (0,04)^2 + (0,14)^2 + (0,34)^2 + (-0,16)^2 + (-0,46)^2 + (-0,56)^2 + (-0,46)^2}{n-1}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1,364}{n-1}} = \sqrt{\frac{1,364}{9}} = \sqrt{0,1515555} = 0,3893$$

Por tanto la incertidumbre estándar correspondiente está dada por:

$$U_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{\sigma}{\sqrt{10}} = \frac{0,3893}{3,162277} = 0,123$$

Evaluando k1 con un nivel de seguridad del 68,28% se tiene:

$$U_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot K1 = \frac{0,3893}{3,162277} \cdot 1,059 = 0,1303\%$$

➤ **Evaluación tipo B**

Incertidumbre de corrección

$$\text{➤ } U_{B\_CertificaaPATRON} = \frac{U_{ExpandidaCertificaaPATRON}}{k_{certificaaPATRON}} = \frac{0.1378}{2.01} = 0.0685\%$$

Resolución equipo patrón = 0,001 m3/h = 0.000277 litros/s

$$\text{➤ } U_{B\_Re\ soluci3n\ Patr3n} = \frac{Re\ soluci3n_{PATRON}}{\sqrt{12}} = \frac{0.000277}{\sqrt{12}} = 8E - 5\%$$

$$U_{B\_Deriva\ Patr3n} = \frac{Deriva_{PATRON}}{\sqrt{3}} = \frac{0.3875}{\sqrt{3}} = 0.2237\%$$

Resolución del equipo de prueba = 0.001 litros/s

$$\text{➤ } U_{B\_Re\ soluci3n\_O.P} = \frac{Re\ soluci3n_{O.P}}{\sqrt{12}} = \frac{0.001}{\sqrt{12}} = 0.00028\%$$

➤ **Incertidumbre combinada**

$$U_c = \sqrt{0,1303^2 + 0,0685^2 + 0,00008^2 + 0,223^2 + 0,00028^2}$$

$$U_c = \sqrt{0,0714} = 0,26672$$

➤ **Estimación de la Incertidumbre expandida**

$$V_{eff} = \frac{Uc^4(y)}{\sum_i \frac{u_i^4(y)}{v_i}} = \frac{Uc^4(y)}{\frac{Ui(y)^4}{n-1}} = \frac{0,26672^4}{\frac{0,1303^4}{9}} = 157,98$$

$$K = 2.013$$

$$U = 2,013 * 0,2672 = 0,537\%$$

Expresión de resultados de la medición de caudal en Anillo vial

$$\bar{\varepsilon} \pm U_{EXPANDIDA} ; k_{95,45\%}$$

[ (----- / -----)]

0,169      0,706      1,243

#### 4.4.3 Cámara mutis

La tabla 7 muestra la inconsistencia en el valor del caudal del caudalímetro KROHNE del sitio y la inestabilidad de la intensidad de la señal. Por estas razones no se realiza la estimación de la incertidumbre.

En la siguiente figura se muestra los valores asignados para la determinación y selección del equipo para instalarse en la cámara de Mutis.

**Applicator Selection    Product Selection**

Input requests
Show products

**Parameter explanation**

Principle	Ultrasonic			▼	
Process temperature	From	-10	to	50	°C ▼
Process pressure	From	0	to	3	bar abs ▼
Requested flowrate	From	10	to	300	m3/h ▼
Process density nom.		1000			kg/m3 ▼
<b>Default: Process density = 1000 kg/m3</b>					
<input checked="" type="radio"/> Pipe size (DIN/EN, JIS)					▼
<input type="radio"/> Pipe size (ANSI, AWWA)					▼
<b>Measurement targets</b>					
Applications	Monitoring/Control				▲
	Batch control				▼
<input type="checkbox"/> Direct mass measurement					
<input type="checkbox"/> Calculated mass					
<input type="checkbox"/> Low pressure drop					
<input type="checkbox"/> High turn down					
<input checked="" type="checkbox"/> Bidirectional flow					

Figura 38. Interfaz gráfica para la función de selección del software Applicator de Endress+Hauser.


Applicator Selection Product Selection

Input requests
Show products

---

**Prosonic Flow Clamp On 93W**

● **Recommended**




Ultrasonic flowmeter. Flow volume measurement from outside for standard applications with drinking water, waste water and process water.

[Sizing](#)

**Prosonic Flow Clamp On 93P**

● **Recommended**



Ultrasonic flowmeter. Flow volume measurement from outside for fluids in chemical or process applications.

