



## Portada Interna de Tesis

Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería en Automatización

Implementación de un aforador para la medición de caudal en flujos a superficie libre

### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Ingeniero en Automatización con especialidad en Instrumentación y Control de  
Procesos

#### Presenta:

C. Irving Francisco García Carrasco

#### Dirigido por:

Dr. M. Alfonso Gutiérrez López

#### SINODALES

Dr. M. Alfonso Gutiérrez López  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Ing. José Luis Avendaño Juárez  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

Ing. Ma. Luisa Balderas Escamilla  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Ing. Alfredo Jiménez Trigos  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Querétaro, Qro. México  
Enero, 2014

## RESUMEN

El presente trabajo desarrolla e implementa un instrumento que nace de la combinación de un método de medición mecánico y un sistema electrónico, con el objetivo de modernizar y mejorar el sistema de medición original, facilitando el proceso para el usuario y ampliando las posibilidades para el manejo de datos. Para realizar la adaptación de los sistemas se sustituyeron piezas del sistema original por unas diseñadas a medida, y se desarrolló una carcasa capaz de contener equipo electrónico dentro del agua sin sufrir daño. Así mismo fue implementado un encoder y un sistema electrónico encargado de transformar los movimientos circulares del instrumento sobre el que se trabajó en señales eléctricas protocolizadas que sirvan de tal modo que el sistema fuera capaz de interpretarlas para hacer posible la medición del el flujo y caudal también conocido como aforo. Con los resultados obtenidos se buscó la correlación, la desviación estándar y la recta de regresión lineal para ser comparada con los datos obtenidos contra un instrumento comercial que definiría el desempeño y rendimiento del instrumento propuesto. Se observa como las variaciones en el flujo provocan resultados variantes en la respuesta del instrumento propuesto y se estudia las causas de este fenómeno así como las posibles soluciones. Los resultados muestran que a flujos estables sin muchas perturbaciones el instrumento responde de forma similar a la de equipos comerciales, presentando un costo/beneficio competitivo frente a los instrumentos que se pueden encontrar en la industria, con un error tolerable y con un desempeño apropiado para ser utilizado como equipo de laboratorio en instituciones de educación superior.

**(Palabras clave:** molinete, aforo, medición caudal, medición flujo)

**A mi Padre**

**A mi Madre y Hermanos**

**A mi Familia y Amigos**

**A la comunidad de Ingeniería de la Universidad  
Autónoma de Querétaro**

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta tesis está dedicada a todas las personas que intervinieron en su realización, a todos aquellos que me brindaron de su tiempo y de su esfuerzo, con un consejo con una opinión, con una crítica, con unas palabras de aliento, a todos ellas gracias de todo corazón.

Agradezco particularmente a mi madre y a mis hermanos por ser mi motivación constante, y mi ejemplo a seguir a lo largo de la carrera, y a una persona en especial, que siempre me recuerda cual es mi objetivo, me ayuda a nunca darme por vencido y me impulsa a seguir sin importar el camino; por su apoyo, palabras de aliento y confianza les doy mi más grande agradecimiento.

A mis amigos y compañeros de la Universidad porque este largo camino no hubiera sido el mismo sin ustedes, gracias por todos los gratos momentos y las experiencias que vivimos juntos.

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
Resumen	i
Dedicatorias	ii
Agradecimientos	iii
Índice	iv
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Hipótesis	20
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo General	20
1.4.2 Objetivos Particulares	20
1.5 Justificación	21
II. CONSIDERACIONES TEÓRICAS	23
2.1 Medición de caudal	23
2.1.1 Aforos con Molinetes hidrométricos	28
2.2 Encoders	35
2.3 Calibración	38
2.3.1 Calibración a 2 puntos	40
III. METODOLOGÍA	42
3.1 Descripción del lugar de experimentación	42
3.2 Diseño del aforador	46
3.3 Características del aforador	53
3.4 Implementación del aforador	59

IV. RESULTADOS	70
V. CONCLUSIONES	90
REFERENCIAS	94
ANEXOS	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1.1	Recta estadística de regresión lineal con los datos obtenidos con un medidor ultrasónico utilizado en Nikkawa, Tone River.	5
1.2	Estaciones hidrométricas en azul y estaciones de evaluación de recursos hídricos (WRA) en rojo alrededor del mundo.	6
1.3	Medición remota basada en la descarga del río Siret en la estación Lungoci cerca de Galati, Eastern Romania. Se presenta la mayor inundación en 2005, así como las mediciones recibidas en la descarga de la estación Lungoci.	9
1.4	Grafico de caudal en metros cúbicos por segundo realizado con las 27 muestras realizadas del 26 de marzo al 24 de septiembre.	11
1.5	Diagrama de bloques del sistema de medición y monitoreo del nivel de agua.	13
1.6	Caudal medio mensual versus caudal ecológico recomendable calculado por método Tennant en la estación Micos, período (1976-2000).	16
1.7	Instalación de un sensor de efecto Doppler para medición de caudal en canales y ríos	17
1.8	Contraste grafico de datos existentes contra datos obtenidos por medio de métodos combinatorios para la estación hidrométrica del río Santiago	19
2.1	Molinete hidrométrico tipo taza cónica	29
2.2	Molinete hidrométrico tipo hélice	29

2.3	Transductores comunes para la fabricación de Encoders ópticos y magnéticos	36
2.4	Ejemplo de un disco codificado utilizado en Encoders de tipo incremental	37
2.5	Ejemplo de un disco codificado utilizado en Encoders de tipo absoluto con codificación Gray.	38
2.6	Ejemplo de recta de calibración con 2 puntos.	41
3.1	Esquema general del instrumento (boceto)	42
3.2	Canal de pruebas hidrométricas, Lab. De hidráulica Facultad de Ingeniería UAQ.	43
3.3	Brazo que permite la inclinación del canal de pruebas.	44
3.4	Compuertas obstructoras de caudal localizadas en el canal de pruebas.	45
3.5	Instrumentos utilizados para medir la altura del flujo, localizados detrás de las compuertas.	46
3.6	Carcasa para la protección del <i>encoder</i> .	47
3.7	Moldes de MDF para carcasa.	48
3.8	Moldes con vaciado de resina.	49
3.9	Piezas de metal maquinadas para el instrumento.	50
3.10	Soporte metálico montado con carcasa y eje central de giro.	51
3.11	Piezas maquinadas juntas.	52
3.12	Discos de acrílico propuestos para el instrumento	53
3.13	Molinete hidrométrico tipo taza cónica utilizado para el trabajo.	54

3.14	Diagrama del circuito implementado para el instrumento.	55
3.15	Sensor óptico tipo herradura y disco para medición.	57
3.16	Instrumento sumergido en canal de pruebas.	60
3.17	Boceto del interior de la carcasa.	61
3.18	Flujometro FP201.	62
3.19	Diagrama de flujo del programa.	63
3.20	Menú principal del programa.	64
3.21	Medición a 3 minutos.	64
3.22	Medición a 5 minutos.	65
3.23	Medición minuto a minuto.	66
3.24	Modificar área hidráulica.	67
3.25	Calibración del instrumento.	68
4.1	Carcasa superior con fisura en el cuerpo y sellada con resina.	70
4.2	turbulencias y burbujas producidas por una altura baja en el tirante.	72
4.3	Instrumento con flujo mínimo para activación.	74
4.4	Medición en flujo bajo.	75
4.5	Medición a caudal máximo flujometro patrón.	75
4.6	Medición a caudal máximo instrumento propuesto.	76
4.7	Comparación de mediciones en el flujo.	77
4.8	Graficas comparativas de medición 1.	81

4.9	Graficas comparativas de medición 2.	82
4.10	Graficas comparativas de medición 3.	82
4.11	Posibles posiciones del disco al inicio de una medición.	83
4.12	Graficas comparativas de medición 4.	85
4.13	Graficas comparativas de medición 5.	86
4.14	Graficas comparativas de medición 6.	86
4.16	Graficas comparativas de medición 7.	87
4.17	Graficas comparativas de medición 8.	88

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
1.1	Análisis estadísticos de los datos adquiridos durante la prueba del sensor ultrasónico.	14
1.2	Costos promedios de los aforadores y medidores de caudal más utilizados en la industria.	14
4.1	Tabla con mediciones realizadas con instrumento patrón contra propuesto.	78
4.2	Tabla con mediciones durante periodos de 15 min.	79
4.3	Tabla con mediciones durante periodos de 15 min (continuación).	84
4.4	Tabla con mediciones en el último intervalo de tiempo durante periodos de 15 min.	89

## I. INTRODUCCIÓN

La necesidad de medir y en muchos casos regular el caudal de un canal abierto es una necesidad básica en cualquier lugar para mejorar el aprovechamiento de los recursos hídricos locales, ya sea que se vaya a generar energía eléctrica o alimentar plantaciones y zonas de cultivo, la medición de la velocidad y finalmente el caudal de un canal abierto es el primer paso para la explotación de los recursos hídricos naturales, también lo es para la observación y prevención de desastres naturales que ponen en peligro la infraestructura, los ecosistemas y a las poblaciones.

### 1.1 Planteamiento del problema.

El agua es esencial para todas las actividades socio-económicas y para el mantenimiento de todos los ecosistemas del mundo. A medida que se incrementa la explosión demográfica de un lugar, también crece en razón proporcional la demanda del uso del agua en superficies y subsuelo para su uso doméstico, industrial y agrícola, esta demanda desmedida provoca la sobreexplotación del agua disponible (UNESCO & UN-Water, 2007).

Estudios recientes revelan que una de cada tres personas enfrentan problemas de suministro de agua (UNESCO & UN-Water, 2007a). Alrededor de 1200 millones de personas, o cerca de un quinto de la población mundial, viven en áreas de escasez de agua y 500 millones se aproximan a esta situación.

La escasez de agua es un problema a nivel local, regional, nacional e internacional, sobre todo dentro de una cuenca o subcuenca. En países grandes, existe tanto escases como abundancia de agua en ciertas áreas, tal es el caso de países como Brasil, China y México (UNESCO, 2009). Las áreas de estos países están generalmente muy alejadas unas de las otras con pocas oportunidades para la transferencia y canalización del agua.

Una estimación eficiente de la lluvia para el pronóstico de escurrimientos, requiere de la correcta medición de la lluvia, pero sobre todo una correcta y confiable medición de los caudales que se transportan por los ríos. El empleo de datos de lluvia registrados únicamente por redes pluviométricas, radares meteorológicos o satelitales, no tiene la capacidad de describir completamente el proceso lluvia-escurrecimiento, si no se tiene la variabilidad de los sistemas de precipitación, debido a las limitantes propias de cada técnica.

En México, esta falta de medición para la correcta y equitativa distribución del agua del territorio ha provocado una sobre explotación en los mantos acuíferos y ha generado una baja disponibilidad de agua por habitante. Actualmente corresponde a 4 mil 300 metros cúbicos por habitante según la Comisión Nacional del Agua presentado en un informe en el 2009. (CONAGUA, 2009a)

En cuanto a la medición de caudales, en México se ha hecho poco o nulo uso de nuevas técnicas de medición debido al escaso interés de mejorar los procesos de medición y a un abandono en la innovación tecnológica de estos procesos, otra razón es la poca inversión que se hace en mejorar las técnicas de medición y la falta de tecnología mexicana, ya que actualmente los mejores medidores son de tecnología extranjera y son de alto costo, por lo que se ve en la necesidad de utilizar técnicas de medición que no son ciento por ciento precisas y que no transmiten sus datos en tiempo real lo cual hace que las bases de datos se vuelvan imprecisas u obsoletas con el tiempo.

Los sistemas actuales de medición de flujo, distribución, captación y almacenamiento, etc. no son suficientes para cubrir la demanda cada vez mayor de agua y de infraestructura hidráulica, solo con una correcta administración del recurso, una medición en tiempo y forma, modelos y escenarios predictivos, se podrá alcanzar un alto porcentaje de captación, distribución, tratamiento y producción en materia de aprovechamiento del agua, pero todo esto solo es posible si se mejoran las técnicas utilizadas, los procesos industriales y la

metrología de los sistemas utilizados en la canalización y monitoreo de escurrimiento, precipitación y distribución del agua captada por medio de ríos y lagos. Por lo tanto, a través de esta propuesta se pretende diseñar sistemas que ataquen el problema de la medición de flujo en ríos y presas para la temprana obtención y estimación de datos que servirán para el desarrollo tecnológico de la hidrometría y prestaran el apoyo necesario para la prevención de desastres naturales y la planeación de futuras plantas de distribución de agua y generación de electricidad.

### 1.2 Antecedentes.

Desde el inicio de la expansión demográfica a nivel mundial y ante el aumento cada vez más evidente del uso, distribución, captación, análisis y medición del agua en todos los territorios hidrológicos de cada país, cada institución tanto nacional como internacional ha hecho esfuerzos en desarrollar y mejorar la forma de medir, además, de administrar todos los datos relacionados con el uso del agua superficial para de esta forma mejorar las alertas de desastres naturales, el uso y distribución del agua, mejorando el aprovechamiento del recurso hídrico disponible.

El diseño y operación de la administración del agua a nivel mundial ha sido realizado desde tiempos antiguos bajo el concepto de estacionariedad, esto es, que el agua así como su captación, distribución y canalización está basada en las estaciones hidrológicas de las regiones, en donde se esperan las temporadas de precipitaciones para almacenar y las temporadas secas para la distribución. **Es un concepto que aún se utiliza para la práctica de la hidrología y la infraestructura hidrológica moderna.** En esta práctica se utilizan datos almacenados desde hace tiempo atrás, enriqueciéndolos con datos obtenidos en años posteriores, se forman y determinan escenarios predictorios que ayudan a determinar riesgos en la suministración de agua, planos de inundaciones y cauces naturales de agua. La

inversión mundial total en materia de infraestructura del agua excede los 500 mil millones de dólares (Milly P. et al, 2008).

Este método de predicción está actualmente en decaimiento debido al cambio climático y estacionario que se está dando alrededor del mundo aunado a los problemas e intervenciones realizadas por el hombre en los cauces naturales de la mayoría de los ríos. Riesgo de inundaciones, suministro del agua, calidad del agua son factores afectados por la infraestructura, por las modificaciones de canales, trabajo de drenajes y el cambio de tierra-cubierta contra tierra-usada. Esta situación ha dado paso a que se realicen investigaciones relacionadas a la predicción y medición del caudal de los ríos, a la medición constante del nivel de las presas y a la implementación de nuevos métodos y nuevas tecnologías que permitan tener una mayor concentración de datos, y que a su vez estos se encuentren disponibles para la creación y desarrollo de simuladores.

Un ejemplo sencillo es el que han aplicado los japoneses desde hace ya 20 años el cual solo han ido mejorando y actualizando dependiendo de las necesidades de las zonas y del avance de la tecnología disponible.

Este ejemplo es la implementación de sensores ultrasónicos para la medición de caudal en ríos, este artículo es presentado por el doctor Kinoshita (2001), investigador del Centro Nacional de prevención de desastres Ibaraki-Ken en Japón, el documento nos presenta, la superioridad del sensor ultrasónico en tiempo de respuesta comparándolo con los actuales sistemas de medición. Aunque se presentan pérdidas de datos durante ciertos períodos de tiempo, se trata de mejorar el método y mejorar su fiabilidad para la obtención de datos.

Los métodos actuales de movimiento rotatorio y de desplazamiento libre solo proveen la velocidad. Una serie de diversas velocidades deben ser medidas en la sección seleccionada, multiplicadas por el área representativa y sumada a la

descarga obtenida. Como la distribución de velocidad en la sección transversal no está definida, la selección del punto de medición es meramente empírica y se introduce un cierto error en el método. Sin embargo la velocidad en cada punto de la sección transversal es medida e integrada por el método del sensor ultrasónico (Kinosita, 2001).

Los métodos de movimiento rotatorio no pueden proveer información continua en todo momento y hay ocasiones en los que pueden tardar horas en arrojar un resultado, el método ultrasónico (Figura 1.1) puede dar resultados continuamente y solo demora fracciones de segundo en tomar una medición.

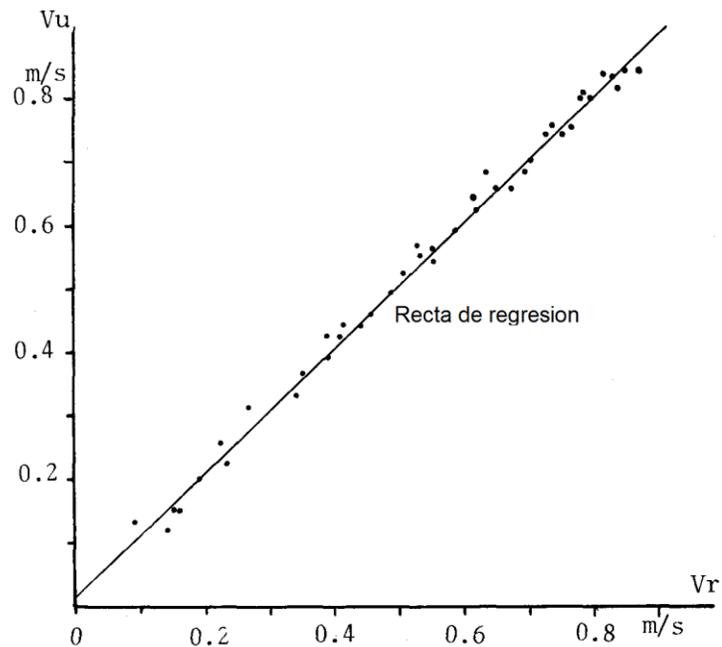


Figura 1.1 Recta estadística de regresión lineal con los datos obtenidos con un medidor ultrasónico utilizado en Nikkawa, Tone River (Kinosita, 2001).

Sin embargo el método ultrasónico no se puede utilizar en el 100% de los casos debido a que existen ciertas condiciones que afectan el funcionamiento y por lo tanto la precisión del sensor. Entre ellas son la temperatura, ya que se ha probado que bajo cierta temperatura un río calmado produce interferencias sonoras con el sensor lo que ocasiona un mal funcionamiento en este, otro

problema sería el ruido, esto es debido a que los sonidos fuertes como el sonido del motor de una lancha, etc. afectan las ondas emitidas por el sensor provocando que tenga mediciones incorrectas o engañosas.

El método ultrasónico es un buen método que ha ido mejorando bastante y está completamente operacional en nuestros días sobre todo cuando se requiere una medición en ríos muy turbulentos, y se recomienda ampliamente el método ultrasónico para redes hidrométricas debido a todas sus características y ventajas, los errores pueden ocurrir, pero las ventajas y ganancias del método están por encima de sus problemas.

Otro ejemplo es el artículo presentado por la Mishra Ashok, en el cual hace una investigación relacionada al diseño de las redes hidrométricas creadas con la finalidad de monitorear una amplia gama de variables relacionadas con los problemas ambientales y de disponibilidad del agua.

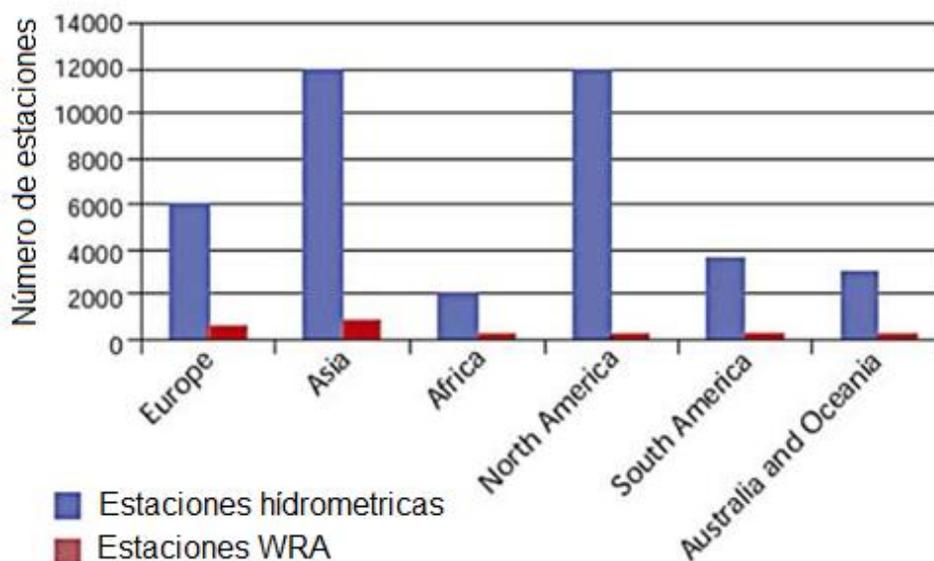


Figura 1.2 Estaciones hidrométricas en azul y estaciones de evaluación de recursos hídricos (WRA) en rojo alrededor del mundo (Mishra & Coulibaly, 2009).

La Figura 1.2 nos muestra el número de estaciones hidrométricas contra el número de estaciones de evaluación de recursos hídricos (WRA) en distintas partes del mundo lo cual muestra, como actualmente estamos viviendo un decaimiento en el número de estaciones de medición de los recursos hídricos en ríos y canales los cuales provocan que cada vez sea más difícil predecir con precisión los escenarios y el comportamiento de los recursos hídricos lo cual según menciona en su artículo es debido a factores tales como falta de fondos en la investigación, mala orientación del trabajo institucional, poca apreciación por el valor de los datos hidrológicos a largo plazo y en algunos pocos casos debido a guerra y desastres naturaleza. (Mishra & Coulibaly, 2009).

Menciona que es importante el desarrollo tecnológico y científico en materia de medición de agua debido a los problemas actuales de cambios climáticos por los cuales una adecuada base de datos, que se actualice constantemente puede ayudar a prever sequias, inundaciones y ayudar a gestionar agua de una forma más eficiente, y puede ayudar de manera sustanciosa al ahorro de dinero debido a la información que las estaciones hidrométricas pueden proveer y a cómo pueden ayudar a predecir y determinar los mejores lugares para construir plantas tratadoras de aguas y plantas hidroeléctricas.

Al tomar en cuenta en el análisis de las debilidades de los sistemas hidrométricos tales como la dificultad para analizar matemáticamente las variables relacionadas con las precipitaciones pluviales y de escurrimiento, una mala resolución y medida de los instrumentos, debido al clima tan cambiante de una región, a lo impredecible que es la naturaleza en cuestiones climáticas, al impacto humano en cada área y a la contaminación producida por este mismo y a la serie de anomalías impredecibles presentes en todo momento, concluyen que aún hay mucho trabajo que hacer y mucho que avanzar en la creación de redes hidrométricas eficientes y funcionales, que hay un déficit en la recolección de datos y en él la importancia que se le debe dar a este tipo de información que a largo plazo será necesario para la predicción y la mejor gestión del agua en todos

los ámbitos en la que se utiliza y finalmente que hay mucha oportunidad para nuevos métodos y nuevos estudios en este tema lo cual implica más atención por parte de las instituciones y centros de investigación así como mayor inversión por parte de los gobiernos.

Algunos métodos presentados han utilizado tecnología que no se creía que pudiera ser aplicada para estos fines como lo presenta Brakenridge (2007) del California Institute of Technology en un artículo presentado en el Water Resources Research, en este documento presentan una propuesta en la que, utilizando satélites de sensores pasivos de microondas en conjunto con estaciones hidrométricas en tierra y sensores ópticos para áreas amplias pueden estimar cambios en las descargas de los ríos, la cantidad de hielo presente y el escurrimiento en las cuencas.

Con solo unos pocos datos obtenidos en tierra se puede calibrar el sensor que está en órbita y puede entregar lecturas bastante precisas del flujo presente en los ríos, así como la cantidad de hielo que transporta el río y su temperatura aproximada, se menciona que gracias a la alta tecnología del sensor y a su gran resolución no resulta afectado por nubes y puede servir para estimar los flujos de ríos de todo el mundo ya que solo necesita una base de datos con valores del flujo del río para ser calibrado, los datos no tienen que ser recientes y pueden tener meses de diferencia entre ellos.

En la figura 1.3 se puede apreciar la predicción realizada por medio del uso del sensor de microondas y las bases de datos existentes así como la medición tomada en la estación hidrológica, ambas gráficas son muy parecidas y se puede apreciar una relación y similitud de los datos obtenidos con los calculados.

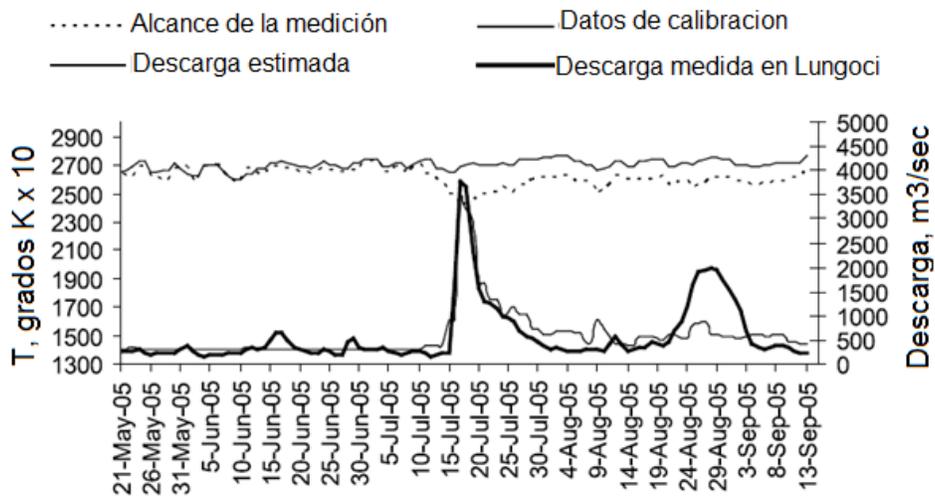


Figura 1.3 Medición remota basada en la descarga del río Siret en la estación Lungoci cerca de Galati, Eastern Romania. Se presenta la mayor inundación en 2005, así como las mediciones recibidas en la descarga de la estación Lungoci. (Brakenridge et al., 2007).

Finalmente, se concluye que el uso de este tipo de sensores trae ventajas considerables tales como la temprana detección de un cambio de flujo, una posible inundación u otro desastre, al no ser un método en el cual se tenga que estar en el sitio de la medición se puede realizar muy rápidamente y de forma constante, debido a que la detección es espacial no se puede tener una resolución muy alta (del orden de 1 a 10 kilómetros) que es poca resolución espacialmente hablando, pero es muy dinámico y flexible ya que puede detectar anomalías que duran de horas a solo minutos (Brakenridge et al., 2007).

Sus usos, según lo indican, podrían ser la medición y seguimiento de un río desde donde nace hasta su desembocadura en el océano, investigación de los efectos de las inundaciones en los ecosistemas y en los océanos, así como la detección y seguimiento de desastres naturales para la temprana alerta a niveles regionales e internacionales.

