

LA MACROMEDICIÓN DE TIPO PROPORCIONAL COMO UNA HERRAMIENTA
PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EN ACUEDUCTOS DE PEQUEÑAS
LOCALIDADES Y/O ZONAS RURALES

GUILLERMO ANDRÉS FUENTES BARRERA
C.C 10.013.099

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
MAESTRÍA EN ECOTECNOLOGÍA
PEREIRA
2009

LA MACROMEDICIÓN DE TIPO PROPORCIONAL COMO UNA HERRAMIENTA
PARA EL CONTROL DE PÉRDIDAS EN ACUEDUCTOS DE PEQUEÑAS
LOCALIDADES Y/O ZONAS RURALES

GUILLERMO ANDRES FUENTES BARRERA
C.C 10.013.099

Tesis de maestría para optar al título de
Magister en Ecotecnología

Director
Ph.D JHONIERS GUERRERO ERAZO
Director Escuela de Postgrado
Facultad de Ciencias Ambientales

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
MAESTRIA EN ECOTECNOLOGÍA
PEREIRA
2009

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira 6 de Abril de 2009

Este trabajo está dedicado a mis padres Milton y Aurora, por su infinito amor, apoyo, confianza, paciencia y esfuerzo. A quienes debo la vida y todo lo que soy.

AGRADECIMIENTOS

Por el apoyo brindado para la realización de este proyecto expreso los más sinceros agradecimientos a:

Dios por todo.

Al Doctor. Jhoniers Guerrero Erazo, Director de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira, director de mi tesis de maestría por su importante asesoría y colaboración.

A Tito Morales Pinzón, profesor de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira, por la asesoría y colaboración en temas de estadística.

A Pedro León García Reinoso, profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Quindío, por la asesoría y colaboración en temas de hidráulica.

Ingeniero Luis Alberto Montes Rico, administrador del acueducto comunitario de la vereda Mundo Nuevo, por su colaboración para el uso de las instalaciones de planta y la información facilitada.

Al proyecto de investigación de *“Evaluación, Monitoreo y Manejos Sostenible de las Pérdidas de Agua en Empresas de Acueducto de Pequeñas Localidades”* el cual fue financiado por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología (COLCIENCIAS) y la Universidad Tecnológica de Pereira.

Al Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento (GIAS) por el apoyo y los recursos facilitados durante la realización de la investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag
1. INTRODUCCIÓN	14
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	15
2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
3. OBJETIVO GENERAL.....	17
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4. JUSTIFICACION.....	17
5. MARCO DE REFERENCIA.....	22
5.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES SOBRE MEDICIÓN DE CAUDAL ...	22
5.2 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN UN CONDUCTO CERRADO A PRESIÓN	23
5.3 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL EN TUBERÍAS CERRADAS Y A PRESIÓN	26
5.4 MEDICIÓN DE TIPO PROPORCIONAL.....	30
5.5 INVESTIGACIONES REALIZADAS	32
6. METODOLOGIA.....	40
6.1 METODOLOGÍA PARA EL OBJETIVO: ESTANDARIZACIÓN DE UN MEDIDOR DE AGUA DE TIPO PROPORCIONAL PARA TUBERÍAS DE 4 PULGADAS	40
6.1.1 ESTANDARIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE UN MEDIDOR DE TIPO PROPORCIONAL EN LABORATORIO	40
6.1.1.1 Montaje del medidor en Laboratorio.....	40
6.1.1.2 Prototipo de medición de tipo proporcional	41
6.1.1.3 Medición y registro de la información en laboratorio	43
6.1.1.4 Diseño experimental	43
6.1.2 ESTANDARIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE UN MEDIDOR DE TIPO PROPORCIONAL EN CAMPO	45
6.1.2.1 Montaje del medidor en campo.....	45
6.1.2.2 Medición y registro de la información en campo.....	45

6.1.2.3	Análisis de la Información recolectada en campo.....	46
6.2	FORMULAR UNA METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN MEDIDOR DE TIPO PROPORCIONAL PARA TUBERÍAS DE 4 PULGADAS.....	46
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
7.1	ESTANDARIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DEL MEDIDOR DE AGUA DE TIPO PROPORCIONAL EN LABORATORIO	47
7.1.1	Caudales de funcionamiento.....	47
7.1.2	Recolección y análisis de los datos de laboratorio	48
7.1.3	Curva de error del medidor de agua de tipo proporcional	56
7.1.4	Variables que afectan la medición	58
7.2	ESTANDARIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DEL MEDIDOR DE TIPO PROPORCIONAL DE AGUA EN CAMPO	59
7.2.1	Recolección y análisis de los datos en campo	60
7.3	METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN MEDIDOR DE AGUA DE TIPO PROPORCIONAL....	62
7.3.1	Costo.....	63
8.	CONCLUSIONES	64
9.	RECOMENDACIONES	66
10.	BIBLIOGRAFIA.....	67
11.	ANEXOS.....	72

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Entidades prestadoras del servicio de acueducto en el sector rural que tienen macromedición de agua.	19
Figura 2 .Perfil de velocidades	24
Figura 3.Contadores de velocidad de chorro único y múltiple	27
Figura 4. Contadores volumétricos	27
Figura 5. Medidores deprimogenos.....	28
Figura 6. Caudalimetro de ultrasonido.....	29
Figura 7. Medidor electromagnético.....	29
Figura 8. Reducción de la sección de flujo en movimiento	30
Figura 9. Medidor proporcional o de derivación	30
Figura 10. Macromedidor con tecnología de tipo proporcional	37
Figura 11. Esquema banco de pruebas.....	41
Figura 12. Esquema medidor de agua de tipo proporcional.....	42
Figura 13. Dispersión entre la variable dependiente volttotal y la variable independiente volmicro.....	52
Figura 14. Intervalos de caudal analizados.....	55
Figura 15. Curva de error del medidor de agua de tipo proporcional.....	56
Figura 16. Histograma del análisis de residuos	61

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 1. Índice de agua no contabilizada en algunos municipios y/o empresas del país.....	39
Tabla 2. Resumen del modelo de regresión lineal múltiple.....	50
Tabla 3. Intervalos de caudal	53

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Metodología para la construcción, calibración y mantenimiento de un medidor de agua de tipo proporcional	
--	--

RESUMEN

Una adecuada gestión del agua se debe basar en la medición de los caudales que circulan en los diferentes procesos de un sistema de abastecimiento (captación, tratamiento, almacenamiento y distribución) y a partir de estas mediciones evaluar la cantidad disponible y planear estrategias para mejorar el sistema.

En la presente investigación se calibró un medidor de agua de tipo proporcional de tal manera que se convierta en una alternativa tecnológica de medición confiable, de bajo costo y fácil construcción y mantenimiento para los sistemas de aprovisionamiento de agua de pequeñas localidades y/o zonas rurales. Proporcionando una herramienta que puede mejorar considerablemente la gestión técnica y el control en la reducción de las pérdidas de agua en estos sistemas de abastecimiento de agua.

La investigación se dividió en 2 fases; en la primera fase se calibró el medidor de agua de tipo proporcional en laboratorio y se determinó el caudal de funcionamiento del medidor ($4.03 - 18 \text{ m}^3/\text{h}$), con un promedio de error demasiado alto (estimado en 21%). Por tal razón se evaluaron intervalos de caudal más pequeños, con su respectivo modelo de regresión determinando el error en cada intervalo. A partir de esta información se determinó el caudal óptimo de funcionamiento es con caudales mayores a $9.21 \text{ m}^3/\text{h}$ con un error en la medición de 8.2%.

Seguidamente en el acueducto de la vereda Mundo Nuevo se realizó la segunda etapa de la investigación que consistió en la calibración del medidor de agua en campo mediante la validación de los modelos de regresión determinados en laboratorio. El lugar seleccionado tiene un caudal que varía entre $4.0 - 4,5 \text{ l/s}$, correspondiendo al modelo de regresión determinado para el intervalo de caudal $14.43 - 18.00 \text{ m}^3/\text{h}$. Como resultado se obtuvo que el 98.5% de los residuos de la

diferencia entre el volumen registrado por el medidor de flujo ultrasónico portátil, instalado como testigo y el volumen pronosticado por el modelo de regresión está ± 2 desviaciones estándar, por tanto el modelo de regresión se considera válido para el pronóstico del volumen de agua que circula por la tubería.

Una vez concluida la etapa calibración y validación en campo se procedió a diseñar y elaborar un manual que contiene la metodología para la construcción, montaje y calibración de un medidor de agua de tipo proporcional para tuberías de 4 pulgadas. Adicionalmente se determinó que el costo de construcción, montaje y mantenimiento del medidor es 2.45 veces menor que un medidor de agua mecánico (volumétrico – velocidad) convirtiéndose en una alternativa de medición de caudal que puede ser instalada en diferentes lugares del sistema de abastecimiento de agua de pequeñas localidades o zonas rurales.

Finalmente se determinó que la variable física que más afectó el medidor de agua de tipo proporcional es la calidad del agua, debido a una reducción del área de paso en el interior del mismo y la obstrucción de las partes móviles del medidor causado por la acumulación de sedimentos. De igual manera es importante mencionar que la calibración del medidor de agua se realizó con unos criterios de construcción específicos, por tal razón, el cambio en cualquiera de sus componentes, afectaría directamente el porcentaje de error calculado para cada modelo de regresión, exigiendo de nuevo la calibración de este en laboratorio y en campo.

ABSTRACT

Appropriate water management should consider the measurement of the inflow that goes through different processes in a water supply system (captation, treatment, storage and distribution) and therefore, the evaluation of the available quantity of water to plan strategies to improve the system.

During this research a prototype of a proportional meter device was calibrated in order to establish a reliable, low-cost, easily constructive and low maintenance alternative of flow measurement for rural communities or small towns. It can be said, that it is an affordable tool to improve the technical water management and reduce water leaks in water supply systems.

The investigation was divided into 2 phases, the first stage was calibrated a proportional flow meter device laboratory and the flow rate of the device was determined (a range between 4.03-18 m³/h) with a too high average error of 21%. For that reason, and in order to reduce the error, smaller flow intervals were built finding in this way a regression model and the error for each one of them. Finally, using this information, an optimal flow of 9.21 m³/h with an error of 8.02% was determined.

Then, in the rural area of “Mundo Nuevo” the proportional meter device was calibrated using a validating regression model found in the laboratory. In the Mundo Nuevo’s water supply system the flow is between 4.0 – 4,5 l/s, which is related to the regression model for the flow rate of 14.43 – 18.00 m³/h. As a result, it was obtained that 98,5% of the difference between the volume of the portable ultrasonic flow meter and the volume that initially was prognosticated by the regression model is about ± 2 standard deviation. Therefore, the regression model is valid for the water volume that was prognosticated and that flows in the pipe.

When the calibrating process was finished a manual for constructing, assembling and calibrating the proportional water meter device for 4" pipes was elaborated. Additionally, it was determined that cost of construction, assembling, operation and maintenance of the device is 2,45 times lower than a mechanical water meter device (volumetric-velocity), thus, it is an alternative for flow measurement that can be installed in different places of the water supply system in rural communities or small towns.

Finally, it is clear that the physical factor that most affects the proportional meter device is water quality, due to the reduction of the flow area in the device attributed to sediments accumulation and the obstruction of its small parts. In the same way, it is important to say that flow meter calibration was made with specific construction items, for that reason, any change on its parts affects the calculated percentage error for each regression model, and thus, a new calibration must be made.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para el sostenimiento de la vida en el planeta que, además, satisface las principales necesidades humanas en las actividades de tipo doméstico, agrícola e industrial. Ha sido un elemento básico para el desarrollo de la humanidad a través del tiempo, convirtiéndose en uno de los recursos que mayor presión enfrenta en la actualidad debido al desmesurado crecimiento poblacional. Lo anterior ha obligado al diseño e implementación de políticas y estrategias que permitan realizar una adecuada gestión del recurso hídrico a nivel mundial, regional y local, como respuesta a la denominada crisis del agua (Restrepo, 2004).

En los últimos años, se han iniciado procesos que tienen como objetivo promover la gestión del recurso hídrico, basada en un uso sostenible, una mejor calidad del servicio y un menor impacto en el medio ambiente, pero esto solo es posible a partir del conocimiento de los caudales y volúmenes de agua circulantes y consumidos en cada componente de un sistema de abastecimiento. La medición es la única herramienta que permite determinar la cantidad de agua disponible y plantear estrategias de mejoramiento a través de la implementación de indicadores de gestión.

En este sentido, la presente tesis de maestría pretende investigar y mostrar la medición de agua de tipo proporcional como una alternativa de medición confiable, de bajo costo, fácil construcción y mantenimiento para los acueductos de pequeñas localidades y/o zonas rurales, contribuyendo con la generación de información, a partir de la cual es posible mejorar la gestión administrativa y técnica y cuantificar las pérdidas de agua en el sistema de abastecimiento. Correspondiendo con la nueva definición de ecotecnología en la cual en un sentido más amplio involucra la gestión ambiental y no sólo la creación y restauración de ecosistemas dentro de sus alcances de aplicación (Mitsch and

Jorgensen, 2003), siendo la producción más limpia (pml) y su cultura de medición la herramienta que se debe aplicar en los sistemas de abastecimiento de pequeñas localidades y/o zonas rurales para detectar las ineficiencias de los procesos (captación, tratamiento y distribución), a través del control y monitoreo de los volúmenes y caudales de agua suministrados en cada uno.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El sector de agua potable en Colombia presenta altos índices de ineficiencia en la prestación del servicio en los municipios con una población menor a 12.000 habitantes y en las zonas rurales. Esta ineficiencia se refleja en el Índice de Agua No Contabilizada (IANC), que está por encima del 51%, excediendo el valor máximo permitido del 30% establecido por la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA). Problemática que se agudiza, si tenemos en cuenta que en el país existen más de 860 municipios con una población menor a 12.000 habitantes. Y en el sector rural sólo el 56% de las localidades existentes tienen cobertura en el abastecimiento de agua; de las cuales el 3.8% poseen planta de potabilización y de ellas solo funciona el 65% (MAVDT, 2004). Una de las causas de este problema es el poco acceso y disponibilidad de recursos tecnológicos, económicos y administrativos de las empresas prestadoras del servicio de acueducto de las pequeñas localidades y/o zonas rurales del país, los cuales son fundamentales para mantener un control eficiente y eficaz de los sistemas de acueducto.

Teniendo en cuenta lo anterior, es fundamental iniciar un proceso para la gestión adecuada del agua a partir de la implementación de sistemas de medición que permitan conocer y controlar los caudales circulantes en las tuberías (Palau, 2005), los volúmenes de agua suministrados y cuantificar las pérdidas de agua en los diferentes procesos del sistema de abastecimiento (captación, tratamiento, almacenamiento y distribución), facilitando el monitoreo y cumplimiento de los

requerimientos legales existentes por entes internos y externos, como es el caso del control y seguimiento que podrían realizar las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR'S) a las concesiones de agua otorgadas a cada empresa prestadora del servicio de acueducto. Además de facilitar la implementación de estrategias y herramientas dirigidas a reducir las pérdidas de agua, mejorar y optimizar el uso del agua y el funcionamiento administrativo, económico, técnico de la empresa de acueducto.

En este sentido, la presente investigación pretende mostrar la medición de tipo proporcional como una alternativa de medición confiable, de bajo costo y de fácil construcción y mantenimiento que puede ser implementada en las zonas rurales y pequeñas localidades del país, contribuyendo a la gestión adecuada del recurso hídrico mediante el monitoreo de los volúmenes de agua utilizados en los diferentes componentes del sistema de aprovisionamiento de agua (captación, tratamiento, almacenamiento y redes de distribución). Teniendo en cuenta que los sistemas de medición de caudal utilizados tradicionalmente en los sistemas de acueducto (contadores de velocidad y volumétricos) presentan problemas originados por el costo del instrumento de medición, la complejidad en la instalación y reparación del equipo in situ y el incorrecto dimensionamiento del medidor a instalar, que puede incrementar el deterioro de las partes internas cuando hay caudales excesivamente altos y/o el subdimensionamiento del volumen de agua por bajos caudales (Palau, 2005).

2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es la macromedición de tipo proporcional una herramienta viable para el control de los volúmenes de agua?

3. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la macromedición de tipo proporcional como una herramienta para la medición de agua en sistemas de abastecimiento de pequeñas localidades y/o zonas rurales.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estandarizar una estación de macromedición de tipo proporcional para tuberías de 4 pulgadas.

Formular una metodología para la construcción, calibración y mantenimiento de la estación de macromedición para tuberías 4 pulgadas.

4. JUSTIFICACION

Según las Naciones Unidas, para el año 2050 la crisis del agua afectará tres cuartas partes de la población mundial, siendo insuficiente para la producción de alimentos y el sustento de los ecosistemas del planeta, ya que se deberá incrementar en un 60% la producción de alimentos en la tierra para el año 2030 (FAO, 2003), afectando a todos los sectores sociales y económicos y colocando en peligro la sostenibilidad de los recursos naturales (FAO, 2007).

Por esta razón han surgido organizaciones como la Asociación Mundial para el Agua (Global Water Partnership, GWP), la cual tiene como objetivo principal, promover el Manejo Integrado del Recurso Hídrico (MIHR), entendido como un “proceso para el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales”(GWP. 2000).