[Sizing](#)

Figura 39. Equipos recomendados para ser instalado en la cámara de macromedición Mutis.

Los equipos mostrados en la figura 39, fueron seleccionados por el software Applicator de arriba a abajo en orden de prioridad. Seis (6) caudalímetros fueron propuestos por el software, pero solo se presentan los dos primeros. El equipo que se instalara será un Prosonic Flow 93 (Clamp On).

## 5. CONCLUSIONES

La interacción directa con el equipo patrón Prosonic Flow 93 para la macromedición de caudal del amb SA en cada una de las mediciones realizadas en diferentes puntos de macromedición dentro del área metropolitana, permitió conocer su funcionamiento, las variables incidentes para su configuración (eléctricas, geométricas, hidráulicas y ambientales) su programación, la adquisición de los datos con su respectivo almacenamiento, el principio de operación y su conexión para la adecuada instalación en los sitios de medición.

El buen posicionamiento de los sensores de fijación externa, la buena definición del perfil de velocidades obtenido mediante el establecimiento de las distancias lineales aguas arriba y aguas abajo (fig.25 ), la mínima presencia de gases y partículas solidas en el agua (menos del 1% en volumen), la disposición de una fuente de AC regulada, el conocimiento del material de la tubería, el grosor de la tubería, la velocidad del sonido en el fluido (agua 20°C), y el escaso grosor de revestimiento en la tubería son las consideraciones más importantes que se deben tener en cuenta a la hora de la comparación de caudal, obteniéndose de esta forma buenas medidas, pues se reducen notablemente varias fuentes de incertidumbre.

El estudio técnico desarrollado aplicado a un proceso activo como es la macromedición de caudal y además vital para garantizar la prestación de un servicio fundamental como lo es el suministro de agua potable al área metropolitana, necesita labores de mantenimiento y verificación por periodos de 4 meses aproximadamente determinados por la sección de mantenimiento electrónico, a través de los índices de criticidad en cada punto de macromedición. Esto se deduce por inconsistencias encontradas, así como en el caso del sitio de

macromedición Mutis. La información obtenida, servirá de recurso y reporte ante entidades encargadas de auditar los procesos operativos y comerciales del amb SA. De igual forma el desarrollo del estudio técnico garantiza en buena medida la calidad de los servicios operativos y comerciales de la compañía y la reducción de los riesgos asociados a este sistema por su inadecuado funcionamiento.

Estimar la incertidumbre de la macromedición de caudal permite definir qué tan confiable es la medición de caudal, puesto que en ella se involucran el mayor número de fuentes que pueden generar errores en la medición. Por tener un solo certificado de calibración (el más reciente) la incertidumbre de deriva (función de los errores obtenidos de las calibraciones) se ha tomado como la incertidumbre más grande del certificado de calibración, para abarcar un mayor margen de error de calibración.

Los equipos Optisonic 6300 de KROHNE y Prosonic Flow 93 (clamp-on), empleados por el amb SA tienen ventaja de acomodar el equipo a diferentes condiciones de operación, esta característica para el amb SA es fundamental porque la gran mayoría de sitios de macromedición presentan diferentes valores de variables que se requieren en la programación del equipo.

Para la estimación de la incertidumbre no se tomó en cuenta la incertidumbre aportada por el termómetro, debido a que no se tiene contacto con el agua en los sitios de medición y porque los equipos de macromedición de caudal del amb SA, al funcionar con el método de tiempo de tránsito de la señal reducen considerablemente el efecto ocasionado por el cambio de temperatura en el fluido, puesto que un cambio en la temperatura del fluido provoca un cambio en la velocidad de las ondas sonoras, pero este efecto se compensa al tener que medir las velocidades en el sentido de circulación y en el sentido en contra de la corriente. La incertidumbre aportada por el termómetro se debe tener en cuenta en los laboratorios que realizan procesos de calibración.

La estimación de la incertidumbre permite definir el rango en el que las lecturas pueden permanecer para atribuidas como verdaderas. Decir que este sea el rango de aceptación dependerá del concepto de las divisiones de Disponibilidad y Distribución del amb SA, pues estas se encargan de ejecutar proyectos con los datos de macromedición y podrían decidir si aumentar el rango determinado o no, dependiendo del grado de exactitud que ellos requieran.

El valor de la intensidad de la señal de ultrasonido mostrada en el transmisor de caudal, es el parámetro más importante a tener en cuenta para comprobar la buena instalación y programación del equipo en el tubo de macromedición. El valor de la intensidad de la señal debe ser estable y por lo menos tener en un valor de 35 dB.