Un estudio realizado por investigadores de la Universidad Estatal del Centro-Oeste, Brasil buscaba medir el flujo de salida y la sedimentación de una sección del río Cascabel en el cual realizaron 28 mediciones y tomaron 84 muestras del sedimento.

El objetivo principal de la medición de este río era conocer su caudal medio, debido a que este representa un peligro potencial para las zonas urbanas por donde pasa, así como ser parte fundamental del ecosistema que mantiene la región, por lo tanto por medio del estudio se quería conocer la cantidad de agua que transporta, la absorción del agua potable potencial para plantas hidroeléctricas y planificación urbana en el área que rodea el río (Camargo Filho et al., 2009).

El método que utilizaron para la medición del flujo fue el método de los flotadores de flujo, este consiste en tomar una sección conocida y mediante un objeto que flote sobre la superficie del agua se mide el tiempo en segundos que tarda en llegar de un punto A al punto B.

La siguiente figura muestra el comportamiento del caudal del río en el tiempo de estudio en un período de 6 meses en el cual se puede apreciar que tuvo sus picos de capacidad durante los períodos de lluvias que comprenden los meses de mayo junio y septiembre.

Los resultados (Figura 1.4) arrojan un panorama no muy favorable, la falta de vegetación en la ribera del río, está ocasionando erosión y exceso de sedimentación en el lecho durante todas las estaciones del año, si no hay medidas de control que eviten o corrijan la actual situación geo-ambiental del área estudiada, el riesgo de inundación será cada vez mayor y la sedimentación será cada vez más un hecho. Teniendo en cuenta la contaminación debido a descargas domesticas e industriales, el daño al río tomara proporciones desastrosas y la flora y fauna del lugar se verán comprometidas, afortunadamente debido al estudio

realizado y a las mediciones se ha podido detectar el problema y ahora se podrán tomar acciones para remediar el problema todo gracias a la oportuna y constante medición de las condiciones del río.

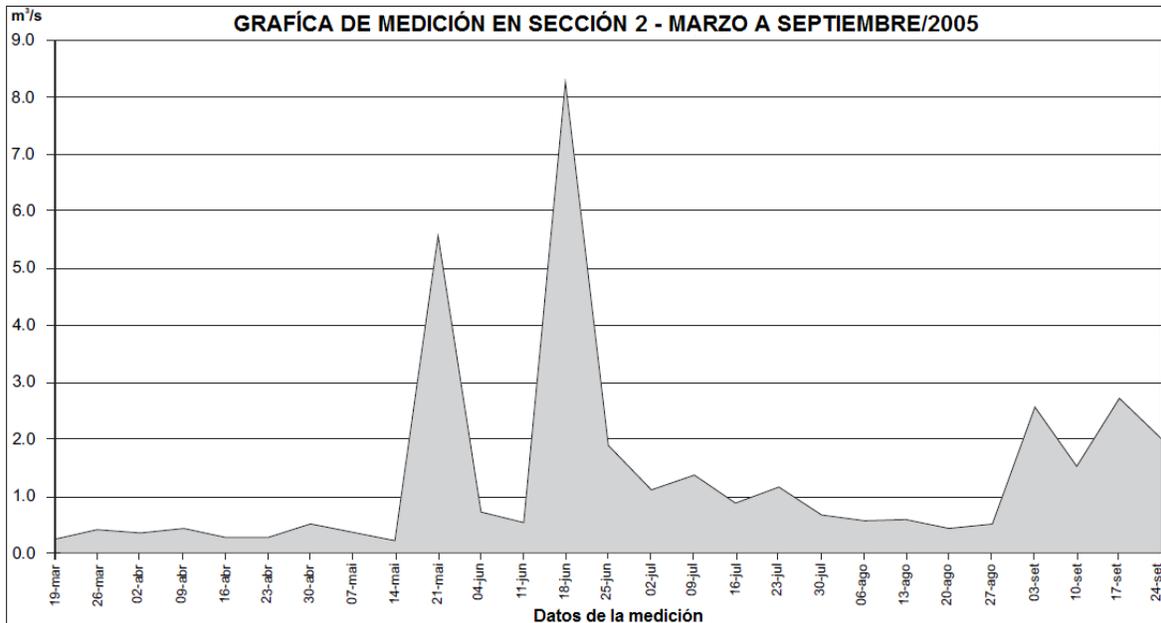


Figura 1.4 Grafico de caudal en metros cúbicos por segundo realizado con las 27 muestras tomadas del 26 de marzo al 24 de septiembre (Camargo Filho et al., 2009).

En otro estudio realizado en ese mismo país Leandro Rodríguez de Souza y su equipo buscan usar la energía cinética del agua para determinar cuál es la capacidad de esta de producir energía eléctrica. El principio básico de la generación es el de usar la energía natural del flujo turbulento del río sin la necesidad de causarle daño. El objetivo principal del estudio fue el obtener datos hidrológicos que les ayudara a determinar si era viable una planta de energía de baja potencia para la región.

El método utilizado por los investigadores para la medición del flujo del río fue el método del molinete, que es un objeto que se sumerge en el río y por medio de una veleta que da vueltas se puede determinar la velocidad del río, con este dato y el dato del área del río donde se hizo la prueba, se puede determinar el flujo del río.

Una vez que se obtuvieron estos datos junto con los datos de la precipitación pluvial pudieron determinar la capacidad del río para generar energía eléctrica a partir de la fuerza de su flujo. Los datos obtenidos arrojaron que el río es ideal para la instalación de una turbina hidrocínética, ya que en el mes de menor precipitación pluvial se obtuvo un resultado más que satisfactorio para la puesta en marcha de la turbina lo cual sustenta la inversión de la turbina así como la infraestructura necesaria para la operación de esta, esta turbina beneficio a bastantes pobladores del Amazonas que vivían sin luz eléctrica debió al lugar donde habitan y a que es difícil implementar todos los servicios básicos (Rodríguez de Souza et al., 2011).

También, se comprobó la importancia de conocer las características hidrometeorológicas y como estas pueden ser vitales para determinar los criterios técnicos necesarios para sustentar cualquier proyecto o investigación, también con la ayuda de simuladores y predicciones meteorológicas se mostró que es posible detectar o predecir los fenómenos hidrológicos adversos a partir de datos limitados, en efecto con este estudio se determinó que es seguro la instalación de sistemas hidroeléctricos y de estaciones meteorológicas, por último este trabajo hace una invitación a realizar más esfuerzos y desarrollar mayor tecnología necesaria para el análisis y determinación de futuros puntos y zonas en las que es posible la instalación de turbinas hidrocínéticas que ayudaran al impulso socio-económica de las zonas más apartadas y en donde no se tiene acceso a la red eléctrica pública.

En otros países de Latinoamérica también se incursiona con métodos novedosos para la medición de sus ríos y presas tal como lo presenta Oyola (2008) y su equipo, investigadores de la Universidad Nacional de Colombia, los cuales implementaron un prototipo de un sistema de monitoreo en tiempo real del nivel de agua en ríos usando instrumentación virtual.

Este ambicioso prototipo presentado por Oyola, funciona con una serie de sensores ultrasónicos y de temperatura los cuales por medio de una interfaz virtual crea instrumentos virtuales con ayuda de un programa llamado LabView, el cual se encarga de medir la señal de los sensores, la interpreta y la convierte en una variable que indica el nivel de agua en metros, este procedimiento se logra sólo en el lugar donde se instala el sensor, por otro lado, también, es capaz de medir el nivel de agua en tanques de almacenamiento. El programa cuenta con una interfaz grafica interactiva (HMI, de sus siglas en inglés) y cuenta con despliegue de datos y alarmas de alerta para los niveles críticos definidos.

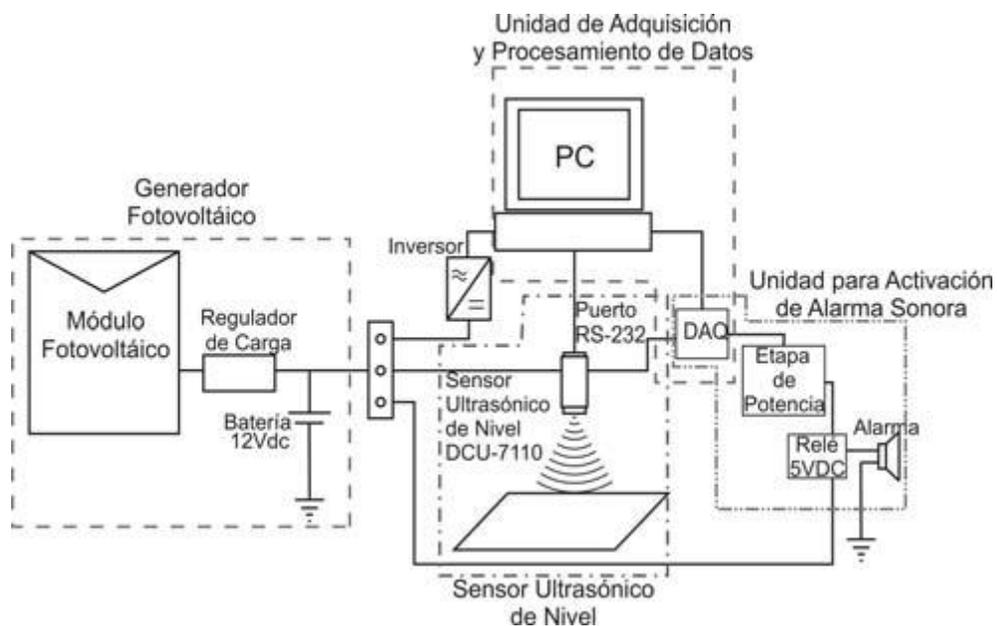


Figura 1.5 Diagrama de bloques del sistema de medición y monitoreo del nivel de agua (Oyola et al., 2008).

El sistema cuenta principalmente con un sensor ultrasónico con un rango de operación de entre 0.3 y 4.9 metros que entrega una señal eléctrica proporcional a la distancia en la cual se encuentre su objetivo, cuenta con una unidad de adquisición y procesamiento de datos que es la encargada de recibir y traducir los datos mandados por el sensor y posteriormente toma esa señal y la convierte a distancia en metros, el sistema es capaz de almacenar los datos en la memoria de la computadora y genera reportes a partir de ellos; Por último cuenta

con un generador fotovoltaico el cual está conformado por un módulo solar, una batería y un sistema electrónico para controlar la carga y descarga de la batería, cuenta con la capacidad de suministrar energía en AC y DC para alimentar los distintos tipos de componentes presentes en el sistema.

Debido a que la señal del sensor es afectado por la superficie a detectar, se hicieron pruebas con agua y con cemento a distintas alturas para determinar cuál sería el más adecuado para lecturas precisas y confiables arrojando los siguientes datos:

	Agua (1.5m)	Agua (0.75m)	Agua (1m)	Cemento (1.8m)	Cemento (1m)	Cemento (.5m)
Desv. Estándar (cm)	0.04	0.13	0.06	0.03	0.05	0.1
Dist. Prom. (m)	1.5	0.75	1	1.8	1	0.49
No. datos	385	390	398	390	400	405
Error rel. (%)	0.22	0.27	0.23	0.18	0.21	0.24

Tabla 1.1 Análisis estadísticos de los datos adquiridos durante la prueba del sensor ultrasónico.

El sistema presenta una respuesta bastante confiable, con un error de  $\pm 0.5\%$  y una resolución de 1.5 mm y ya que el sistema cuenta con alarmas para cuando el río rebasa el nivel definido se puede utilizar para crear alarmas y sistemas de alerta temprana ante un desbordamiento o una inundación en zonas de poco acceso.

En México se han hecho algunas investigaciones respecto a la medición hidrológica un ejemplo claro es el trabajo presentado por Germán Santacruz de León y Miguel Aguilar Robledo de la Universidad Autónoma Metropolitana. En este trabajo estiman el caudal ecológico del Río Valles.

El caudal ecológico se define como el régimen fluvial que se da en un río, humedal o zona costera para mantener ecosistemas y sus beneficios; o como el caudal que es capaz de mantener el funcionamiento del ecosistema fluvial en condiciones naturales (Santacruz de León & Aguilar-Robledo, 2009).

Para la estimación de los caudales medio el equipo utilizó un método matemático conocido como método Tennant, que establece los siguientes criterios: 1) El 10% del caudal medio anual es el mínimo recomendable para mantener un hábitat que permite en un corto plazo la sobrevivencia de la mayoría de las formas de vida acuática, 2) El 30% del caudal medio anual es recomendable para mantener un hábitat adecuado para la sobrevivencia de las diversas formas de vida acuática; 3) El 60% del caudal medio anual es recomendable para generar un hábitat de características excelentes a excepcionales para la mayoría de las formas de vida acuática (Santacruz de León & Aguilar-Robledo, 2009).

Los datos fueron obtenidos por medio del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) y los datos fueron recolectados por medio de 2 estaciones hidrológicas existentes en el río.

Con el estudio determinaron que el río sufre un decremento en su gasto medio lo cual es producto de la presencia del hombre y la destrucción del ecosistema existente. Con base en los resultados se establecieron sistemas de monitoreo de alerta temprana y métodos de preservación del ecosistema, sobre todo, con fines de gestión integrada de recursos hídricos e incluso con la finalidad de limitar las extracciones de agua del río. Los resultados permiten concluir que el caudal ecológico ha disminuido entre 10 % y 11 % en los últimos treinta años en el tramo donde se realizó el estudio; en los meses más críticos, en relación con la cantidad de agua que fluye por los puntos estudiados, para la vida acuática son marzo y abril, meses en los que se presenta el período de sequía y, con ella, las mayores extracciones de agua para uso agrícola y doméstico.

Recomiendan que un río sometido a nuevas y grandes extracciones de agua para usos humanos se calculen y revisen, cuando menos en un período de diez años. Esto solo es posible en la medida que existan estaciones hidrológicas en todos los ríos y canales de la región, y con medición constante o mediciones en tiempo real se puede predecir que ríos y mantos están siendo sobre explotados y de esta forma tomar acciones para impedir la sobre explotación y el impacto en el ecosistema.

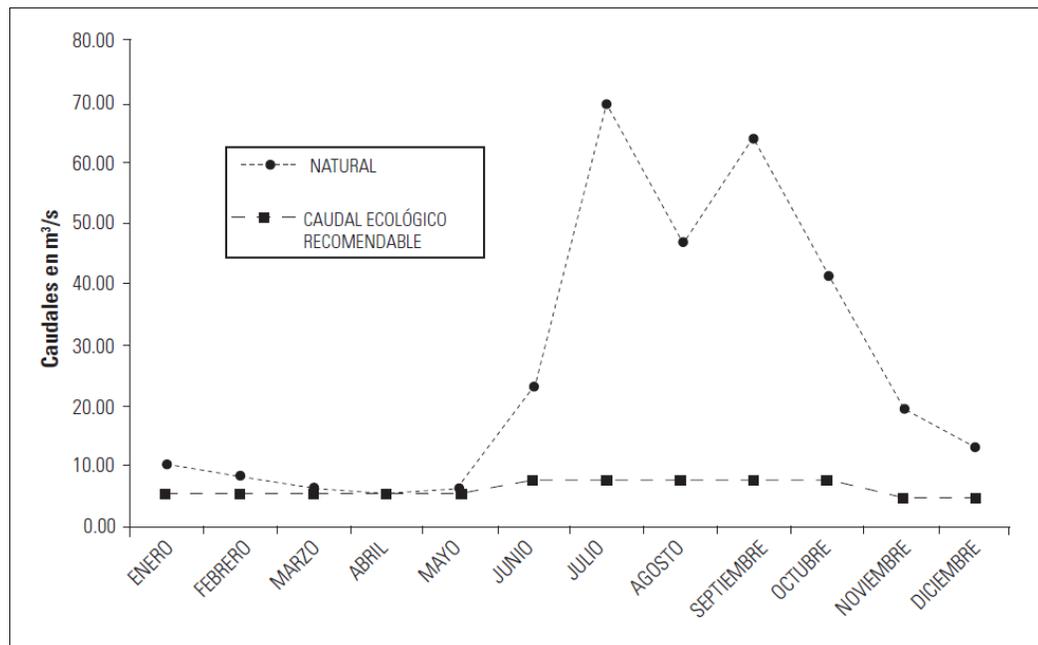


Figura 1.6 Caudal medio mensual versus caudal ecológico recomendable calculado por método Tennant en la estación Micos, período (1976-2000). (Santacruz de León & Aguilar-Robledo, 2009).

Si bien el método presenta ventajas en la estimación de caudales, no debemos olvidar que es un método matemático y como tal, tiene desventajas y errores, que pueden ser corregidos por los métodos modernos de medición.

Tenemos el caso del ingeniero Edmundo Pedroza Gonzales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua en Morelos, en su trabajo, implementa aforadores ultrasónicos en las presas “Lázaro Cárdenas” y “Francisco Zarco” para

mejorar el balance hidráulico y de esta manera mejorar la administración del recurso en la zona.

El sensor ultrasónico seleccionado para este proyecto fue el de efecto Doppler debido a las ventajas técnicas que presenta así como por su versatilidad a la hora de colocarlo en el afluente para poder realizar la medición. El sensor Doppler tiene ciertas consideraciones que deben ser tomadas en cuenta para su utilización, en primer lugar se asume que las partículas en las que se refleja la señal avanzan a la misma velocidad que el agua, y también se asume que el agua contiene un mínimo de partículas en suspensión para que la señal se refleje. (Pedroza-González, 2011).

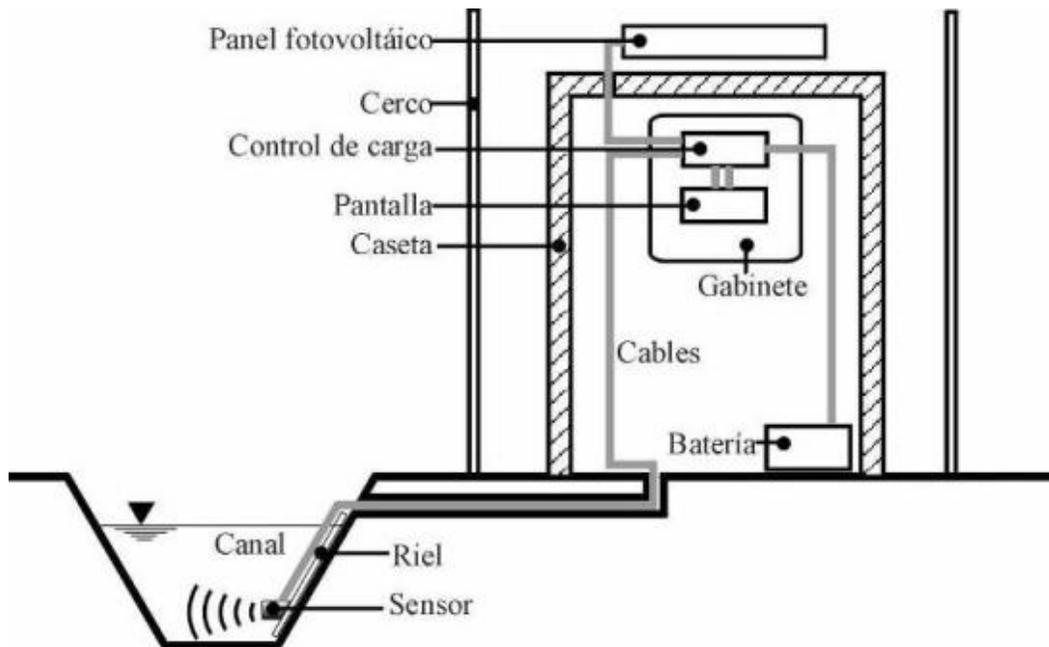


Figura 1.7 Instalación de un sensor de efecto Doppler para medición de caudal en canales y ríos. (Pedroza-González, 2011).

Dentro de las principales ventajas que presenta el método del sensor Doppler podemos mencionar, que al ser un sistema diseñado para trabajar las 24 horas del día, cualquier cambio en el gasto o caudal es medido y registrado al instante, enriqueciendo la base de datos y ayudando en la estimación de las pérdidas presentes en el río, así como mejorar las estimaciones de las extracciones utilizadas para zonas de riego.

Las desventajas de este método se presentan relativamente al poco tiempo, causadas principalmente por la naturaleza, por mencionar algunos ejemplos tenemos, que al venirse una crecida en el flujo del río arrastró objetos de gran dimensión tales como rocas y ramas de árboles, los cuales causaron daños importantes a la caseta donde se aloja el sistema de adquisición de datos y a los sensores; también podemos mencionar que la erosión natural del río arrancó de su lugar los cables de comunicación del sensor que se encontraban en el lecho de este, lo que ocasionó fallas en el registro de los datos y hasta la total pérdida de comunicación con los sensores.

La actualización en los sistemas de medición no es el único método para asegurar una predicción eficiente y exacta de las condiciones naturales de ríos y presas, tenemos que considerar que con la ayuda de la estadística y de los métodos matemáticos predictivos también se puede hacer un gran avance en la obtención de datos confiables y útiles.

Tal como menciona el Dr. Campos-Aranda (2010), “Cuando en un sitio de interés no existe ningún tipo de información hidrométrica, la estimación de sus crecientes o avenidas máximas deberá basarse en los análisis hidrométricos regionales”. También nos menciona que en el caso de existir datos disponibles, por muchos o pocos que estos sean, deben ser utilizados al menos como referencias parciales o bases para partir en métodos estadísticos.

En su artículo, hace uso de la distribución Log-normal, que es el método estadístico más utilizado para la estimación de gastos máximos anuales. Su propuesta combina métodos estadísticos tan sencillos como la desviación estándar y la media aritmética, con funciones probabilísticas tales como la  $t$  de Student y la distribución Log-normal, complementando estos datos con la información recopilada de las estaciones hidrométricas existentes.

Para poner a prueba la efectividad de su propuesta hace uso de datos existentes del río Santiago en Nayarit, que debido a la poca o nula actualización, sus registros hidrométricos llegan a tener hasta más de 60 años de antigüedad, lo que ocasiona una deficiencia en las predicciones de las venidas y en los niveles de retorno de agua por temporada, pero con ayuda del método propuesto y de las combinatorias realizadas se pudo recopilar información para crear curvas de tendencia y gráficas para predicciones que serán útiles para el cálculo de los gastos y para la temprana preparación de temporadas de escasos o de inundaciones.

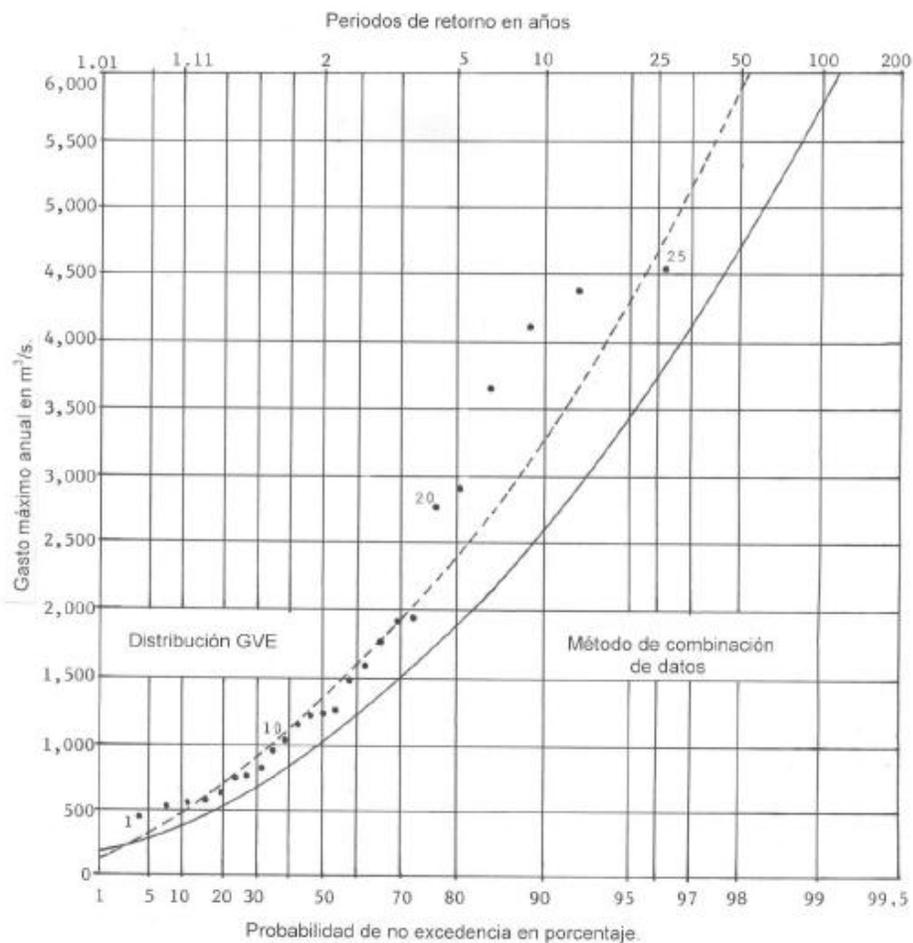


Figura 1.8 Contraste grafico de datos existentes contra datos obtenidos por medio de métodos combinatorios para la estación hidrométrica del río Santiago (Campos-Aranda, 2010).

Estos trabajos y artículos mencionados nos muestran como se ha incursionado en el mejoramiento de los métodos existentes de medición y en la

utilización de métodos estadísticos y matemáticos para mejorar la predicción temprana de crecientes, la situación hidrométrica actual de presas y cauces naturales además de la gestión de recursos hídricos a niveles locales y regionales, pero todos estos métodos no pueden tener su máximo de efectividad si no están al alcance de las instituciones en el sentido tecnológico y económico, se tiene que innovar en los métodos utilizados pero siempre con la consideración de que sean de fácil utilización y que no represente una inversión económica que solo pocas instituciones o personas puedan costear.

### 1.3 Hipótesis

- Mediante el uso de técnicas de diseño industrial, electrónica y programación embebida se puede rehabilitar sistemas mecánicos utilizados para la medición de caudal con las mismas o mejores prestaciones.

### 1.4 Objetivos.

#### 1.4.1 Objetivo General

- Diseñar e implementar un instrumento de medición que con la ayuda de sistemas electrónicos y principios físicos que sea capaz de estimar el caudal de ríos y canales.

#### 1.4.2 Objetivos Particulares.

- Proponer un sistema que mediante el uso de tecnología, pueda ser implementado en sistemas de medición mecánicos en desuso mejorando su funcionamiento.
- Determinar si con la implementación de un medidor electromecánico, se puede obtener una medición y/o cálculo preciso del flujo y caudal de un río o canal.