En América latina, los estudios realizados hasta el 2002 presentan cifras que indicaban un promedio de 60 millones de personas sin un adecuado suministro de agua para consumo humano, y unos 137 millones sin infraestructura de saneamiento básico (Cepis, 2005), con el consiguiente impacto en la salud y la calidad de vida de la población en esta región a pesar de las grandes inversiones realizadas en la denominada Década del Agua (1980 – 1990). Esta situación ha sido especialmente crítica en poblaciones pequeñas (menores de 30.000 habitantes), incluyendo cabeceras municipales, zonas rurales nucleadas y los asentamientos urbanos marginales de las grandes ciudades donde esta población representa, en el caso de los países de la Región Andina, más del 50% del número total de habitantes (Galvis et al, 1996). Esta situación motivó, al Banco Mundial a implementar El Programa de Agua y Saneamiento (WSP), el cual tiene como fin encontrar soluciones sostenibles que aseguren a las poblaciones pobres de los países en desarrollo, una eficiente prestación de servicios de agua potable y saneamiento (WSP, 2008).

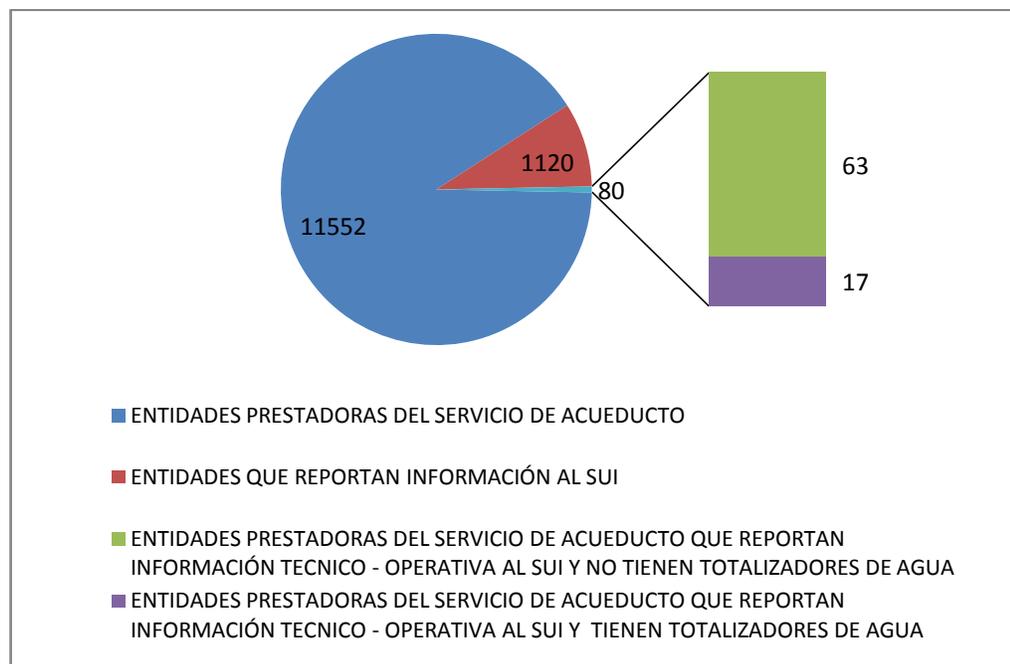
Si bien en Colombia, las zonas urbanas del país han logrado avances significativos en la cobertura y gestión de estos servicios, en la zona rural para el año 2003 aún se presentaban rezagos significativos en materia de abastecimiento de agua con cobertura promedio del 66% y de disposición de aguas servidas con un promedio del 57.9%; así mismo se detectaron debilidades en la gestión de los servicios, bajo nivel de desarrollo tecnológico, entre otros aspectos, situaciones que reflejan condiciones de inequidad en relación con las zonas urbanas (MAVDT, 2005).

Por esta razón el gobierno colombiano a través del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), ha planteado las estrategias a seguir para realizar una gestión integral del recurso hídrico, partiendo de la base que para iniciar un proceso de conservación, manejo y uso sostenible del recurso, se deben conocer los diferentes tipos de usuarios y usos que lo demandan, como

herramienta fundamental para establecer los instrumentos administrativos, económicos y técnicos de la planificación, de forma tal que se determine la asignación más óptima del agua garantizando la sostenibilidad ambiental (MAVDT, 2004).

En el país existen aproximadamente 11552 entidades prestadoras del servicio de acueducto en pequeñas localidades y/o zonas rurales (hasta 2500 usuarios) (MAVDT, 2005). De las cuales 1120 entidades reportan información al Sistema Único de Información (SUI), que corresponde al 9.7%. De estas 1120 entidades solo 80 (7.1%) reportan información técnico – operativa al SUI y sólo 17 empresas tienen instalados totalizadores de agua en su sistema de abastecimiento de agua (ver figura 1).

Figura 1. Entidades prestadoras del servicio de acueducto en el sector rural que tienen macromedición de agua.



Está situación evidencia varios problemas, entre los que sobresalen: 1) la inadecuada gestión en la información, pues son muy pocas las entidades

prestadoras del servicio de acueducto que presentan su información al SUI y, 2) el aumento en la presión sobre el recurso hídrico por la ausencia de sistemas de medición que permitan tener un control y conocimiento de los caudales de agua circulantes en los procesos de los sistemas de abastecimiento, impidiendo la definición y formulación de estrategias que contribuyan a mejorar la gestión del servicio de acueducto e incrementar el desarrollo tecnológico de los sistemas de aprovisionamiento de agua, además de la formulación, seguimiento y evaluación de indicadores de eficiencia de carácter técnico, administrativo y financiero para los sistemas de acueducto por entes interno y/o externos

La ausencia de instrumentos de medición en los sistemas de abastecimiento de agua impide a las autoridades ambientales realizar un seguimiento eficaz a las concesiones de agua, además del cobro adecuado de la tasa por utilización de agua, que se deriva del “*volumen de agua efectivamente captada, dentro de los límites y condiciones establecidos en la concesión de aguas*”, de acuerdo a lo estipulado en el artículo 6 del decreto 155 de 2004 (MAVDT, 2004). A nivel departamental el volumen total de agua otorgado por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER) a las empresas prestadoras del servicio de acueducto por el concepto de concesiones es de 4.15 m³/s (130.874.400 m³/año), de los cuales 3.20 m³/s (100.915.200 m³/año) se están midiendo adecuadamente y corresponde a las empresas de acueducto ubicadas en las cabeceras municipales del departamento y no existe información sobre la instalación de sistemas de medición para los restantes 0.95 m³/s (29.959.200 m³/año) que corresponden a entidades prestadoras del servicio del sector rural. Por tal motivo es fundamental que la autoridad ambiental realice un control y seguimiento eficaz de los volúmenes de agua efectivamente captados por cada sistema de abastecimiento, ya que el dinero recaudado por la tasa de utilización de agua debe ser destinado a la protección y recuperación del recurso hídrico conforme al respectivo Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (Decreto 155 de 2004).

Por tal motivo, esta investigación presenta la medición de tipo proporcional como una alternativa de medición confiable, de bajo costo y de fácil construcción y mantenimiento que puede ser implementada en las zonas rurales y pequeñas localidades, mejorando la gestión del recurso hídrico, a través del monitoreo de los volúmenes de agua utilizados en los diferentes componentes del sistema de aprovisionamiento de agua (captación, tratamiento, almacenamiento y redes de distribución).

Siendo consecuente con la nueva definición de ecotecnología que involucra la gestión ambiental y no solo la creación y restauración de ecosistemas en su campo de aplicación (Mitsch and Jorgensen, 2003), en la cual la producción más limpia (pml) y su cultura de medición es una herramienta fundamental para detectar ineficiencias en los procesos productivos. En este sentido la implementación de un sistema de medición de agua de tipo proporcional contribuye de manera directa al conocimiento y control de los volúmenes de agua utilizados y consumidos en los diferentes procesos de un sistema de acueducto (captación, bocatoma, tratamiento, almacenamiento y distribución de agua) de pequeñas localidades y zonas rurales, sitios donde se presentan los mayores índices de ineficiencia operacional. Con lo cual es posible la evaluación e implementación de estrategias de mejoramiento continuo dirigidas a la reducción de las pérdidas de agua y al uso eficiente del recurso hídrico en los sistemas de abastecimiento, disminuyendo los impactos negativos y contribuyendo con la sostenibilidad del recurso.

5. MARCO DE REFERENCIA

Este capítulo describe las características y los principios de funcionamiento de los principales instrumentos de medida de caudal utilizados en los sistemas de abastecimiento para el control del agua circulante en los diferentes componentes del acueducto (bocatoma, tratamiento, almacenamiento y red de abastecimiento). Aunque actualmente existe una gran variedad de instrumentos de medición de caudal existentes, se presentan dificultades para seleccionar un instrumento que combine precisión, bajo costo de compra, instalación y mantenimiento, y que considere las condiciones particulares de funcionamiento (caudal, presión, calidad de agua, velocidad, entre otros) existentes en cada sistema de aprovisionamiento de agua.

5.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES SOBRE MEDICIÓN DE CAUDAL

La mayor parte de los equipos diseñados para realizar mediciones de caudal en tuberías cerradas a presión se basan en la medición local de la velocidad del flujo (velocidad media axial en la sección) y el área de paso. Sin embargo cada instrumento posee un principio de funcionamiento diferente que permite obtener la velocidad local y relacionar la velocidad medida con la velocidad media de la conducción (Palau, 2005).

$$Q = V \times A \quad (1)$$

Donde:

Q = Caudal (m³/s)

V = Velocidad (m/s)

A = Área (m²)

5.2 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN UN CONDUCTO CERRADO A PRESIÓN

Un aspecto fundamental de la medición de caudales es el comportamiento del flujo de agua o perfil de velocidades al interior de la tubería o conducción, este comportamiento del flujo al interior de la tubería es posible conocerlo a partir de la relación en las velocidades medidas y la velocidad media axial.

Idealmente el perfil de velocidades en una tubería de agua con un flujo plenamente desarrollado, debe presentar una simetría axial y dependiendo del tipo de flujo adquiere una forma más o menos parabólica. Cuando el número de Reynolds (Re) es menor a 2000, parámetro adimensional (Ecuación 2), el flujo se considera laminar y su perfil es parabólico y cuando el número de Re es mayor a 2000 el flujo se considera turbulento y el perfil de velocidades es logarítmico (Saldarriaga, 2001). La figura 2 presenta el comportamiento del perfil de velocidades al interior de una tubería (Palau, 2005).

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \quad (2)$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

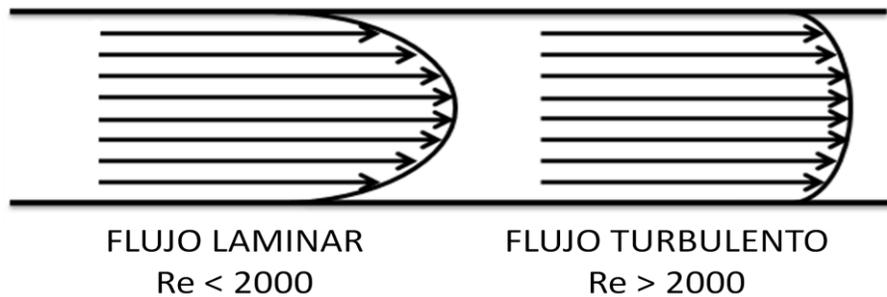
ρ : Densidad (kp/cm³)

V: Velocidad (m/s)

D: Diámetro (mm)

μ : Viscosidad dinámica (g/cm-s)

Figura 2 .Perfil de velocidades



Fuente: Baker, 2000

A continuación se presentan las ecuaciones que explican el comportamiento al interior de una tubería a presión cuando el flujo es laminar, es decir cuando el número de Reynolds es menor a 2000 (Baker, 2000):

$$\frac{v}{v_{max}} = \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \quad (3)$$

Donde:

Vmax:	Velocidad máxima	(m/s)
r:	Radio	(m)
R:	Área mojada/perímetro mojado	(m ²)

Para este caso, donde el perfil de velocidades tiene la forma de una parábola, la velocidad media en el conducto es la mitad de la velocidad máxima (ver ecuación 4) (Baker, 2000).

$$V_m = \frac{V_{max}}{2} \quad (4)$$

Donde:

V _m :	Velocidad media en la tubería	(m/s)
------------------	-------------------------------	-------

Cuando el flujo de agua al interior de una tubería a presión pasa de laminar a turbulento, es decir cuando el número de Reynolds es mayor a 2000, la curva del perfil de velocidad cambia y se explica con las ecuaciones para Flujo Hidráulicamente liso (FHL) y Flujo Hidráulicamente Rugoso (FHR), ecuaciones 5 y 6 respectivamente (Baker, 2000).

$$FHL = \frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{Re \sqrt{f}}{2.51} \quad (5)$$

$$FHR = \frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{3.7 d}{K_s} \quad (6)$$

Donde:

f: Factor de fricción

K_s: Rugosidad absoluta

En general cuando el perfil de velocidades se encuentra plenamente desarrollado, la velocidad media se calcula integrando la expresión de la velocidad en toda el área y dividiendo el resultado por la sección de la tubería. Con un flujo turbulento se integrará la expresión anterior por toda el área (ecuación 7). Calculando el caudal a partir de dicha velocidad media por toda el área de dicha tubería o sección (ecuación 8) (Baker, 2000).

$$V_m = \frac{\int_0^R V 2\pi \times r \times dr}{2\pi R} \quad (7)$$

Donde:

A: Área de la sección de tubería (m²)

$$Q = V_m \times A \quad (8)$$

Por este motivo el principal problema de los instrumentos de medición de caudal es la incapacidad de integrar la velocidad considerando todos los puntos de la sección de tubería. Por lo que solo estiman la velocidad promedio a partir de la medición en uno o varios puntos, razón por la cual se presentan graves errores en la medición del caudal cuando hay variaciones en la forma del perfil de velocidades, es decir la relación entre la velocidad medida y la media (Palau, 2005).

5.3 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL EN TUBERÍAS CERRADAS Y A PRESIÓN

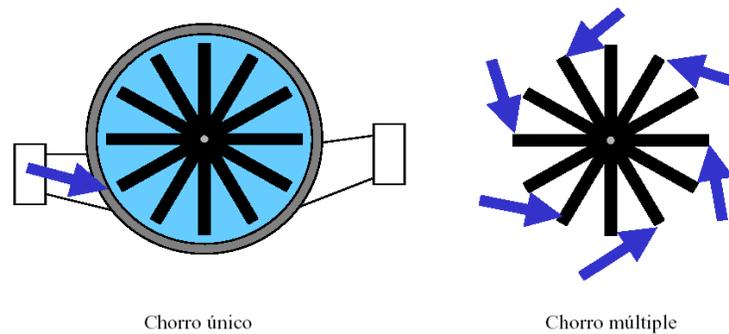
En primer lugar la medición de agua se define como el conjunto de equipos, elementos y actividades que permiten obtener, analizar y divulgar datos operativos relativos a los caudales, volúmenes, presiones y niveles de agua en los sistemas de abastecimiento (Bourguett et al, 2001), y está conformado por dos partes diferentes, un elemento primario que está en contacto con el fluido e interacciona con el mismo y un elemento secundario que se encarga de transformar estas interacciones en las lecturas y registros.

Los principales instrumentos de medición de caudal para conductos cerrados y a presión y sus principios de funcionamiento se describen en este capítulo. Los medidores más destacados son de: velocidad, volumétricos, deprimógenos, ultrasónicos y electromagnéticos.

Medidores de velocidad: Su funcionamiento se basa en la incidencia tangencial de un chorro de agua sobre la turbina alojada en el interior de la carcasa. La velocidad de giro de la turbina es directamente proporcional a la velocidad de impacto del agua sobre la misma y por tanto, del caudal circulante. Cualquier alteración en la relación existente entre el caudal circulante y la velocidad de giro en la turbina, afectará a los errores de medida y alterará la curva de error (Arregui

et al, 2007). Las tecnologías más comunes son los de chorro único y chorro múltiple, la diferencia entre ambos radica en la superficie entre el agua y la turbina, en los de chorro único el agua solo toca a la turbina en un punto, mientras que en los de chorro múltiple la totalidad de la periferia de la turbina está en contacto con el agua (ver figura 3).

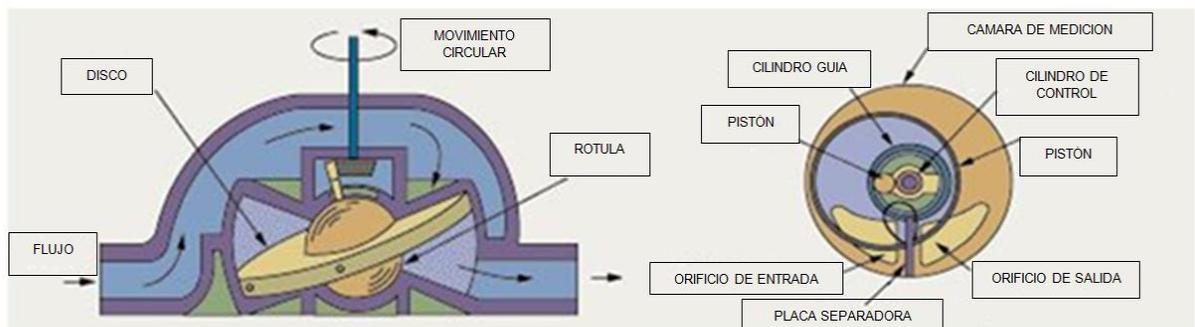
Figura 3. Contadores de velocidad de chorro único y múltiple



Fuente: Palau. 2005

Medidores volumétricos: Basa su principio de funcionamiento, a diferencia de los contadores de velocidad, en el conteo del número de llenados y vaciados de una o dos cámaras de volumen conocido. Existen dos tecnologías, los de pistón rotativo y disco nutante (ver figura 4). La diferencia entre ellos se encuentra en el elemento móvil, los primeros poseen un pistón rotativo que gira excéntricamente mientras que el movimiento en los segundos los realiza un disco giratorio (Palau, 2005).