Se enumeraron las diversas características que poseen los equipos de macromedición de caudal, en materia de instalación, funcionamiento, mantenimiento, principio de medición, fluido a medir, rangos de operación, costos de operación, tipo de tubería e impacto a la salud de los operarios se pudo establecer que los equipos de macromedición del amb SA, cumplen con los requerimientos en gran proporción para las aplicaciones de interés.

La verificación de caudal realizada en el sitio de macromedición Mutis permitió identificar fallas relevantes en el sistema de macromedición. La falla estaba argumentada en la inadecuada selección del equipo instalado (Optisonic 6300 marca KROHNE) para este punto de macromedición. Endress+Hauser dispone de una herramienta software Applicator que permite disminuir tiempo y complejidad en el diseño y el análisis de aplicaciones de esta naturaleza, la selección de equipos (sizing Flow) es una de las más sobresalientes, y con ella se ha determinado el equipo apropiado para suplir el que estaba instalado.

La estimación de la incertidumbre es posible realizarla a partir del modelo matemático (Ecuación 1.1), donde las variables de las cuales es función el modelo matemático son las más relevantes fuentes de incertidumbre. Por esto, se recomienda estimar la incertidumbre partiendo del modelo matemático y comparar con el resultado obtenido mediante la metodología volumétrica.

Existen algunas diferencias entre los valores asignados al transmisor del equipo patrón y el transmisor del equipo instalado en cuanto a las medidas de la tubería, se recomienda la asignación correcta de estos valores en especial para el equipo instalado en cada sitio, para tener valores de caudal con un menor error.

Con los resultados obtenidos en la estimación de la incertidumbre se deduce que la macromedición de caudal en el punto Anillo Vial es confiable, pues el nivel del error e incertidumbre son mínimos para esta aplicación, contrario a esto, el sitio de macromedición Girón presenta un error del 17 % y una mínima incertidumbre. Se deduce que es un punto no confiable por la magnitud del error de las medidas y se recomienda la reprogramación del transmisor o la revisión de los sensores para equipo instalado. De no haber una reducción considerable del error se debe realizar al ajuste del equipo instalado.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Endress+Hauser, people for process Automation, medición de caudal, Guía práctica: Tecnologías de medición – Aplicaciones – Soluciones. Edición española 2005.
- [2] La sectorización hidráulica, como estrategia de control de pérdidas en sistemas de acueducto, sociedad colombiana de ingenieros, premio Diódoro Sánchez 2003.
- [3] Incertidumbre de la medición, CCOLSMI, compañía colombiana de servicios en metrología e ingeniería Ltda. 2008.
- [4] Especificaciones de diseño de programas y de equipos, RAYCO, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2002.
- [5] Wolfgang A, Schmid. Lazos Martínez, Ruben J. “Guía para estimar la incertidumbre de la medición”. Centro nacional de metrología CENAM, México, abril, 2004.
- [6] Norma Técnica Colombiana, NTC-ISO 10012. “Sistemas de gestión de la medición. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición. INCONTEC, 2003.
- [7] Mendiburu Díaz Henry. “Sistemas SCADA”. Fundamentos teóricos, 2005. Disponible en <http://www.galeon.com/hamd/pdf/scada.pdf>.
- [8] Sáez Ruiz, Sifredo.J. Font Avila, Luis. “Incertidumbre de la medición, Teoría y práctica”. Primera edición, Febrero de 2004.
- [9] Guillén, Edwin. “Curso de incertidumbre en la medición”. INDECOP servicio nacional de metrología, Mayo 2009.
- [10] Arias Romero, Roberto. “Introducción a la estimación de incertidumbre en la medición de caudal”. Centro Nacional de Metrología, 2004.
- [11] Aristizábal Ramírez, Diego Luis. “Curso Fundamentos de metrología”, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, julio 2008.

- [12] Avilés Espinoza, Josey. “Medición de nivel y caudal por ultrasonido”, Universidad Técnica Federico Santa María.
- [13] Moreno Hernández, José. A. “Metodología para el cálculo de incertidumbre”. CENAM, junio 2005.
- [14] Lorente Gassó, José. M. “Transductores de ultrasonido”.
- [15] Endress+Hauser “Description of device functions”, Proline Prosonic Flow 93.
- [16] KROHNE. “Technical Datasheet”, Optisonic 6300, Ultrasonic clamp-on flowmeter.
- [17] Drake Moyano, José María. “Instrumentación electrónica de comunicaciones”, Introducción a los sistemas de instrumentación. Departamento de electrónica y computadores, 2005.
- [18] “Guía para el cálculo de la incertidumbre”. Ente Costarricense de Acreditación (ECA), Octubre 2004.
- [19] González Muñoz, Héctor. “Incertidumbre en la calibración de calibradores tipo vernier”. Centro Nacional de Metrología CENAM, México, Mayo 2001.
- [20] “Programa de agua no contabilizada”. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2005.
- [21] Azevedo de Netto, J.M, Acosta Álvarez, Guillermo. “Manual de Hidráulica”. Sexta edición 1975.