- Evaluar si el instrumento diseñado puede ser utilizado en el campo o en el laboratorio como sistema convencional para la medición de flujos y caudales.

### 1.5 Justificación.

En México se vive un rezago tecnológico en materia de administración de recursos hídricos que impide un aprovechamiento, distribución, recepción y manejo efectivo del agua en toda la República Mexicana. El rezago tecnológico es consecuencia de la falta de inversión y el poco recurso financiero destinado a las obras hidráulicas en el país (CONAGUA; SEMARNAT, 2008).

La Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) conjuntamente con CONAGUA y el Gobierno Federal presentan en el Plan Hídrico Nacional 2007-2012 varias iniciativas y propuestas para mejorar el aprovechamiento del agua nacional entre las que destacan, el desarrollo tecnológico de métodos y procesos de medición para la mejora en la administración y canalización del agua procedente de lagos, ríos y precipitaciones pluviales (CONAGUA; SEMARNAT, 2008), esto para una mejor administración y aprovechamiento en materia de agricultura, generación eléctrica y agua potable. A su vez el Plan Hídrico Nacional exhorta a las instituciones de educación pública y a los centros de investigación a producir tecnología y recursos humanos para la innovación y mejoramiento del sector hídrico Mexicano.

La oportuna y exacta medición del caudal en un río, permite evaluar los volúmenes susceptibles de ser aprovechados y también permitirá utilizar la información a tiempo real para alertar a la población de una posible amenaza de inundación.

Tradicionalmente la medición de caudales en un río se le conoce como aforo y se efectúa en nuestro país con un instrumento llamado molinete, que es un aparato que transforma revoluciones o velocidad tangencial en velocidad lineal de

la corriente. Con este dato de la velocidad, como se conoce el área hidráulica de aforo, se puede calcular o conoce el caudal. En este sentido se tienen un sin número de alternativas, por ejemplo, el medidor con láser, el medidor Doppler, entre otros. Estas tecnologías son costosas (Tabla 1.2) para nuestro país y nuestras instituciones públicas y aún no están al alcance de todos. Esto es el primer objetivo que se pretende en este trabajo, diseñar o en su caso mejorar dispositivos para aforo usados normalmente para la medición de flujo en ríos y presas de México.

Equipo	Descripción	Costo Promedio
Medidor de gasto SonTek Argonaut	Medidor de gastos de efecto Doppler ultrasónico con equipo y control.	\$ 100 000 MXN.
Caudalímetro AquaProfiler M-Pro	Medidor ultrasónico, con pantalla Led y cable de 9 metros registro completo en v.	\$ 25 000 MXN.
Correntómetro mod. F1	Correntómetro universal con hélices tipo propela acero inoxidable.	\$ 17 700 MXN.
Molinete hidrométrico Flow-watch FW-450	Molinete medidor de velocidad analógico con posibilidad de digital con cargo extra.	\$ 15 900 MXN.
Canaleta Parshall	Canaleta pre-fabricada Parshall para flujos desde 2.8 m <sup>3</sup> /h hasta 125.3 m <sup>3</sup> /h.	\$ 12 700 MXN.

Tabla 1.2 Costos promedios de los aforadores y medidores de caudal más utilizados en la industria.

## II. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

### 2.1 Medición de Caudal

El caudal o gasto de una corriente es el volumen de agua que pasa por una sección transversal del cauce o canal en un tiempo dado, normalmente en la unidad de tiempo.

Aforar una corriente de agua es determinar en un momento dado el valor del caudal. A esta operación se le llama aforo, y a la persona que lo realiza aforador.

El caudal depende directamente de la superficie (S) de la sección transversal de la corriente de agua y de la velocidad media del agua (V); obteniéndose de esta forma el caudal o gasto (Q) por medio de la multiplicación de ambos factores:

$$Q = S * V \quad (1)$$

La superficie de la sección transversal de la corriente, como su velocidad, varían con la altura de agua, por lo cual, una vez conocida esa relación, pueden obtenerse los caudales por medio de las alturas de agua registradas en escalas colocadas en forma apropiada. (Doebelin, Ernest O., 2003).

El grado de exactitud en la medición de un curso de agua depende del cuidado que se tenga en la tarea y del equipo o método utilizado. La selección del método dependerá del volumen a medir, de las condiciones bajo las cuales deben efectuarse las medidas y de la exactitud requerida.

Existen distintos tipos de equipos o métodos para aforar a continuación nombrare los más importantes y más utilizados:

El aforo químico se aplica en casos especiales donde no se puede determinar la sección o la velocidad por ejemplo en ríos de montañas o cauces naturales en zonas de difícil acceso. Consiste en proveer una compleja mezcla de trazadores que serán vertidos en el cauce del río, el radio de concentración de la solución inyectada en el río medida aguas abajo, será la medida de la descarga.

Para la utilización de este método se tienen que tomar una serie de muestras a lo largo del cauce del río, y medir los niveles de concentración de la sustancia vertida; El método es muy confiable pero se ve afectado por el número de cálculos que tienen que ser realizados para determinar el caudal y la dificultad de obtención de los equipos utilizados para el análisis de muestras, así como la presencia de químicos que pueden dañar el ecosistema del río o contaminar el agua en caso de que vaya a ser utilizado para el consumo humano. (Hersch, R. W., 1998)

Cuando el método del trazador químico no es el adecuado se utiliza el método de los flotadores. Este método consiste en soltar un cuerpo flotante (el flotador) en el cauce del río y por medio de cronómetros medir el tiempo que tarda en objeto de llegar de un punto A a un punto B donde la distancia de A a B será determinada por el usuario y por lo tanto conocida.

El flotador debe ser soltado desde una distancia suficientemente lejana aguas arriba para lograr una velocidad constante antes de llegar a los puntos de medición. El cálculo del caudal se logra multiplicando el área del segmento utilizado para la medición por la velocidad estimada en el segmento.

Este método presenta los inconvenientes de ser afectado por el aire u otros objetos presentes en el flujo y tiene que ser usado en un segmento recto para que la medición represente la velocidad media del flujo medido. (Hersch, R. W., 1998)

El uso de fórmulas empíricas, es así mismo, una práctica válida y actualmente, aun esta en uso, aunque solo es utilizada a la hora de realizar cálculos rápidos y que no necesiten mucha precisión y los datos tienen que ser corroborados posteriormente con el uso de un método comprobado.

Este método es totalmente empírico y está basado en la idea de que la velocidad del agua en un canal, está relacionada con una serie de factores que pueden ser determinados con la ayuda de tablas y de relaciones directas. Factores tales como, pendiente en condiciones ideales del canal, la fricción que presenta el río dependiendo de la rugosidad o suavidad de las paredes del canal o río y la forma del canal que finalmente determina el área transversal del río, etc. Son factores que pueden ser concentrados en una fórmula conocida como fórmulas de Manning que nos ayuda a determinar la velocidad media de un río. (Bello, M.A. & Pino, M.T., 2000).

El principal inconveniente de este método es que es meramente empírico y obtiene sus datos y cifras de tablas estandarizadas y en muchos casos no pueden representar fielmente la realidad, y en otros casos no pueden predecir la velocidad cambiante del canal dependiendo de la estación climática.

Dentro de los métodos más utilizados por su alta precisión y confiabilidad son los medidores tipo vertederos, estos vertederos son placas colocadas transversalmente al flujo del canal, los cuales tienen formas definidas y estudiadas. Los vertederos están concebidos para una descarga libre sobre la sección crítica con el fin de que el caudal sea proporcional a la profundidad de la corriente en el vertedero.

Los dos tipos más comunes son el vertedero triangular y el vertedero rectangular. Para su funcionamiento debe haber una poza de amortiguación o un canal de acceso aguas arriba para calmar cualquier turbulencia y lograr que el agua se acerque al vertedero lenta y suavemente. Además, para tener mediciones

precisas, el ancho del canal de acceso debe equivaler a ocho veces al ancho del vertedero y debe extenderse aguas arriba a 15 veces la profundidad de la corriente sobre el vertedero. Para conocer la profundidad de la corriente a través del vertedero, se instala un medidor en la poza de amortiguación en un lugar en el que se pueda leer fácilmente. El medidor debe instalarse bastante detrás de la escotadura para que no se vea afectado por la curva de descenso del agua a medida que el agua misma se acerca a la escotadura. (Bello, M.A. & Pino, M.T., 2000).

Estos vertederos cuentan con tablas ya establecidas en las cuales dependiendo de la proporción de la escotadura y de la altura del agua nos dice instantáneamente el caudal del río o canal, la desventaja de estos, es que necesitan una instalación sobre el flujo y no pueden ser utilizados con caudales muy grandes además de necesitar una preparación aguas arriba para que la medición sea confiable.

Existen una gama de aforadores que son los que han demostrado una mayor confiabilidad y precisión cuando se trata de medir caudal en flujos de distintas dimensiones, estos aforadores son conocidos como aforadores de pared ancha, debido a la construcción hidráulica que es necesaria para la construcción de dichos aforadores.

Los más destacados debido a su amplio estudio y a su extenso uso son el canal de aforo Parshall y los aforadores en H.

El principio de funcionamiento del canal Parshall es muy sencillo en realidad, es una canaleta que sigue el principio de Venturi para el aforo del flujo en canales abiertos constituida por tres secciones principales:

- 1) Una sección convergente o de contracción, localizada aguas arriba.
- 2) Una sección contraída o de garganta.
- 3) Y una última sección divergente o de expansión aguas abajo.

Este tipo de estructuras aforadoras funcionan muy bien con todo tipo de caudales grandes o de caudales pequeños, ya que cuentan con medidas estandarizadas por tablas para cada una de sus secciones. Gracias a esta estandarización el uso de los aforadores Parshall resulta muy sencillo y casi no presenta errores a la hora de tomar la medición, ya que la contracción y caída de flujo es constante y está determinada por las proporciones de las secciones, por lo tanto, para conocer el caudal del flujo lo único que se tiene que medir es la altura en las secciones aguas arriba y aguas abajo del aforador, debido a que este aforador cuenta con una relación directa entre dichas alturas y el caudal que pasa a través de él.

Las principales ventajas de este aforador son: solo existe una pequeña pérdida de carga a través del aforador debido a la contracción de este, deja pasar libremente sedimentos y desechos lo cual no afecta su capacidad de medición ni su confiabilidad, no necesita una poza de amortiguación y puede funcionar con flujos con pendiente suave. Dentro de sus desventajas podemos mencionar que este aforador requiere una estructura que se necesita situar en un lugar que se recomienda este lejos de cascadas o curvas ni cerca de compuertas o de cualquier estructura que perturbe el nivel del agua, requiere una estructura hidráulica que representa un costo considerable y no puede ser retirado posteriormente. (Herschy, R.W., 1999).

Por otro lado, los aforadores en H son aforadores que están basados en los canales Parshall pero con diversas modificaciones en su forma con la ventaja de que son capaces de capturar sedimentos y pueden funcionar parcialmente sumergidos.

Sus ventajas frente al canal Parshall son: el agua fluye a través de la escotadura rápidamente de manera que no se produce depósito de sedimentos en el aforador, el diseño de salida con una escotadura con pendiente del fondo hacia aguas arriba no queda obstruida por residuos flotantes. Si en la escotadura se

retiene algún residuo, el agua se remansa hasta que la obstrucción es arrastrada por la corriente por encima de la escotadura. (Bos, M.G. et al, 1995).

De la extensa gama de métodos y técnicas de medición de caudal en flujos a superficie abierta, se ha escogido trabajar sobre la técnica de molinete hidrométrico, a continuación se expondrán los aspectos generales de este método así como sus pormenores y características principales.

### 2.1.1 Aforos con Molinetes hidrométricos.

Este método se fundamenta en la expresión de la fórmula 1, la velocidad se tiene que determinar en distinto puntos trabajando sobre la misma sección transversal S con un aparato que se denomina molinete hidrométrico.

Este es un equipo que contabiliza las revoluciones que efectúa la hélice al ser sumergida en una corriente de agua. La velocidad se obtiene mediante una curva de calibración que relaciona las revoluciones por segundo con la velocidad. Esta curva de calibración es única para cada aparato y para cada hélice. (Bos, M.G. et al, 1995).

Está compuesto básicamente por los siguientes componentes, aunque puede tener más componentes, dependiendo de la especificación con la que cuente el instrumento:

- Un sistema accionante: hélice o rotor.
- Un interruptor: mecánico o magnético.
- Un sistema de señal: acústico / sonoro.
- Un sistema de sujeción: barras o cable y contrapeso.

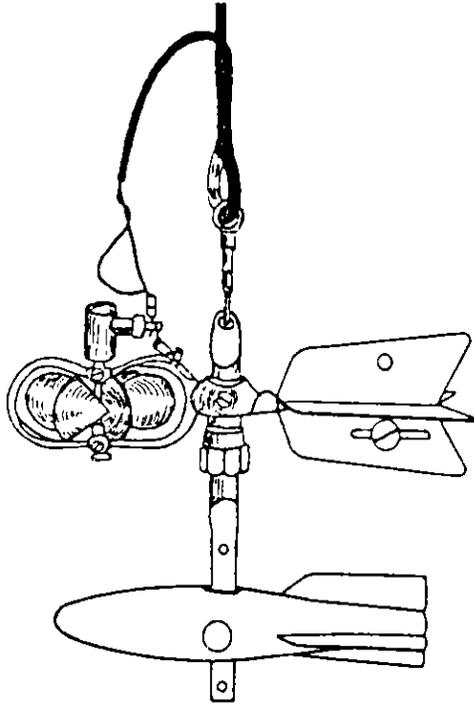


Figura 2.1 Molinete hidrométrico tipo taza cónica. (Herschy, R.W., 1999).

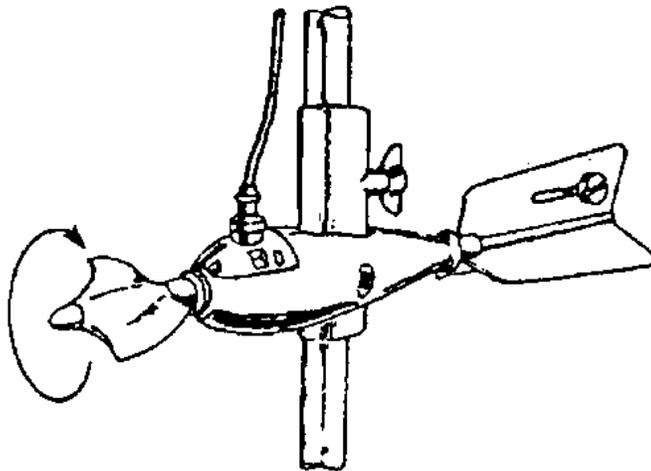


Figura 2.2 Molinete hidrométrico tipo hélice. (Herschy, R.W., 1999).

Los molinetes más utilizados en campo en campo para efectuar mediciones son de dos tipos principalmente: de contacto mecánico y de contacto magnético. Se denomina contacto mecánico cuando el interruptor es accionado directamente, o sea que es necesario un contacto físico. Normalmente es un platino preparado para que después de 10 o 20 vueltas de la hélice se cierre y active el circuito

eléctrico. En el caso del contacto magnético, el cierre del circuito eléctrico es efectuado por el pasaje de un imán montado al núcleo de la hélice, por cada vuelta de la hélice da uno o dos impulsos eléctricos.

Una vez que el molinete se halla en el lugar de medición, trabaja de la siguiente manera:

- Se pone en cero el contador de mano.
- Se conecta el contador, y en ese instante se inicia la cuenta del tiempo.
- Cuando se cumple el tiempo prefijado de medición se acciona el interruptor y se lee el número de vueltas de la hélice.

Debido a su tamaño, los más utilizados son el molinete universal con hélice de 12 cm de diámetro y el micro molinete con hélice de 3 cm de diámetro, la diferencia de tamaño fundamentalmente viene dada por el tamaño del área de aforo y la precisión requerida.

El sistema de sujeción del aparato dentro del agua puede ser por: Barras o cable y contrapesos.

Las barras están compuestas por tramos de 1 m de longitud, graduadas cada cm, o cada 10 cm, normalmente fabricadas en acero inoxidable o de aluminio, que unidas con tornillos o roscadas, permiten trabajar con hasta 4 o 5 tramos.

El cable y el contrapeso, por otro lado, se utilizan cuando se dificulta el trabajo con las barras, ya sea por la profundidad o por elevada velocidad del agua. Para ello se lo complementa con una barra de cola estabilizadora que la misma corriente del agua hace que el molinete se mantenga paralelo a los filetes líquidos.

Existen otros tipos de montaje para molinetes pero los antes mencionados son los más comunes y los que son más ampliamente utilizados en campo, tanto para prácticas, como para uso industrial.

Para el funcionamiento de estos instrumentos, primeramente tienen que ser calibrados y ajustados para lograr su óptimo funcionamiento y asegurar que las lecturas realizadas con este sean confiables y sean representativas del flujo total del río. Para esto, es necesario hacer uso de la curva de calibración del instrumento, que es la que encargada de relacionar las vueltas de la hélice con la velocidad de la corriente. Esta curva de calibración viene definida para cada molinete en particular, y a su vez, para cada hélice del equipo.

Puede ser suministrada por el fabricante, o si no, se adquiere el equipo y se envía a un centro especializado y certificado donde será calibrado y ajustado.

Cada molinete, por cada hélice, tiene 2 rectas de calibración posibles todo depende de la relación que sea seleccionada entre las revoluciones del aparato y el tiempo escogido de muestreo, y viene dado de la forma:

$$V = a * m + b \quad (2)$$

Dónde:

V = velocidad medida

a = es un número muy cercano y representativo al paso de la hélice.

m = es la relación entre el número de revoluciones (n) y el tiempo de lectura.

b = velocidad mínima a la que comienza a moverse la hélice.

De manera general la forma de hacer la medición con un molinete hidrómetro se realizara de la siguiente manera:

- Se seleccionara una sección transversal del río, que tendrá que ser una sección recta del río, esta sección tendrá que ser dividida en secciones verticales que tendrán diferentes alturas dependiendo de la profundidad del río, es importante mencionar que entre más verticales sean tomadas mayor precisión se tendrá en la medición del caudal total, con 10 verticales se considera una buena medida, con 15 es una muy buena medición.
- La velocidad será medida con el molinete en cada vertical a una altura definida, esta dependerá de la longitud de las secciones, serán realizadas a 0.2 y a 0.8 de la altura si la vertical es amplia y a 0.6 si la vertical es pequeña.
- El tiempo de medición en cada punto hay que elegirlo teniendo en cuenta el curso de agua que se quiera aforar: si es una sección uniforme donde los perfiles del líquido vengan sin remolinos, el intervalo de tiempo va a ser distinto que en un río donde tenga algunas verticales con perturbaciones, donde se tendrán aceleraciones y desaceleraciones del agua, en el último caso el intervalo de medición debe ser mayor.

Para todos los casos, lo que se pretende hacer es transformar velocidades puntuales medidas con el molinete hidrométrico en la media o promedio de esa vertical. (Basan-Nickisch, M., 2008).

Para realizar la medición con el molinete hidrométrico y posteriormente obtener la velocidad media del flujo, existen muchos métodos establecidos y que ofrecen buenos resultados, el más utilizado por su confiabilidad y por los datos recolectados es el método de los 5 puntos.

Este método consiste en realizar una serie de mediciones sobre las verticales seleccionadas de manera que, se pueda obtener una velocidad promedio por cada vertical para posteriormente con la ayuda de esta velocidad media y de las áreas de las secciones seleccionadas se pueda calcular el caudal

total del flujo. Se hace uso de esta ecuación para ayudar en la obtención de la velocidad media:

$$V_{media\ vertical} = (V_{superficial} + 3V_{0.2} + 2V_{0.6} + 3V_{0.8} + V_{fondo})/10 \quad (3)$$

Dónde:

$V_{superficial}$  = Velocidad superficial, es aquella medida cuando el agua justo tapa la hélice totalmente.

$V_{0.2}$  = Velocidad medida ubicando el centro de la hélice al 20% de la profundidad. Siempre midiendo desde la superficie del agua hacia el fondo.

$V_{0.6}$  = Velocidad medida al 60% de la profundidad.

$V_{0.8}$  = Velocidad medida al 80% de la profundidad.

$V_{fondo}$  = Velocidad de fondo, medida lo más cerca posible del fondo, sin que la hélice choque con el piso.

Se debe tomar en cuenta que, los flujos que vayan a ser medidos con estos instrumentos deben cumplir con ciertas características específicas o deben cumplir ciertas condiciones que a continuación serán mencionadas:

1. La sección de aforo se debe ubicar en un tramo recto, porque asociado a esto está la distribución de velocidades. Como criterio, que el tramo sea por lo menos 6 veces la longitud transversal donde se piensa aforar.
2. En una estación de aforo permanente el cauce tiene que ser lo más estable posible. Esto está asociado a la posibilidad de calcular curvas altura-caudal, de tal manera de que con una simple medición de la altura de agua obtenga el caudal, ahorrándonos todo el trabajo de los aforos. Esto no es posible si la sección cambia, ya que para una misma altura de agua pasaran caudales distintos.
3. Las velocidades del curso de agua deben ser medibles, debiéndose descartar secciones de aforo donde aparezcan zonas de aguas con

velocidad nula, contracorriente, velocidades muy bajas o demasiado altas.

4. Es conveniente una distribución más o menos uniforme de las velocidades, condicionadas por la sección en caso de ser simétrica o asimétrica.
5. Las líneas de corrientes o filetes líquidos deben ser perpendiculares a la sección de aforo.
6. La sección de aforos debe estar libre de obstáculos, donde se debe limpiar ramas, pastos o cualquier vegetación acuática que este próxima aguas arriba y aguas abajo, ya que esto está asociado a la rugosidad: a mayores obstáculos implica que más se frena el agua.
7. El acceso en las estaciones hidrométricas permanentes se debe realizar para todos los niveles del curso de agua, sobre todo en crecidas en el caso de cursos naturales.
8. La sección de aforos situada aguas arriba de cualquier estructura que embalse agua debe estar lo suficiente alejada, como para que la elevación del tirante del agua en el dique sea despreciable en el área de trabajo.
9. La sección de aforos debe ser sensible. Esto quiere decir que para una variación de caudal, aunque sea leve, experimente una variación de nivel de agua. Una sección es más sensible que otra si para la misma variación de caudal experimenta una mayor variación de nivel de agua.

Estas pueden ser consideradas como las reglas básicas que deben cumplirse para realizar un aforo exitoso con datos representativos y significativos. (Basan-Nickisch, M., 2008).

Finalmente el caudal total del flujo puede ser calculado mediante el cálculo de los caudales parciales en cada una de las secciones realizadas, para que por ultimo sean sumadas y de esta forma obtener el caudal total del flujo. Para calcular los caudales parciales, se aplica la fórmula 1 ya antes mencionada, y

determinando las pequeñas áreas formadas por las secciones parciales y la profundidad del canal se puede obtener el área de la sección y con los datos recopilados por el molinete se calcula la velocidad media con la ecuación antes descrita para que, de esta manera, se puedan obtener el caudal parcial de todas las secciones.

El método que será utilizado para nuestro estudio será el método de los molinetes hidrométricos. Debido a que es de los métodos más económicos y de fácil acceso, sus procedimientos son más fáciles de comprender, y debido a que son aparatos de fácil montaje y desmontaje son ideales para cualquier tipo de canal o de río, además de que cuentan con la ventaja de no necesitar mucha infraestructura para su utilización y también evitan el tener que afectar la estructura del cauce.

Este método es de los más utilizados en campo y en las prácticas escolares, es debido a esto, por lo que se decidió trabajar con él y en manera de lo posible mejorar sus tiempos de lectura, sus capacidades de medición y su capacidad de recolección de datos.

## 2.2 Encoders

Un *encoder*, también conocido como codificador rotatorio, es un dispositivo electromecánico usado en la industria y en los procesos que involucren el control de motores, para convertir la posición angular o lineal a código digital. Consta de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí, de un sistema de iluminación y de un elemento fotoreceptor. (Romero-Barcojo, A., 2010).

El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco, a medida que el eje gira se van generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese las marcas, llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del

eje. La resolución depende del número de marcas que se pueden poner físicamente en el disco.

Los *encoders*, según su fabricación, pueden ser ópticos o magnéticos. Los sensores ópticos proporcionan altas revoluciones y altas velocidades de operación, brindando una larga vida útil en ambientes industriales. Los sensores magnéticos se han venido utilizando en trabajos pesados como laminadoras de papel y acero, teniendo una buena resistencia al, a la humedad, golpe térmico y mecánico, aunque actualmente están siendo reemplazados por transductores ópticos en todas las aplicaciones. (Romero-Barcojo, A., 2010).



Figura 2.3 Transductores comunes para la fabricación de *encoders* ópticos y magnéticos.

Los *encoders* están disponibles con diferentes tipos de salidas, uno de ellos son los *encoder* incrementables, que generan pulsos mientras se mueven, se utilizan para medir velocidad, o la trayectoria de posición. El otro tipo son los *encoders* absolutos que generan multi-bits digitales, que indican directamente su posición actual.

Los *encoders* de incremento proveen un número específico de pulsos equitativamente espaciados por revolución o por pulgada o milímetro de movimiento lineal. Se utiliza un solo canal de salida para aplicaciones donde el sentido de la dirección de movimiento no es importante. Donde se requiere el sentido de dirección, se utiliza la salida de cuadratura, con dos canales de 90 grados eléctricos fuera de la fase.

Una salida de un *encoder* incremental indica movimiento. Para determinar la posición, sus pulsos deben ser acumulados por un contador. Las cuentas están sujetas a pérdidas durante una interrupción de energía o interferencia eléctrica. Cuando comienza, el equipo debe ser dirigido a una referencia o posición de origen para inicializar los contadores de posición. (West Instruments de México, 2009).

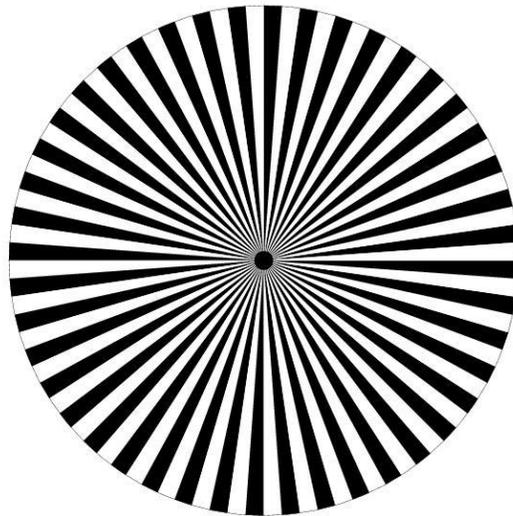


Figura 2.4 Ejemplo de un disco codificado utilizado en *encoder* de tipo incremental.