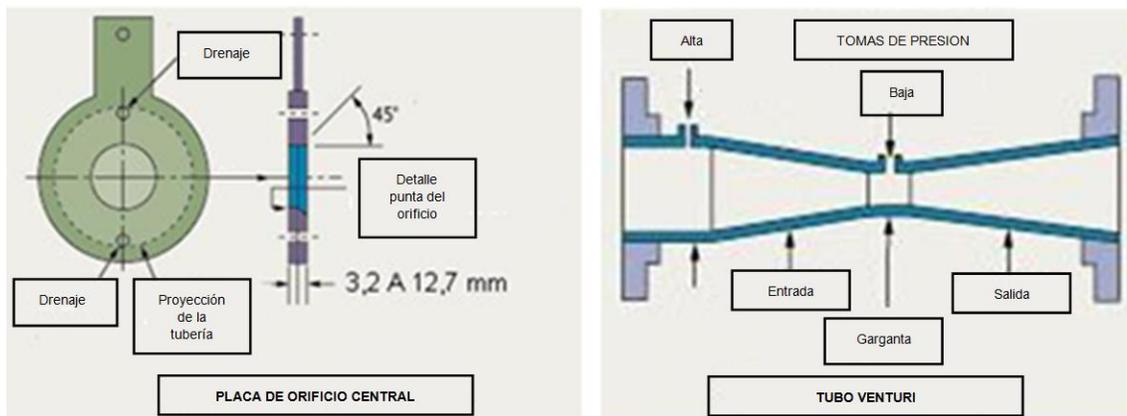
Figura 4. Contadores volumétricos



Fuente: Frangipani, 2005.

Medidores deprimógenos: Se conocen también como medidores de presión diferencial y su funcionamiento se basa en una reducción gradual o brusca de la sección de flujo en movimiento, ocasionando con esto un aumento de la velocidad del fluido y una disminución en la presión del mismo. De la correlación de la variación de la presión con la velocidad es posible determinar el caudal del volumen (DTA D2 - PNCDA, 2004). Los medidores que pueden ser incluidos en esta categoría son el tubo pitot, tubo venturi, placas de orificio y el medidor diferencial proporcional (ver figura 5).

Figura 5. Medidores deprimógenos



Fuente: PNCDA, 2004

Medidores de caudal por ultrasonido: Existen dos tipos de medidores denominados caudalímetros de ultrasonido de tiempo de tránsito y caudalímetros de efecto Doppler (ver figura 6). El primero utiliza la variación de la velocidad del sonido en un medio en movimiento y el segundo emplea el cambio de frecuencia que sufre una onda sonora al reflejarse en un cuerpo en movimiento y ser observada por un sensor que permanece en todo momento fijo (Arregui et al, 2007).

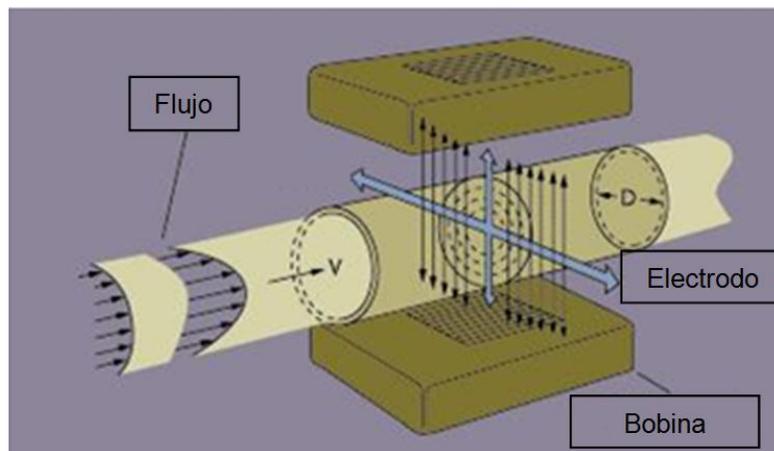
Figura 6. Caudalimetro de ultrasonido



Fuente: Sensors. 2009. Disponible en <http://www.sensorsmag.com/articles/1097/flow1097/main.shtml>

Medidores Electromagnéticos: Su funcionamiento se basa en el principio de la ley de Faraday, la cual dice: “el voltaje inducido en un conductor, que se desplaza a través de un campo electromagnético, es proporcional a la velocidad de ese conductor.” Para medir esta velocidad el medidor cuenta con bobinas magnéticas situadas en un tubo y un par de electrodos que están en contacto con el fluido, siendo conocida la distancia entre los electrodos, la tensión que se forma entre los electrodos es directamente proporcional a la velocidad del fluido (ver figura 7). (Frangipani, 2005).

Figura 7. Medidor electromagnético

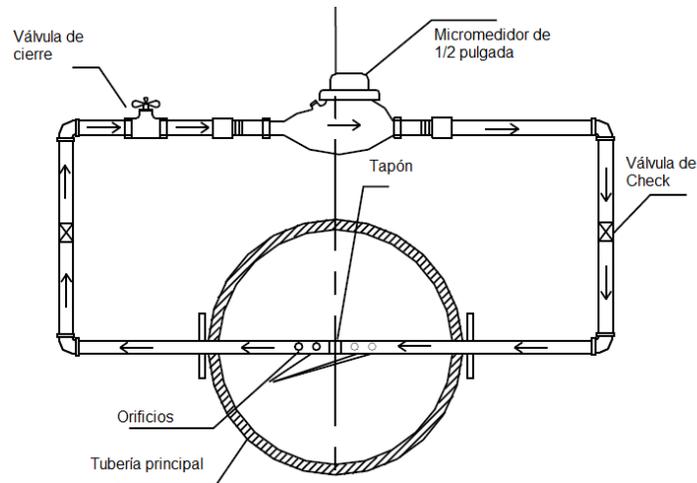


Fuente: Frangipani, 2005

5.4 MEDICIÓN DE TIPO PROPORCIONAL

En contraste con los medidores descritos en los puntos anteriores, existe el medidor de tipo proporcional (ver figura 8) que tiene como objetivo medir una porción del flujo desviada a través de un “by-pass”, que posee un medidor de agua. La derivación se hace a través de un orificio, lo que proporciona la presión suficiente para desviar una parte del agua a través del “by-pass” y realizar la medición (Mc Fadden, 2006).

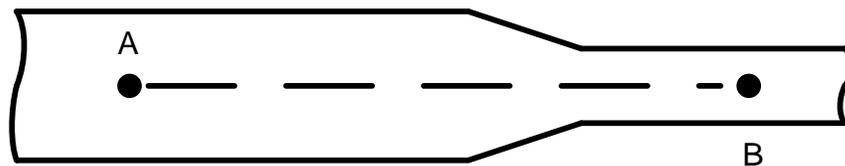
Figura 8. Medidor proporcional o de derivación



Fuente: PNCDA 2004

Este tipo de medición hace parte de los medidores deprimógenos los cuales se caracterizan por presentar una reducción gradual o brusca de la sección de flujo en movimiento (Ver figura 9). Por tal razón la mejor forma de entender el funcionamiento de un medidor deprimógeno es aplicando la ecuación de Bernoulli entre dos puntos que tienen una pérdida de carga (ecuación 9).

Figura 9. Reducción de la sección de flujo en movimiento



$$\frac{V_1}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + H_f + H_m \quad (9)$$

Donde:

$\frac{V_1}{2g}$:	Altura de la velocidad	(m/s)
$\frac{P_1}{\gamma}$:	Altura de presión	(m)
Z:	Elevación	(m)
H_f :	Pérdidas por fricción	(m)
H_m :	Pérdidas menores	(m)

Suponiendo que los puntos A y B tienen la misma cota y están suficientemente próximos, la diferencia de presión entre ellos será proporcional a la diferencia de velocidades medias del flujo en A y B.

Como el ingreso de agua al medidor se realiza mediante orificios de diferente diámetro, la ecuación teórica que describe la descarga a través de un orificio y explica matemáticamente la correlación del diferencial de presión con la velocidad del escurrimiento para determinar el caudal está definida por la ecuación 10 (USBR, 2001):

$$Q = K_t \sqrt{2 \times g \times h} \times A_T \quad (10)$$

Donde:

Q =	Caudal	(m ³ /s)
K_t =	Coeficiente de correlación	
g =	Gravedad	(m/s ²)
h =	Diferencial de presión	(m)
A_T =	Área total del orificio	(m ²)

La calibración del medidor se realiza determinando un coeficiente de correlación K_t , que relacione el caudal de agua que circula por la tubería principal y el caudal desviado por el “by-pass”, en un tiempo determinado. En la actualidad no existe una curva de calibración estándar, lo que exige la calibración del medidor cada vez que se instala en un sistema de abastecimiento de agua, disminuyendo la confiabilidad de este sistema de medición (DTA D2 - PNCDA, 2004).

5.5 INVESTIGACIONES REALIZADAS

La necesidad de iniciar un proceso que promueva la gestión adecuada del recurso hídrico en las pequeñas localidades y el sector rural de América Latina, ha obligado a la investigación y búsqueda de opciones tecnológicas para la macromedición de agua que sean de bajo costo, fácil construcción y mantenimiento, debido a la poca disponibilidad de recursos económicos. Problema ya solucionado en los países desarrollados, donde los sistemas de abastecimiento poseen instrumentos de macromedición de agua con un alto desarrollo tecnológico (medidores de agua electromagnéticos y ultrasónicos), en los cuales la gestión del agua se concentra en el mejoramiento de los sistemas de micromedición y reducción de las pérdidas de agua por este concepto.

El interés por mejorar la gestión del recurso hídrico a partir de la investigación y generación de conocimiento sobre el funcionamiento de los sistemas de medición incentivó a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), a través del Instituto Tecnológico del Agua (ITA) a realizar investigaciones en este tema. Arregui (1998) presentó una metodología para el análisis y gestión del parque de contadores en un abastecimiento de agua, dicha metodología hace énfasis en la importancia de generar indicadores operacionales, especialmente los de rendimiento volumétrico, que se define como *“la relación entre el volumen registrado y el volumen total aportado en un período de tiempo de referencia”*, a partir de estos indicadores se obtiene información sobre: curvas de consumos clasificados, precisión global del

sistema de medición y error en la medición, lo que permite la selección adecuada de los equipos de medición a utilizar en sistema de aprovisionamiento de agua.

En Suráfrica también se han diseñado metodologías que describen el procedimiento teórico empleado y desarrollado para la aplicación de modelos computarizados que tienen como objetivo la selección óptima del sistema de medición de agua en un sistema de abastecimiento (Jhonson, 2001). De igual manera en España se continuo con la investigación y evaluación el rendimiento volumétrico del sistema de medición a través de la determinación de los patrones de consumo, estimando el porcentaje total de consumo en los diferentes caudales y el error ponderado de los medidores de agua, además se diseñó un modelo de decisión económico para la selección óptima del sistema de medición (Arregui et al, 2003).

Posteriormente Palau, (2005) realizó investigaciones dirigidas a mejorar los sistemas de medición de caudal en redes de distribución de agua a presión, resaltando la importancia de medir los caudales de agua circulante por las redes de un sistema de abastecimiento, ya que solo a partir de estas mediciones es posible evaluar la cantidad de agua disponible y trazar las diferentes políticas a seguir para asegurar la disponibilidad y mejorar la distribución de agua en la red. Para ello se exploran los diferentes tipos de medición existentes y su respectivo funcionamiento, señalando que el principal problema de los sistemas de abastecimiento de agua es la selección incorrecta del instrumento de medición a utilizar, porque no se tienen en cuenta factores como: el tipo de tecnología, diámetro, caudal de funcionamiento, velocidad y presión en la red de distribución, entre otras.

En Estados Unidos de América (USA), los esfuerzos por reducir las pérdidas de agua se han concentrado principalmente en el mejoramiento de los sistemas medición existente en las diferentes ciudades, ya que es un elemento esencial

para la administración, conservación del recurso hídrico, conocimiento de la demanda de agua y el establecimiento de sistemas de auditorías eficientes en los sistemas de abastecimiento (EPD, 2007).

De igual manera la Asociación Internacional del Agua (IWA) y el ITA publicaron un libro que tiene como objetivo realizar una adecuada gestión y optimización del sistema de medición de las empresas de agua en versión inglesa y española, que son respectivamente: “Integrated Water Meter Management” y “Gestión Integral de Contadores de Agua” (Arregui et al 2007), estas publicaciones presentan las experiencias combinadas de la investigación y la aplicación práctica de las metodologías desarrolladas para la gestión de los contadores de agua y su contribución en el mejoramiento de la gestión técnica y comercial para Europa. Se observa entonces el creciente interés de instituciones académicas y no académicas por generar metodologías y realizar investigaciones que permitan la selección adecuada del sistema de medición, además de conocer el estado real de funcionamiento de los mismos, determinando: el error en la medición, los patrones de consumo y las características de funcionamiento e instalación, información fundamental para optimizar el proceso comercial y reducir las pérdidas de agua en el mismo. Además de generar herramientas que permiten mejorar la planificación en las empresas de acueducto y hacer un uso eficiente del agua.

En América Latina el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) desarrolló trabajos para realizar un manejo integral del recurso hídrico a través de la implementación de sistemas de medición como una herramienta básica para la operación de los sistemas de abastecimiento de agua, con la publicación de una guía de medición de agua, en la cual se presentan los diferentes tipos de medidores de caudal para conductos cerrados a presión y las formas de instalación, resaltando la importancia de seleccionar un equipo de medición de caudal teniendo en cuenta las condiciones hidráulicas propias de cada sistema de acueducto (Hueb, et al, 1985).

Seguidamente el CEPIS publicó una guía para la construcción de medidores primarios tipo Pitot modificados que tienen por objetivo medir la presión dinámica o presión diferencial, para obtener la velocidad promedio del caudal de acuerdo a una distribución de velocidades esperadas (Rodríguez, 1985). También publicó una guía en la cual se explica brevemente el método que se debe seguir para construir un medidor de tipo proporcional, basado en un tupo pitot en forma de “L” (Saenz et al 1985). Toda esta serie de guías publicadas por el CEPIS tienen como objetivo lograr un desarrollo de tecnologías apropiadas y de fácil acceso y mantenimiento para las comunidades puedan llevar a cabo la medición de caudales en sus sistemas de abastecimiento de agua.

En 1990 Brasil incluyó el manejo de las pérdidas de agua en las empresas de acueducto como una herramienta para promover y realizar un uso racional del agua en los sistemas de abastecimiento público, un ejemplo es el programa nacional para combatir las pérdidas de agua (PNCDA), dirigido a ordenar las políticas y programas de conservación del recurso hídrico. Como resultado se emitieron una serie de documentos técnicos de apoyo, entre los cuales, se encuentra un documento dirigido exclusivamente a la medición de agua como un instrumento indispensable para la administración y operación de sistemas públicos de distribución de agua, ya que permite la implementación y visualización del comportamiento de indicadores técnicos en el sistema de acueducto. De igual manera este documento menciona la medición de tipo proporcional como una opción viable y de bajo costo para el registro de caudales en acueductos, pero poco confiable, ya que no existe una adecuada curva de calibración para este tipo medidores, lo que implica calibrar el medidor cada vez que se instale (DTA D2 - PNCDA, 2004).

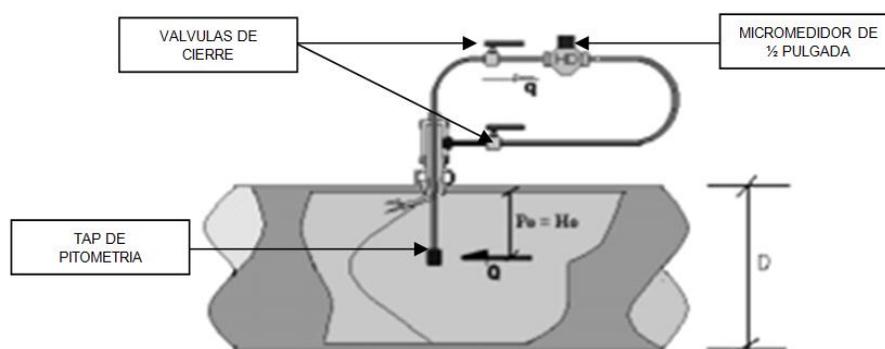
También se destaca la importancia de la pitometría, basada en campañas de medición de presiones, parámetro que nos permite optimizar el funcionamiento de la red disminuyendo las pérdidas de agua por fugas no visibles. Adicionalmente es

fundamental resaltar que estos procesos están diseñados para que sean de carácter permanente y autosostenibles en las empresas (PNCDA, 2004).