## ANEXOS

## ANEXO A: Tabla t-student.

Veff	0,3173	0,1	0,05	0,0455	0,0013	0,0001
	68,27%	90%	95%	95,45%	99,87%	99,99%
1	1,837	6,314	12,706	13,968	489,707	6366,198
2	1,321	2,920	4,303	4,527	27,708	99,992
3	1,197	2,353	3,182	3,307	11,826	28,000
4	1,142	2,132	2,776	2,869	8,038	15,544
5	1,111	2,015	2,571	2,649	6,485	11,178
6	1,091	1,943	2,447	2,517	5,666	9,082
7	1,077	1,895	2,365	2,429	5,167	7,885
8	1,067	1,860	2,306	2,366	4,833	7,120
9	1,059	1,833	2,262	2,320	4,595	6,594
10	1,053	1,812	2,228	2,284	4,417	6,211
20	1,026	1,725	2,086	2,133	3,737	4,837
30	1,017	1,697	2,042	2,087	3,548	4,482
40	1,013	1,684	2,021	2,064	3,459	4,321
50	1,010	1,676	2,009	2,051	3,408	4,228
60	1,008	1,671	2,000	2,043	3,375	4,169
70	1,007	1,667	1,994	2,036	3,351	4,127
80	1,006	1,664	1,990	2,032	3,334	4,096
90	1,006	1,662	1,987	2,028	3,320	4,072
100	1,005	1,660	1,984	2,025	3,310	4,053
200	1,003	1,653	1,972	2,013	3,262	3,970
300	1,002	1,650	1,968	2,008	3,247	3,944
441	1,001	1,648	1,965	2,006	3,237	3,926
565	1,001	1,648	1,964	2,004	3,232	3,919
791	1,001	1,647	1,963	2,003	3,228	3,911
1133	1,000	1,646	1,962	2,002	3,224	3,904
2593	1,000	1,645	1,961	2,001	3,220	3,897
5024	1,000	1,645	1,960	2,001	3,218	3,894
5025	1,000	1,645	1,960	2,000	3,218	3,894
10000000000	1,000	1,645	1,960	2,000	3,216	3,891
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	3,216	3,891

## ANEXO B: Certificado de calibración del equipo patrón.

**SAYTEC COLOMBIA**  
SERVICIOS  
AUTOMATIZACIÓN Y TECNOLOGÍA

Centro Empresarial El Dorado, Carrera 127 N° 22 D - 93, Bodega 25 Bogotá, Colombia  
Teléfono: (571) 418 49 24 Fax: 267 54 34 E-mail: [info@saytec.com.co](mailto:info@saytec.com.co)

Consecutivo: CA06123

---

**1. TRAZABILIDAD INFORME DE CALIBRACIÓN**  
**Calibration Report**

Los patrones utilizados en la calibración de este instrumento están trazados a

<b>SOLICITANTE:</b> <i>Customer</i>	ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA	<b>DIRECCIÓN:</b> <i>Address</i>	Diag 32 N° 30ª-51 Bucaramanga
--	--	-------------------------------------	-------------------------------

<b>Mesurando:</b> <i>Measurand</i>	Flujo Volumetrico	<b>RANGO DE MEDICIÓN:</b> <i>Measurement Range</i>	0 - 36.000 m3/h
---------------------------------------	-------------------	---	-----------------

<b>INSTRUMENTO:</b> <i>Instrument</i>	Ultrasonico	<b>RESOLUCIÓN:</b> <i>Resolution</i>	0,001 m3/h
--	-------------	---	------------

<b>FABRICANTE:</b> <i>Manufacturer</i>	Endress+Hauser	<b>IDENTIFICACION:</b> <i>Identification</i>	N/I-002
---	----------------	---	---------


<b>MODELO:</b> <i>Model</i>	93WA1-AB3B20ACB2AB	<b>NUMERO DE SERIE:</b> <i>Serial number</i>	42005791000
--------------------------------	--------------------	---	-------------