Un *encoder* absoluto genera mensajes digitales lo cual representa la posición actual del *encoder*, así como su velocidad y dirección de movimiento. Si la energía se pierde, su salida será corregida cada vez que la energía sea reestablecida. No es necesario ir a una posición referencial como con los *encoders* de tipo incremental. Los transistores eléctricos pueden producir únicamente errores de datos transitorios, usualmente muy breve como para afectar la dinámica de un control de sistema. (West Instruments de México, 2009).

La resolución de un *encoder* absoluto es definida como el número de bits por mensaje de salida. Esta salida puede ser directamente en código binario o Gray, el cual produce un cambio de un solo bit en cada paso para reducir errores.



Figura 2.5 Ejemplo de un disco codificado utilizado en *encoders* de tipo absoluto con codificación Gray.

La resolución será dada por el número de segmentos de medición o unidades en una revolución de un eje de *encoder* o una pulgada o milímetro de una escala lineal. Los *encoders* de eje están disponibles con resoluciones arriba de los 10 000 pulsos por revolución directamente, y 40 000 por detección de margen de 2 canales diferentes, mientras que los *encoders* lineales están disponibles con resoluciones medidos en micrones.

### 2.3 Calibración

Un instrumento o una de sus partes pueden considerarse como dispositivos de conversión de señales (transductores) que pasan de una variable de entrada a una o varias señales de salida, como indicación de la variable de entrada, lectura

de un índice o de un registro; transmisión de la variable de entrada en señal neumática o eléctrica; fijación de la posición de una palanca o un vástago de una varilla interna del instrumento o del vástago del obturador de una válvula.

Existirá una correspondencia entre la variable de entrada y la de salida, representando esta última el valor de la variable de entrada. Siempre que el valor representado corresponda exactamente al de la variable de entrada del instrumento se está efectuando una medición correcta. (Creus Solé, 1997).

Todos los sistemas de medida presentan desviaciones que se van incrementando a lo largo del tiempo. Cuando la desviación es mayor que la incertidumbre permitida para una señal, es necesario calibrar el equipo utilizado.

Se entiende por calibración al conjunto de operaciones que establece, bajo condiciones específicas, la relación entre las señales producidas por un instrumento analítico y los correspondientes valores de concentración o masa del juego de patrones de calibrado. Un instrumento representativo, se considera que está bien calibrado cuando en todos los puntos de su campo de medida, la diferencia entre el valor real de la variable y el valor indicado, registrado o transmitido, está comprendido entre los límites determinados por la precisión del instrumento.

Procedimiento general de calibración:

1. Situar la variable en el valor del campo de medida, y en este valor ajustar el cero del instrumento hasta que el indicador muestre el punto de base.
2. Colocar la variable en el valor máximo del campo de medida, y en este valor ajustar el multiplicador de señal hasta que el indicador muestre el valor máximo de la variable.

3. Repetir los puntos 1 y 2 sucesivamente, hasta que las lecturas sean correctas en los valores mínimo y máximo.
4. Colocar la variable en el cincuenta por ciento del intervalo de medida, y en ese punto ajustar la angularidad hasta mover el indicador cinco veces el valor del error a la dirección del mismo.
5. Reajustar sucesivamente el cero y el multiplicador del instrumento, hasta conseguir la exactitud deseada o requerida. Si fuera necesario, efectuar una nueva corrección de angularidad.

Cuando se calibra un instrumento se debe tener una razonable certeza de que este responderá de igual manera a los patrones así como a las muestras, aunque estas tengan una matriz relativamente diferente. Si estas diferencias son muy grandes, pueden llegar a invalidar el proceso de calibración. Es necesario estar completamente seguro de que el calibrado es válido antes de utilizarlo para obtener el valor de concentración de muestras incógnita.

### 2.3.1 Calibración a 2 puntos.

Si la respuesta del instrumento al valor de lectura a cero no es conocida de antemano, es necesaria una calibración con un mínimo de dos puntos (Creus Solé, 1997). Para esta calibración se utiliza un modelo lineal con un término constante:

$$y = b + mx \quad (4)$$

El término  $b$  indica la magnitud de la señal estimada cuando el instrumento registra un cero en la entrada, mientras que  $m$  es la pendiente de la recta de calibrado e indica nuevamente la sensibilidad.

Para la estimación de estos dos valores de la recta de calibrado es necesario hacer la lectura de 2 puntos, un punto tomado como el punto mínimo y

el otro que habrá de ser el punto máximo (Figura 2.6), y haciendo uso de la siguiente relación en donde  $x$  representa el valor de lectura o referencia:

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad (5)$$

Por tanto:

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) + y_1 \quad (6)$$

Con la cual finalmente llegamos a la fórmula 4, en la cual:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$b = y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * x_1$$

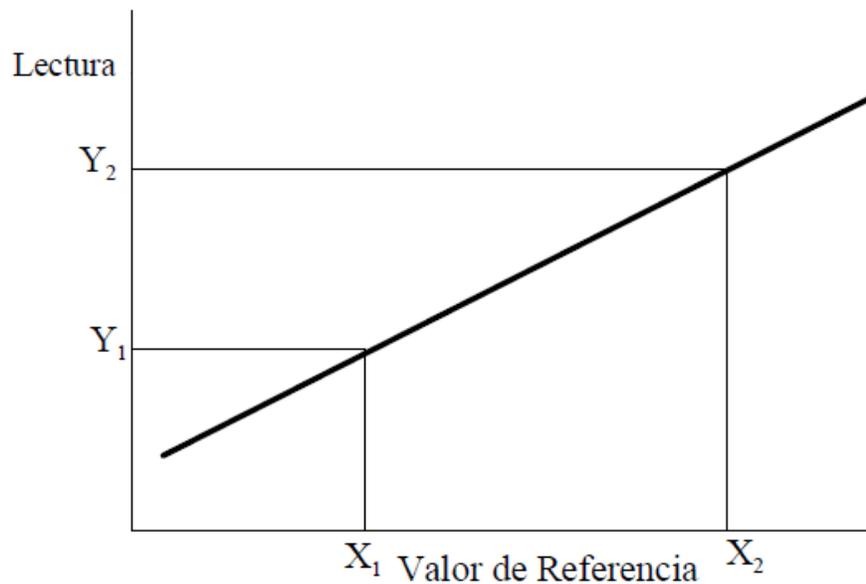


Figura 2.6 Ejemplo de recta de calibración con 2 puntos.

### III. METODOLOGÍA

El instrumento propuesto cuenta con 2 módulos principales (Figura 3.1), encargados de realizar la operación completa del sistema, que consiste en: medir, transmitir, interpretar, mostrar y registrar para su futuro uso.

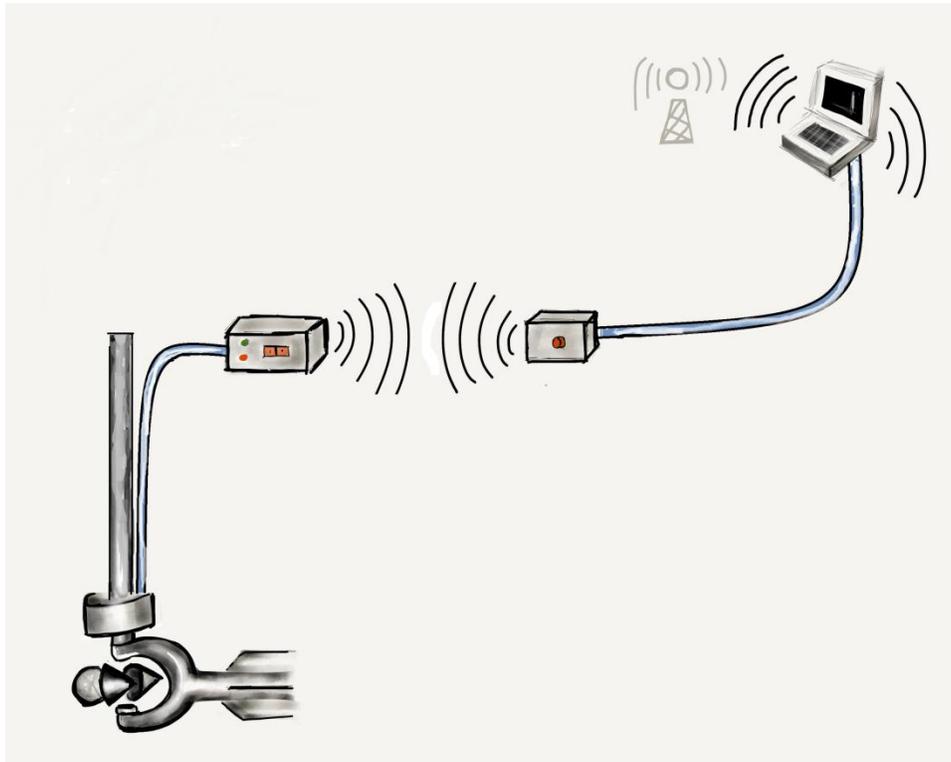


Figura 3.1 Esquema general del instrumento (boceto)

#### 3.1 Descripción del lugar de experimentación.

El presente trabajo fue realizado dentro de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), en el laboratorio de Hidráulica. El laboratorio es un recinto protegido de los efectos del clima y otras alteraciones del exterior, por su estructura y extensión, se mantiene a una temperatura promedio de 20 grados centígrados en primavera y 16 a 17 en invierno.

En este laboratorio se cuenta con un canal de pruebas (Figura 3.2), capaz de simular una variedad de perfiles de flujo con caudales variables, lo cual lo hace idóneo para igualar las condiciones presentes en todo tipo de flujos tanto artificiales como naturales.



Figura 3.2 Canal de Pruebas hidrométricas, Lab. De hidráulica, Facultad de Ingeniería UAQ.

Las medidas del canal son: 45 cm de alto, 38 cm de ancho y 10.93 m de largo y puede ser ajustado con inclinaciones que van desde 0 a 25 cm lo cual ayuda a cambiar las características de los flujos. Está construido con una armadura metálica de acero inoxidable, el fondo del canal es de acrílico traslucido pulido para minimizar las turbulencias debidas a las imperfecciones y el rozamiento, las paredes del canal son de vidrio para mejorar a la visualización del flujo y de esta manera mejorar la observación y comportamiento de los instrumentos utilizados.



Figura 3.3 Brazo que permite la inclinación del canal de pruebas

El canal cuenta con ciertas características tales como la capacidad de simulación de distintos tipos de flujos, es capaz de simular: flujo permanente y no permanente, flujo turbulento, flujo gradualmente variado, flujo no permanente “raro”, subcrítico – turbulento, supercrítico y turbulento, es capaz de producir caudales mínimos de 5 litros/segundo y hasta de 90 litros/segundo. Estos caudales son alcanzados gracias a una serie de bombas utilizadas para generar el flujo en el canal. El caudal es controlado por una válvula localizada en el piso a un lado del canal y el agua es suministrada por un tanque que se encuentra a una altura de 10 metros, el agua a este tanque es bombeada por medio de 3 bombas que pueden ser activadas juntas o en combinaciones diferentes dependiendo del caudal máximo que se quiera llegar a alcanzar.

La medición de este caudal es actualmente realizado por medio de 2 métodos ubicados en distintas partes del canal. El primero es realizado por medio de 2 compuertas colocadas en el interior del canal de pruebas y las cuales con la ayuda de un instrumento de medición para conocer la altura del flujo y con un

cronometro para registrar el tiempo de muestreo, se puede utilizar la ecuación de compuertas para canales a flujo abierto y de esta manera conocer el caudal del canal, el segundo método es un vertedero de pared delgada rectangular de 20 \* 50 cm situado en una parte más baja del canal y el cual con la ayuda de un medidor de altura de flujo y por medio de la ecuación de vertederos y las tablas correspondientes es capaz de darnos el caudal promedio, para nuestro estudio utilizamos estos instrumentos como instrumentos patrón para ajustar y comparar la lectura dada por nuestro instrumento.



Figura 3.4 Compuertas obstructoras de caudal localizadas en el canal de pruebas.



Figura 3.5 Instrumentos utilizados para medir la altura del flujo, localizados detrás de las compuertas.

### 3.2 Descripción del aforador

El instrumento fue rediseñado y acondicionado para que trabajara con una forma diferente de medición y con otros instrumentos con los que el original no contaba, debido a esto varias piezas fueron reemplazadas o modificadas para cumplir con los nuevos requisitos, a continuación se explicaran las modificaciones realizadas en el instrumento.

La primer parte del trabajo fue el armazón superior del instrumento, debido a que el original es un encapsulado donde se lleva a cabo el accionamiento mecánico con el que actúa el resorte de su diseño original, debido a su compacta construcción y poco espacio para la implementación de nuevos instrumentos, se

diseñó una carcasa acoplable (Figura 3.6), que sustituye a este elemento y que da espacio y protección a los instrumentos y actuadores que fueron adicionados.

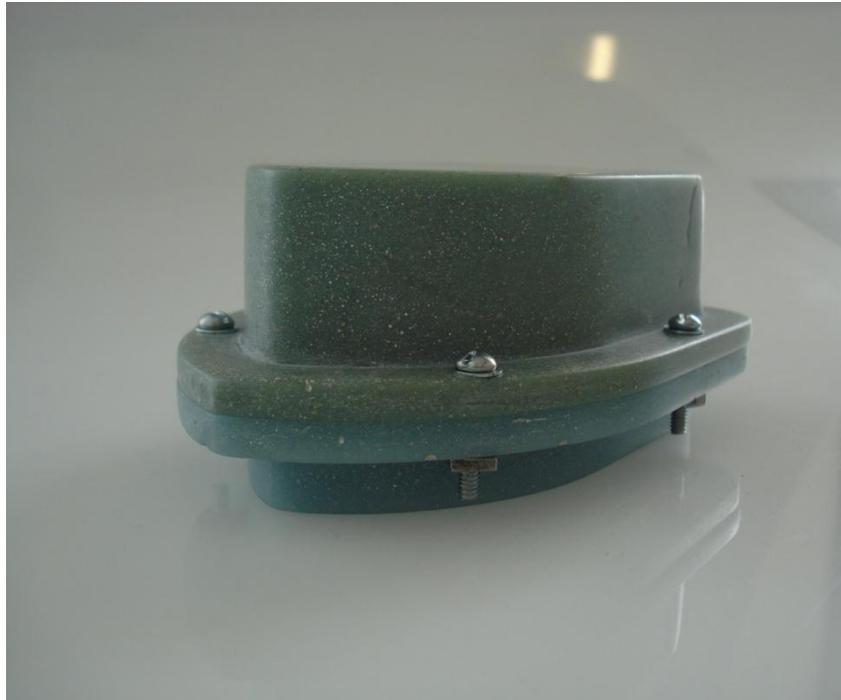


Figura 3.6 Carcasa para la protección del *encoder*.

La carcasa fue construida en resina poliéster con carga de minerales para resinas poliméricas compuesto por magnesio y hierro, este material es utilizado para realizar moldes y es relativamente fácil de utilizar con moldes de vaciado, lo cual también ayuda a la producción en serie de las piezas al ser de rápido secado. La razón de utilizar una carga de minerales fue que este material al ser usado solo con su catalizador, suele tener baja resistencia mecánica y llega a ser frágil a los impactos, al ser un instrumento utilizado en ríos y canales tanto artificiales como naturales es propenso a ser impactado por cuerpos suspendidos en el agua (ramas, piedras, etc.), la carga de minerales aumenta la resistencia de la resina polimérica al introducir “impurezas” dentro de los cristales del polímero, estas impurezas mejoran la resistencia a los impactos y a la corrosión producida por el agua y las sales disueltas en esta.

Para trabajar con la resina se vio en la necesidad de generar unos moldes con los negativos del diseño de la carcasa, estos moldes fue construidos con MDF de 5 mm. de espesor utilizando la técnica de planos seriados para conformar los moldes en su totalidad (Figura 3.7).

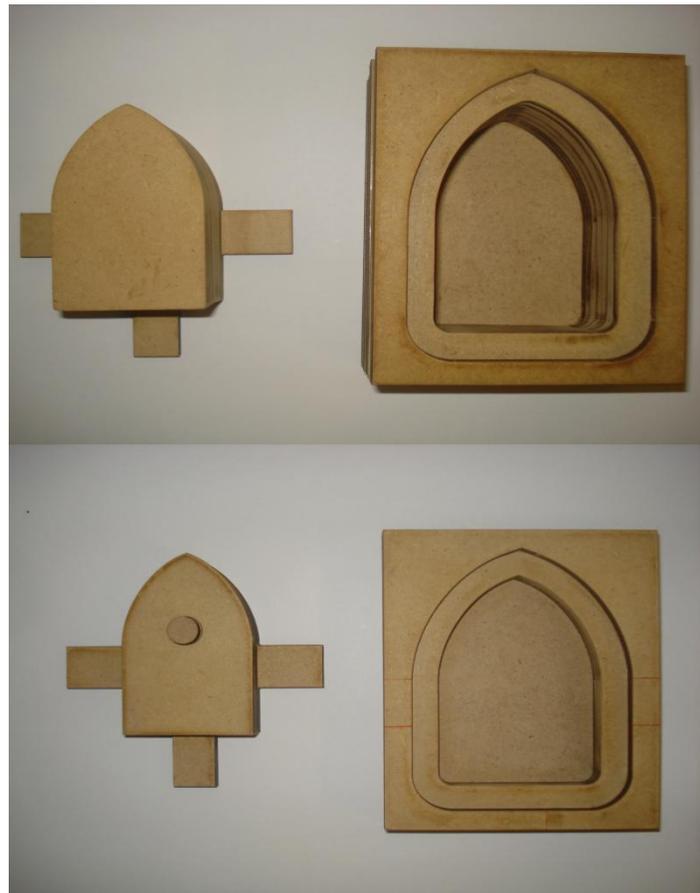


Figura 3.7 Moldes de MDF para carcasa.

Una vez conformados los moldes de MDF se procedió a lijarlos para darles uniformidad y a cubrirlos con desmoldante para resinas, debido a la porosidad del material se tuvieron que dar 3 capas de desmoldante con 4 horas de separación entre aplicaciones, para asegurar que el MDF absorba la mayor cantidad de desmoldante y evitar que las piezas quedaran pegadas o “amarradas” a los moldes para poder ser recuperados y así ser utilizados en un futuro. Cuando los moldes estaban preparados y listos para ser utilizados, se realizó el vaciado de resina poliéster enriquecido con una carga mineral de magnesio y hierro y

colorante para resina azul, se procedió a llenar los moldes y dejarlos en una superficie plana y expuestos al sol para acelerar la reacción de la resina con el catalizador (Figura 3.8); Una vez secas las piezas se limpiaron, lijaron y pulieron para de esta manera reducir la resistencia con el agua que pudieran generar y ayudar a la forma de la carcasa, a guiar el flujo del agua por el cuerpo del instrumento y reducir las afectaciones por las turbulencias generadas por el choque y movimiento de las tazas cónicas (Figura 3.6).



Figura 3.8 Moldes con vaciado de resina.

La siguiente parte importante del instrumento propuesto sería el eje metálico central, es la parte del instrumento en donde gira las tazas cónicas, que accionan el sistema mecánico del instrumento original, tuvo que ser remplazado ya que este estaba construido bajo ciertas especificaciones que solo eran utilizables para el accionamiento mecánico original, por lo tanto se diseñó y produjo un nuevo eje con características particulares para poder ser adaptado al diseño propuesto, este nuevo eje tuvo que ser construido en metal resistente a la oxidación debido a que es el encargado de soportar las rotaciones de las tazas que llegan a desarrollar una velocidad considerable y son constantemente

expuestas a turbulencias u objetos que viajan con el flujo, además, es la parte del instrumento que se encuentra constantemente en movimiento y siempre está en contacto con el agua, por lo tanto su material es muy importante para el adecuado funcionamiento del instrumento (Figura 3.9).

El eje (pieza inferior de la foto), fue construido en acero al carbón que brinda gran resistencia mecánica, este eje nos brinda estabilidad para el giro de las hélices y con el roscado de la parte superior brinda la facilidad para la implementación y ajuste del disco de acrílico utilizado para el nuevo modelo propuesto.



Figura 3.9 Piezas de metal maquinadas para el instrumento.

Así mismo se diseño y maquino una pieza extra (esquina superior derecha) que fue colocada por dentro de la carcasa para ajustarla al soporte de las tazas y así evitar que el flujo arrancara la carcasa de su lugar y permaneciera perpendicular al flujo, este soporte cumplía además la función de mantener el eje de giro en forma recta y evitaba las vibraciones e inclinaciones que provocarían un

giro incorrecto de las tazas cónicas; Al estar el soporte en contacto constante con el eje de giro y además soportar las fuerzas provocadas en la carcasa por el flujo, fue lubricado con grasa para mecanismos, lo cual reducía la fricción provocada en el eje y brindaba una barrera contra el agua y la mantenía afuera de la carcasa y por lo tanto lejos del opto interruptor, creando una “burbuja” de aire al interior de la carcasa implementando un principio de funcionamiento similar al de las campanas de sumersión utilizadas en el buceo (Figura 3.10).



Figura 3.10 Soporte metálico montado con carcasa y eje central de giro.

La última pieza maquinada (Figura 3.11) fue diseñada para soportar las tazas cónicas y acoplar su movimiento con el del eje de giro, esto fue logrado diseñando una pieza metálica con 2 “roscados” diferentes, el roscado externo sería el que sujetaría las tazas cónicas con ayuda de una tuerca de  $\frac{1}{4}$  de pulgada que se apretaría en dirección del movimiento de las tazas al ser movidas por el flujo y de esta forma evitar el que se aflojaran y se salieran del eje de giro imposibilitando su funcionamiento o provocando la falla del instrumento.

El segundo roscado de la pieza, es un roscado interno menor al primer roscado cuya función es servir de acoplamiento y tuerca al roscado del eje de giro y así poder transmitir los movimientos producidos por el flujo, lo cual nos daría la reproducción del giro de las tazas para ser aplicado al disco de acrílico que servirá de *encoder* para obtener las señales utilizadas posteriormente en el funcionamiento del instrumento.



Figura 3.11 Piezas maquinadas juntas.

Para realizar el *encoder* incremental utilizado en el instrumento propuesto, se vio en la necesidad de maquinar unos discos de acrílico cuya función fuera el reproducir los movimientos de las tazas cónicas y a la vez activara el opto interruptor, combinando ambos elementos es como se formó el *encoder* utilizado. Los discos (Figura 3.12) fueron realizados en acrílico transparente de polimetilmetacrilato de 3 mm. de grosor y con un diámetro de 4 cm., este material fue trabajado con una cortadora laser para asegurar la medida exacta del disco y para asegurar que el agujero central por donde pasara el eje de giro este justo en el centro, esta parte es crítica porqué al empezar a girar el disco tiene que estar perfectamente centrado y así evitar malas mediciones o inclusive el daño parcial o total del disco o la carcasa, estos discos tienen vinil auto adherible en su superficie que será el que provoque el cambio de estado en el opto interruptor impidiendo el paso de la luz o permitiendo que pase según sea el caso.

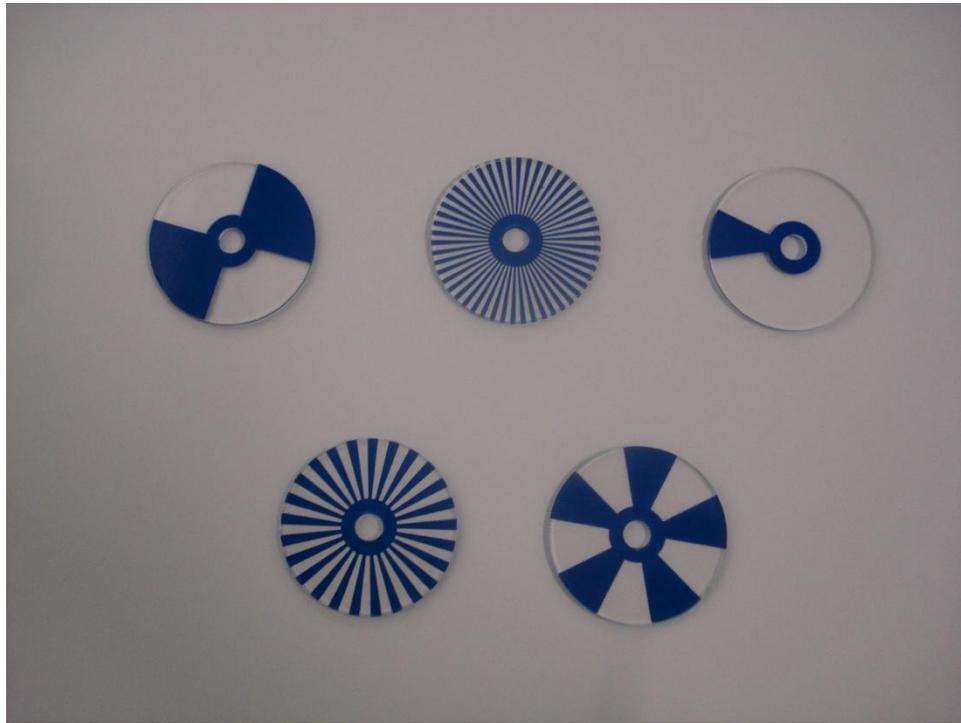


Figura 3.12 Discos de acrílico propuestos para el instrumento

Tienen definidas el número de cuentas que entregan por cada vuelta que dan las tazas, que son 1, 2, 5, 25 y 50 respectivamente, esto con el objetivo de enriquecer la lectura; Estos discos tienen que ser utilizados dependiendo del caudal que se espera en la lectura así como depende del nivel de precisión que se busque con la medición, para caudales altos se recomienda usar los discos con menor número de cuentas para asegurar una lectura precisa y que no haya pérdida de datos debida a la velocidad alcanzada, en caso contrario, para caudales bajos se recomiendan los discos con más divisiones para captar más datos por intervalo de tiempo y “afinar” la lectura reduciendo el error por redondeo al mínimo.

### 3.3 Características del aforador

El instrumento sobre el que se trabajó fue un molinete hidrométrico tipo taza cónica (Figura 3.13) de 13 cm de diámetro total y con 6 conos de 6 cm de diámetro construido a base de acero inoxidable, el principio de funcionamiento del

instrumento es de tipo contacto mecánico de accionamiento físico, este instrumento fue seleccionado debido a su gran versatilidad al momento de medir distintos tipos de caudales y a lo adaptable y portátil de su diseño.