De igual manera el programa de PNCDA inició investigaciones en sistemas de medición alternativos basados en la presión diferencial, como se observa en la metodología para la calibración de medidores de presión diferencial basados en tubos de pitot tipo “cole”, los cuales son frecuentemente empleados por las empresas de abastecimiento de agua y saneamiento en Brasil para la medición de velocidades y volúmenes de agua utilizando tres métodos diferentes. El objetivo de la investigación fue determinar un coeficiente de calibración en función del número de Reynolds para un diámetro unitario y verificar su aumento o disminución dependiendo del diámetro, convirtiendo esta tecnología en una opción más accesible pero de difícil mantenimiento in situ. (Espírito Santo y Gomez, 2000).

Consecutivamente Camuri (2001) efectuó una investigación que dió como resultado la presentación de un medidor y una técnica de medición empleando una tecnología de tipo proporcional (ver figura 10). El equipo está basado en el tubo de pitot, convirtiéndose en una alternativa adecuada para el registro de los volúmenes de producción de las empresas de agua, facilitando la construcción de índices operacionales de eficiencia, además de ser una tecnología confiable y de fácil acceso, instalación y mantenimiento desde el punto de vista técnico y económico para las empresas.

Figura 10. Macromedidor con tecnología de tipo proporcional



Fuente. Camuri. 2001.

También se presentó una estrategia para reducir las pérdidas de agua facturada, enfocada en la gestión de los procesos de operación, comercialización del servicio e inversión en tecnologías accesibles que permitan la reducción de las pérdidas de agua en los sistemas de abastecimiento (Bággio et al, 2001). Así mismo se han realizado trabajos con el objetivo de mejorar la gestión metrológica para los sistemas de abastecimiento de agua, debido a la situación tan crítica en los sistemas de distribución con relación a las estaciones de macromedición y la imposibilidad del retiro de los mismos para su calibración en el laboratorio, por lo tanto se plantea una metodología para estimar el porcentaje de error basados en tubos de pitot y venturi. (Tadeu et al, 2003).

En Cuba el Instituto Superior Politécnico “Jose Antonio Echevarria” solicitó un certificado de autor de invención ante la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial para un dispositivo hidrométrico para descarga libre y forzada en tuberías, que tiene aplicación en el campo de la hidráulica para determinar los volúmenes de agua entregados y el objetivo es relacionar el gasto que circula por un “by-pass” con el gasto que pasa por la tubería principal con la ayuda de un metro contador doméstico (Oficina Cubana de Propiedad Industrial, 1996). Es importante resaltar que el certificado solo aplica sobre el dispositivo, pero no sobre la estandarización

y parametrización de la curva de calibración y los posibles factores del entorno que pueden afectar el funcionamiento del equipo.

En México se ha trabajado en el desarrollo de metodologías y tecnologías que contribuyen a mejorar el manejo integral del recurso hídrico, un ejemplo de su evolución se evidencia en los trabajos realizados para el control de presiones y pérdidas de agua en la red de distribución del distrito federal mediante la sectorización de la red, el producto de este arduo trabajo realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) se refleja en el libro “Recuperación Integral de las Pérdidas de Agua Potable” (Bourguett et al, 2001), el cual resume las experiencias y desarrollos de nueve años de estudio sobre el control y manejo de las pérdidas de agua, haciendo énfasis para que el diseño de las nuevas redes de distribución tengan sectores hidrométricos, y realizar esta sectorización en las redes ya existentes.

Igualmente el IMTA desarrolló metodologías para optimizar los recursos por medio de la reducción de los costos, asegurando la confiabilidad del suministro mediante la implementación y desarrollo de indicadores de eficiencia que permitan realizar un análisis comparativo que refleje las ventajas de optimizar el sistema: mejora del servicio a los usuarios, eficiencia operativa e indicadores de funcionamiento hidráulico. Igualmente presentaron una serie autodidáctica de medición del agua basada en tubos de pitot y tubos venturi, en las cuales se presentan las metodologías para la instalación, manejo y mantenimiento de este tipo de tecnologías dirigido al personal técnico encargados de su funcionamiento (Ruiz, 2005).

En Colombia la gestión integral del recurso es un proceso que se inició con la implementación del programa del manejo de las pérdidas de agua en los sistemas de abastecimiento de agua a través del programa de Agua No Contabilizada (ANC), impulsado por el Ministerio de Desarrollo Económico desde el año 2000 y

continuado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), complementando el marco jurídico que tiene como objetivo promover el uso eficiente y ahorro del agua con la Ley 373 de 1997. El avance en este camino se refleja en la determinación de los porcentajes de ANC para los diferentes tipos de poblaciones (ver tabla 1), del cual es importante resaltar que las mayores pérdidas de agua se presentan en los acueductos de los municipios con menos de 2400 usuarios.

Tabla 1. Índice de agua no contabilizada en algunos municipios y/o empresas del país

RANGO	IANC
Grandes ciudades (Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla)	32%
Ciudades Intermedias (100.000 habitantes ó 20.000 usuarios)	41%
Municipios entre 10.000 y 20.000 usuarios	42%
Municipios con menos de 2.400 usuarios (12.000 habitantes)	51%

Fuente: Dirección General de Agua Potable y Saneamiento Básico, Ministerio de Desarrollo Económico, 2000

Igualmente, Guerrero y otros (2008) han realizado investigaciones que tienen por objetivo el diseño y formulación de metodologías para: “el *diagnóstico y formulación de planes de reducción de pérdidas de agua en acueductos de pequeñas localidades*” y la “*evaluación económica de proyectos de reducción de pérdidas y uso eficiente de agua, en empresas de acueducto*”. Pero no existen avances significativos a nivel investigativo en la implementación de tecnologías para la medición de agua de fácil acceso y mantenimiento que permitan a las empresas que operan en municipios menores o zonas rurales tener un adecuado control sobre los caudales y volúmenes de agua consumidos en sus respectivos sistemas de aprovisionamiento de agua.

6. METODOLOGIA

El desarrollo preliminar del prototipo de medición de agua de tipo proporcional se realizó en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Libre “Seccional Pereira”, una vez finalizada esta etapa, se seleccionó el acueducto comunitario de la vereda Mundo Nuevo perteneciente a la zona rural del municipio de Pereira del departamento de Risaralda para realizar el montaje del medidor de tipo proporcional de 4 pulgadas.

6.1 METODOLOGÍA PARA EL OBJETIVO: ESTANDARIZACIÓN DE UN MEDIDOR DE AGUA DE TIPO PROPORCIONAL PARA TUBERÍAS DE 4 PULGADAS

La estandarización y parametrización de la estación de medición de tipo proporcional, se dividió en dos fases o etapas. En la primera fase se realizó el desarrollo preliminar del prototipo de medición en laboratorio y en la segunda etapa se evaluó el funcionamiento de medidor de agua en un sistema de abastecimiento de agua.

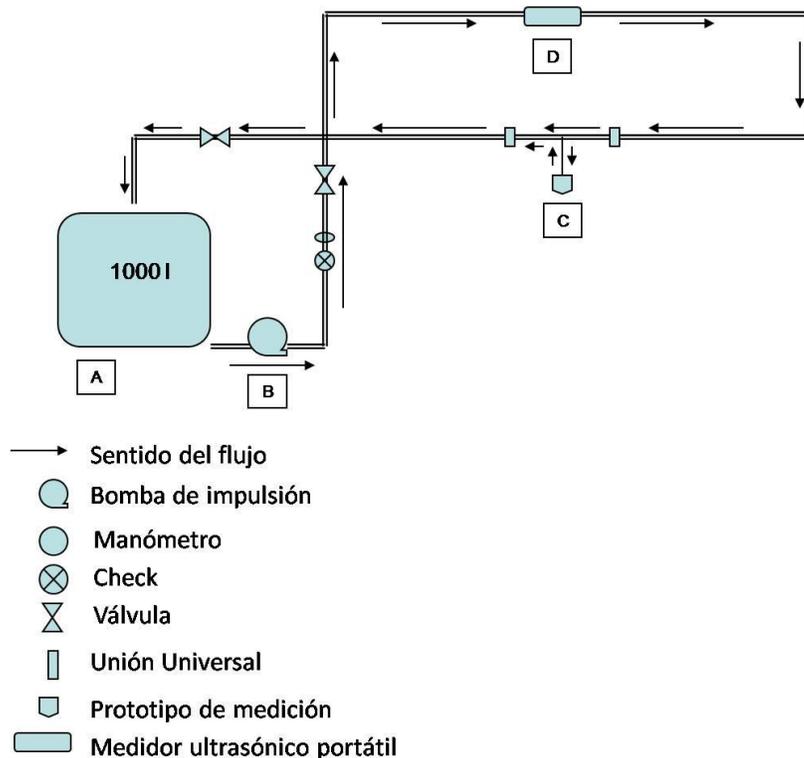
6.1.1 ESTANDARIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE UN MEDIDOR DE TIPO PROPORCIONAL EN LABORATORIO

6.1.1.1 Montaje del medidor en Laboratorio

En esta etapa se realizó el diseño y construcción del banco de pruebas utilizado para el desarrollo y calibración del prototipo de macromedición (ver figura 11). Este consta de un tanque de un metro cúbico (A) el cual está conectado a una bomba con diferencial y variador de velocidad (B), que permite controlar el caudal y la presión de agua a suministrar en la tubería que se conecta a ella y en la cual se encuentra el prototipo de medición de caudal (C). La verificación del caudal

circulante por la tubería se efectuó con la instalación de un medidor ultrasónico portátil (D) en la tubería principal, marca DYNASONICS, con el certificado de calibración C6 – 012830 y calibrado de acuerdo al procedimiento ISO DAS-206-003. El banco de pruebas tiene un sistema de recirculación de agua que permite mantener el caudal y la presión constantes.

Figura 11. Esquema Banco de pruebas



Fuente: Elaboración propia.

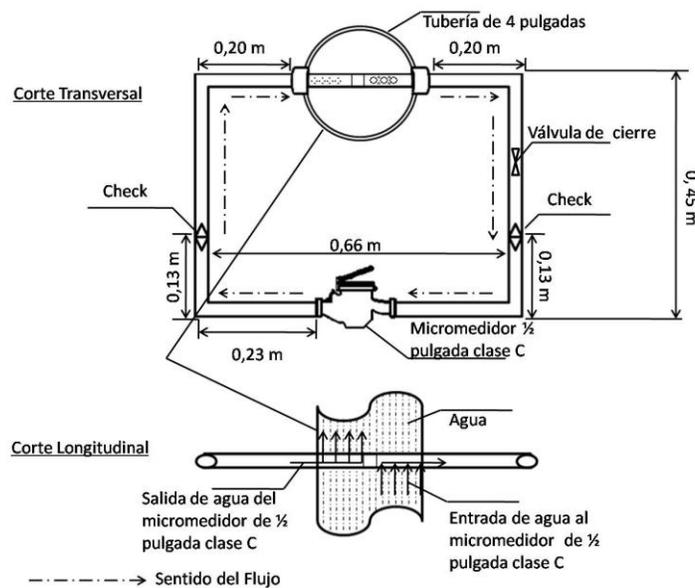
6.1.1.2 Prototipo de medición de tipo proporcional

Para el diseño del medidor de caudal de tipo proporcional se modificó el esquema encontrado en el documento D2 de macromedición del Programa Nacional de Combate en el Desperdicio de agua del Brasil (PNCDA DTA D2; 2004). El prototipo de medición consiste en tubería de 4 pulgadas de la cual sale una derivación o “by - pass” de ½ pulgada, la derivación tiene una válvula de cierre y

dos checks para garantizar la dirección del flujo en un solo sentido, de igual manera se instaló un micromedidor de velocidad chorro único clase C para registrar el volumen de agua que pasa por la tubería, todos los accesorios instalados son de ½ pulgada (ver figura 12 – corte transversal). El tubo de ½ pulgada tiene 7 orificios para la entrada de agua, de los cuales 3 son de 11/32 de pulgada y 4 de 3/16 de pulgada de diámetro, para un área total de 2.5 pulgadas cuadradas, el tubo de salida de agua tiene 4 orificios de 11/32 de pulgada de diámetro, para un área total de 1.49 pulgadas cuadradas (ver figura 12 – corte longitudinal).

Se seleccionó un micromedidor de agua de velocidad tipo chorro único porque tienen una buena resistencia a la presencia de sólidos suspendidos, es una tecnología fiable utilizada durante muchas décadas, son poco sensibles al perfil de velocidad entrante reduciendo los requerimientos de espacio en su instalación y tienen un bajo costo en el mercado (Arregui et al, 2007).

Figura 12. Esquema medidor de agua de tipo proporcional



Fuente: Elaboración propia.

6.1.1.3 Medición y registro de la información en laboratorio

En esta fase de la investigación se determinó el rango de trabajo mínimo y máximo de caudal y presión para el prototipo de medición, teniendo en cuenta factores como: caudal de arranque del prototipo y la capacidad de la bomba. Las mediciones se realizaron durante una hora registrando datos cada 5 minutos, siguiendo el método utilizado por Espirito Santo y Gomez (2000). Antes de iniciar las mediciones se esperó a que se estabilizará el sistema durante 10 minutos, para confirmar la presión del agua en la tubería se instalaron manómetros en el banco de pruebas, de igual forma se instaló un caudalímetro de flujo ultrasónico con el objetivo de verificar el caudal y el volumen de agua que circula por la tubería principal del agua del banco de pruebas.

6.1.1.4 Diseño experimental

Como el objetivo del prototipo de medición de tipo proporcional es registrar el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo, es importante determinar un modelo, factor y/o gráfico que relacione el volumen total que pasa por la tubería de 4 pulgadas (*vol_{total} – Variable dependiente*), respecto al volumen de agua que pasa por el micromedidor (*vol_{micro}*), ubicado en el prototipo de medición, con *presiones y caudales de agua (variables independientes)* seleccionadas aleatoriamente y de esta forma conocer su comportamiento y determinar la relevancia de cada una de ellas dentro del modelo.

Teniendo en cuenta lo anterior, la técnica de análisis estadístico que más se ajusta a los requerimientos mencionados en el párrafo anterior es el análisis de regresión múltiple, ya que esta técnica de análisis permite explorar y cuantificar las relaciones de dependencia entre una variable dependiente o criterio (Y) y una o más variable independientes (X) (Hair et al, 2001). La fórmula básica de un modelo de regresión lineal múltiple se presenta en la ecuación 11:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (11)$$

Donde:

$Y =$ Variable independiente (voltotal)

$\beta =$ Constante

$X_k =$ Conjunto de variables independiente (Volmicro, presión y caudal)

$k =$ Coeficiente de correlación de cada variable

$\varepsilon =$ Error

De acuerdo a lo presentado en el modelo de la anterior ecuación, la variable dependiente (Y) se interpreta como una combinación lineal de un conjunto de variables independientes (X_k), las cuales van acompañadas de un coeficiente (β_k) que indica el peso relativo de esa variable en la ecuación. Además se incluye una constante (β_0) y un error aleatorio (ε) que recoge todo lo que las variables independientes no son capaces de explicar.

La técnica de análisis de regresión lineal múltiple utilizada para analizar los datos obtenidos en el laboratorio es la de “stepwise” o selección por pasos, esta técnica selecciona en orden descendente (mayor a menor) las variables independientes que más se correlacionan (en valor absoluto) con la variable dependiente. El proceso se detiene cuando no quedan variables que superen los criterios de entrada.

Se utilizó el paquete estadístico SPSS 15 para Windows para llevar a cabo el análisis de regresión lineal múltiple y determinar la ecuación lineal con fines predictivos.

6.1.2 ESTANDARIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE UN MEDIDOR DE TIPO PROPORCIONAL EN CAMPO

6.1.2.1 Montaje del medidor en campo

En esta fase de la investigación se realizó una verificación del modelo obtenido en la fase de laboratorio, esta validación se realizó instalando el prototipo de medición de agua de tipo proporcional en la aducción de la Quebrada Carrillo del sistema de abastecimiento de agua de la Vereda Mundo Nuevo, teniendo en cuenta que el lugar seleccionado en el sistema de abastecimiento cumple con los criterios mínimos de funcionamiento en cuanto a caudal (caudales mayores a $9.21 \text{ m}^3/\text{h}$ las 24 horas del día) obtenidos en la fase de laboratorio.

6.1.2.2 Medición y registro de la información en campo

Una vez instalado el medidor de agua de tipo proporcional se procedió a verificar que el tubo esté completamente lleno y el caudal que circula con el fin de utilizar el modelo que más se ajuste para dicho caudal y determinar el tamaño de la muestra. Las mediciones se realizaron durante 8 días registrando datos las 24 horas del día cada 10 minutos y de esta manera ser consecuentes con la metodología utilizada para el registro de información en el laboratorio de hidráulica. Para verificar el caudal y volumen de agua que ha circulado en la tubería principal se instaló como *testigo* un Caudalímetro de flujo ultrasónico, aplicando el mismo procedimiento empleado en el laboratorio para la recolección de datos.

6.1.2.3 Análisis de la Información recolectada en campo

El análisis realizado a la información recolectada en campo consistió en determinar el volumen de agua que circula en la tubería utilizando el modelo o ecuación determinado en el laboratorio y compararlo con el volumen registrado por el Caudalímetro de flujo ultrasónico, si la diferencia entre ambos volúmenes es mayor a dos desviaciones estándar el modelo de regresión lineal determinado en el laboratorio no es válido estadísticamente y debe ser ajustado teniendo en cuenta los resultados obtenidos en campo. De igual manera se utilizó el paquete estadístico SPSS 15 para realizar la verificación de la ecuación lineal.