<b>FECHA DE EXPEDICIÓN:</b> <i>Date of Issue</i>	24 de septiembre de 2008	<b>FECHA DE CALIBRACIÓN:</b> <i>Calibration Date</i>	23 de Septiembre de 2008
---	--------------------------	---	--------------------------

*Estado en que se recibió el instrumento: Condiciones eléctricas, mecánicas y electrónicas, adecuadas para su calibración. Calibración en laboratorio tomando como referencia banco de Calibración de flujo con trazabilidad S.I.C.*

**4. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN**

**Firmas autorizadas:**

Calibró 

Carlos Andrés Neuta  
Jefe de calibración

*Este certificado (informe/reporte) expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas. No podrá ser reproducido total o parcialmente excepto cuando se hayan obtenido previamente permiso por escrito del laboratorio que lo emite.*

*Los resultados contenidos en el presente certificado (informe/reporte) se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que pueden derivarse del uso inadecuado de los instrumentos calibrados.*

*El usuario es responsable de la recalibración de sus instrumentos en intervalos adecuados.*

Página 1 de 4

# SAYTEC COLOMBIA

SERVICIOS  
AUTOMATIZACION Y TECNOLOGIA

Centro Empresarial El Dorado. Carrera 127 N° 22 D - 93, Bodega 25 Bogotá, Colombia  
Teléfono: (571) 418 49 24 Fax: 267 54 34 E-mail: [info@saytec.com.co](mailto:info@saytec.com.co)

Consecutivo: CA08123

## 1. TRAZABILIDAD:

Los patrones utilizados en la calibración de este instrumento están trazados a patrones nacionales de la magnitud respectiva. Para este caso se trabajo con:

Patrón	N° de identificación	Certificado	Fecha de calibración	Trazabilidad
CORIOLIS	64F50	C-C-08-0686	2008-06-23	S.I.C.
CORIOLIS	64MT15	C-C-08-0687	2008-06-24	S.I.C.

## 2. METODO DE CALIBRACIÓN

El método empleado en la calibración del instrumento de medición, fue bajo la prueba de comparación directa, basados en el procedimiento interno PC -002 Calibración de medidores de flujo (líquidos), usando agua como medio de calibración.

## 3. CONDICIONES AMBIENTALES

Durante la prueba se obtuvieron las siguientes condiciones ambientales:

Temperatura del Fluido:  $17,4 \pm 1$  °C

## 4. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Serial No. 8800530200 Orientación: Horizontal

Configuración del medidor de referencia:

Diámetro exterior del tubo:		4"					
K-Factor:		1,04					
Fluido de Calibración:		Agua					
Calibración							
Caudal Nominal m <sup>3</sup> /h	Caudal Nominal [%]	Volumen de prueba m <sup>3</sup>	Error m <sup>3</sup>	Error [%]	U <sub>expandida</sub> [%]	Factor de cubrimiento SD	Tolerancia [%]
33.37	93%	2.75	-0.00095	-0.0344%	0.1818%	3.18	2.00%
23.24	65%	1.90	-0.00206	-0.1079%	0.2690%	3.18	2.00%
13.81	38%	1.13	-0.00145	-0.1289%	0.2361%	3.18	2.00%

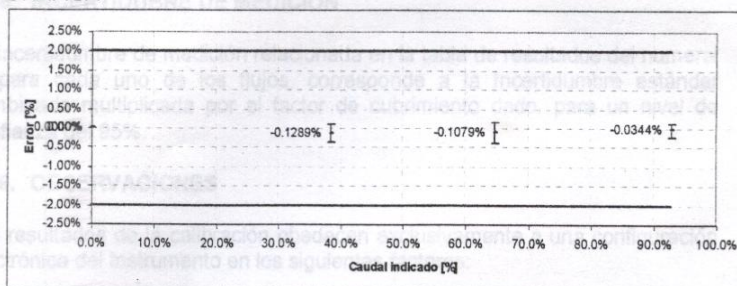
# SAYTEC COLOMBIA

SERVICIOS AUTOMATIZACION Y TECNOLOGIA

Centro Empresarial El Dorado, Carrera 127 N° 22 D - 93, Bodega 25 Bogotá, Colombia  
 Teléfono: (571) 418 49 24 Fax: 267 54 34 E-mail: [info@saytec.com.co](mailto:info@saytec.com.co)

Consecutivo: CA08123

## GRAFICA



Factor de expansión (K factor): 1.04

Diámetro exterior del tubo: 6"