Se trabajó directamente sobre el diseño y su método de medición debido a que el resto de sus componentes son accesorios para el montaje en caudales o son apoyos para facilitar y simplificar su utilización.



Figura 3.13 Molinete hidrométrico tipo taza cónica utilizado para el desarrollo del trabajo.

Al analizar el principio de funcionamiento del instrumento, y en función de lo que se busca obtener con este estudio, se tuvieron que sustituir piezas y elementos del instrumento y reemplazarlos por otros elementos diseñados a medida y contruidos para ser adaptados al sistema, en manera que cumplieran los requerimientos y las funciones necesarias para el desarrollo del trabajo.

El principio de funcionamiento del instrumento original, consiste en una delga de metal que acciona un resorte interno, dicho resorte produce un sonido

por cada vuelta completa de las hélices, o en caso de ser necesario cuenta con otro resorte que produce el mismo sonido por cada 5 vueltas completas de las tazas. Se buscó seguir este principio de funcionamiento sustituyendo sus elementos originales con otros elementos que funcionen de manera independiente y autónoma, que facilitaran la medición y excluyeran el error humano a la hora de realizar la medición.

Para poder poner al instrumento a prueba, era necesario el poder transmitir los movimientos realizados por las tazas cónicas al microcontrolador, esto solo podía ser posible haciendo uso de un transductor capaz de convertir este movimiento mecánico a una señal eléctrica protocolizada, con este objetivo fue diseñado un circuito que con la ayuda de un encoder transmitiera señales al microcontrolador para que posteriormente pudieran ser calculados los valores de flujo y caudal presentes en el canal.

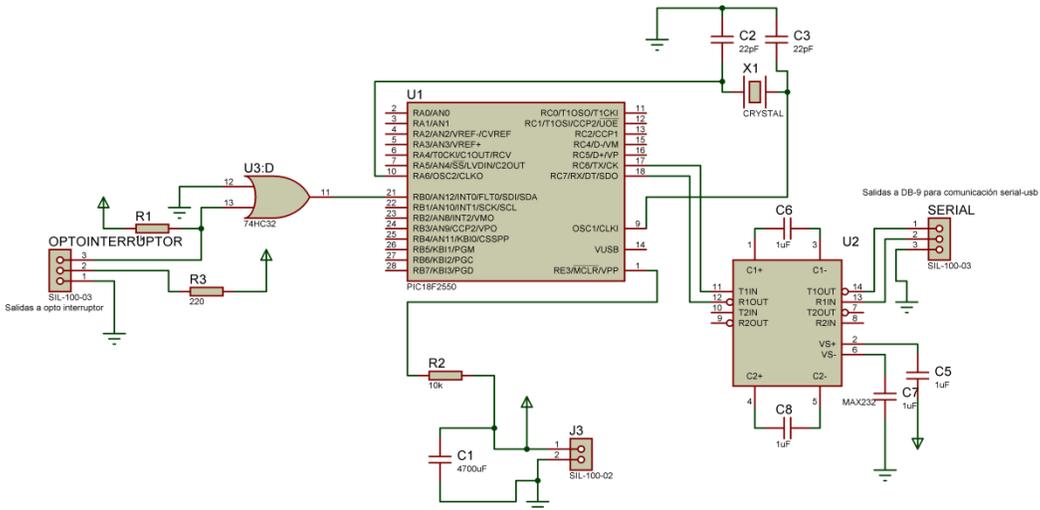


Figura 3.14 Diagrama del circuito implementado para el instrumento.

En la Figura 3.14 se observa el circuito que fue implementado en el nuevo instrumento, el objetivo de dicho circuito era por una parte, el recibir las señales entregadas por el opto interruptor y con la ayuda de una compuerta transformar esta señal eléctrica no protocolizada, en una señal TTL apta para el microcontrolador; el segundo objetivo del circuito era el establecer la comunicación de 2 vías entre el microcontrolador y el ordenador para facilitar el despliegue y recepción de datos necesarios para el aforo de canales.

El opto interruptor es un elemento electrónico compuesto por un foto Led y foto transistor que al interrumpir el paso de luz entrega un voltaje por su emisor, este voltaje depende de la relación de resistencias utilizadas y el voltaje presente en su base, debido a esto el voltaje entregado por el opto interruptor oscila entre el 1.3 volts y los 4.2 volts en sus cambios de estados, siendo que ambos voltajes son registrados por el microcontrolador como estados altos se vio en la necesidad de utilizar una compuerta con un diodo que se encarga de rectificar este voltaje y acoplarlo a una señal estándar TTL de 0-5 v. Estas señales son registradas por el microcontrolador y reconocidas para ser definidas como las señales de control utilizadas en el cálculo de las mediciones.

Para el sistema de medición del instrumento propuesto, se utilizó un *encoder* óptico de tipo incremental. La razón para esto es, debido a que los *encoders* son decodificadores electromecánicos, nos ayudan a acoplar la etapa mecánica y convierten las revoluciones del instrumento original a señales digitales las cuales son más fáciles de transportar y de interpretar por una maquina o por un sistema de control.

El *encoder* óptico cuenta con características importantes, las cuales son útiles para el proyecto propuesto, podemos mencionar la velocidad con la que trabaja el *encoder*, ya que al ser señales de luz el tiempo de respuesta del transductor es muy bajo lo cual nos apoya para su utilización a altas velocidades, por la naturaleza de la medición que fue realizada, se requirió de un *encoder* que

contara con una alta velocidad de lectura, para esto se propuso un *encoder* con una resolución de 2 divisiones, ya que las velocidades manejadas por el molinete pueden ser medias o muy altas, y una alta resolución nos brinda la confianza de tener el mayor número de cuentas por unidad de tiempo.

Los elementos que fueron implementados con el objetivo de crear el *encoder*, fueron un opto interruptor tipo herradura y un disco de acrílico transparente con diseños para impedir el paso del rayo de luz dado por el sensor (Figura 3.15). El objetivo de esta instrumentación era sustituir al usuario encargado de realizar en manera “manual” la medición de la velocidad al escuchar las vibraciones del instrumento original, por un sensor capaz de dar una serie de señales protocolizadas de 0 – 5 V. por cada vuelta que dieran las tazas del medidor, y que un microcontrolador programable fuera el encargado de llevar las cuentas y posteriormente, sería el mismo microcontrolador el encargado de hacer el cálculo de la velocidad y del caudal para ser desplegado por la pantalla del ordenador, haciendo más sencillo el trabajo del usuario y reduciendo los errores que este pudiera generar al realizar directamente la medición con el método convencional.

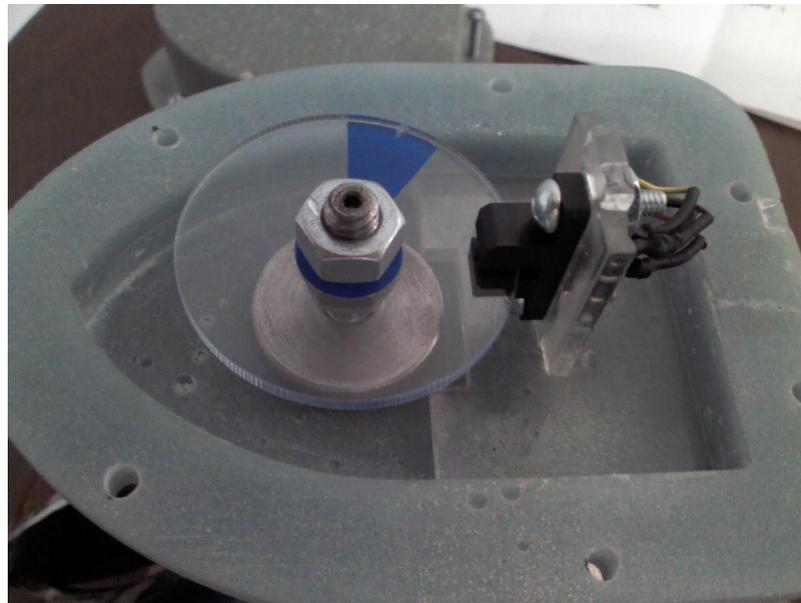


Figura 3.15 Sensor óptico tipo herradura y disco para medición.

Al ser ahora un sistema electrónico el encargado de realizar la lectura de las vueltas de las hélices, se mejora la obtención, la cantidad y el uso de los datos obtenidos, ya que dicha medición es realizada con pulsos de luz y abre posibilidades de precisión y manejo de datos que serían imposibles de manejar por el usuario directamente, debido a esto, se optó por la posibilidad de manejar otro tipo de diseños de disco, los cuales obtienen una mayor cantidad de datos por cada vuelta de las tazas, que al contrario de la capacidad original del aforador de disminuir la cantidad de datos por cada intervalo de tiempo, estos discos permiten al instrumento obtener más y más datos por cada vuelta de las tazas, lo que produce lecturas más robustas y enriquecidas que impactan directamente en la precisión del instrumento y ayudan a reducir los errores por redondeo o por falta de riqueza de datos.

Se escogió un *encoder* de tipo incremental, debido a que el dato que se necesitaba conocer era únicamente la velocidad del flujo, los datos obtenidos con un *encoder* absoluto tales como la posición o el sentido de giro son innecesarios en nuestro estudio, por lo tanto se recurrió a desarrollar un disco con 2 divisiones lo cual nos proporcionó los datos necesarios para calcular e interpretar la velocidad del flujo medido.

Con la utilización de disco con más divisiones se buscó mejorar la obtención de datos, por lo tanto, se diseñaron 4 discos más con 4, 10, 50 y 100 divisiones respectivamente, al tener más datos por cada vuelta del instrumento se aumenta la cantidad de datos obtenidos por intervalo de tiempo lo cual sería imposible para el usuario con el método convencional, con este manejo superior de datos se buscó reducir el error del instrumento y debido a que el instrumento no para de girar en ningún momento mientras se encuentre dentro del caudal, con un aumento de segmentos en los disco, el instrumento puede recibir lecturas incluso cuando el inicio o termino del conteo del tiempo no coincida con la marca del vinil en el disco en el caso del disco de acrílico de una sola marca.

Las velocidades alcanzadas por el instrumento en un río son bastante altas, por lo tanto tenemos una limitante física en las lecturas la cual puede provocar que discos con una gran cantidad de marcas no funcionen como son previstos, debido a la velocidad de captura del sensor, tal es el caso del disco de 100 marcas, que al alcanzar altas velocidades puede generar que se salte lecturas o que no sean registradas, haciendo de su uso el equivalente al de un disco con menos marcas, por lo tanto se tiene que tomar en consideración la velocidad del caudal que se va a medir, para seleccionar el disco más adecuado que nos brinde la mayor confiabilidad en los datos y que al mismo tiempo sea utilizado al máximo sin perder datos o saltarse lecturas debido al factor físico del caudal que no puede ser controlado.

#### 3.4 Implementación del sistema de medición

Para hacer posible la obtención de datos del instrumento propuesto, se vio en la necesidad de realizar una comunicación directa con un ordenador que fuera el encargado de la presentación, recopilación y alimentación de los datos transmitidos por y para el instrumento, para posteriormente poder ser interpretados y utilizados de la manera más provechosa para el usuario.

Para la obtención del dato que nos mostrara el número de cuentas por minuto entregada por el *encoder* en relación con el flujo, primeramente se tuvo que sellar el instrumento con sus piezas y partes para posteriormente ser introducido en el flujo que se quisiera aforar (Figura 3.16), cuidando la manera en la que es introducido el instrumento; Esto debido al diseño de la carcasa y a la forma de transmisión del movimiento de las tazas cónicas al disco de acrílico.



Figura 3.16 Instrumento sumergido en canal de pruebas.

La carcasa diseñada para el nuevo instrumento consta de 2 piezas que al ser unidas y atornilladas entre sí, encierran al opto interruptor y al disco de acrílico en su interior (Figura 3.17) y crean un sello en sus bordes impidiendo la salida de aire por estos. El orificio por donde atraviesa el eje de giro a la carcasa, es el único lugar abierto en toda la estructura y al ser colocado en forma transversal al flujo del caudal, crea una burbuja de aire al interior de la carcasa, esta burbuja no tiene lugar por donde salir a la superficie, dando como resultado que la carcasa empiece a trabajar como una campana de sumersión para buceo, donde la presión del aire al interior no permite la entrada de agua, creando un “espacio seco” y manteniendo al opto interruptor y a los cables que lo conectan con el microcontrolador alejados del agua y por lo tanto funcionales aun estando sumergidos.

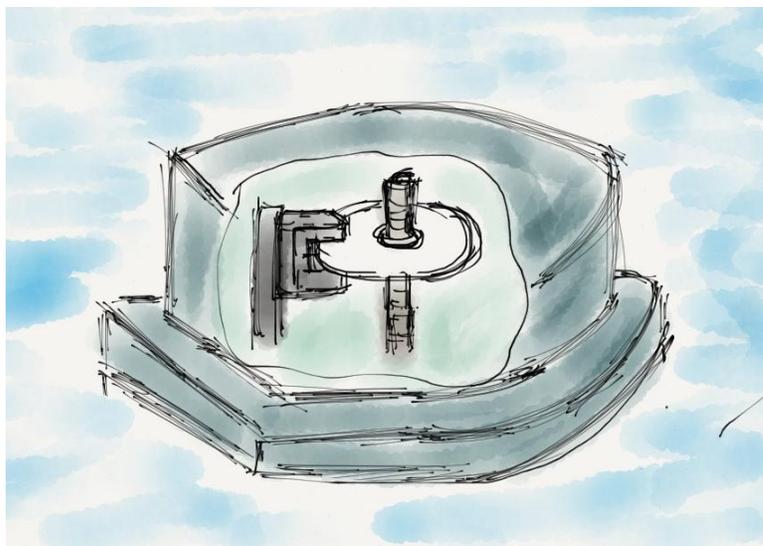


Figura 3.17 Boceto del interior de la carcasa.

Para verificar el correcto funcionamiento del instrumento y saber que el flujo que mostraba era el que tenía el canal en realidad, fue necesario comparar la lectura que se estaba realizando contra la de un instrumento o método que hubiera probado anteriormente su validez y confiabilidad apegándose a las normas y métodos definidos por las instituciones certificadoras en lo referente a los métodos de aforos y mediciones hidrométricas, para esto se utilizó un instrumento que ya estuviera aprobado que contara con sus propios métodos de funcionamiento, calibración y recopilación de datos, para este caso se hizo uso de un flujometro que serviría primeramente como instrumento patrón para la calibración del instrumento propuesto y, finalmente, sería utilizado como instrumento contra el cual se compararía el desempeño del instrumento propuesto para de esta forma validar las lecturas obtenidas con una serie de datos comparativos que nos mostrarían la viabilidad y desempeño de la propuesta.

El flujometro utilizado para esta ocasión fue un medidor de velocidad de agua Flow probe FP201 de Global Water (Figura 3.18), este medidor de velocidad es de tipo hélice con un sensor magnético, este flujometro entrega datos tales como la velocidad media y la velocidad máxima del flujo que se esté midiendo, son estos datos los que son de importancia en el estudio ya que con estos se ajustó el

instrumento propuesto y más tarde fueron con estos datos contra los que se comparó la lectura recibida.



Figura 3.18 Flujometro FP201.

El programa que se utilizó para el funcionamiento del instrumento propuesto, fue desarrollado en lenguaje C y fue embebido dentro del mismo microcontrolador, para asegurar su constante funcionamiento aunque el ordenador del usuario no estuviera conectado o perdiera la comunicación con este mismo.

El programa consiste en una serie de subrutinas con usos y objetivos determinados, que en conjunto, ayudan a la correcta utilización del instrumento y a facilitar la medición de caudales, mostrando directamente en pantalla solo los datos de interés para el usuario y dejando todo el proceso de cálculos y almacenamiento de datos en manos del microcontrolador.

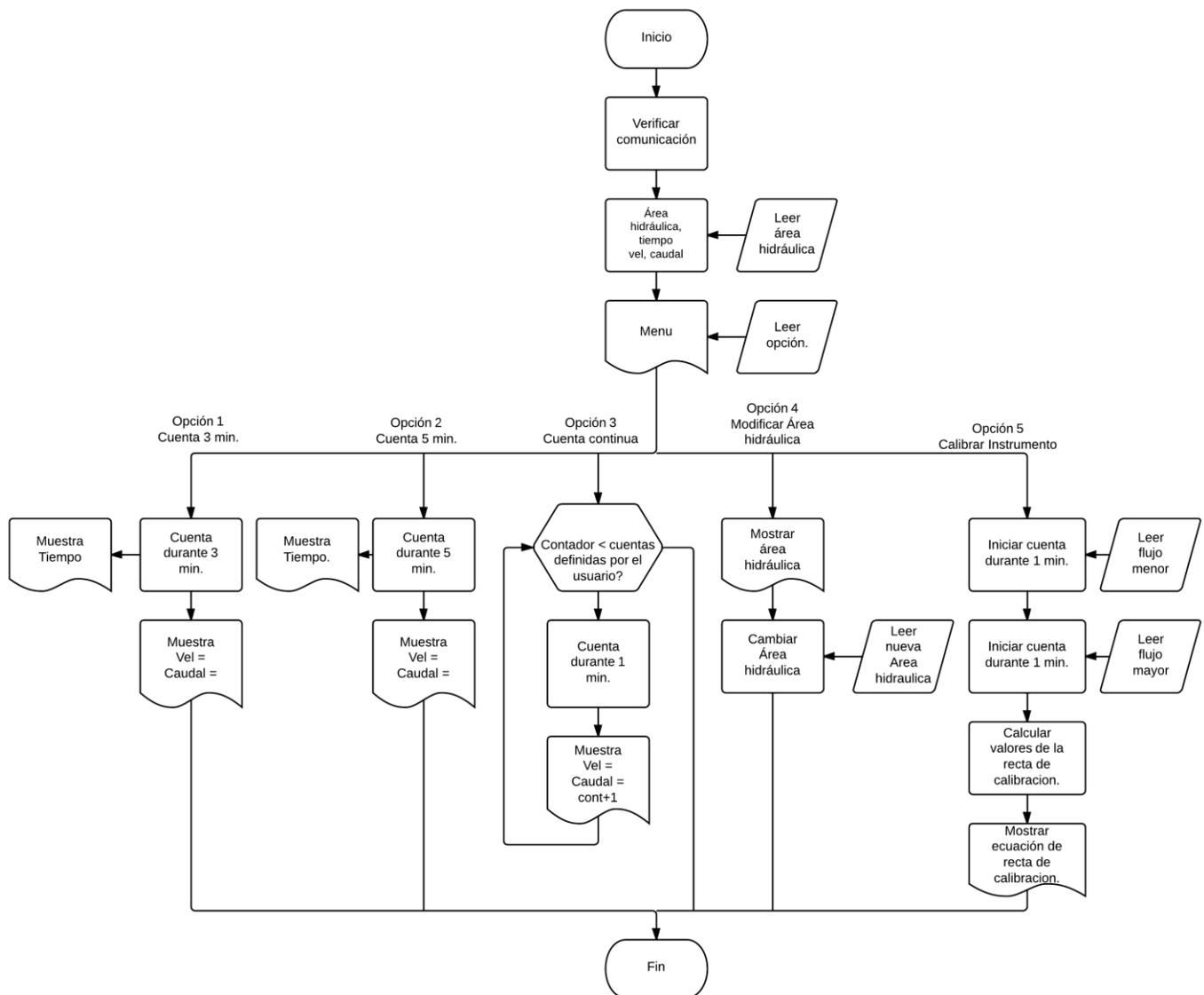


Figura 3.19 Diagrama de flujo del programa.

El programa inicia con la identificación del instrumento y del lugar en donde se trabajó el proyecto a manera de verificación de la comunicación del microcontrolador con el ordenador, posteriormente el sistema solicita el área hidráulica con la que se esté trabajando o con la que se va a estar trabajando a la hora de realizar el aforo. Una vez que es introducida y aceptada el área hidráulica,

se despliega un “menú” de opciones con diferentes rutinas con objetivos definidos para facilitar el uso del instrumento y mejorar el proceso de aforo (Figura 3.20).

```
Universidad Autonoma de Queretaro
Facultad de Ingenieria
Aforador Hidrometrico FI

Introducir area hidraulica (m2) =
Nueva area hidraulica definida
Area hidraulica = 0.00 m2

Menu principal
Selecciona la accion a realizar
1 Medicion a 3 minutos
2 Medicion a 5 minutos
3 Medicion minuto a minuto
4 Modificar area hidraulica
5 Calibrar Instrumento
6 Senales del instrumento
```

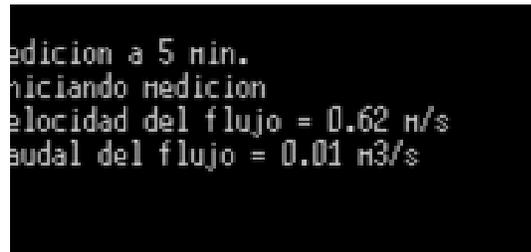
Figura 3.20 Menú principal del programa.

La primera opción, es una rutina que activa el registro del sensor del instrumento y durante un periodo de 3 min., lleva el conteo y guarda las señales entregadas, mientras el sistema registra, muestra en la pantalla del ordenador el tiempo que lleva de conteo para que el usuario esté al tanto y sepa en qué momento el instrumento terminara con el proceso de conteo; Al terminar el conteo el instrumento determina la velocidad y el caudal del flujo con la ayuda de sus datos de calibración, y lo muestra en la pantalla del ordenador hasta que el usuario presione una tecla (Figura 3.21), lo cual lo lleva nuevamente al menú principal.

```
Medicion a 3 min.
Iniciando medicion
Velocidad del flujo = 0.67 m/s
Caudal del flujo = 0.01 m3/s
```

Figura 3.21 Medición a 3 minutos.

La tercera opción, es una rutina que activa el registro del sensor del instrumento y durante un periodo de 5 min., lleva el conteo y guarda las señales entregadas, en un proceso que se lleva simultáneamente el sistema registra las señales entregadas por el opto interruptor y muestra en la pantalla del ordenador el tiempo que lleva de conteo para que el usuario esté al tanto y sepa en qué momento el instrumento terminara con el proceso de conteo; Al terminar el conteo, el instrumento determina la velocidad y el caudal del flujo con la ayuda de sus datos de calibración, y lo muestra en la pantalla del ordenador hasta que el usuario presione una tecla (Figura 3.22), lo cual lo lleva nuevamente al menú principal.



```
medicion a 5 min.  
iniciando medicion  
velocidad del flujo = 0.62 m/s  
caudal del flujo = 0.01 m3/s
```

Figura 3.22 Medición a 5 minutos.

Estas dos primeras formas de medir son con intervalos grandes de tiempo, ya que al aumentar el tiempo de muestreo del instrumento se aumenta la cantidad de datos recolectados y por lo tanto la relación de cuentas / intervalo de tiempo es más precisa lo que repercute directamente en la exactitud y error de la lectura del instrumento propuesto, mejorando la lectura realizada y garantizando que el valor entregado por el instrumento sea el valor real del flujo en el momento del aforo.

La tercera opción, es una medición minuto a minuto durante un numero de ciclos definidos por el propio usuario; Esta rutina pregunta primeramente cuantos intervalos de mediciones quiere realizar el usuario, y una vez que estos fueron definidos y aceptados el programa comienza a realizar una serie de lecturas minuto a minuto en los cuales muestra el tiempo mientras realiza la lectura y al terminar despliega la velocidad y caudal del flujo, realiza cada minuto hasta cumplir con el número de iteraciones solicitadas por el usuario y muestra los

resultados de las mediciones hasta que es presionada alguna tecla del ordenador lo que lleva al programa a desplegar una vez más el menú principal (Figura 3.23).

```
Medicion a intervalos
  Cuantas mediciones quieres realizar?
Iniciando medicion
Velocidad del flujo = 0.65 m/s
Caudal del flujo = 0.01 m3/s

Velocidad del flujo = 0.63 m/s
Caudal del flujo = 0.01 m3/s

Velocidad del flujo = 0.69 m/s
Caudal del flujo = 0.01 m3/s

Velocidad del flujo = 0.58 m/s
Caudal del flujo = 0.01 m3/s

Velocidad del flujo = 0.61 m/s
Caudal del flujo = 0.01 m3/s
```

Figura 3.23 Medición minuto a minuto.

Esta rutina nos presenta los datos uno tras otro para poder observar como es el comportamiento del flujo que se esté midiendo y nos permita la obtención más rápida de una mayor cantidad de datos para, posteriormente, generar tablas de datos y/o de tendencias tales como el perfil del caudal, la tendencia de la velocidad, entre otras.

La cuarta opción, es la misma rutina que presenta el sistema al ser iniciado, se le solicita al usuario que introduzca el valor del área hidráulica con la cual está trabajando y con la cual va a trabajar durante el aforo del flujo, esta medida se pide en m<sup>2</sup> ya que la calibración del instrumento está determinado en m/s y porque al trabajar en ríos y cauces naturales las medidas de estos son dadas en metros (Figura 3.24). Esta opción permite al usuario poder desplazarse a lo largo del canal a aforar y poder modificar el área dependiendo del uso que se le va a dar al instrumento.

```
Introducir area hidraulica (m2) =  
Nueva area hidraulica definida  
Area hidraulica = 0.00 m2
```

Figura 3.24 Modificar área hidráulica.

La quinta opción, es la rutina que ayuda al usuario a calibrar y modificar los valores del instrumento que tenga actualmente, esta calibración es importante debido a que con esta rutina el instrumento define su recta de calibración con la cual calcula la velocidad del flujo que está midiendo. Esta calibración es realizada con el cálculo de la recta de regresión lineal (Ecuación 4) que es el método definido para los medidores hidrométricos rotatorios (ISO2537, 2007), primeramente el sistema le pide al usuario que se va definir el punto bajo de la recta lo cual quiere decir que es el flujo menor del rango de medición que se va a utilizar o que se espera durante la medición, el instrumento comienza un registro de las señales del sensor durante un periodo de 1 minuto y al terminar el sistema pide el valor actual de la velocidad en m/s del canal en el que se esté calibrando el sistema, una vez que fue introducido y aceptado el valor de la velocidad actual el sistema proceda a definir el punto superior de la recta, esto es, el rango más alto de flujo que se espera o al que puede llegar, nuevamente el sistema comienza a registrar las señales del sensor durante un periodo de 1 minuto y al finalizar este proceso le pide al usuario el introducir el valor actual de la velocidad en m/s.