6.2 FORMULAR UNA METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN MEDIDOR DE TIPO PROPORCIONAL PARA TUBERÍAS DE 4 PULGADAS.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el proceso realizado para estandarizar, parametrizar y evaluar el funcionamiento del medidor de agua de tipo proporcional, se procedió a elaborar un manual en el cual se especifican el material y los accesorios que se deben utilizar para la construcción de un medidor de tipo proporcional, también se establecen los criterios y procedimientos requeridos para la instalación, calibración, mantenimiento del medidor, identificando las variables y/o factores que afectan la medición y finalmente se establece y compara el costo de un medidor de agua de tipo proporcional versus el costo de un medidor de agua convencional.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 ESTANDARIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DEL MEDIDOR DE AGUA DE TIPO PROPORCIONAL EN LABORATORIO

La metodología propuesta durante la fase de laboratorio permitió conocer de manera confiable el comportamiento, las condiciones de funcionamiento del medidor, la curva de error y los factores hidráulicos que pueden afectar la medición.

7.1.1 Caudales de funcionamiento

Este proceso se inició al determinar que el rango de caudal evaluado en el laboratorio es 1.12 y 5 l/s, que respectivamente corresponden al caudal mínimo derivado por la tubería principal, a partir del cual empieza a funcionar y registrar datos el micromedidor de ½ pulgada instalado en el prototipo de medición de agua y a la capacidad máxima de caudal de la bomba. El rango de presiones a evaluado varía entre 15 y 41 metros columna de agua (mca), que corresponde a la presión mínima de servicio exigida por el Reglamento Técnico del sector del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000 y la capacidad máxima de la bomba respectivamente.

Los caudales característicos de funcionamiento para el medidor de agua de tipo proporcional, se determinaron de acuerdo a las definiciones realizadas por la Norma Técnica Colombiana – NTC 1063 - y la normatividad europea para contadores de agua (Palau, 2005). En primer lugar se estableció que el caudal de arranque o mínimo es de 4.02 (m³/h), lo que equivale a 1.12 l/s, es decir que a partir de este caudal circulante por la tubería principal el micromedidor de agua instalado en el medidor proporcional (ver figura 11) empieza a funcionar y registrar datos sobre el volumen de agua que ha circulado en la tubería. Igualmente se

determinó que el caudal nominal (Q_n) es de $9 \text{ m}^3/\text{h}$ y el caudal máximo (Q_{max}) es de $18 \text{ m}^3/\text{h}$, y que respectivamente corresponden al caudal medio de funcionamiento del medidor y al caudal máximo suministrado por la bomba utilizada en el banco de pruebas, pero puede funcionar con caudales superiores al suministrado por la bomba.

De acuerdo a los caudales de funcionamiento determinados para el medidor de agua objeto de estudio de esta investigación, este debe ser clasificado como un micromedidor porque tiene un caudal nominal (Q_n) menor a $15 \text{ m}^3/\text{h}$ (Palau, 2005), con el inconveniente de que se estarían clasificando como micromedidores instrumentos que requieren un control más exhaustivo. Pero el medidor de agua de tipo proporcional se considerará como un macromedidor de agua, porque será una alternativa de medición a instalar en las captaciones, entrada y salida de las plantas de tratamiento de agua potable, entrada y salida de tanques de almacenamiento y redes de distribución, lugares por los cuales circulan grandes volúmenes de agua, exigiendo un seguimiento individualizado del sistema de medición instalado.

Es importante mencionar que un requisito indispensable para la instalación del medidor es tener caudales mayores o iguales a $4.02 \text{ m}^3/\text{h}$ en el lugar seleccionado, si se presentan caudales inferiores a este valor durante la operación y funcionamiento en el sistema de abastecimiento, se dejaría de contabilizar el volumen de agua que circula durante el periodo del tiempo que se presente este caudal.

7.1.2 Recolección y análisis de los datos de laboratorio

Los datos recolectados en el banco de pruebas (ver fotografía 1), se analizaron utilizando un modelo de regresión lineal múltiple con el objetivo de establecer una relación de dependencia entre una variable dependiente y dos ó más variables

independientes. En este caso se pretende establecer una relación entre la variable dependiente volumen total (*voltotal*), que corresponde al total de agua que circula por la tubería principal, respecto al volumen de agua que circula por el micromedidor instalado en la tubería de ½ pulgada del prototipo de medición, evaluando el cambio en su comportamiento con diferentes caudales y presiones. Las variables independientes utilizadas son: *Volumen del micromedidor (Volmicro)*, *presión* y *caudal*.



Fotografía 1. Banco de pruebas del medidor de tipo proporcional

El tamaño de muestra calculado para las pruebas de laboratorio fue de 242 muestras cada una con 13 repeticiones, en total se recolectaron 3146 datos, los cuales fueron seleccionados aleatoriamente. La técnica seleccionada para realizar la construcción de la ecuación de regresión múltiple es la de *pasos sucesivos* o *stepwise*, ya que esta técnica selecciona y descarta automáticamente las variables que hacen parte de la ecuación de regresión lineal, teniendo en cuenta su correlación con la variable dependiente, es decir que escoge las variables que más correlación tengan con la variable dependiente (UCA 2008).

En la tabla 2 se presenta el análisis de regresión lineal realizado por el programa SPSS 15 de los datos recolectados en el laboratorio, observando el cambio en el coeficiente de determinación (R^2) de cada una de las variables independientes o predictoras (*volmicro*, *presión* y *caudal*), respecto a la variable dependiente o criterio (*Volttotal*).

Tabla 2. Resumen del modelo de regresión lineal múltiple

Modelo	R	R cuadrado corregida	Estadísticos de cambio			
			Cambio en R cuadrado	gl1	gl2	Sig. del cambio en p
1	0.970(a)	0.941(a)	0.941	1	3144	0.000
2	0.975(b)	0.951(b)	0.009	1	3143	0.000
3	0.975(c)	0.951(c)	0.001	1	3142	0.000

a Variables predictoras: (Constante), *volmicro*
 b Variables predictoras: (Constante), *volmicro*, *caudal*
 c Variables predictoras: (Constante), *volmicro*, *caudal*, *presión*
 d Variable dependiente: *volttotal*
 p Probabilidad
 *Grados de libertad
 Fuente: Elaboración propia.

Este cambio se observa en tres modelos diferentes, El modelo 1, estudia únicamente la relación entre la variable independiente *volmicro* y la variable dependiente *volttotal*, observando que el modelo tiene un $R^2 = 0.941$ con una probabilidad menor a 0.05 ($p < 0.05$), rechazando la hipótesis nula de que el valor de R es cero e indicando que la variable es relevante dentro de la ecuación de regresión, por tanto se puede afirmar que la variable *volmicro* contribuye a explicar en 94.1 % la varianza de la variable dependiente *volttotal*, que corresponde al volumen total de agua que circula por la tubería principal.

En el modelo 2 se incorpora la variable de caudal, es decir que el modelo analiza de manera simultánea la relación entre las variables predictoras *volmicro* y *caudal* respecto a la variable criterio *volttotal*, en este modelo el $R^2 = 0.951$ y como $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula de que el valor de R es cero en el modelo, por lo

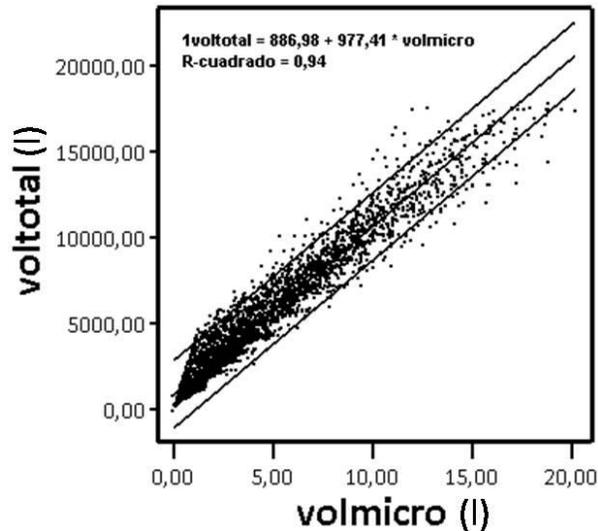
que se puede afirmar que las variables analizadas son relevantes en la ecuación de regresión y que la variable de *caudal* incorporada en el modelo 2 contribuye a mejorar en un 1% la explicación de la varianza en la variable dependiente *voltotal*.

Finalmente en el modelo 3 se analiza la relación entre las variables independientes *volmicro*, *caudal* y *presión* y la variable dependiente *voltotal*, en este modelo el valor de $R^2 = 0.951$, indicando que la variable *presión*, incorporada en este modelo mejora la explicación de variable *voltotal* en un 0.001% y como $p < 0.05$ se puede afirmar que el modelo contribuye de forma significativa a explicar el comportamiento de la variable dependiente. En conclusión, se puede afirmar que las tres variables independientes (*volmicro*, *caudal* y *presión*) en conjunto pueden explicar en un 95.1% la variabilidad observada en la variable dependiente (*voltotal*).

Teniendo en cuenta que la técnica de regresión lineal de pasos sucesivos o stepwise seleccionó las variables de *volmicro* y *caudal* para ser incluidas en la ecuación de regresión y que esta cumple con los supuestos de un modelo de regresión lineal múltiple, se decidió incluir únicamente como variable predictora *volmicro*, que corresponde al valor que registrado por el micromedidor porque es la que mejor explica el cambio de la variable dependiente *voltotal* con un 94.1% y con la inclusión de la variable *caudal* se mejora la explicación de la variable dependiente en 1%, que en total sería 95.1%, cambio que estadísticamente no es muy significativo, pero que en campo obligaría a medir constantemente el caudal de agua que circula por la tubería principal, objeto mismo del medidor de agua.

A continuación en la figura 13 se presenta la dispersión de los datos que hacen parte del modelo de regresión lineal múltiple y que corresponde a la variable dependiente *voltotal* (eje Y) y a la variable independiente *volmicro* (eje X), observando que existe un relación lineal y positiva entre las dos variables analizadas.

Figura 13. Dispersión entre la variable dependiente *volttotal* y la variable independiente *volmicro*.



El modelo o ecuación de regresión lineal múltiple determinado con el análisis estadístico realizado a los datos obtenidos en el laboratorio se presenta en la ecuación 12, en ella se puede apreciar que para conocer el valor de la variable dependiente *volttotal*, a cada valor de *volmicro* le corresponde un incremento constante de 886.98 más 977.41 por el valor de *volmicro*, que corresponde al valor registrado por el micromedidor de agua instalado en el medidor de agua, el nivel de confiabilidad del modelo regresión es del 95%.

$$Volttotal = 886.98 + 977.41 * volmicro \quad (12)$$

Cómo el modelo será utilizado para determinar el pronóstico del volumen de agua que circula por una tubería, este se validó calculando el Porcentaje de Error Medio Absoluto (PEMA) del modelo de regresión lineal. Como resultado se obtuvo que en este caso existe una variación del 21% del valor calculado por la ecuación, respecto al valor real, siendo excesivamente alto comparado frente al porcentaje de error establecido por la norma colombiana NTC – 1063 para medidores de

agua volumétricos y de velocidad (comerciales) que ésta entre ± 2 y 5% para los caudales de funcionamiento especificados por el fabricante. Por esta razón se decidió construir intervalos de caudal más pequeños (0.5 l/s) entre el rango de caudal seleccionado y evaluado inicialmente (1,12 – 5 l/s), determinando un modelo o ecuación de regresión lineal múltiple y calculando el PEMA o error de pronóstico para cada nuevo intervalo analizado, los cuales se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Intervalos de caudal

Intervalo de caudal (m³/hora)	Porcentaje de Error Medio Absoluto (%)	Modelo de regresión
4.02 - 5.61	26	voltotal = 489.77 + 1869.24 * volmicro
5.61 - 7.20	18.2	voltotal = 383.20 + 1490.02 * volmicro
7.23 - 9.18	10.4	voltotal = 234.46 + 1310.98 * volmicro
9.21 - 10.80	8.2	voltotal = 156.77 + 1095.50 * volmicro
10.83 - 12.78	8.9	voltotal = 242.61 + 1103.22 * volmicro
12.81 - 14.40	8.8	voltotal = 282.50 + 942.59 * volmicro
14.43 - 16.38	8.6	voltotal = 302.07 + 1070.40 * volmicro
16.41 - 18.00	8.6	voltotal = 292.97 + 979.91 * volmicro

Fuente: Elaboración propia.

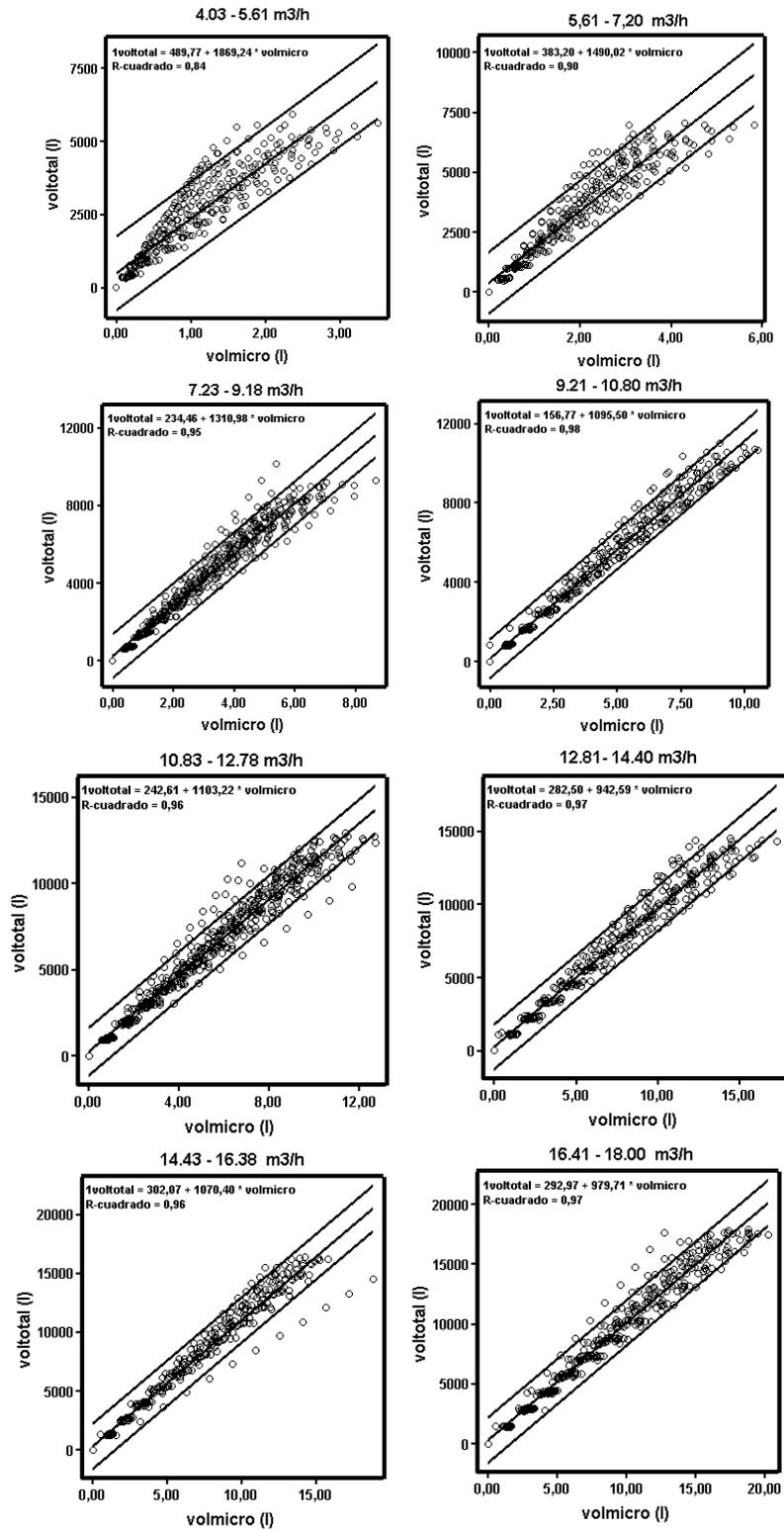
En la tabla 3 se observa que el menor porcentaje de error obtenido en la medición del medidor de tipo proporcional es de 8.2% , superando el rango establecido para medidores de agua de $\pm 2 - 5\%$ por la NTC – 1063, esta diferencia se debe principalmente a la presencia de datos atípicos en los diferentes modelos de regresión, que pueden ser causados por variaciones en la corriente eléctrica del laboratorio, las cuales puede ocasionar cambios repentinos en el caudal suministrado por la bomba debido al aumento o reducción de la potencia de la misma (ver figura 14).

Sin embargo y a pesar de que el porcentaje de error en la medición supera el rango establecido por la NTC – 1063, el medidor de agua de tipo proporcional es

una opción tecnológica confiable que puede ser instalada en los sistemas de acueducto de pequeñas localidades y/o zonas rurales, porque se determina claramente el porcentaje error en la medición en cada intervalo de caudal analizado (*que en todos los casos tiende a la sobremedición de agua equivalente al porcentaje de error determinado*), lo que permite llevar un control eficiente de los volúmenes de agua suministrados en cada proceso del sistema de abastecimiento.