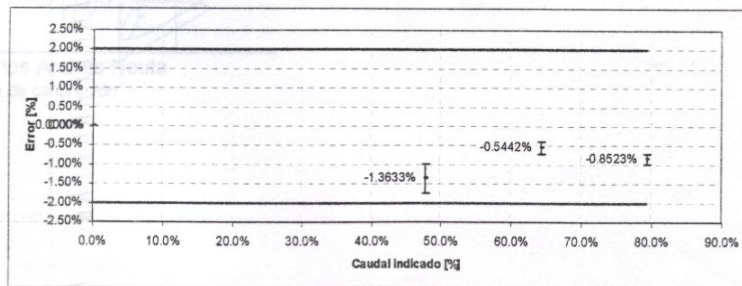
K-Factor: 1,04

Fluido de Calibración: Agua

### Calibración

Caudal Nominal m3/h	Caudal Nominal [%]	Volumen de prueba m3	Error m3	Error [%]	U <sub>expandida</sub> [%]	Factor de cubrimiento SD	Tolerancia [%]
28.55	79%	2.49	-0.02140	-0.8523%	0.1378%	2.01	2.00%
23.09	64%	1.98	-0.01082	-0.5442%	0.1540%	2.18	2.00%
17.19	48%	1.43	-0.01979	-1.3633%	0.3875%	2.01	2.00%

## GRAFICA



**SAYTEC LTDA**

**SAYTEC COLOMBIA**

SERVICIOS AUTOMATIZACION Y TECNOLOGIA

Centro Empresarial El Dorado. Carrera 127 N° 22 D - 93, Bodega 25 Bogotá, Colombia  
 Teléfono: (571) 418 49 24 Fax: 267 54 34 E-mail: [info@saytec.com.co](mailto:info@saytec.com.co)

Reporte N°: R-01-0004-L3

Fecha: 14/08/2008

Hora: 11:22:00 a.m.

Consecutivo: CA08123

---

**5. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN**

La incertidumbre de medición relacionada en la tabla de resultados del numeral 4, para cada uno de los flujos, corresponde a la Incertidumbre estándar combinada multiplicada por el factor de cubrimiento dado, para un nivel de confianza del 95%.

---

**6. OBSERVACIONES**

Los resultados de la calibración obedecen exclusivamente a una configuración electrónica del instrumento en los siguientes factores:

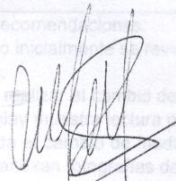
Factor de calibración (*K factor*): 1,04

Se realizó la revisión física externa e interna del instrumento, se verificó estado de funcionamiento y desempeño frente a pruebas de funcionamiento.

Se realizó la verificación física interna y externa del equipo, se revisan tarjetas electrónicas.

Diagnóstico y Recomendación:


- El instrumento inicialmente se encendió y externamente, ajustando el equipo de acuerdo a su display de visualización.
- El instrumento no encendió ya que el funcionamiento no es el adecuado, cuando se enciende el instrumento tarda un tiempo y después deja de funcionar.
- Se recomienda al cliente electrónico de visualización para hacer verificación de su funcionalidad en proceso. Se realizó la revisión.

**Elaboró** 

**Carlos Andrés Neuta**  
 Jefe de calibración

---

Observaciones del Cliente:

Responsable asignado: Ing. Tec. CARLOS NEUTA Firma: 

Recibe a satisfacción: ING. DIOGENE SUAREZ Firma:

Cargo: Centro:

Página 4 de 4



SAYTEC Colombia - Centro Empresarial El Dorado  
 Carrera 127 N° 22 D - 93, Bodega 25 Bogotá, Colombia  
 Teléfono: (571) 418 49 24 Fax: 267 54 34 E-mail: [info@saytec.com.co](mailto:info@saytec.com.co)