Cuando el sistema tiene introducidos y guardados estos datos, define los 2 puntos, tanto superior como inferior, los cuales son una relación entre el número de señales recibidas del sensor en un periodo definido de tiempo y la velocidad del flujo en el que estaba midiendo, y haciendo uso de la ecuación (6) el sistema define la recta de calibración del instrumento, guardando estos datos el instrumento queda calibrado y aunque el sistema sea desconectado de la alimentación estos datos quedan guardados dentro de una memoria no volátil, con esto se evita la calibración del instrumento para cada medición que se vaya a realizar y nos permite la flexibilidad de cambiar el instrumento de lugar para aforar

diferentes flujos y en diferentes lugares cargando solo el equipo más indispensable (Figura 3.25).

```
Iniciando calibracion del Intrumento
Presiona ENTER para continuar o ESC para cancelar
Calibrando Instrumento
Definir punto inferior de la recta
tiempo = 59.5 segs.
Dane Velocidad del punto inferior (m/s) =
Definir punto superior de la recta
tiempo = 59.5 segs.
Dane Velocidad del punto superior (m/s) =
Instrumento Calibrado
Nueva recta definida:  $Y = 0.098 X + 0.922$ 
```

Figura 3.25 Calibración del instrumento.

La última opción del menú es una rutina que nos mostrara un contador que aumenta de valor por cada señal obtenida del sensor, de manera que se transforma en un contador infinito cuya función es la de monitorear el correcto funcionamiento del opto interruptor, así como comprobar el registro que lleva el microcontrolador de las señales entregadas.

Se realizaron una serie de lecturas a distintos flujos, y repeticiones de las lecturas durante intervalos definidos de tiempo en distintos días, con el objetivo de realizar mediciones con diferentes condiciones externas para observar el comportamiento del instrumento, y con la compilación y manejo de estos dato fue posible obtener una recta de regresión que nos mostraría la repetitividad del equipo así como la primera ecuación que fue utilizada para la calibración del instrumento, con la ayuda del flujometro que serviría de instrumento patrón, se pudo fijar la ecuación final que fue utilizada posteriormente para la medición y estimación de las velocidades y de los caudales del canal con el cual se estuvo trabajando.

Para la validación del instrumento así como para verificar su desempeño y precisión en las lecturas, se realizaron una serie de mediciones con intervalos

grandes de tiempo en diferentes días para verificar como el instrumento era afectado por los cambios en el medio, estas mediciones fueron realizadas con la misma velocidad del flujo, y fueron contrastadas contra las mediciones realizadas por el instrumento de comparación que fue el mismo flujometro utilizado para la calibración del instrumento propuesto. Con estos datos obtenidos del instrumento propuesto así como del flujometro comercial, fueron utilizados para generar tablas y graficas que nos ayudaron a verificar el desempeño de la propuesta así como para validar las lecturas realizadas con el uso de herramientas probabilísticas tales como la regresión lineal, la desviación estándar y el valor de correlación.

#### IV. RESULTADOS

Durante el desarrollo del instrumento propuesto se realizaron varias pruebas para determinar los valores y características inherentes del instrumento que nos ayudaran a comprobar y validar la hipótesis definida de manera cualitativa y cuantitativa desde una validación interna y externa. Durante este propuesto el instrumento arrojó los siguientes resultados.

Una vez que las piezas de la carcasa fueron producidas, acondicionadas y ajustadas, y las piezas metálicas fueron maquinadas y montadas, se procedió a armar el instrumento para realizar la primera prueba de funcionamiento. Durante la exposición del instrumento a un caudal no controlado con condiciones aleatorias dadas por la naturaleza y su imprevisibilidad, el instrumento fue impactado por un cuerpo extraño en la carcasa superior encargada de proteger el opto interruptor y el disco de acrílico. Este suceso reveló la fragilidad de la carcasa, produciéndole una fisura a lo largo de la carcasa superior (Figura 4.1).

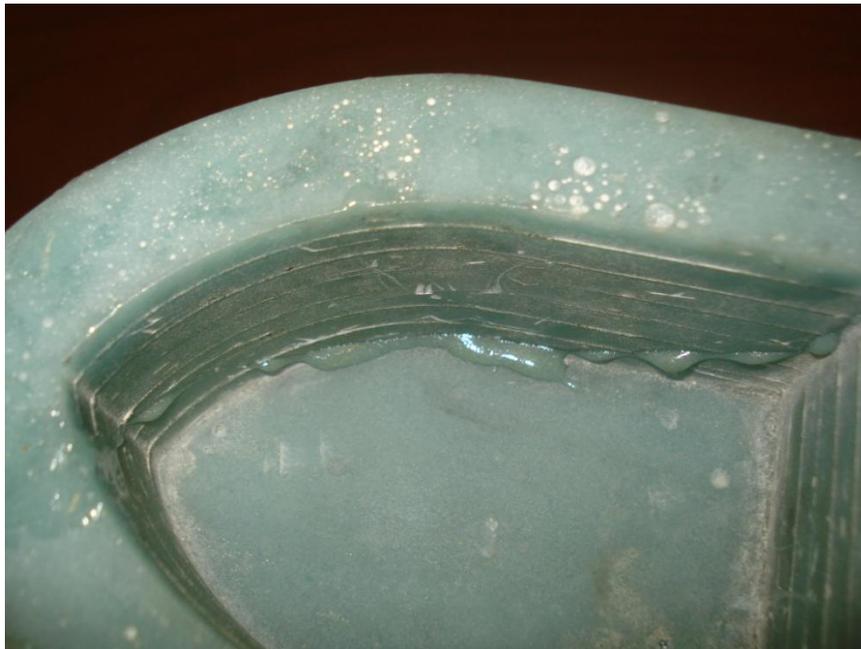


Figura 4.1 Carcasa superior con fisura en el cuerpo y sellada con resina.

Dicha fisura provocó la salida de la burbuja de aire encargada de mantener una presión al interior de la burbuja, permitiendo la entrada del agua a la carcasa, impidiendo el funcionamiento del opto interruptor y ocasionándole un daño por el cual tuvo que ser reemplazado por un componente nuevo. Al ser analizada la tapa de carcasa y su fractura, se llegó a la conclusión que el proceso de mezclado, vaciado y polimerizado de la resina utilizada había sido inadecuado, produciendo una pieza frágil con una resistencia mucho menor a la requerida, y a pesar de ser sellada la fisura con resina nuevamente, la tapa ya no resultó ser útil al presentar ramificaciones de la fisura principal provocando filtrado por varias zonas del cuerpo, por lo que se vio en la necesidad de realizar una segunda carcasa cuidando las proporciones utilizadas de los materiales a reaccionar para asegurar una calidad y dureza superior a la primera, además, se le fue adicionado marmolina, que es un reactivo utilizado en la resina para aumentar aún más la resistencia de la carcasa. Esta nueva adición en la fabricación le brindó a la carcasa mayor resistencia a impactos de objetos contundentes que se pueden presentar en los canales abiertos como ríos y canales naturales.

Cuando la nueva carcasa fue puesta en funcionamiento y probó su correcto funcionamiento y su resistencia ante los objetos y situaciones presentes en los canales abiertos, se procedió a verificar el correcto funcionamiento de las piezas móviles del instrumento propuesto, las cuales son las piezas claves del correcto funcionamiento de la propuesta y, dependiendo de la situación serían las primeras en presentar una falla o anomalía en caso de presentarse.

Durante la realización de las pruebas en el canal, el flujo suministrado al instrumento iba siendo aumentado gradualmente, lo que mostró una situación en las tazas cónicas del instrumento, cuando la altura del tirante en el flujo estaba por debajo de la mitad de la altura de la carcasa del instrumento durante su funcionamiento, esta producía turbulencias y remolinos de burbuja por la parte trasera, las cuales provocaban un mal funcionamiento de las tazas, ya que producían flujos con direcciones contrarias al flujo que estaba siendo medido, y los

remolinos de burbujas (Figura 4.2) provocaban un “frenado” en las tazas lo que ocasionaba que los giros en la tazas cónicas no fueran constantes ni uniformes; Conforme a la norma ISO 11655, para una correcta medición de flujos con elementos rotativos, el tirante del flujo tiene que estar por encima de la altura del elemento rotativo, de manera que las tazas cónicas tienen que estar completamente cubiertas por el flujo a aforar ( ISO,2010); Para la propuesta se agregaría que el tirante del caudal estuviera por encima de la mitad de la altura de la carcasa, de esta manera el perfil del flujo elimina las turbulencias provocadas por la parte trasera de la carcasa y por el mismo movimiento de las tazas cónicas, eliminando los problemas de falta de uniformidad en el movimiento y asegurando una correcta medición0m apegada a las normas y estándares.

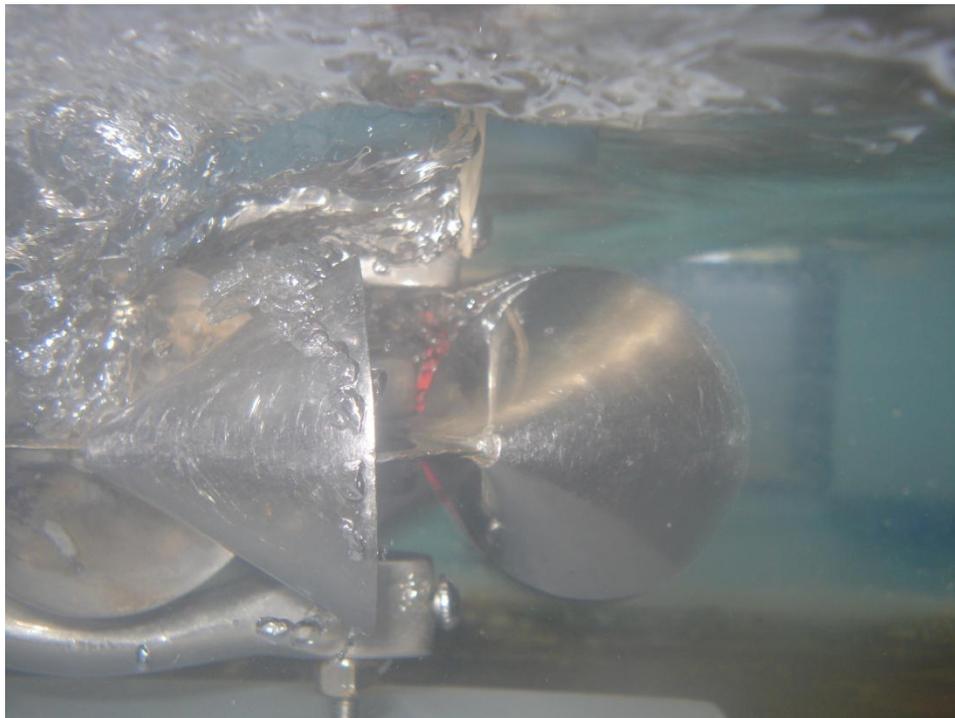


Figura 4.2 Turbulencias y burbujas producidas por una altura baja en el tirante.

La anterior situación al igual que caudales altos provocaba una condición en las tazas que puede ser descrita como turbulencias con proyecciones en el eje vertical, esto es, que al alcanzar altas velocidades en el giro de las tazas cónicas el mismo movimiento horizontal de estas producían turbulencias que generaban

fuerzas proyectadas hacia la superficie del agua lo que elevaba el eje de giro al que estaba unido el disco de acrílico sacándolo de su posición. Al girar de esta manera el eje de giro sufrió una ligera inclinación la cual fue suficiente para provocar un choque entre el disco de acrílico y el opto interruptor, este choque y continuo rozamiento entre el disco y el opto interruptor hizo girar las tuercas que sujetaban el disco al eje, estas tuercas continuaron su giro hasta sacar completamente el disco del eje lo que produjo que las tazas cónicas dejaran de girar y se quedaran inmóviles mientras se encontraban dentro del flujo. Para evitar esta situación que afectaba el desempeño del instrumento se colocó una tuerca extra que apretara el eje y se tomó la decisión de soldar y dejar fija la tuerca superior que sujeta el disco de acrílico, de esta forma cuando se generan las fuerzas verticales por causa de las turbulencias la tuerca fija y la tuerca extra en el eje generan una fuerza contraria que mantiene el disco de acrílico en su lugar y evita la vibración en el eje de giro.

Las siguientes pruebas que fueron realizadas tenían como objetivo la obtención de los valores que definirían las capacidades del instrumento, así como las características y propiedades inherentes en todo elemento primario de medición cuya función sea la obtención de datos de los fenómenos físicos directamente.

El primer valor que se busco fue el denominado límite inferior de medición, que sería el valor mínimo de flujo que el instrumento es capaz de medir y por lo tanto define el punto más bajo desde el cual comenzara a registrar valores, se fue aumentando gradualmente el flujo del canal y verificando el comportamiento del instrumento hasta el momento que las tazas cónicas comenzaran a moverse. El valor del flujo encontrado para el comienzo del movimiento de las tazas fue de 0.43 m/s, si bien este flujo era suficiente para comenzar a realizar un movimiento, dicho movimiento no era constante ni uniforme y se descubrió que el eje de giro presentaba rozamiento con el soporte que lo mantenía recto, y que a pesar del soporte sufría una ligera inclinación por lo cual se tuvieron que realizar algunos

ajustes mecánicos y además se optó por lubricar el eje de giro en la zona donde sufría mayor contacto con el soporte. Una que vez que fueron realizados estos ajustes se buscó de nuevo el límite inferior de medición del instrumento, estos ajustes mejoraron el desempeño mecánico del instrumento dando como resultado un flujo mínimo de activación de 0.26 m/s.



Figura 4.3 Instrumento con flujo mínimo para activación.

Aunque este valor definía el límite inferior del instrumento, no se podían realizar mediciones con este flujo ni caudal, debido a que las tazas cónicas no se encontraban completamente cubiertas (Figura 4.3), con lo cual de acuerdo a la norma, los valores entregados no serían válidos por lo que se procedió a aumentar el flujo del canal hasta llevarlo al momento en el que fue posible realizar una medición confiable y significativa tal y como lo muestra la Figura 4.4 Este valor fue tomado en el momento en el que las características propias del canal permitieron realizar una medición efectiva, esto es, cuando el tirante del flujo estaba por encima de la altura de las tazas cónicas.

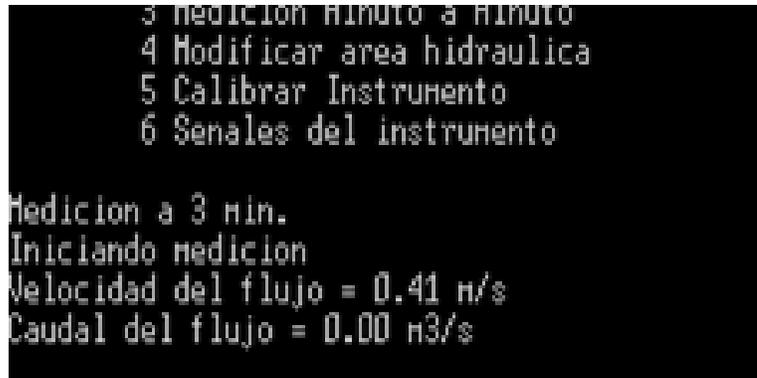


Figura 4.4 Medición en flujo bajo.

El siguiente punto importante para definir las características del instrumento sería el límite superior de medición, por lo cual se llevó al canal a los valores superiores que podía desarrollar siempre cuidando al instrumento propuesto, para asegurar su continuo funcionamiento y prevenir fallas o daños en su estructura. Cuando la velocidad del canal alcanzo un flujo de 1.07 m/s (Figura 4.5) con un caudal de 0.0802 m<sup>3</sup>/s (80.2 lts/s.) casi alcanzando el límite de caudal del canal, la base donde se encontraba montado el instrumento propuesto comenzó a deslizarse unos centímetros sobre el piso del canal, cuando dejo de deslizarse por la acción de la fricción y peso del instrumento comenzó a vibrar por acción de la fricción del agua con el instrumento y su base.



Figura 4.5 Medición a caudal máximo flujometro patrón.

Se realizó la medición del flujo con el instrumento propuesto con el flujo máximo antes de que aumentara la vibración del instrumento tal como se observa en la Figura 4.6, una vez hecha la medición se procedió a bajar el flujo del canal para evitar un daño irreparable en el instrumento. Al momento de presentarse estos fenómenos se decidió dejar de aumentar el flujo, sin embargo, esto no representa el límite superior del instrumento, nos indica que el instrumento responde en el rango de operación del canal, por otra parte la base utilizada para las pruebas se adaptó para poder operar dentro del canal ya que el sistema utilizado para las mediciones en canales abiertos no es compatible con la estructura propia del canal y nos limita el poder llevar el instrumento hasta el límite del canal.

```
Medicion a intervalos
Cuantas mediciones quieres realizar?
Iniciando medicion
]
Velocidad del flujo = 1.08 m/s
Caudal del flujo = 0.02 m3/s
]
Velocidad del flujo = 1.09 m/s
Caudal del flujo = 0.02 m3/s
]
Velocidad del flujo = 1.08 m/s
Caudal del flujo = 0.02 m3/s
]
Velocidad del flujo = 1.07 m/s
Caudal del flujo = 0.02 m3/s
]
Velocidad del flujo = 1.07 m/s
Caudal del flujo = 0.02 m3/s
```

Figura 4.6 Medición a caudal máximo instrumento propuesto.

Con estos valores se pudo conocer el rango de funcionamiento máximo del instrumento, este rango de operación se encuentra entre 0.26 m/s – 1.09 m/s con un valor de Span de 0.83 m/s al momento de que fueron realizadas las pruebas, el instrumento pudiera contar con un alcance y un Span mayor que no fue posible alcanzar en el canal de pruebas debido a los limitantes del mismo canal y de la forma de colocación del instrumento dentro del canal. Cuando el rango de

operación con el que cuenta el instrumento fue definido el próximo valor a conocer sería el denominado zona muerta que sería el valor mínimo de variación que sería capaz de detectar el instrumento para generar un cambio en la salida de datos. Por la naturaleza del control del flujo en el canal de pruebas no se podía variar con precisión la salida del flujo, por lo que se tuvo que trabajar conjuntamente con el instrumento patrón para detectar los pequeños en la velocidad del agua (Figura 4.7), se optó a utilizar las compuertas del canal para cambiar el perfil del flujo y volverlo lo más laminar posible, ya que de esta manera se facilitaría el cambio de velocidad del flujo y el instrumento sería menos afectado por las turbulencias y perturbaciones del flujo.



Figura 4.7 Comparación de mediciones en el flujo.

Con unas series de lecturas tanto del instrumento patrón como del instrumento propuesto, fue determinado que la zona muerta obtenida tendría un valor de variación del .01 al .02 m/s que nos llevaría a un valor de zona muerta de entre +/-1.2% a +/-2.4%; El instrumento propuesto mostraba estas variación en la medición del flujo, mientras que el instrumento patrón no mostraba variación en sus mediciones debido a que genera un promedio de las lecturas que va realizando, presentando de esta manera menor sensibilidad a los cambios mínimos de velocidad en el flujo.

Durante la realización de las pruebas para la determinación de la zona muerta, se llevó el registro de las mediciones realizadas del instrumento propuesto y del instrumento patrón con el objetivo de determinar el nivel de correlación de los datos el comportamiento del instrumento propuesto al modificarse el flujo medido durante un muestreo de datos (Tabla 4.1). Con estos datos obtenidos se obtuvo el coeficiente de correlación, que nos indica la relación lineal entre dos variables y su comportamiento, las mediciones realizadas arrojaron un coeficiente de correlación de 0.96 que nos indica que ambos datos llevan un comportamiento positivo, este comportamiento positivo indica que cuando un instrumento registra un aumento o un decremento en la medición el otro instrumento responde de la misma forma, y el valor indica que estos aumentos están muy cerca de ser en proporción constante durante toda la medición.

Mediciones m/s	
Patrón	Propuesto
0.6	0.61
0.51	0.5
0.4	0.35
0.4	0.41
0.32	0.33
0.39	0.41

Tabla 4.1 Tabla con mediciones realizadas con instrumento patrón contra propuesto.

Una vez que fueron obtenidos estos valores que marcan las características y propiedades del instrumento se procedió a realizar mediciones y lecturas con un flujo fijo para poder realizar la comparativa en las respuestas de ambos instrumentos, y de esta manera conocer el desempeño del instrumento y sistema utilizados para validar su funcionamiento en manera cuantitativa/operativa.

Estas mediciones fueron realizadas en diferentes días y con diferentes condiciones atmosféricas naturales, esto, con el objetivo que someter al instrumento a la mayor cantidad de condiciones externas aleatorias y determinar si era capaz de desempeñar su función con condiciones no controladas tales como

las que se pueden encontrar en los canales abiertos en el exterior no importando el lugar en donde tuviera que ser utilizado.

La siguiente tabla (Tabla 4.2) muestra las primeras mediciones realizadas en intervalos de 15 minutos haciendo una comparativa de las mediciones realizadas con el instrumento patrón comparándolas con las realizadas con el instrumento propuesto. En estas mediciones se pueden observar saltos oscilantes en las mediciones tanto del instrumento patrón como del propuesto, esto es debido a que el canal en donde fueron probados los instrumentos, no cuenta con una manera segura de mantener estable el flujo que es suministrado, esto debido a su principio de operación.

Mediciones m/s		Mediciones m/s		Mediciones m/s	
Patrón	Propuesto	Patrón	Propuesto	Patrón	Propuesto
0.8	0.83	0.77	0.77	0.77	0.77
0.82	0.84	0.76	0.75	0.76	0.75
0.79	0.82	0.77	0.77	0.77	0.76
0.77	0.79	0.77	0.76	0.75	0.74
0.78	0.81	0.78	0.77	0.78	0.77
0.78	0.82	0.78	0.77	0.75	0.74
0.77	0.78	0.77	0.77	0.77	0.77
0.81	0.82	0.77	0.76	0.77	0.75
0.77	0.75	0.78	0.79	0.78	0.78
0.77	0.77	0.77	0.79	0.77	0.75
0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.77
0.78	0.77	0.78	0.78	0.76	0.76
0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
0.77	0.78	0.77	0.77	0.76	0.75
0.77	0.79	0.77	0.77	0.77	0.76

Tabla 4.2 Tabla con mediciones durante periodos de 15 min.

El canal funciona con agua almacenada en un tanque por encima del canal de pruebas y para alimentar con agua a este tanque son utilizadas 3 bombas con diferentes capacidades, estas bombas por la potencia que desarrollan pueden introducir burbujas de aire al flujo y bombear más o menos agua dependiendo de

la carga o de la cantidad de agua disponible lo que provoca alteraciones en el flujo entregado al canal lo que provoca cambios de mínimos a moderados en la lectura del flujo, estas alteraciones desaparecen con el funcionamiento del canal ya que al pasar el tiempo el flujo tiende a estabilizarse al igual que las lecturas realizadas. Por este motivo las primeras lecturas realizadas en cada día de pruebas tienden a tener una mayor variación en los datos comparándolas contra las lecturas realizadas más tarde en el mismo día.

En la Figura 4.8 se observa la comparación del instrumento patrón (rojo) contra el instrumento propuesto (azul) así como la recta de regresión de cada conjunto de datos, con las gráficas de las rectas se puede apreciar que el instrumento propuesto tiende a ser más afectado por las turbulencias y cambios en el flujo que el instrumento patrón, esto es debido a que las mediciones realizadas por nuestro instrumento son minuto a minuto y calculas en el momento de cumplirse el tiempo de muestreo, por lo que una variación en el flujo puede provocar el cambio de velocidad de las tazas lo que conlleva a que se pueda realizar una lectura más o una lectura menos dependiendo de la situación, por otro lado la medición que realiza el instrumento patrón es una medición promedio en la cual recoge datos cada instante y efectúa una media aritmética de las lecturas para otorgar el valor de la medición por lo que su lectura no se ve mayormente afectada por los cambios súbitos en el flujo.

Sin embargo con un valor de correlación de 0.806 entre ambas mediciones nos indica que el instrumento responde ante los cambios del flujo de la misma manera que lo hace el instrumento contra el que lo estamos comparando; Las desviaciones estándar de ambos instrumentos se encuentran en un valor de 0.016 para el instrumento patrón y .0266 para el propuesto lo que nos indica que las mediciones realizadas por parte de nuestro instrumento se encuentran muy cercanas al modelo de predicción estadística representado por la recta de regresión indicándonos un margen de error por debajo del 5%.

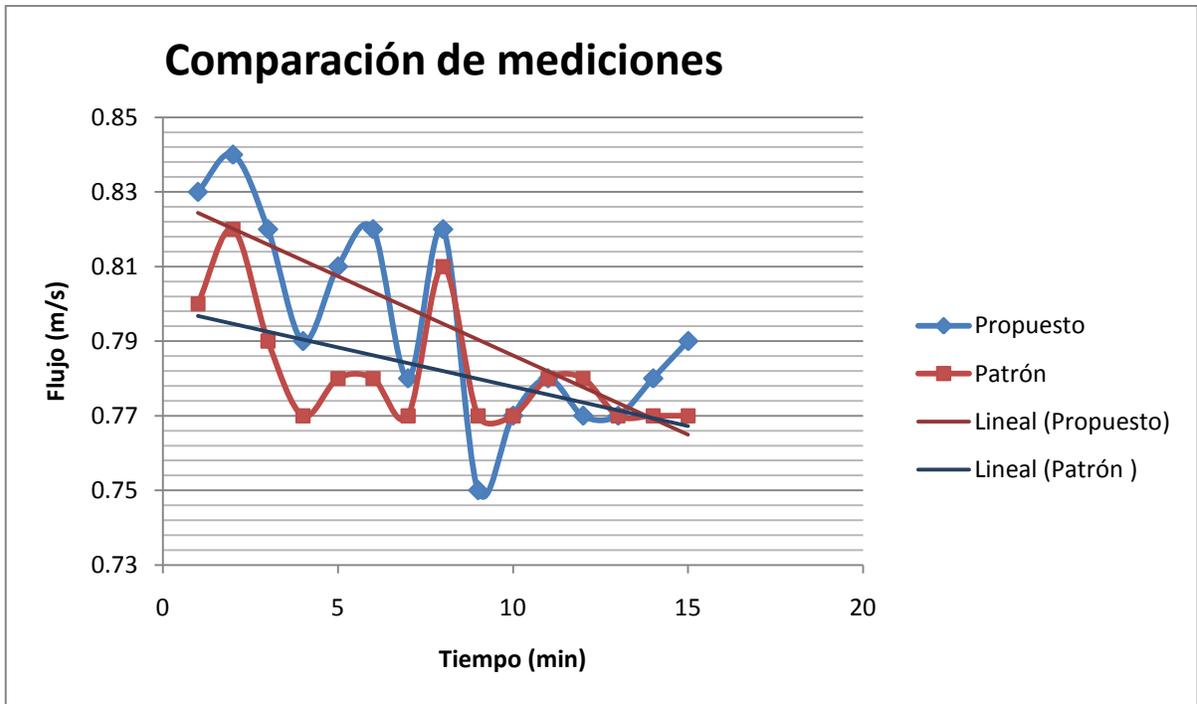


Figura 4.8 Graficas comparativas de medición 1.