En la figura 14 se presentan los diagramas de dispersión que se obtuvieron como resultado del análisis de regresión lineal realizado a los intervalos de caudal presentados en la tabla 3. En los diagramas se puede observar que existe una relación lineal y positiva en todos los intervalos de caudal evaluados, pero a medida que el caudal es mayor, la dispersión de los datos es menor y se produce un mejor ajuste sobre la recta de regresión lineal de cada diagrama, como se mencionó anteriormente la presencia de datos atípicos en los diagramas de dispersión pueden ser causados por alteraciones en la medida de caudal originadas principalmente por variaciones súbitas en la corriente de energía eléctrica que producen un leve aumento o disminución en la potencia de la bomba que suministra el caudal de agua al banco de pruebas instalado en el laboratorio.

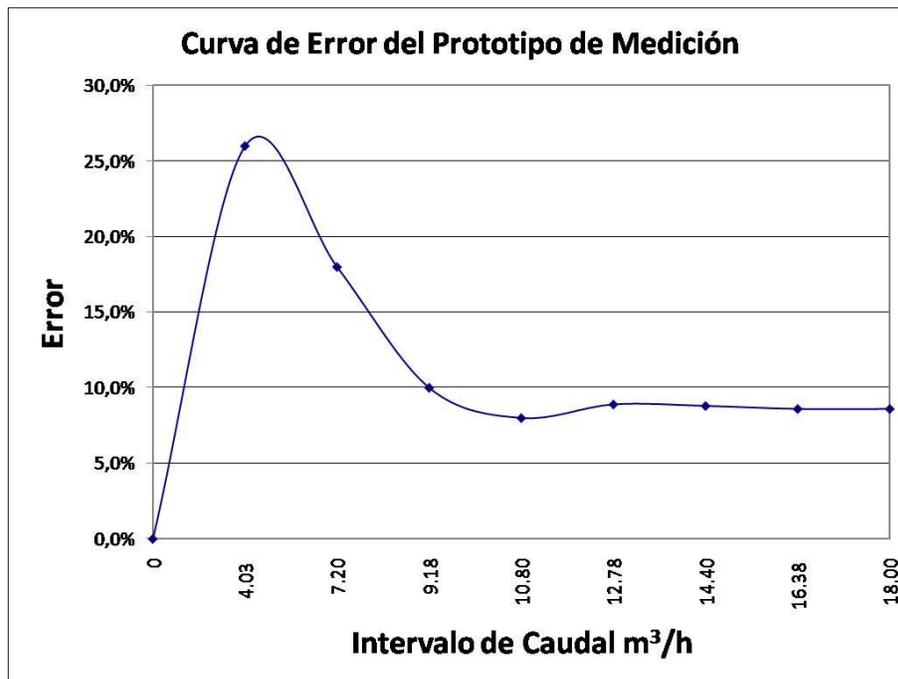
Figura 14. Intervalos de caudal analizados



7.1.3 Curva de error del medidor de agua de tipo proporcional

Con el objetivo de determinar la capacidad del instrumento para medir con exactitud a lo largo de su vida, se procedió a definir la curva de error del medidor de agua de tipo proporcional en un rango de caudal previamente definido y dependiendo de la construcción, calidad de los acabados y de parámetros externos como la calidad del agua los cuales pueden afectar el instrumento de medición de diferentes maneras (Arregui et al, 2007). De la curva de error se puede concluir que el comportamiento es similar al observado en la curva de error de instrumentos de medición de agua de velocidad y volumétricos, en la cual a medida que el caudal aumenta el porcentaje de error disminuye y luego se estabiliza, siendo consecuente con los estudios realizados por Arregui (1998) y Palau (2005), en los cuales se menciona la dificultad que tienen la mayoría de los instrumentos de medición mecánicos (de velocidad y volumétricos) para registrar el volumen de agua en bajos caudales.

Figura 15. Curva de error del medidor de agua de tipo proporcional



El caudal óptimo de funcionamiento determinado para el medidor de agua corresponde a los superiores a $9.21 \text{ m}^3/\text{h}$, con un error en la medición que oscila entre 8.2 y 8.6 %, observando un rápido incremento en la precisión del medidor de agua. Por tanto se recomienda la utilización del medidor en los diferentes componentes del sistema de abastecimiento de agua donde se mantenga un régimen de caudal estable como la salida de la bocatoma, entrada y salida de la planta de tratamiento y en la entrada y salida del tanque de almacenamiento, también puede ser usado en los sectores de la red de distribución que tengan caudales mayores a $9.21 \text{ m}^3/\text{h}$, en flujo permanente.

Para evitar alteraciones en la curva de error determinada para el medidor de agua de tipo proporcional se recomienda instalar el medidor en lugares donde no se excedan los criterios de calidad de agua establecidos en la NTC – 1063 y no modificar las especificaciones de construcción del medidor (anexo 1), especialmente a las relacionadas con el diámetro de los orificios para la entrada y salida de agua al medidor, la modificación de los criterios de construcción establecidos obligaría a calibrar el medidor de agua determinando un nuevo modelo de regresión que tenga en cuenta los criterios modificados.

En la presente investigación no se evaluó el cambio del porcentaje de error en la curva de error con el paso del tiempo, pero se recomienda reparar y/o reemplazar el medidor cada 3000 m^3 , de acuerdo a lo especificado en el artículo 2.1.1.4 de la resolución 151 de 2001.

7.1.4 Variables que afectan la medición

Los principales factores o parámetros que afectan el funcionamiento adecuado del medidor alterando su normal funcionamiento se presentan a continuación:

Calidad del agua

Durante el desarrollo de la presente investigación se evidenció que el incremento de la turbiedad debido a lluvias repentinas causó la acumulación de sedimentos en el filtro de entrada del micromedidor de agua, obstruyendo el correcto funcionamiento del mismo, debido a una reducción del área de paso en el interior del mismo y la obstrucción de las partes móviles del medidor causado por la acumulación de sedimentos.

Nivelación

Otro factor que puede afectar el buen funcionamiento del medidor es la nivelación, éste se debe encontrar en un tramo recto que permita instalar el medidor en una perfecta posición horizontal, cualquier otra posición puede ocasionar un deterioro más rápido en la curva de error, principalmente en bajos caudales debido al rozamiento de la turbina del micromedidor (Palau, 2005).

Desgaste de los elementos mecánicos

Las partes móviles del micromedidor instalado en el medidor de tipo proporcional están expuestas al desgaste con el paso del tiempo, alterando la curva de error del micromedidor con la consecuente disminución en la confiabilidad en la curva de error del medidor proporcional y los modelos determinados para calcular el volumen de agua. Por esta razón se recomienda reparar y/o reemplazar el

micromedidor cada 3000 m³, de acuerdo a lo especificado en el artículo 2.1.1.4 de la resolución 151 de 2001

7.2 ESTANDARIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DEL MEDIDOR DE TIPO PROPORCIONAL DE AGUA EN CAMPO

El medidor de agua de tipo proporcional se instaló en el acueducto de la Vereda Mundo Nuevo, con el objetivo de verificar y ajustar, si es necesario, la calibración realizada en el laboratorio. La selección del lugar de instalación del medidor se realizó teniendo en cuenta que el caudal circulante por la tubería fuera superior a 9.21 m³/h las 24 horas del día, porque los caudales superiores a este valor son los que presentan el menor porcentaje de error en la medición.

Teniendo en cuenta los requerimientos de caudal establecidos para la instalación de medidor de agua se procedió a realizar mediciones de caudal en diferentes lugares del sistema de abastecimiento. El resultado de dichas mediciones determinó que el único lugar que reúne este requerimiento (caudales mayores a 9,21 m³/h las 24 horas de día), es la tubería que conduce el agua de la bocatoma de la quebrada carrillo a la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) del acueducto de la vereda Mundo Nuevo, específicamente en el tramo de tubería ubicado en las instalaciones de la PTAP (ver fotografía 2).



Fotografía 2. Medidor de agua de tipo proporcional instalado en campo

7.2.1 Recolección y análisis de los datos en campo

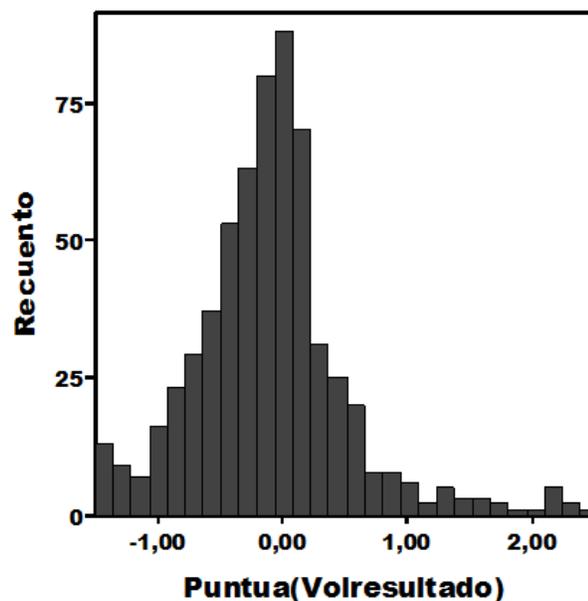
El tamaño de muestra calculado para las pruebas de campo fue de 600 datos, el cual se calculó teniendo en cuenta el caudal que circula por la tubería seleccionada para la instalación del medidor de agua y que en este caso varía entre 4 y 4,5 l/s, el cual fue medido con un Caudalímetro de flujo ultrasónico portátil.

Finalizado el muestreo en campo se procedió a verificar la validez del modelo o ecuación de regresión lineal para medir el volumen de agua. El modelo evaluado corresponde al intervalo de caudal 14.43 – 16.38 m³/h (ecuación 13), el análisis del modelo se realizó con el paquete estadístico SPSS 15 y consistió en la comparación de las diferencias del volumen registrado por el caudalímetro de flujo ultrasónico, el cual se utilizó como testigo y el modelo o ecuación de regresión determinado en el laboratorio.

$$v_{total} = 302.07 + 1070.40 * v_{micro} \quad (13)$$

La validación del modelo o ecuación de regresión se realizó mediante el análisis de la representación gráfica de los residuos de estimación de la variable Volumen Resultado (VolResultado) (ver figura 16), obtenida a partir de la diferencia del volumen total (Vtotal) registrado por el caudalímetro ultrasónico menos el volumen obtenido a partir de la aplicación del modelo de regresión obtenido en el laboratorio (Volmicro). Los residuos situados más allá de 2 desviaciones estándar de la distribución de errores, corresponden a valores atípicos. Para un nivel de confianza del 95%, entonces es correcto esperar que máximo el 5% de los residuos estén por fuera de la banda de 2 desviaciones estándar (Fort y Gonzales 2000), si excede este valor el modelo no se considera válido y se deben realizar los ajustes necesarios.

Figura 16. Histograma del análisis de residuos



En el histograma del análisis de residuos (ver figura 15) se observa que el 98.5 % de los residuos se encuentra entre las bandas de 2 desviaciones estándar y solo el 1.5% de los residuos se encuentra a más de 2 desviaciones estándar, por lo tanto el modelo se considera válido para la medición de caudal. La existencia de

residuos con valores atípicos, es decir a más de 2 desviaciones estándar se asocia a errores producidos por la acumulación de sedimentos en el filtro de entrada de agua al micromedidor alterando la medición de agua realizada por el medidor.

7.3 METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN MEDIDOR DE AGUA DE TIPO PROPORCIONAL

Después de verificar el funcionamiento del medidor y la validez del modelo de regresión para la medición de caudales, se procedió a realizar un manual (ver anexo 1), que contiene la metodología con los criterios para la construcción, calibración y mantenimiento del medidor en cualquier acueducto ubicado en una pequeña localidad y/o zona rural del país, de acuerdo a las especificaciones de construcción utilizadas en laboratorio y verificadas en campo. Se pretende proporcionar una herramienta que facilite a los acueductos de estas localidades el conocimiento y control de los volúmenes reales de agua consumidos en los diferentes procesos (captación, tratamiento, almacenamiento y distribución de agua) de un sistema de abastecimiento, fortaleciendo la gestión de la información y permitiendo la implementación de indicadores de eficiencia operacional de los procesos, programas de control de pérdidas de agua, modelación hidráulica de las redes, entre otros, contribuyendo en la toma de decisiones de carácter administrativo, económico y técnico. Contribuyendo con el desarrollo sostenible en la explotación del recurso hídrico, una mejor calidad del servicio y un menor impacto en el ambiente, contrastando con las ideas que impulsaron el desarrollo hidráulico a inicios del siglo XIX, en el cual la satisfacción de la demanda era el principal motor para el desarrollo (Cabrera, 2001).

7.3.1 Costo

El costo del medidor de tipo proporcional se determinó sumando el valor de cada uno de los accesorios (codos, uniones, válvulas, checks, entre otros) y elementos (pegante, limpiador de tubos, entre otros) requeridos para la construcción del medidor y se comparó frente al valor comercial de un medidor mecánico, como resultado se obtuvo que el costo del medidor de tipo proporcional es de \$US 350 dólares frente al costo de un macromedidor mecánico de 4 pulgadas que en promedio es de \$ US 860 dólares, es decir que el costo del prototipo de medición de agua es 2.45 veces más bajo que un macromedidor mecánico de agua de 4 pulgadas reafirmando lo indicado por Larry 1999. Convirtiendo al medidor de tipo proporcional en una alternativa tecnológica de medición confiable y competitiva frente a otros instrumentos de medición por sus bajos costos de construcción, calibración y mantenimiento, contrastando con los problemas como: la inadecuada instalación y las dificultades para el mantenimiento de los instrumentos de medición mecánicos en las pequeñas localidades y/o zonas rurales que pueden causar una distorsión en la medición del equipo, contrastado con la facilidad en el montaje y mantenimiento del prototipo de medición calibrado en la presente investigación.

Es importante mencionar que la calibración del prototipo de medición de tipo proporcional desarrollado en la presente investigación se realizó con unos criterios de construcción específicos, por tal razón, el cambio en cualquiera de sus componentes, afectaría directamente la curva y el porcentaje de error calculado para cada modelo de regresión, exigiendo de nuevo la calibración de este en laboratorio y en campo.

8. CONCLUSIONES

1. Durante el proceso de calibración del prototipo de medición de agua de tipo proporcional y después del análisis estadístico se comprobó que la variable más relevante y la que mejor explica el cambio de la variable dependiente volumen total (*voltotal*) es la del volumen del micromedidor (*volmicro*) con un 94.1%. El modelo de regresión mejora su predicción solo en 1% (95.1%) incluyendo las variables de presión y caudal, siendo más difícil medir estas variables en campo al mismo tiempo, especialmente la de caudal que es objeto mismo del prototipo de medición de agua.
2. El menor error de pronóstico se encuentra en caudales superiores a $9.21 \text{ m}^3/\text{h}$ con un error entre 8.2 y 8.6%, es decir que este es el rango de caudal en el cual se debe instalar el prototipo de medición de agua, convirtiéndose en una alternativa de medición que puede ser instalado en la entrada de una planta de tratamiento de agua, a la entrada y salida de un tanque de almacenamiento y en las redes de distribución, siempre y cuando el caudal sea permanente las 24 horas del día.
3. El modelo y/o ecuación de regresión lineal para el intervalo de caudal $14.43 - 16.38 \text{ m}^3/\text{h}$ ($4.0 - 4.5 \text{ l/s}$), se considera válido porque el 98.5% de los residuos está entre las bandas de dos desviaciones estándar, la existencia de valores atípicos se relacionó con los periodos de lluvia en los cuales la acumulación de sedimentos en el filtro del medidor ocasionaron una obstrucción en el paso del agua, afectando la medición realizada por el micromedidor.
4. El costo del medidor de agua de tipo proporcional es 2,45 veces menor que un medidor mecánico (velocidad, volumétrico) de igual diámetro, convirtiendo el medidor en una alternativa tecnológica confiable, de bajo costo, fácil construcción y mantenimiento.

5. La implementación de este sistema de medición en acueductos de pequeñas localidades y/o zonas rurales del país puede ser una herramienta que contribuya al mejoramiento de la gestión del agua fundamentada en el desarrollo sostenible de la explotación del recurso hídrico, una mejor calidad del servicio y un menor impacto en el ambiente.

9. RECOMENDACIONES

Evaluar el comportamiento en el deterioro de la curva de error con el paso del tiempo.

Revisar y/o reparar el micromedidor de agua instalado en el medidor proporcional cada 3000 m³, de acuerdo a lo establecido en el artículo 2.1.1.4 de la resolución 151 de 2001.

El micromedidor que se debe instalar en el medidor de tipo proporcional es de velocidad tipo chorro único clase C, se seleccionó este tipo de micromedidor porque tienen una buena resistencia a la presencia de sólidos suspendidos, es una tecnología fiable utilizada durante muchas décadas, son poco sensibles al perfil de velocidades entrante reduciendo los requerimientos de espacio en su instalación y tienen un bajo costo en el mercado

La calibración del prototipo de medición de tipo proporcional desarrollado en la presente investigación se realizó con unos criterios de construcción específicos, por tal razón, el cambio en cualquiera de sus componentes, afectaría directamente el porcentaje de error calculado para cada modelo de regresión, exigiendo de nuevo la calibración de este en laboratorio y en campo.

10. BIBLIOGRAFIA

Arregui FJ. 1998. Propuesta de una Metodología Para el Análisis y Gestión del Parque de Contadores de Agua de un Abastecimiento. España. Tesis de Doctorado (Hidráulica) Universidad Politécnica de Valencia. 324 p.