## ANEXO C: Propiedades físicas del agua. [1]

Temperatura		Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Presión de saturación		Viscosidad (din./cin.)	
[°C]	[°F]		[psia]	[Pa]	$\mu, \eta$ [Pas, cP]	$\nu$ [cSt]
0	32,0	999,8	0,08858	610,7	1787	1,787
2	35,6	999,9	0,10235	705,6	1671	1,671
4	39,2	1.000,0	0,11794	813,1	1562	1,562
6	42,8	999,9	0,13561	934,9	1464	1,464
8	46,4	999,8	0,15557	1072,5	1376	1,375
10	50,0	999,7	0,17805	1227,5	1305	1,307
12	53,6	999,4	0,20336	1402,0	1226	1,227
14	57,2	999,2	0,23178	1597,9	1161	1,163
16	60,8	998,9	0,26362	1817,4	1104	1,106
18	64,4	998,5	0,29924	2063	1052	1,053
20	68,0	998,2	0,33899	2337	1002	1,004
22	71,6	997,7	0,38337	2643	955	0,957
24	75,2	997,2	0,43255	2982	911	0,914
26	78,8	996,6	0,48738	3360	872	0,875
28	82,4	996,1	0,54801	3778	834	0,837
30	86,0	995,7	0,61517	4241	797	0,801
32	89,6	994,9	0,68944	4753	764	0,768
34	93,2	994,2	0,77139	5318	741	0,745
36	96,8	993,4	0,86147	5939	700	0,705
38	100,4	992,8	0,96069	6623	680	0,685
40	104	992,2	1,06962	7374	653	0,658
45	113	990,2	1,38976	9581	598	0,604
50	122	988,0	1,78909	12334	548	0,554
55	131	985,7	2,28314	15740	505	0,512
60	140	983,2	2,88947	19920	467	0,475
65	149	980,6	3,62780	25010	434	0,443
70	158	977,8	4,51988	31160	404	0,413
75	167	974,8	5,61056	38550	378	0,388
80	176	971,8	6,86975	47360	355	0,365
85	185	968,6	8,38412	57800	334	0,345
90	194	965,3	10,16973	70110	315	0,326
95	203	961,8	12,26141	84530	298	0,310
100	212	958,4	14,69687	101320	282	0,295
150	302	916,9	69,04570	476000	186	0,205
200	392	864,6	225,5734	1555100	136	0,161
250	482	799,2	578,3302	3987000	109	0,140
300	572	712,4	1246,3039	8592000	89	0,132

**ANEXO D: Velocidad del sonido en diferentes medios.**

Fluid	Velocity of sound		Density	
	[m/s]	[ft/s]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[lbs/ft <sup>3</sup> ]
Water	1485	4950	1.0	0.06
Alkanes	1050	3500	0.65	0.04
Oil	1480	4933	0.98	0.06
Acids	1500	5000	1.3	0.08
CxHx refined	1250	4167	0.8	0.05
CxHx light	1000	3333	0.6	0.04
Alcohols	1200	4000	0.8	0.05
Refrigerant	800	2667	1.5	0.09
Caustic soda	2040	6800	1.25	0.08
solvents	1200	4000	0.8	0.05
other	1500	5000	1.0	0.06

Pipe material	Velocity of sound	
	[m/s]	[ft/s]
Carbon steel	3230	10767
Stainless steel	3120	10400
Cast iron	2500	8333
Aluminium	3050	10167
Asbestos cement	4200	14000
Concrete	2500	8333
Acrylics	2700	9000
PP/PVC	2400	8000
Polyamide	2200	7333
GRP/FRP	2500	8333
other	free entry	

Liner material	Velocity of sound	
	[m/s]	[ft/s]
Cement	4200	14000
Epoxy	2500	8333
LDPE	1900	6333
HDPE	2400	8000
PTFE	1350	4500
Rubber	1500	5000
other	free entry	
none	-	

**ANEXO E:** Características de ejecución de los caudalímetros. [1]

Principio de medición / Tipo de contador	Fluido (L, G, V) *	Precisión (típica)
Placa de orificio	L, G, V	0,6 a 2% v.f.e.
Tubos de Venturi	L, G	0,6 a 2% v.f.e.
Sección variable	L, G	2% v.f.e.
Desplazamiento	L, G	< 0,1 a 2% v.l.
Turbinas	L, G, V	0,1 a 2% v.l.
Vortex	L, G, V	0,5 a 1% v.l.
Electromagnéticos	L	0,2 a 1% v.l.
Ultrasónicos (Doppler)	L, G	1% v.l. a 2% v.f.e.
Ultrasónicos (tiempo de tránsito)	L, G, V	0,5% v.l. a 2% v.f.e.
Coriolis	L, G, V	0,1 a 0,5% v.l.
Caudalím. máscos térmicos	L, G	0,5% v.l. a 2% v.f.e.
Sistemas de pesado	L, sólidos	0,1% v.l.
Análisis de correlación cruzada	L, sólidos	0,5% v.l. a 2% v.f.e.
De láser	L, G, V	1% v.l.
Métodos de traza	L, G, V	1 a 2% v.l.
Vertederos	L	3 a 5% v.l.
Canales	L	3 a 5% v.l.