Lo anterior también puede ser observado con las 2 graficas restantes de las primeras mediciones realizadas (Figura 4.9 y Figura 4.10) en ambas también se observa las variaciones del flujo sin estabilizarse aun y como estas variaciones afectan al instrumento propuesto en sus mediciones durante el intervalo de tiempo. La desviación estándar para ambos conjuntos de datos es de 0.0106 y 0.0122 para el instrumento patrón, los valores nos indican que ambas rectas se encuentran en el intervalo de medición predicho y son cercanas a las del instrumento patrón, incluso en la Figura 4.10 en donde ambas rectas de regresión poseen una pendiente cercana a ser igual con una diferencia de separación de solo 0.012 unidades.

Estos valores altos y bajos en las mediciones del instrumento propuesto no solo eran causadas por las variaciones en el flujo del canal, con las primeras pruebas se observó que podía haber otro fenómeno que afectara las mediciones y la cantidad de datos recibidos por el sistema y que contribuirían a los altos o bajos valores en las lecturas.

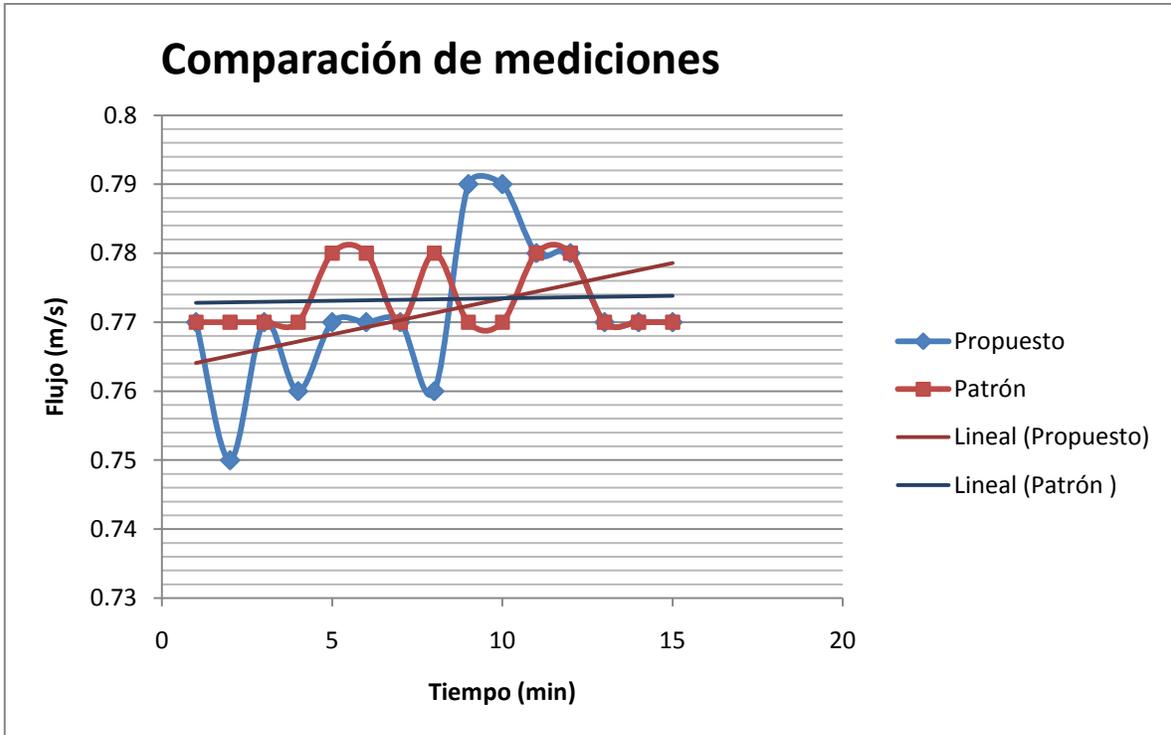


Figura 4.9 Graficas comparativas de medición 2.

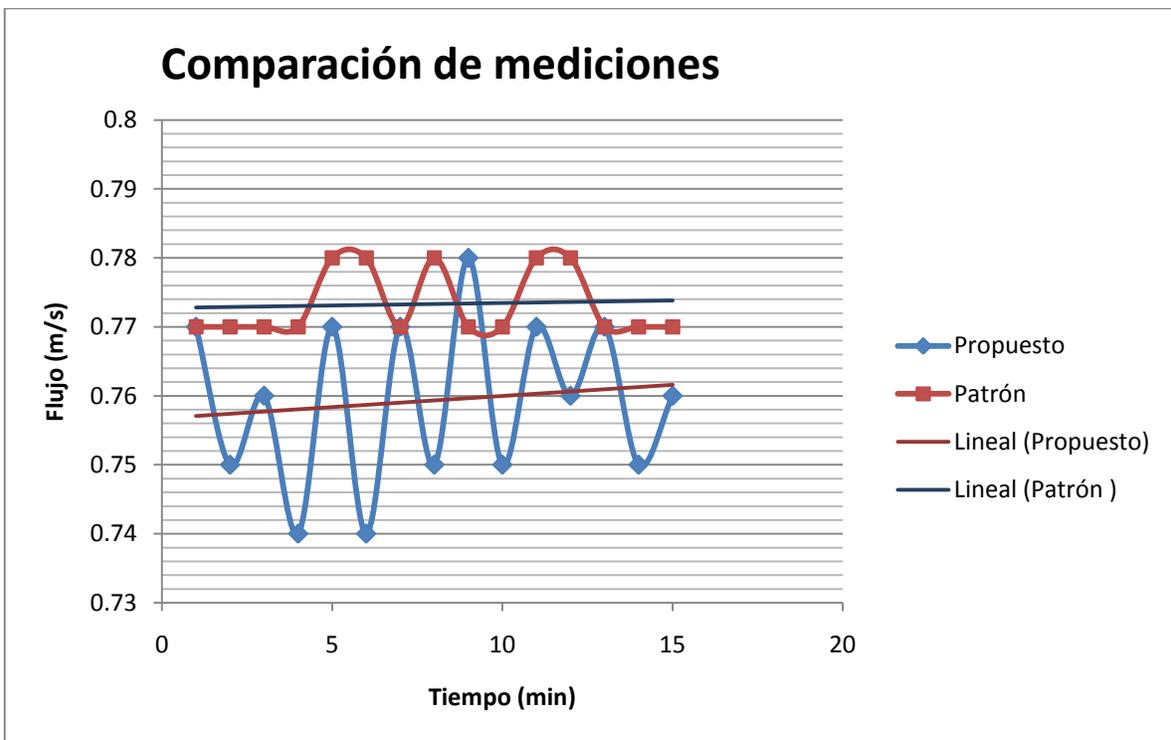


Figura 4.10 Graficas comparativas de medición 3.

Esto es causado por el opto interruptor y la posición del disco de acrílico al momento de comenzar la medición. En el mismo instante en el que el instrumento es colocado en el flujo, el disco de acrílico comienza a girar y este giro se vuelve ininterrumpido, cuando se le requiere al instrumento que comience una medición nueva justo en ese instante el sistema empieza a recibir las señales provenientes del opto interruptor, pero no se puede saber ni controlar en qué posición se encuentra la marca en el disco de acrílico, por lo que la recolección de datos se ve afectado por la posición en la que se encontraba dicha marca en el comienzo del tiempo de muestreo. Esto nos lleva a 3 posibles situaciones (Figura 4.11).

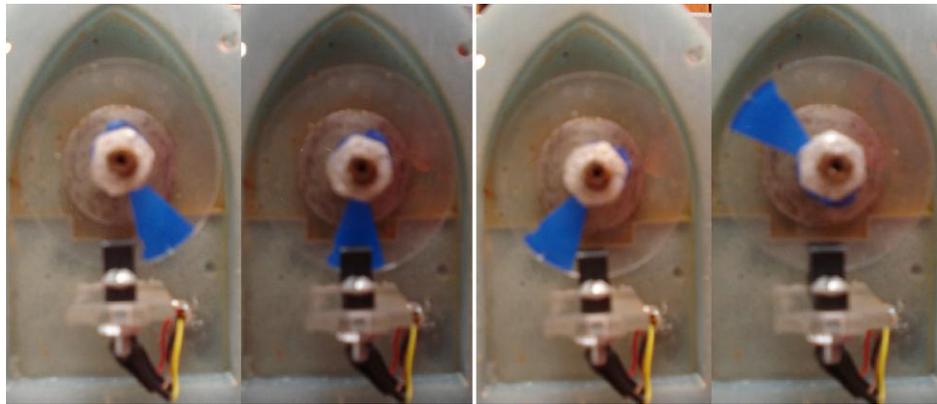


Figura 4.11 Posibles posiciones del disco al inicio de una medición.

Para comenzar tal y como se puede observar en la primer imagen de izquierda a derecha, la marca se encuentra justo delante del sensor pero sin activarlo lo que nos llevaría a que el sistema registrara una señal inmediatamente después de haber sido activado el tiempo de muestreo, lo que nos daría mayor cantidad de datos en comparación al resto de las situaciones posibles. La segunda, que la marca se encuentre justo en el opto interruptor y al tener el sistema configurado una detección por cambio de flanco de alto a bajo, no contara esta señal y detectara hasta el momento en el que haya otro cambio de flanco ocasionando la pérdida de un dato en el intervalo de tiempo de muestreo. Por último, que la marca en el disco de acrílico se encuentre después del opto interruptor provocando de esta manera un tiempo en el que el sistema no recibirá ninguna señal debido a que el disco tendría que dar una vuelta entera para que el

sistema detecte la primera señal, lo que se traduce en menos señales recibidas en el intervalo de tiempo de muestreo.

Estas 3 situaciones pueden provocar, en conjunto con el perfil irregular del flujo al iniciar el canal, variaciones en la lectura de la velocidad del canal, que provocarían las desviaciones y la diferencia entre las rectas de regresión de las lecturas realizadas por el instrumento patrón y el instrumento propuesto.

Conforme el tiempo transcurre, el canal comienza a presentar una mayor estabilidad en su flujo entregado, lo cual es registrado con ayuda de ambos instrumentos y tal como lo muestra la Tabla 4.3, los valores del instrumento patrón y del instrumento propuesto empiezan a tener menos desviación entre ellos, al estabilizarse las variaciones presentes en el flujo, también se estabiliza la lectura del instrumento propuesto mejorando la desviación estándar en las lecturas presentes desde una desviación de 0.012 en la primer tabla, cambiando a un valor de 0.009 para la segunda tabla, y terminando en un valor de 0.005 unidades para la tercera.

Mediciones m/s		Mediciones m/s		Mediciones m/s	
Patrón	Propuesto	Patrón	Propuesto	Patrón	Propuesto
0.77	0.76	0.77	0.75	0.77	0.76
0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.78
0.77	0.76	0.77	0.78	0.77	0.77
0.77	0.77	0.77	0.78	0.77	0.77
0.78	0.76	0.78	0.77	0.78	0.77
0.78	0.76	0.78	0.76	0.78	0.78
0.77	0.76	0.77	0.78	0.77	0.76
0.78	0.77	0.78	0.77	0.78	0.78
0.77	0.77	0.77	0.76	0.77	0.75
0.77	0.77	0.77	0.76	0.77	0.77
0.78	0.77	0.78	0.76	0.78	0.8
0.78	0.76	0.78	0.76	0.78	0.75
0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.76
0.77	0.76	0.77	0.77	0.77	0.77
0.77	0.76	0.77	0.75	0.77	0.77

Tabla 4.3 Tabla con mediciones durante periodos de 15 min (continuación).

Así mismo se puede apreciar esta estabilidad en el flujo si se grafican las lecturas de los instrumentos, en las siguientes graficas (Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14) se aprecia como al disminuir las perturbación en el flujo, los valores arrojados por el instrumento patrón, comienzan a ser más estables y mantenerse dentro de un rango de valores en donde las rectas de regresión se van acoplando y ajustando reduciendo el error presente en la lectura y asegurando que las lecturas realizadas sean cada vez más cercanas al valor del flujo real.

Las desviaciones estándar de los conjuntos de lecturas nos indican que estas lecturas tienden a no separarse y a mantener una uniformidad en la toma de datos, sin embargo si las rectas de regresión se encontraran demasiado separadas entre sí, nos indicaría que el instrumento cuenta con un buen valor de repetitividad pero no así con una buena precisión, al observar como las rectas de regresión de cada una de las lecturas se van acercando, es un indicio que el instrumento comienza a desarrollar una mejor precisión conforme el flujo se estabiliza.

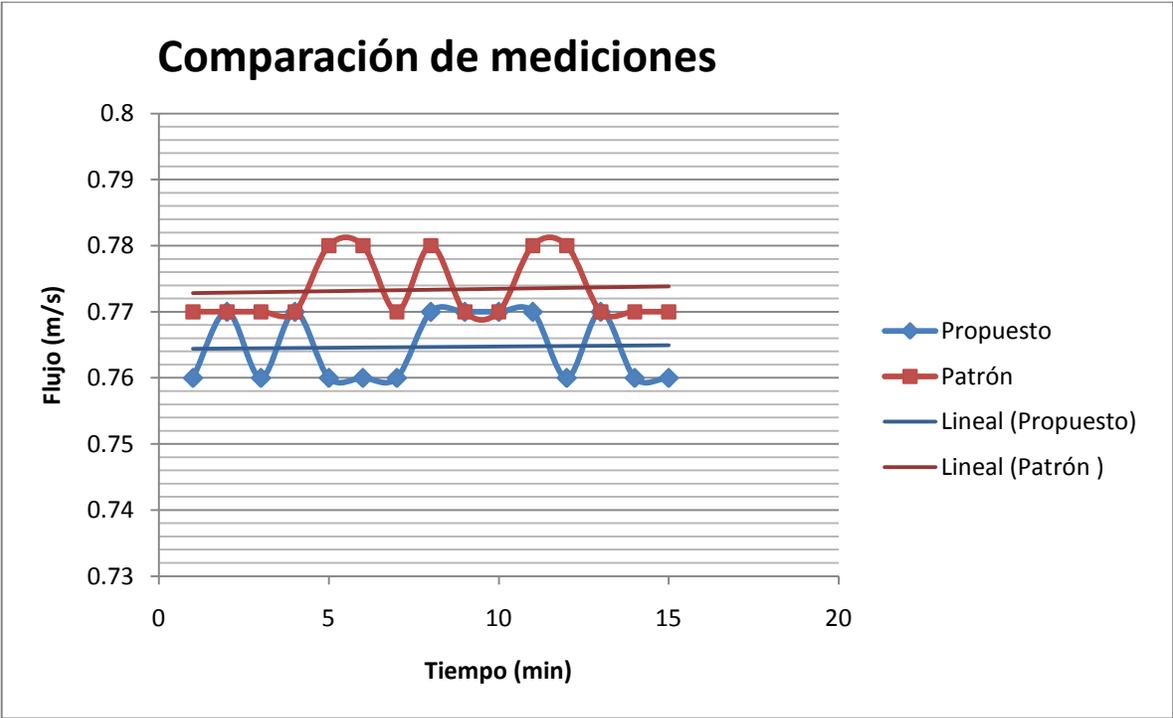


Figura 4.12 Graficas comparativas de medición 4.

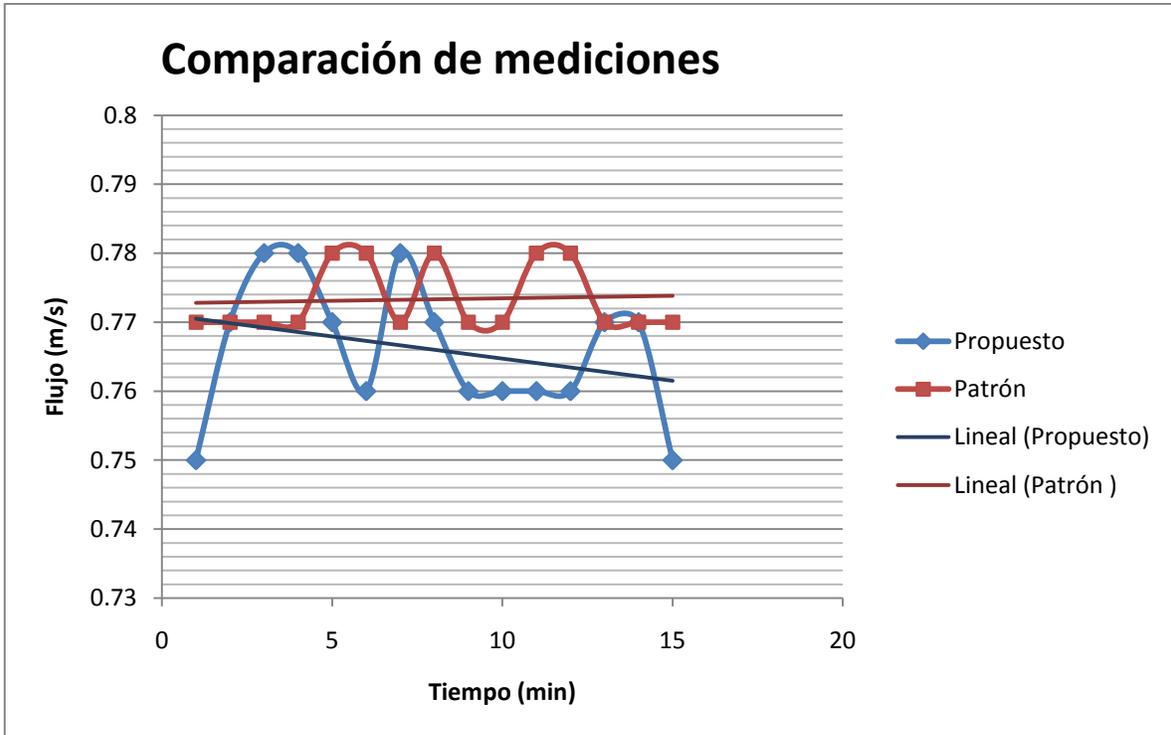


Figura 4.13 Graficas comparativas de medición 5.

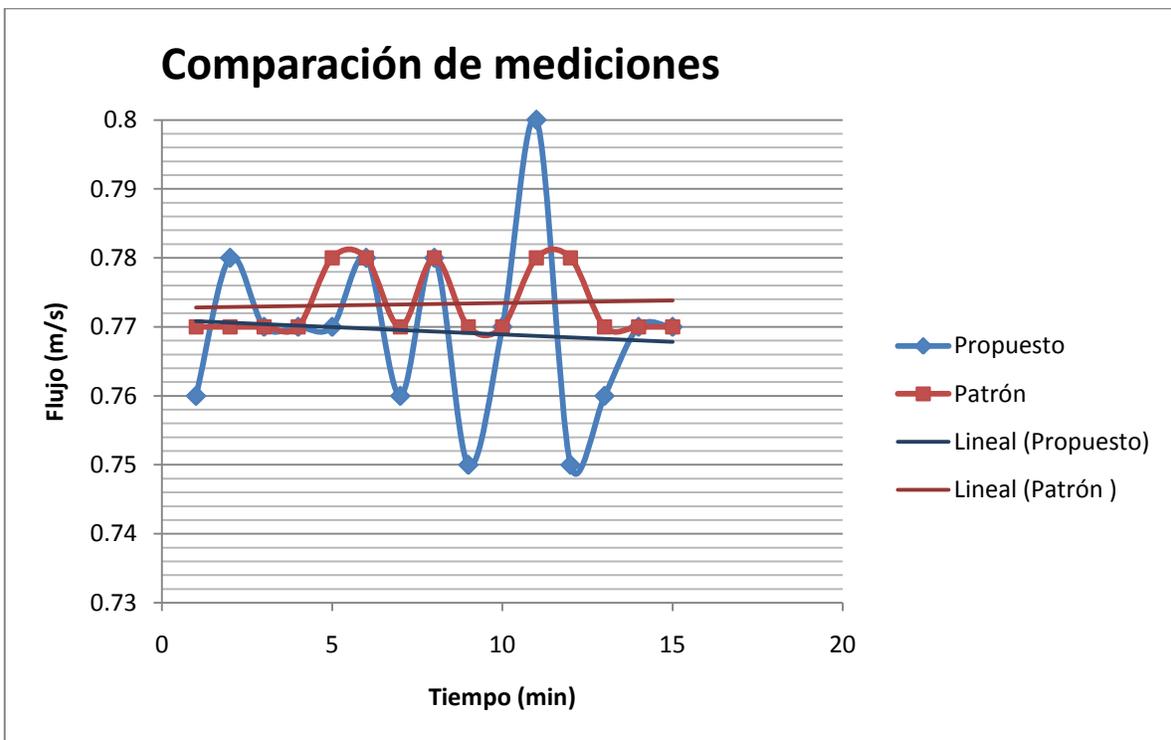


Figura 4.14 Graficas comparativas de medición 6.

Las pruebas y tomas de datos se realizaron durante un intervalo de dos horas y media cada día de pruebas, transcurrida una hora de haber sido iniciadas las pruebas el canal ya no presentaba anomalías ni turbulencias en el perfil del flujo lo que lo hacía más constante, en este periodo de tiempo las mediciones ya no tenían tantas variaciones lo que nos entregaba datos fiables y con buena precisión de acuerdo al instrumento patrón, esto es posible de observar con las gráficas comparativas de las últimas muestras de datos (Figura 4.15, Figura 4.16).

En estas graficas se aprecia como las mediciones obtenidas por el instrumento propuesto se mantienen en un rango que se aleja solo 0.001 m/s de la lectura del instrumento patrón, cabe recordar que el instrumento patrón funciona con una toma de datos instantáneos y realizando un promedio de las lecturas para el muestreo de su medición, se pudo observar que la respuesta obtenida por la propuesta sería ese mismo comportamiento de muestras oscilantes entre el valor real de la medición que obteniéndola con la media y moda del instrumento patrón tendría un valor de aproximadamente 0.773 m/s.

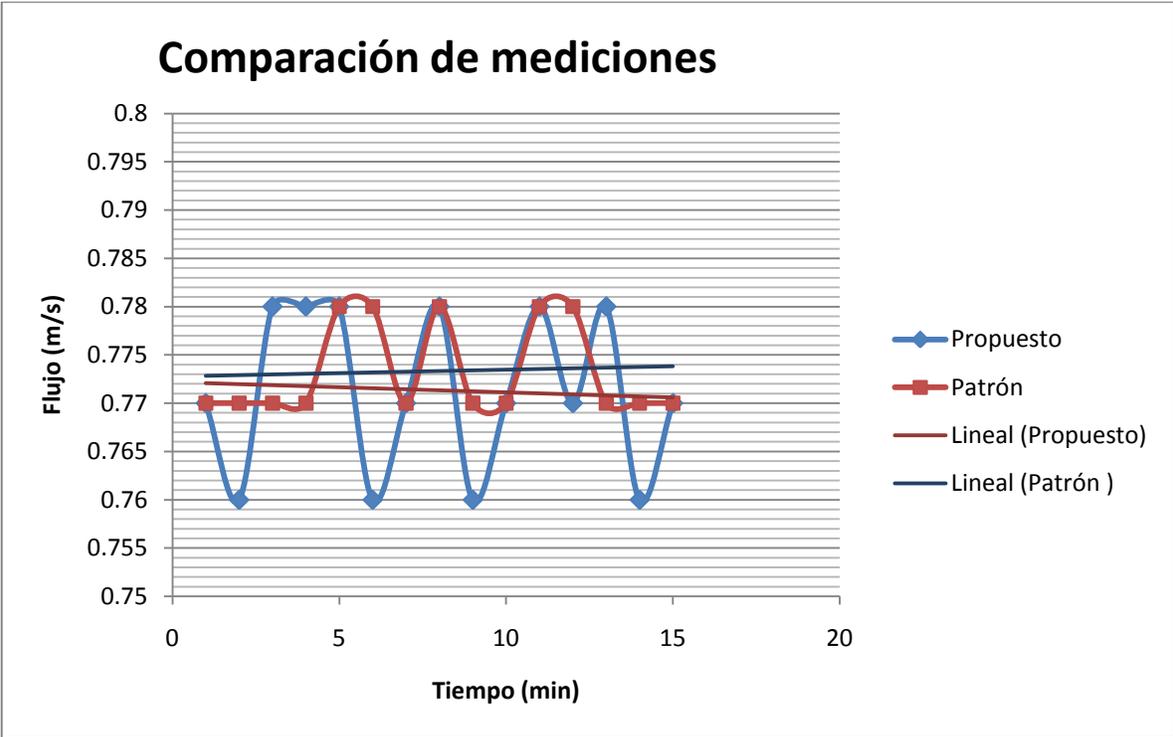


Figura 4.15 Graficas comparativas de medición 7.

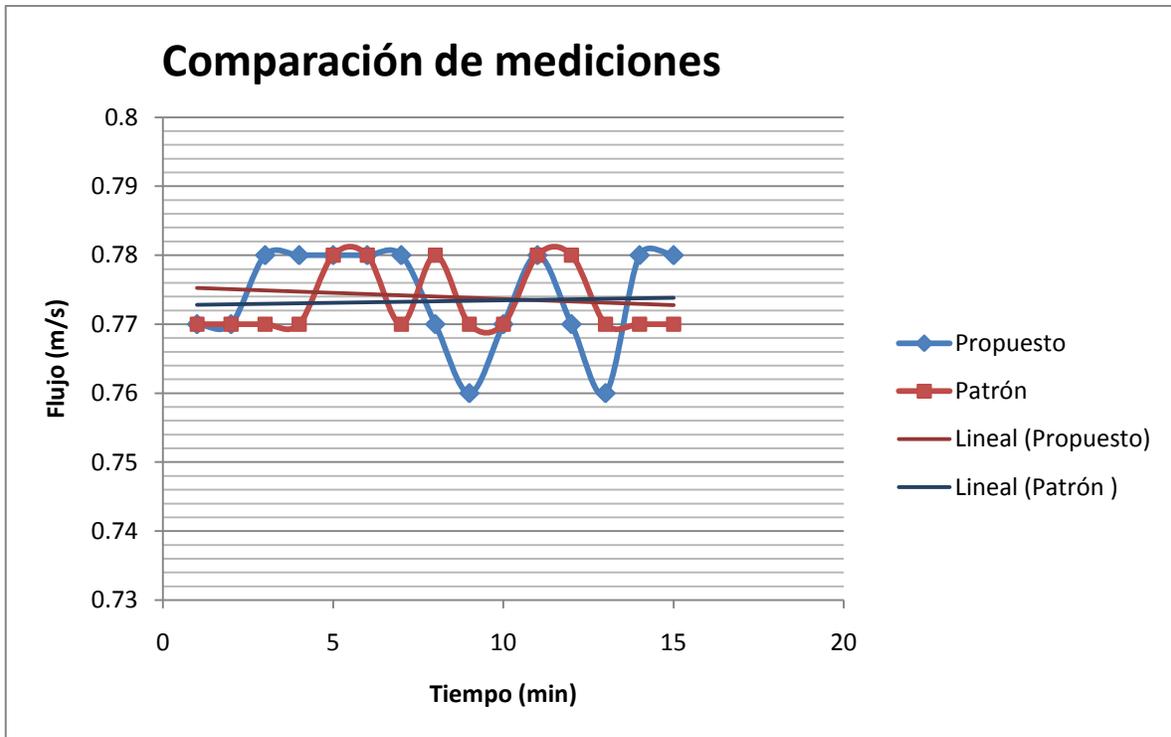


Figura 4.16 Graficas comparativas de medición 8.