Arregui FJ.; Palau, C.V.; Gascón, L.; Peris, O. 2003. Evaluating Domestic Water Meter Accuracy. A case study. España. p 1-9 .

Arregui FJ, Cabrera E, y Cobacho R. 2007. Gestión Integral de Contadores de Agua. España. IWA Publishing, Grupo de Agua de Valencia. 340 p.

Baggio MA. Maóski A. y Pimentel M. 2001. Perder Para Controlar ou Controlar Para Não Perder: Qual o Caminho a Ser Seguido. 21º Congreso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e ambiental. Brasil. P 1-10.

Baker RC. 2000. Flow Measurement Handbook. Universidad de Cambridge Press. Inglaterra. 483 p.

Bourguett, VJ, Rodríguez, JM., Ochoa, LH. 2001. Diseño de Redes con Distritos Hidrométricos Integrados. En: Ochoa L, Bourguett V. Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable. Instituto Mexicano de Agua Potable. p 101-133.

Cabrera E. 2001. Diseño de un Sistema para la Evaluación de la Gestión de Abastecimientos Urbanos. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Valencia. España. 340 p

Camuri R. 2001. Medidor de Vazão e de Consumo por Proporcionalidade – Hasta de Inserção em un Único “TAP” de Pitometria. 21º Congreso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e ambiental. Brasil. p 1 -4.

CEPIS. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, SDE Área de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental, OPS/OMS Organización Panamericana de la Salud. 2005. Día Interamericano del Agua – El Agua, Fuente de Vida Equidad y Calidad en los Servicios. Chile. En www.un.org/spanish/event/waterday/2005

EPD. Georgia Environmental Protection Division. 2007. Guidance Document Meter Calibration, Repair and Replacement Program. United States of America. p 1 – 8.

Espirito Santo G., Gomez J. 2000. Calibração de Tubos de Pitot Tipo “Cole”. 20º Congreso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e ambiental. Brasil. p 1 – 10.

FAO. Food and Agriculture Organization of United Nations. 2003. No Global Water Crisis – But Many Developing Countries Will Face Water Scarcity. En FAONewsRoom: www.fao.org/english/newsroom/news/2003/15254-en.html. Visitado en noviembre de 2006.

FAO. Food and Agriculture Organization of United Nations. 2007 - World Water Day 2007. Coping With Water Scarcity Challenge of the Twenty- First Century. En www.worldwaterday07.org. Fecha de Consulta Enero de 2009

Fort. C y Gonzalez B. 2000. Manual de Econometría. Validación del Modelo de Regresión Lineal. España. 35 p.

Frangipani. M. 2005 Guia Prático de Macromedição. Programa de Modernização do Setor Saneamento – Pmss. Brasil. PNCD. 65 p.

Galvis A y Vargas V. 1996. Modelo de Selección de Tecnología en el Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Universidad del Valle. Colombia. P 1-14.

GWP. Global Water Partnership. 2000. Gestión Integrada de Recursos Hídricos. TAC. Background Paper 4. GWP. Chile. 54p.

Guerrero J. 2008. Diagnóstico y Formulación de Planes de Reducción de Pérdidas de Agua en Acueductos de Pequeñas Localidades. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. 179 p.

Hair J., Anderson R., Tatham R. Black W. 2001. Análisis Multivariante. España. 67p

Hueb JA, Cesar B, Rodriguez FJ. 1985. Macromedición. CEPIS. Peru. 463 p.

Jhonson EH. 2001. Optimal Water Meter Selection System. Water SA. South Africa. vol 24 No 4. p 481 – 488.

Larry. W. 1999 Hydraulic Design Handbook. McGraw – Hill United States of America. 1024 p.

MAVDT. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2004. Decreto 155 de 2004. Colombia.

MAVDT. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2004. Gestión Integral del Agua. Colombia. 68 p.

MAVDT. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2005 Lineamientos de Política de Agua Potable y Saneamiento Básico para la Zona Rural de Colombia. Colombia. 33 p.

Mc Fadden. _____. Purpose of Meters. En Alliance of Indiana Rural Water. URL: www.inh2o.org/Articles/WaterArticles/1_Purpose_of_meters.pdf. Visitado en noviembre de 2006.

Mitsch WJ y Jorgensen SE. 2003. Ecological engineering: A field whose time has come. *Ecological Engineering* 20: 363 – 377.

ICONTEC. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. 2007. Norma Técnica Colombiana NTC 1063. Medición del Flujo de Agua en Conductos Cerrados a Sección Llena. Colombia.

Oficina Cubana de propiedad Intelectual. 1996. Dispositivo Hidrométrico Para Descarga Libre Y Forzada En Tubería. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echevarría". Cuba. p 1-5

Palau CV. 2005. Aportaciones a la Gestión de los Sistemas de Medición de Caudal en Redes de Distribución de Agua a Presión. Tesis de Doctorado Universidad Politécnica de Valencia. España. 324 p.

PNCDA. Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água. 2004. Documento Técnico de Apoio. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasil.

PNCDA. Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água. 2004. Documento Técnico de Apoio. DTA D2 – Macromedição. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasil. 109 p.

RAS Reglamento Técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. 2000. Ministerio de Desarrollo Económico. Colombia.

Restrepo I. 2004. Tendencias Mundiales en la Gestión de los Recursos Hídricos. Universidad del Valle – Cinara. Colombia. 22 p

Rodríguez FJ. 1985. Desarrollo De Tecnología Construcción De Medidores Primarios Tipo Pitot Modificado. CEPIS. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Perú. p 1-8.

Ruiz A. 2005. Serie Autodidáctica de Medición del Agua. Instituto Mexicano de Agua Potable (IMTA). México. 36 p.

Saldarriaga JG. 2001. Hidráulica de Tuberías. Mc Graw Hill. Bogota Colombia

Saenz R, Cavalcanti A. 1985 Tecnología Apropriada. El Medidor Proporcional Construido In Situ. Una Forma Simple Y Economica De Llevar A Cabo La Macromedición. CEPIS. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Perú. p 1-10

Tadeu M., Massami N., De Almeida S., Rodríguez F. 2003. Gestão Metrológica para Sistema de Abastecimento de Água. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Brasil.p 1-10

USBR. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. 2001. Water Measurement Manual. United States Of America. URL. www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/wmm/ . Visitado en diciembre de 2008.

UCA. Universidad de Cádiz. Análisis de regresión lineal. 2008. El Procedimiento de la Regresión Lineal. 2008. URL <http://www2.uca.es/serv/ai/formacion/spss/Imprimir/18reglin.pdf>. fecha de consulta mayo 2008.

WSP. Programa de Agua y Saneamiento. 2008. Operadores Locales de Pequeña Escala en América Latina. Perú. 68 p.

ANEXOS

Metodología Para la Construcción, Calibración Y Mantenimiento de un Medidor de Agua de Tipo Proporcional Para Tuberías de 4 Pulgadas



Elaborado por

GUILLERMO ANDRES FUENTES BARRERA

Tabla de contenido

1. ¿Para quién?	3
2. ¿Por qué?	3
3. Principios de operación	3
4. Caudal de funcionamiento del medidor de tipo proporcional	4
5. Componentes del medidor de tipo proporcional	4
6. Especificaciones técnicas para la construcción del medidor de agua de tipo proporcional	6
7. Requerimientos de Instalación física en campo	10
7.1 Selección y preparación del lugar	10
8. Especificaciones Técnicas de Instalación en campo	11
9. Calibración	12
10. Registro de datos	13
11. Mantenimiento	14
12. Ventajas y desventajas	15
13. Bibliografía	15

1. ¿Para quién?

Este manual está dirigido al personal técnico de las empresas de acueducto y al público en general interesado en la construcción, calibración y mantenimiento de los medidores de agua de tipo proporcional.

2. ¿Por qué?

Es necesario conocer detalladamente el procedimiento a seguir para manejar con habilidad la medición de tipo proporcional y las diferentes opciones de medición que nos presenta el medidor, debido a que el correcto funcionamiento del medidor depende directamente de una construcción e instalación adecuada, por lo cual se debe tener cuidado con cada una de las especificaciones del instrumento de medición.

3. Principios de operación

El medidor de tipo proporcional es un instrumento diseñado para la medición del caudal a través de la cuantificación de la velocidad del flujo utilizando la ecuación de continuidad (ecuación 1):

$$Q = V \times A$$

Donde:

Q = Caudal	(m ³ /s)
A = Área transversal	(m ²)
V = Velocidad	(m/s)

El medidor hace parte de los medidores deprimógenos denominados así porque *“presentan una reducción gradual o brusca de la sección de flujo en movimiento, ocasionando con esto un aumento de la velocidad y disminución de la presión en el fluido”*. Siendo una alternativa tecnológica para la medición de agua confiable y competitiva frente a otros sistemas de medición.

La ecuación teórica del funcionamiento del medidor de tipo proporcional se presenta a continuación:

$$Q = K_t \sqrt{2 \times g \times h} \times A_T$$

Donde:

Q = Caudal (m³/s)

K_t = Coeficiente de correlación

g = Gravedad (m/s²)

h = Altura (m)

A_T = Área total del orificio (m²)

4. Caudal de funcionamiento del medidor de tipo proporcional

El caudal de funcionamiento del medidor de tipo proporcional es entre 4,02 metros cúbicos por hora (m³/h), lo que equivale a 1,12 litros por segundo (l/h) y 18 m³/h (5 l/s)

5. Componentes del medidor de tipo proporcional

El medidor de tipo proporcional consiste en una tubería de ½ pulgada que sale por un lado y entra por el lado opuesto de una tubería de 4 pulgadas, en la tubería de ½ pulgada se instaló una válvula de cierre y dos checks para garantizar la dirección del flujo en un solo sentido, de igual manera se instala un medidor de velocidad chorro único clase C para registrar el volumen de agua que pasa por la tubería (ver figura 1 – corte transversal). El tubo de ½ pulgada tiene 7 orificios para la entrada de agua de los cuales 3 son de 11/32 de pulgada y 4 de 3/16 de pulgada de diámetro, para un área total de 2.5 pulgadas cuadradas, el tubo de salida de agua tiene 4 orificios de 11/32 de pulgada de diámetro, para un área total de 1.49 pulgadas cuadradas. La función de los orificios es producir el diferencial de presión entre la entrada y salida de agua (ver figura 1 Corte longitudinal).

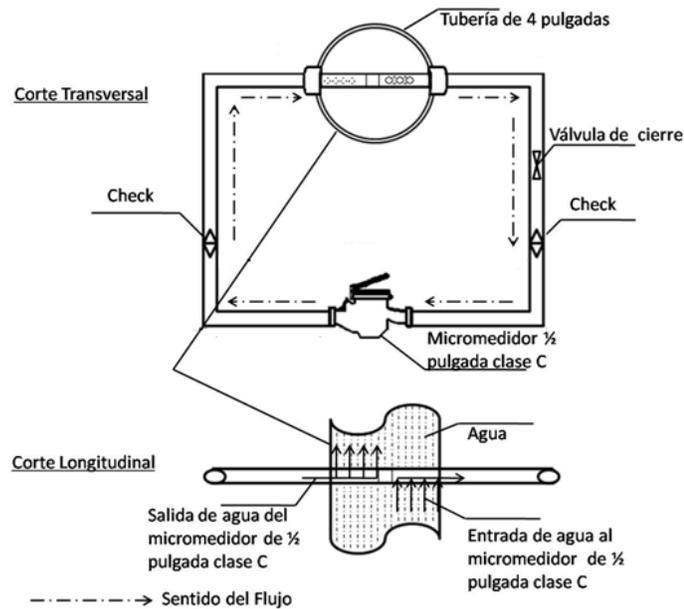


Figura 1. Esquema medidor de tipo proporcional

Los accesorios y la cantidad de los mismos requeridos para la construcción del medidor se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Componentes del medidor de tipo proporcional

Accesorio	Unidad	Cantidad
Tubo de 4 pulgadas	ml	1
Unión Universal de 4 pulgadas	unidad	2
Adaptado Macho de 4 pulgadas	unidad	2
Adaptador hembra de 2 pulgadas	unidad	2
Empac de 2 pulgadas	unidad	2
Tubo de 1/2 pulgada	unidad	1
Codo de 1/2 pulgada	unidad	4
Válvula de cierre 1/2 pulgada	unidad	1
Micromedidor de 1/2 pulgada de velocidad tipo chorro único Clase C	unidad	1
Check de 1/2 pulgada	unidad	2
Limpiador de PVC	unidad	1
Soldadura PVC	unidad	1

6. Especificaciones técnicas para la construcción del medidor de agua de tipo proporcional

A continuación se describen los pasos a seguir para la construcción de un medidor de agua de tipo proporcional para tuberías de 4 pulgadas. Al final del documento se encuentran los planos con las medidas requeridas para la construcción de cada una de las partes.

PASO 1:

Cortar un metro de tubería de 4 pulgadas (a) e instalar 2 uniones universales (b) por medio de los adaptadores macho (c), una en cada extremo (ver figura 2).

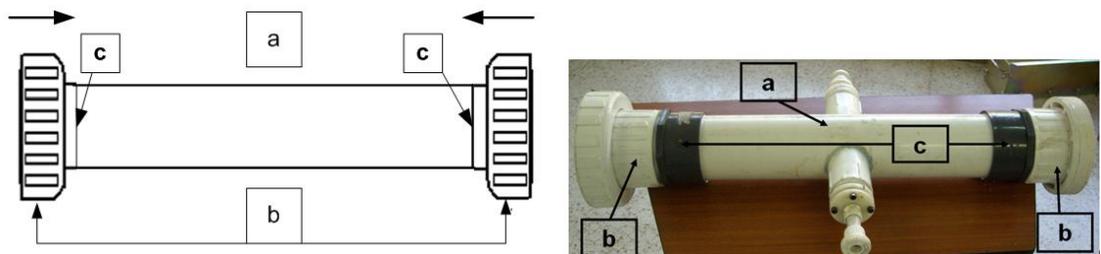


Figura 2. Montaje uniones universales en la tubería de 4 pulgadas

Paso 2:

Hacer 2 orificios en ambos lados del tubo, con un diámetro nominal de 2 pulgadas, paralelos entre sí y en la mitad de la tubería. Los orificios deben quedar alineados; con el fin de conectar los adaptadores hembras de 2 pulgadas (d) que sirven de soporte al empac (e) del mismo diámetro que permite el acoplamiento entre las tuberías de $\frac{1}{2}$ y 4 pulgadas (ver figura 3).

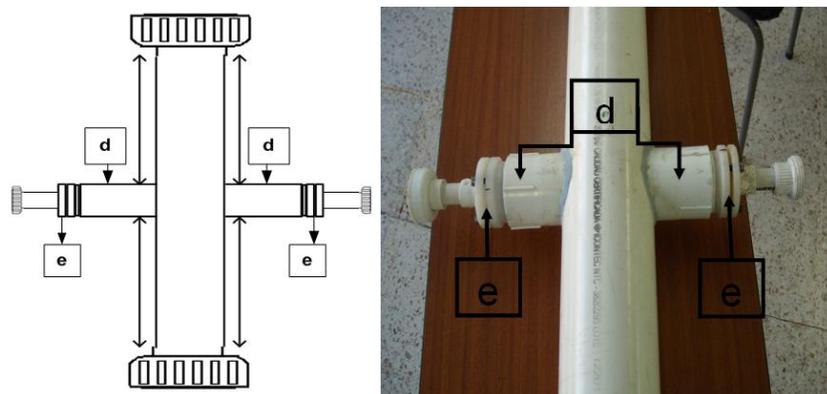


Figura 3. Montaje de los adaptadores hembra de 2 pulgadas

Paso 3:

Tornear e instalar de 2 empac (e), esta pieza se construye a partir de un trozo de teflón sólido y está conformada por dos partes, un adaptador macho (d) roscado en el exterior, para que pueda ser instalado en el adaptador hembra (ver figura 4 – adaptador macho - vista superior), en el interior del adaptador se hace un orificio de 6 cm de diámetro para instalar el empac que va dentro del adaptador macho (ver figura 4 - adaptador macho – vista frontal).

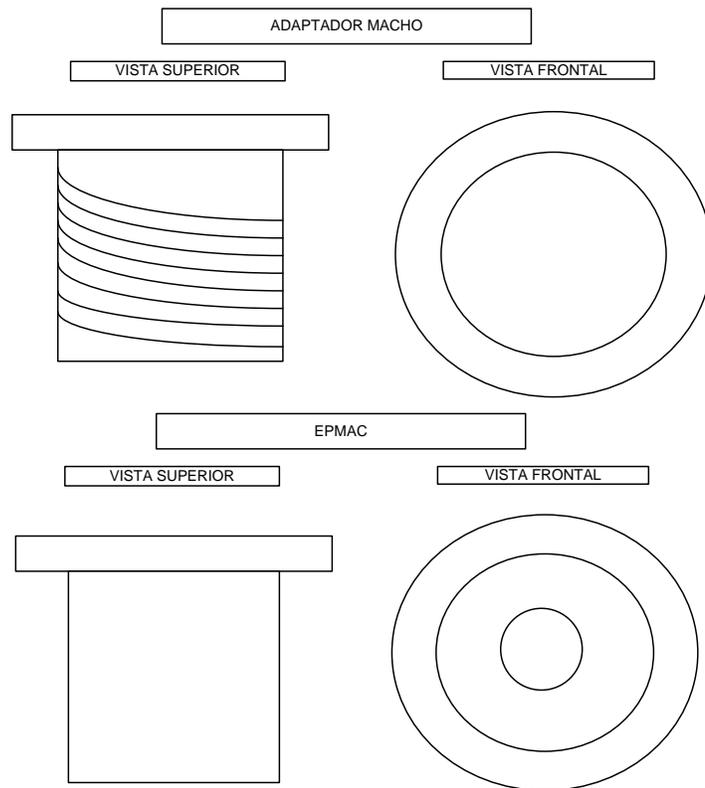


Figura 4. Partes del Empac

Introducir los adaptadores machos en los adaptadores hembra de 2 pulgadas (d) instalados a cada lado de la tubería de 4 pulgadas (ver figura 3). Luego en cada empac (e) se hace un orificio en el centro con un diámetro nominal de $\frac{1}{2}$ pulgada (ver figura 4 –empac - vista frontal), para introducir la tubería de diámetro semejante que permite la entrada y salida de agua al medidor proporcional (ver fotografía 1).