\* L = Líquido, G = Gas, V = Vapor  
 Continúa en la página siguiente

Principio de medición / Tipo de contador	Repetibilidad	Rangeabilidad	Nº Reynolds mín.
Placa de orificio	0,5% v.l.	3 a 10:1%	3.000
Tubos de Venturi	0,5% v.l.	4 a 10:1%	10.000
Sección variable	1% v.l.	10:1	-
Desplazamiento	0,02% v.l.	hasta 50:1	> 100
Turbinas	0,02% v.l.	25:1	5.000
Vortex	0,2% v.l.	15:1	5.000
Electromagnéticos	0,1% v.l.	más de 100:1	2.000
Ultrasónicos (Doppler)	0,5% v.l.	más de 20:1	5.000
Ultrasónicos (tiempo de tránsito)	0,25% v.l.	más de 20:1	10.000
Coriolis	0,02% v.l.	más de 100:1	1.000
Caudalím. máscos térmicos	0,5% v.l.	más de 100:1	5.000
Sistemas de pesado	0,1% v.l.	50:1	> 100
Análisis de correlación cruzada	0,5% v.l.	100:1	5.000
De láser	0,25% v.l.	hasta 2.000:1	> 100
Métodos de traza	1% v.l.	hasta 1.000:1	-
Vertederos	1 a 2% v.l.	400:1	-
Canales	1 a 2% v.l.	120:1	-

Principio de medición / Tipo de contador	Diámetro nom. [mm / pulg.]	Temp.máx. [°C / °F] *	Presión máx. [bar / psi] *
Placa de orificio	1 a 1.000 (0,04 a 40")	1.000 / 1.830	500 / 7.250
Tubos de Venturi	25 a 4.000 (1 a 160")	1.000 / 1.830	600 / 8.700
Sección variable	2 a 150 (0,08 a 6")	450 / 840	100 / 1.450
Desplazamiento	5 a 400 (0,2 a 16")	250 / 480	50 / 700
Turbinas	5 a 800 (0,2 a 32")	500 / 930	3.000 / 43.500
Vortex	15 a 400 (0,5 a 16")	400 / 750	250 / 3.600
Electromagnéticos	1 a 3.000 (0,04 a 120")	250 / 480	150 / 2.200
Ultrasónicos (Doppler)	> 5 (0,2")	200 / 390	200 / 2.900
Ultrasónicos (tiempo de tránsito)	> 2 (0,08")	200 / 390	200 / 2.900
Coriolis	1 a 150 (0,04 a 6")	400 / 750	400 / 5.800
Caudalím. máxicos térmicos	1 a 2.500 (0,04 a 100")	300 / 570	100 / 1.450
Sistemas de pesado	Sin límites	150 / 300	Presión amb.
Análisis de correlación cruzada	25 a 300 (1 a 12")	250 / 480	150 / 2.200
De láser	> 25 (1")	150 / 300	200 / 2.900
Métodos de traza	Sin límites	Sin límites	-
Vertederos	> 25 (1")	Temp. amb.	Presión amb.
Canales	> 100 (4")	Temp. amb.	Presión amb.

\* Valores típicos para los instrumentos comerciales

Principio de medición / Tipo de contador	Pérdidas de carga a $Q_{m\acute{a}x}$ (pérdida carga = $v^2/2g$ )	Entradas / Salidas * (DN = diámetro nominal)
Placa de orificio	8 ×	40 × DN / 10 × DN
Tubos de Venturi	4 ×	20 × DN / 5 × DN
Sección variable	3 ×	0 × DN / 0 × DN
Desplazamiento	2 ×	3 × DN / 2 × DN
Turbinas	2 ×	20 × DN / 5 × DN
Vortex	2 ×	25 × DN / 5 × DN
Electromagnéticos	cercana a 0	10 × DN / 5 × DN
Ultrasónicos (Doppler)	cercana a 0	20 × DN / 5 × DN
Ultrasónicos (tiempo de tránsito)	cercana a 0	15 × DN / 5 × DN
Coriolis	8 ×	0 × DN / 0 × DN
Caudalím. máscos térmicos	2 ×	20 × DN / 5 × DN
Sistemas de pesado	cercana a 0	0 × DN / 0 × DN
Análisis de correlación cruzada	cercana a 0	15 × DN / 5 × DN
De láser	cercana a 0	30 × DN / 10 × DN
Métodos de traza	cercana a 0	80 × DN / 0 × DN
Vertederos	4 ×	10 × DN / 5 × DN
Canales	4 ×	10 × DN / 5 × DN