Fotografía 1. Empac

El tubo de $\frac{1}{2}$ pulgada para la entrada de agua tiene 7 orificios, de los cuales 3 son de $\frac{11}{32}$ de pulgada y 4 de $\frac{3}{16}$ de pulgada de diámetro, para la salida de agua el tubo de $\frac{1}{2}$ pulgada tiene 4 orificios de $\frac{11}{32}$ de pulgada de diámetro. (Ver figura 5). Es importante mencionar que los dos tubos deben estar unidos por medio de un tapón, para que el agua circule en el interior de la tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada.

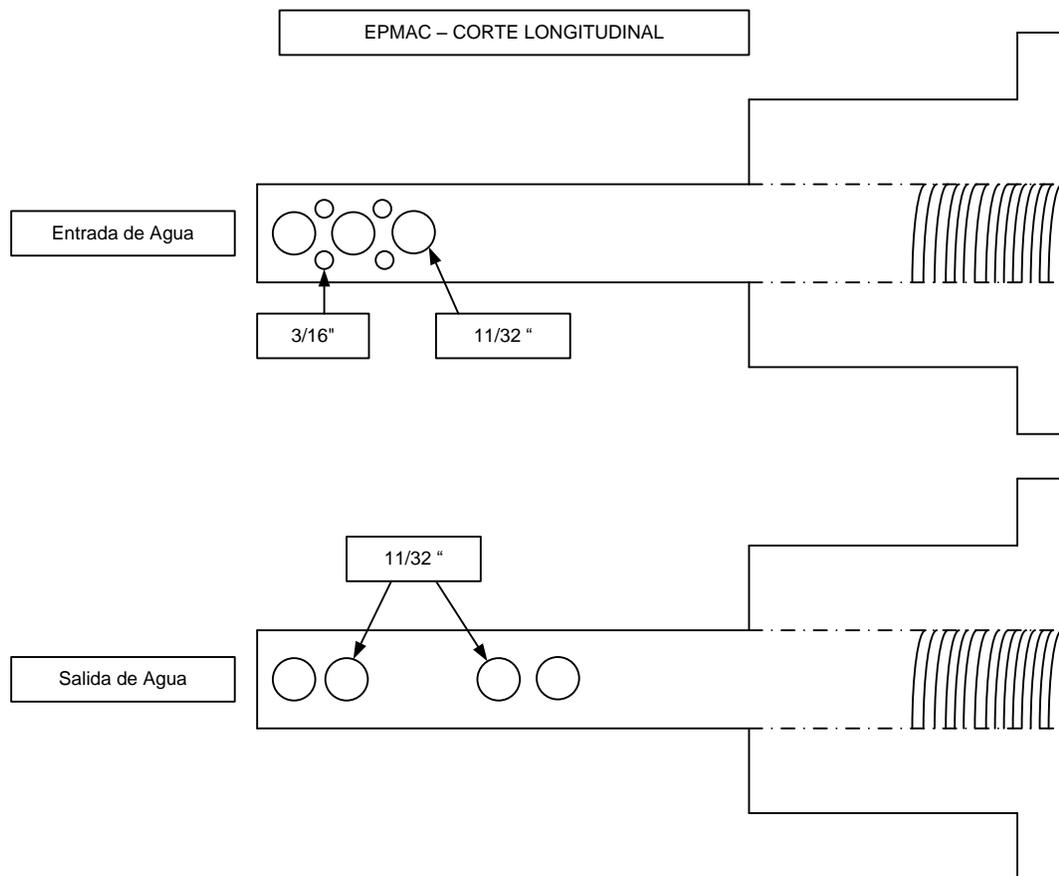
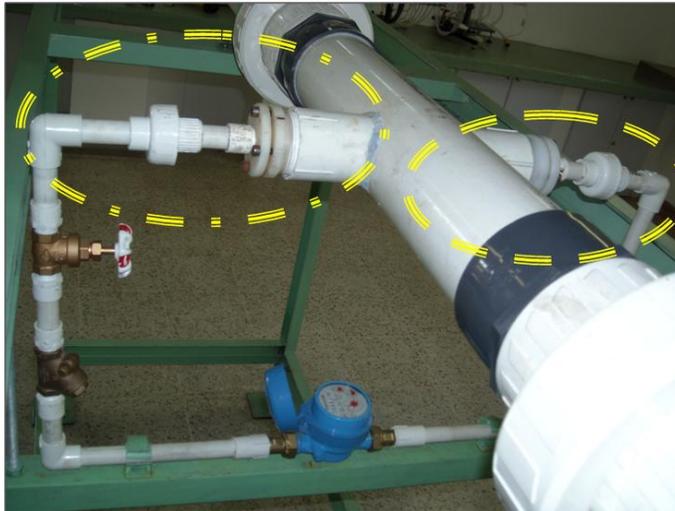


Figura 5. Esquema del empac con los tubos de entrada y salida de agua

Paso 4

Conectar el medidor proporcional con el empac, por medio de un adaptador macho unido a una tubería de ½ pulgada con a una unión universal del mismo diámetro, con el objetivo de montar y desmontar fácil y rápidamente la sección del medidor proporcional que tiene el micromedidor de agua (ver fotografía 2).



Fotografía 2. Conexión entre el medidor proporcional y el empac

Paso 5

Las tareas que se deben realizar en el ensamble de la sección del medidor de tipo proporcional que contiene el micromedidor de agua se inician con la conexión entre una universal de ½ pulgada con un segmento de tubería de 7 cm conectado a un codo de 90°, unido a un segmento de 7 cm de tubería insertado a una válvula de cierre con sus respectivos adaptadores machos. De dicha válvula sale una sección de tubería de 7 cm conectado a un check, para garantizar el sentido del agua en un solo sentido, empatando en otro codo de 90° del cual sale una tubería de 25 que se conecta al medidor de agua de velocidad clase C, encargado de registrar el volumen de agua que circula por el medidor proporcional (ver fotografía 3). Los pasos descritos anteriormente son para la entrada de agua al medidor y son exactamente iguales para la salida, exceptuando la instalación de la válvula de cierre, por lo que es una sección continua de tubería (ver fotografía 4). Es importante mencionar que el diámetro de todos los accesorios y tuberías mencionados anteriormente son de ½ pulgada.



Fotografía 3. Entrada de Agua del medidor proporcional



Fotografía 4. Salida de agua del medidor proporcional

7. Requerimientos de Instalación física en campo

7.1 Selección y preparación del lugar

Desenterrar la tubería para conocer su ubicación, material y diámetro. Además el lugar seleccionado para instalar el medidor de agua de tipo proporcional debe tener el espacio suficiente para la instalación del instrumento con su respectiva caja de inspección. Asegurando la distancia mínima aguas arriba y aguas abajo de 10 y 20 diámetros nominales de la tubería donde se instalará el medidor respectivamente entre el medidor de agua y cualquier accesorio (codo, válvulas, tee, etc) para asegurar un perfil de velocidades uniforme, mejorando la precisión en la medición.

Otros puntos que deben considerarse son los siguientes:

- No instalar la estación de medición de agua a menos de 20 metros de una línea de transmisión eléctrica, para prevenir accidentes causados por cortos circuitos debido a descargas eléctricas y/o fugas de agua.

- Evitar la instalación donde existan o se vayan a instalar ventosas o purgas de aire, para evitar interferencias en la medición.
- Tener la certeza de mantener un régimen de caudal constante y la tubería llena las 24 horas del día.
- Realizar un monitoreo del caudal circulante por la tubería para conocer el las variaciones del mismo durante el día y seleccionar el modelo estadístico que más se ajuste a estos cambios.

8. Especificaciones Técnicas de Instalación en campo

Paso 1

La primera actividad a realizar es suspender el agua en la tubería seleccionada para instalar el medidor de agua. Una vez verificado el corte del servicio, se procede a cortar y retirar la sección de la tubería donde se va a colocar el medidor (ver figura 6).

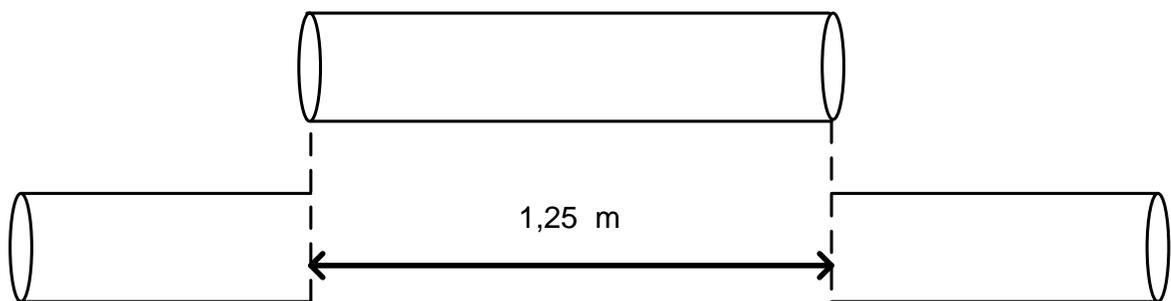


Figura 6. Corte tubería principal

Limpiar, lubricar y pegar en los extremos de la tubería las uniones universales de 4 pulgadas para facilitar el montaje y desmontaje del medidor de agua (ver figura 7).



Figura 7. Instalación de uniones universales de 4 pulgadas

La próxima etapa consiste en la instalación del medidor de tipo proporcional en la tubería de principal, por medio de las uniones universales, verificando que se encuentre perfectamente horizontal, utilizando un nivel de construcción para dicha tarea (ver figura 8). Y finalmente restablecer el paso de agua por la tubería para verificar que no existan fugas en el medidor de agua de tipo proporcional y el funcionamiento del mismo.

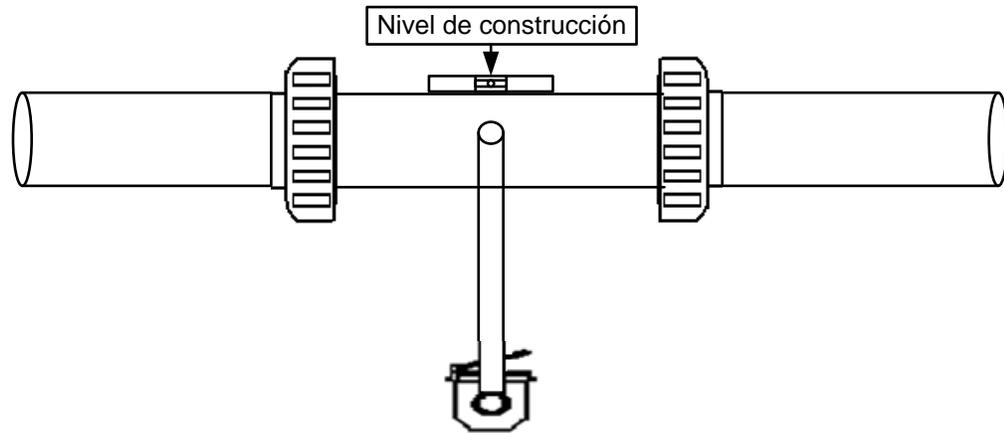


Figura 8. Montaje del medidor de tipo proporcional en la tubería de la red de acueducto

9. Calibración

Verificar el caudal de agua que circula por la tubería para seleccionar el modelo de regresión que más se ajuste. A continuación en la tabla 2 se presentan los modelos de regresión para los intervalos de caudal ubicados entre 4,02 - 18 m³/h, que corresponden al caudal de funcionamiento del medidor de agua. El objetivo del modelo de regresión es determinar el volumen total de agua (voltotal) que circula por la tubería principal, utilizando unas constantes determinadas en laboratorio y el seguimiento al volumen de agua registrado por el micromedidor de agua (volmicro), instalado en el medidor de agua de tipo proporcional.

Tabla 2. Componentes del medidor de tipo proporcional

Intervalo de caudal (m ³ /hora)	Porcentaje de Error Medio Absoluto (%)	Modelo de regresión
4.02 - 5.61	26	$\text{voltotal} = 489.77 + 1869.24 * \text{volmicro}$
5.61 - 7.20	18.2	$\text{voltotal} = 383.20 + 1490.02 * \text{volmicro}$
7.23 - 9.18	10.4	$\text{voltotal} = 234.46 + 1310.98 * \text{volmicro}$

Intervalo de caudal (m ³ /hora)	Porcentaje de Error Medio Absoluto (%)	Modelo de regresión
9.21 - 10.80	8.2	voltotal = 156.77 + 1095.50 * volmicro
10.83 - 12.78	8.9	voltotal = 242.61 + 1103.22 * volmicro
12.81 - 14.40	8.8	voltotal = 282.50 + 942.59 * volmicro
14.43 -16.38	8.6	voltotal = 302.07 + 1070.40 * volmicro
16.41 - 18.00	8.6	voltotal = 292.97 + 979.91 * volmicro

10. Registro de datos

Una vez seleccionado el modelo o ecuación de regresión, de acuerdo al caudal circulante por la tubería, se procede a anotar el valor del volumen de agua registrado por el micromedidor de agua. Es importante mencionar que se deben escribir todos los números que aparezcan en el contador análogo del micromedidor, la diferencia entre ambos datos se reemplaza en la variable *volmicro* de la ecuación de regresión (ver ejemplo 1). La unidad de volumen utilizada por la ecuación es la de litros (l).

Ejemplo 1:

En este ejemplo vamos a suponer que el caudal circulante por la tubería varía entre 4 – 4.5 l/s, correspondiendo al intervalo de caudal 14.43 -16.38 m³/h, por lo tanto la ecuación seleccionada de la tabla 2 es:

$$\text{Voltotal} = 302.07 + 1070.40 * \text{volmicro}$$

Luego se procede a registrar el volumen del micromedidor y a calcular la diferencia entre los valores registrados a las 6:00 am y pm por el micromedidor de agua y a reemplazarlo en la variable *volmicro* del modelo de regresión.

VOLUMEN MICROMEDIDOR DE AGUA			
Fecha	Hora	Volumen micromedidor (l)	Diferencia
13/01/09	6:00 am	4217,90	0
13/01/09	6:00 pm	4218,12	0,22

$$V_{\text{total}} = 302.07 + 1070.40 * 0.22$$

$$V_{\text{total}} = 1864,854 \text{ l}$$

Es decir que el volumen total de agua que circuló por la tubería es de 1864, 854 litros.

11. Mantenimiento

Con el paso del tiempo algunos componentes del medidor de tipo proporcional se pueden desgastar o taponar, por tal motivo es necesario implementar un programa de mantenimiento preventivo permanente, evitando posibles daños en el medidor y reduciendo los costos por la adquisición de repuestos que pueden ser difíciles de conseguir.

El objetivo es procurar el mantenimiento de las partes del medidor y atender las necesidades, anticipando la parálisis del medidor ocasionado por el desgaste y/o rotura de sus componentes. Obteniendo beneficios como;

- Aumento de la vida útil del equipo
- Incremento de la confiabilidad de la información proporcionada por el equipo
- Disminución de los costos de reparación

Las actividades más relevantes para realizar el mantenimiento de equipo son las siguientes:

Revisar periódicamente la existencia de fugas en los componentes del medidor de tipo proporcional.

Retirar los empac y revisar que orificios de las tuberías no se encuentren obstruidos por algún tipo de sedimento que impida el libre ingreso y/o salida de agua al medidor.

Verificar el correcto funcionamiento del micromedidor de velocidad tipo chorro único Clase C de ½ pulgada.

12. Ventajas y desventajas

Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none">1. Es un instrumento, liviano, portátil y resistente.2. Construcción e instalación rápida y sencilla.3. Una opción de medición confiable con bajos costos de construcción, instalación y mantenimiento.4. Puede ser instalado en bocatomas, salida y entrada de plantas de tratamiento, salida y entrada de tanques de almacenamiento y en la red de distribución siempre y cuando exista un caudal constante.	<ol style="list-style-type: none">1. La medición se puede alterar por la obstrucción en los orificios de entrada y salida de agua del medidor.2. El caudal que circula debe ser constante.3. El micromedidor de ½ pulgada se puede obstruir por la presencia de sólidos suspendidos, alterando la medición.

13. Bibliografía

Frangipani. M. 2004. Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água. Documento Técnico de Apoio. GUIA PRÁTICO DE MACROMEDIÇÃO. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasil.

Rivas I. 2001. Serie Autodidactica de Medición del Agua TubosVenturi, Dall y Tobera. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.

Ruiz A. 2002. Serie Autodidactica de Medición del Agua Tubo Pitot. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.