Las similitudes en pendiente que tienen las rectas de regresión en ambos casos nos muestran cómo trabajan ambos equipos y como el instrumento propuesto puede alcanzar una respuesta similar o igual a la del equipo comercial utilizado, la separación existente entre ambas nos determina que el error se encuentra entre el 2% y el 1% de la lectura del instrumento patrón, y realizando la extrapolación con el error inherente en este último equipo podemos determinar que el error en el instrumento propuesto se encuentra entre el 5% y el 1% del valor real del flujo.

Esto último es apreciado con la ayuda de la Tabla 4.4 Donde están condensados los datos de las últimas mediciones realizadas en los días de pruebas, se destaca la uniformidad en las mediciones y la tendencia por parte de las lecturas del instrumento propuesto a continuar la sinergia de las lecturas por parte del instrumento patrón. La distancia entre las rectas es menor a 0.01 unidades y el valor de la correlación entre datos alcanzo un valor de 0.98 lo que indica una correlación casi perfecta con la estimación y predicción de las medidas

y en conjunto con las desviaciones estándar con valores de 0.0073 y 0.0083, los valores estadísticos nos mostraron que las lecturas obtenidas entre ambos instrumentos para un flujo constante en condiciones no ideales y aleatorias están muy cercanas entre sí al grado de casi poderlas considerar las mismas respetando evidentemente el valor del error presente para ambos instrumentos.

Mediciones m/s		Mediciones m/s	
Patrón	Propuesto	Patrón	Propuesto
0.77	0.77	0.77	0.77
0.77	0.77	0.77	0.76
0.77	0.78	0.77	0.78
0.77	0.78	0.77	0.78
0.78	0.78	0.78	0.78
0.78	0.78	0.78	0.76
0.77	0.78	0.77	0.77
0.78	0.77	0.78	0.78
0.77	0.76	0.77	0.76
0.77	0.77	0.77	0.77
0.78	0.78	0.78	0.78
0.78	0.77	0.78	0.77
0.77	0.76	0.77	0.78
0.77	0.78	0.77	0.76
0.77	0.78	0.77	0.77

Tabla 4.4 Tabla con mediciones en el último intervalo de tiempo durante periodos de 15 min.

## V. CONCLUSIONES

El trabajo presentado concluyó en un proyecto que trascendió la línea de investigación y de estudio del autor, fue requerido para su diseño e implementación el uso y aplicación de conocimientos multidisciplinarios que enriquecieran el proyecto y aportaran el material técnico y científico necesario para llevarlo a su culminación.

La hipótesis del estudio era comprobar la viabilidad de combinar sistemas mecánicos y electrónicos que trabajaran en conjunto para realizar la medición precisa de los caudales presentes en los canales abiertos ya sea que fueran naturales o artificiales, para cumplir con este objetivo se hizo uso de los conocimientos aplicados de electrónica, instrumentación, diseño técnico e industrial y métodos matemáticos de cálculos hidrológicos.

En base a las primeras pruebas realizadas con el sistema propuesto se concluyó que es de vital importancia la correcta selección de los materiales para el diseño del instrumento, ya que al elegir metales no resistentes a la corrosión y al rozamiento provoca una degradación continua en las piezas móviles del instrumento ocasionando un mal funcionamiento debido al óxido en las piezas que restarían velocidad o aumentarían los valores de flujo mínimo y zona muerta, e incluso un desperfecto que provocaría la inutilización del sistema durante el proceso de funcionamiento al atorarse las piezas móviles, así mismo es importante que las piezas estén hechas a medida y si es posible que sean corregidas y calibradas con sistemas electrónicos de precisión debido a que un mal ajuste en las piezas provoca un choque de las partes móviles con las partes fijas del instrumento, y este problema ocasiona lecturas erróneas o el fallo del sistema completo al no reproducir fielmente los movimiento de las tazas.

En cuanto a la carcasa propuesta, fue diseñada con el objetivo de reducir el rozamiento con el agua, su forma ayuda a dispersar el agua en la parte superior y

evita la formación de remolinos y turbulencias en la parte frontal del instrumento donde está el accionamiento las tazas, sin embargo se pudiera mejorar la parte trasera de dicha carcasa, ya que en el prototipo original es plano y con flujos con tirantes bajos o con poca velocidad provoca remolinos y depresiones que en ciertos casos pudieran provocar fuerzas inversas que impedirían el movimiento libre de las tazas; Esto puede ser evitado generando un perfil de salida en la carcasa similar al del frente de esta, con el fin de que el agua al chocar con la parte frontal de la carcasa continúe con este mismo trayecto y sea la misma carcasa la que conduzca las corrientes a la parte trasera del instrumento donde ya no afectaría el giro de las tazas.

Esta primera parte física del prototipo fue producida y maquinada individualmente y con solo 1 juego de piezas para poder ser probada, sin embargo fue diseñada e implementada con ayuda de técnicas industriales de diseño y maquinado de piezas en serie, estos procesos al ser llevados a gran escala disminuirían en gran medida los costos de fabricación de dichas piezas y debido a que el proyecto fue concebido para la adaptación y mejora de instrumentos utilizados en la actualidad, se estaría generando un instrumento con bajos costos de fabricación, que alargaría la vida de flujómetros ya inutilizados y mostraría un desempeño capaz de competir con los instrumentos que están actualmente en el mercado cuya desventaja principal son los altos costos para las instituciones que los utilizan.

Con ayuda de las pruebas se determinó que el instrumento es susceptible a los errores y fluctuaciones ocasionadas por el cambio repentino y turbulento que pueda llegar a presentar el flujo medido, acto que parecía no afectar tanto al instrumento utilizado para comparar los desempeños, este aparato utilizaba un método de mínimos cuadrados para determinar un valor medio de la lectura reduciendo de esta manera el error inducido por las perturbaciones, el instrumento propuesto al ser más sensible a estas perturbaciones da la posibilidad de poder ser utilizado como base para un sistema de alerta temprana en donde se

mostraría de manera real el comportamiento del flujo y el caudal con todas las pequeñas alteraciones que pudieran ser determinantes para conocer el caudal ecológico de un canal natural. Sin embargo al ser el sistema tan abierto y al contar con la ayuda de un procesador como lo es el de una computadora, se puede implementar un sistema alternativo con métodos matemáticos iguales a los del instrumento de comparación que ayudarían a reducir en las lecturas estas pequeñas alteraciones y entregarían un dato más uniforme durante las pruebas con perfiles más estables y sin ser tan sensible a las variables de la naturaleza que no pudieran ser controladas, además, el ordenador nos puede abrir la posibilidad de generar una base de datos con actualización en tiempo real donde se pueda acceder por medio de internet y se pueda medir un flujo de manera remota haciendo más flexible el manejo de las mediciones con propósitos de investigación entre otros.

Los valores arrojados en los resultados nos demostraron que al tener un flujo estable sin tantas perturbaciones y siendo calibrado dentro de un rango donde se encuentren los valores esperados, el instrumento propuesto responde de manera similar al instrumento comercial, manteniendo los valores de correlación, repetitividad y precisión, además, el valor de la zona muerta está dentro del rango de tolerancia y va conforme a la sensibilidad con la que se puede controlar el canal de pruebas y gracias a la acotación del rango el error entre las lecturas puede ser reducido hasta el 2%, realizando una extrapolación a los datos obtenidos dentro de los límites alcanzados en el canal, podemos determinar que el instrumento responde casi con las mismas características con las que cuenta un instrumento comercial siendo la única limitante el factor físico de espacio y desempeño mecánico inherente en el instrumento debido a su principio de funcionamiento.

Tomando estos factores y datos en cuenta se concluye que la viabilidad del proyecto fue alcanzada cumpliendo con la hipótesis propuesta y alcanzando los objetivos planteados para el proyecto, ya que se pudo reutilizar un sistema

mecánico existente, fue posible la implementación de un sistema electrónico que fuera capaz de mejorar el método existente para la toma de mediciones llegando a equiparar el desempeño y facilidad de uso de los sistemas comerciales actuales. Con las pruebas y mediciones realizadas durante el estudio se puede asegurar que el prototipo obtenido con un mínimo de modificaciones en la estructura y forma de sujeción al canal puede ser utilizado dentro del laboratorio para ser utilizado como instrumento para la realización de prácticas que enriquezcan y complementen los conocimientos de los estudiantes, así como para incentivar a los alumnos a continuar con proyectos que puedan proveer a la misma universidad de equipos y materiales para continuar con este proceso de mejora continua que ha sido y será la ideología constante de la institución. Y finalmente para la utilización del instrumento en campo de manera constante, con unas modificaciones en el sistema de comunicación con el ordenador y un manual específico con el desarrollo y explicación detallada de la forma de dar conservación y mantenimiento al equipo, así como con pequeñas modificaciones en la estructura física de la carcasa, el equipo pudiera ser utilizado en campo como una alternativa económica y de bajo impacto para la realización de estudios y la posible actualización de las bases de datos utilizadas por parte de instancias gubernamentales y sectores públicos o privados.

## REFERENCIAS

- ANSI/AWWA C701-88, Medidores de agua fría tipo turbina, para servicio a usuarios, (1988).
- Basan-Nickisch, M.; Aforadores de corrientes de agua, Cursos INTA-EEA, 1(2008).
- Bello, M. A.; Pino, M. T., Medición de presión y caudal, Boletín Del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 28 (2000).
- Beltaos, S.; Prowse, T., River-ice hydrology in a shrinking cryosphere, Hydrological Processes, 23 (2009).
- Bos, M.G.; Replogle, J.A.; Clemmens, A.J., Flow measurement: flumes for open channel systems, International Institute for Land Reclamation and Improvement, 38 (1995).
- Brakenridge, G.R.; Nghiem, S.V.; Amderson, E.; Mic, R.; Orbital microwave measurement of river discharge and ice status, Water Resources Research, 43 (2007).
- Camargo Filho, M.; Rocha de Freitas, A; Celso Ferreira da Silva, S.; Leopolski, E.; Belem Tratz, E; Hidrometria aplicada: medição de vazão da seção 2 do rio Cascavel, Guarapuava (PR), *Ambiência – Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, 5 (2009).
- Campos-Aranda, D.F., Procedimiento para revisión (sin hidrometría) de la seguridad hidrológica de presas pequeñas para riego, *Agrociencia*, 40 (2008).
- Campos-Aranda, D.F., Predicción de crecientes combinando información hidrométrica local y regional, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 3 (2010)
- CNA-IMTA, Ley de aguas nacionales, artículos 7-VIII, 26-II, 29-V-VI, 119-VII-X-XI, (1992).
- CONAGUA, CONAGUA y el consejo nacional agropecuario impulsaran acciones para mejorar la productividad del agua en la agricultura, (2008a).
- CONAGUA, México se ubica entre los países con menor disponibilidad de agua, (2009a).
- CONAGUA, Rompe record lluvia en Sonora, (2009b).
- CONAGUA; SEMARNAT, Programa Nacional Hídrico 2007-2012, (2008).

- Creus Solé, Antonio; 1997. Instrumentación Industrial. Editorial Marcombo S.A. 741 paginas.
- Doebelin, Ernest O. ; 2003. Measurement systems: application and design. Editorial Mcgraw-Hill college, 5th edition. 300 pages.
- Herschy, R. W. ; 1999. Hydrometry: principles and practices. Editorial Wiley. 2nd edition. 384 pages.
- ISO 2537, Hidrometria – Medidores de elemento rotante (2007).
- ISO 11655, Medición de flujo en canales abiertos – Método para el desempeño específico para equipo hidrométrico (2010).
- ISO 772, Hidrometria – Vocabulário y símbolos (2011).
- Kinosita, Takeo, Improvement of ultrasonic flowmeter in rivers in Japan, Advances in Hydrometry, (2001).
- Milly, P.C.D.; Betancourt, Julio; Falkenmark, Malin; Hirsch, Robert M.; Kundzewicz, Zbigniew W.; Lettenmaier, Dennis P.; Stouffer, Ronald J., Stationarity is Dead: Whiteher Water Management?, Science, 319 (2008).
- Mishra, A.K.; Coulibaly, P., Developments in Hydrometric network design: A review, Reviews of Geophysics, 47 (2001/2009).
- Oyola, J.S.; Arredondo, C.A.; Gordillo, G., Desarrollo de prototipo de sistema de monitoreo en tiempo real del nivel de agua en ríos usando instrumentación virtual, Revista Colombiana de Física, 40 (2008).
- Pedroza-Gonzalez, E.; Hidrometria ultrasónica en las presas “Lázaro Cárdenas” y “Francisco Zarco” en México, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 32 (2011).
- Perevochtchikova, M.; Jiménez, F.G., Análisis cualitativo de la red hidrométrica actual del estado de Guerrero, México, Investigaciones Geográficas, 61 (2006).
- Rodrigues de Souza, L.; Cavalcanti da Cunha, A.; Correia, M.F.; Lima Tavares, A., Experimentação e simulação hidrológica aplicada ao uso de energia hidrocínética na bacia do rio Maracá – Amapá, Engenharia Ambiental – Espirito Santo do Pinhal, 8 (2011).
- Romero-Barcojo, A.; Electrónica aplicada: sistemas de control y robótica, revista IES Departamento de Tecnología, 40 (2010).

Santacruz de León, G.; Aguilar-Robledo, M., Estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant, Hidrobiología, 19 (2009).

Toledo, Alejandro, El agua en México y el mundo, Gaceta Ecológica, 64 (2009).

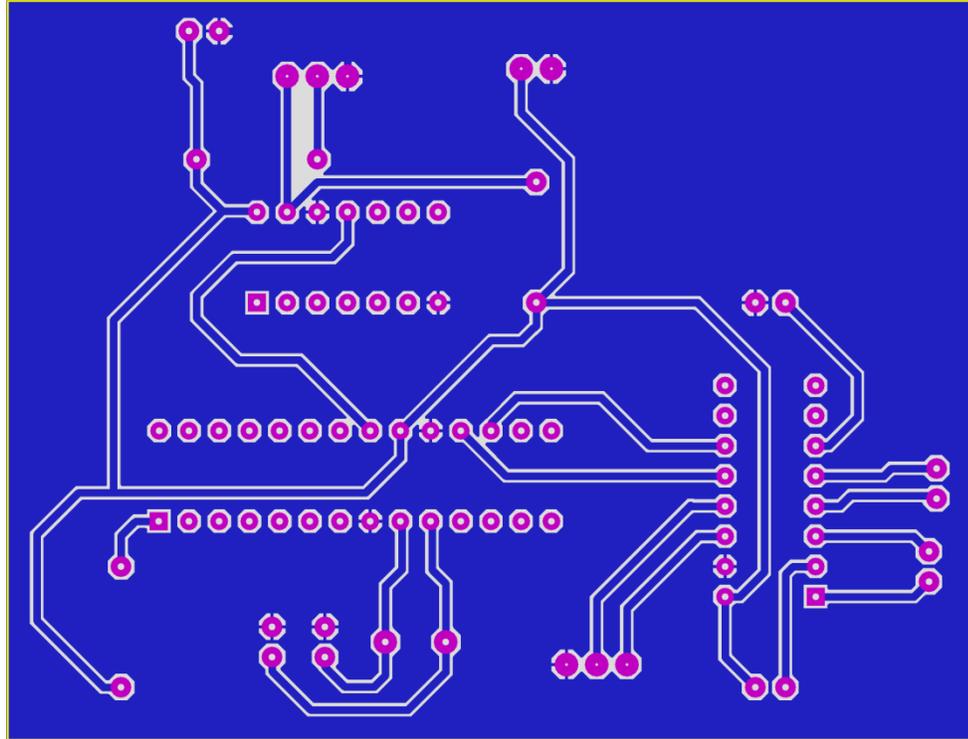
UNESCO; UN-Water, Coping with water scarcity: challenge of the twenty-first century, (2007).

UNESCO; UN-Water, Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture. (2007a).

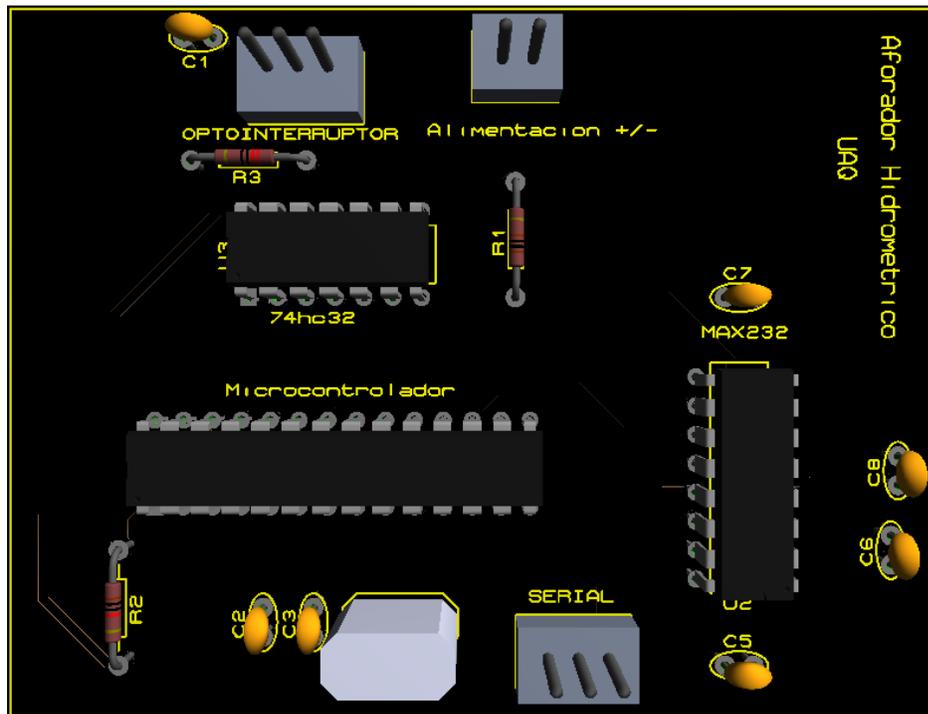
UNESCO, The United Nations World Water Development Report 3: Water in a changing world. (2009).

West Instruments de México, Manual de aplicación de *encoders*. (2009).

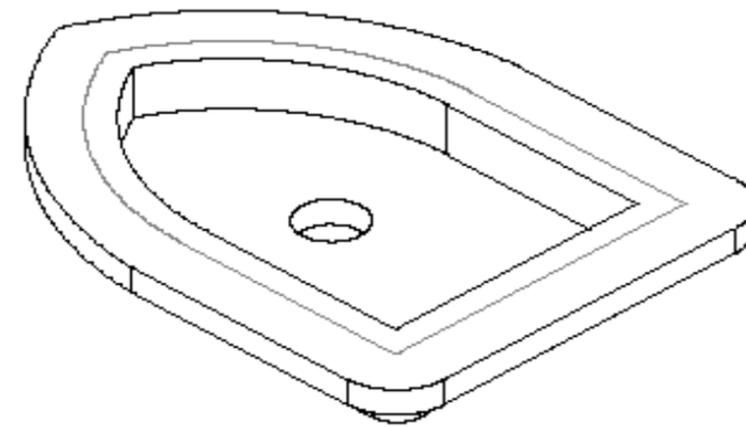
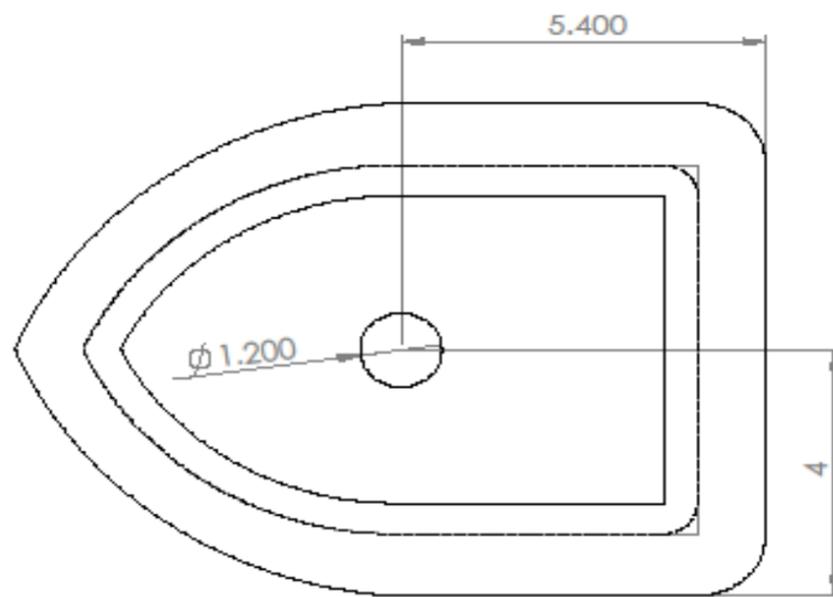
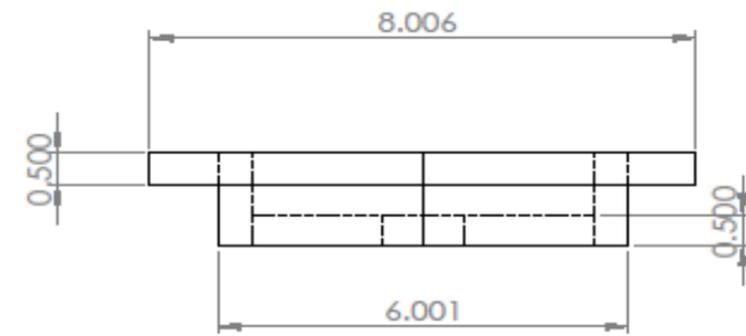
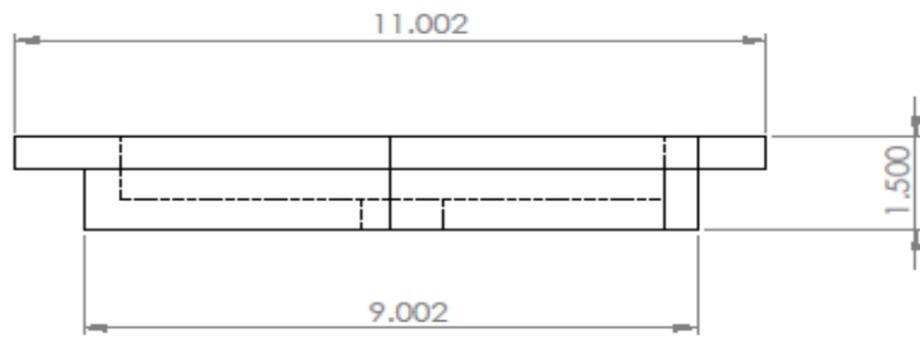
## ANEXOS



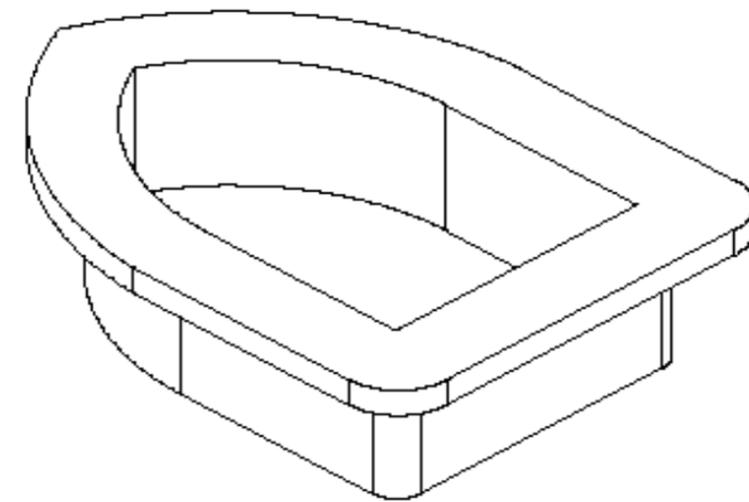
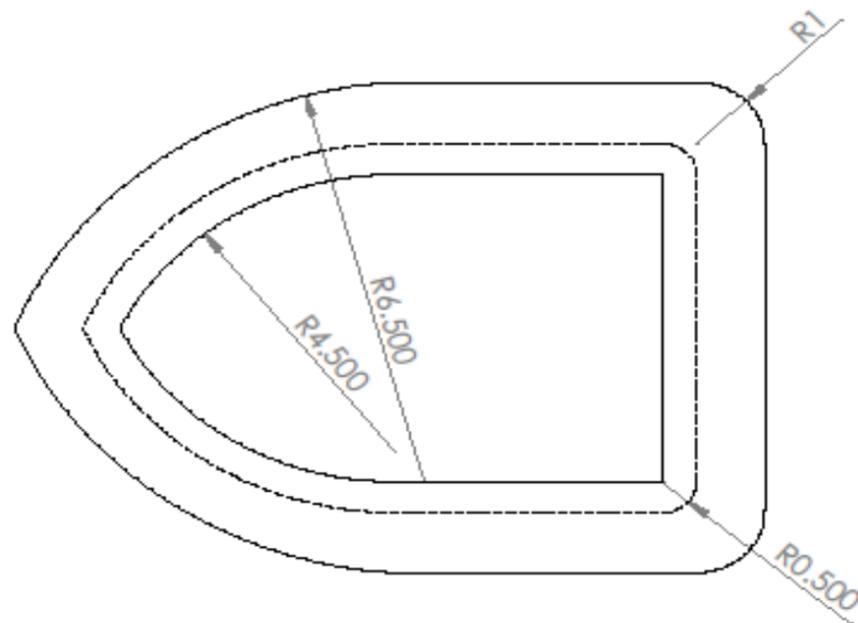
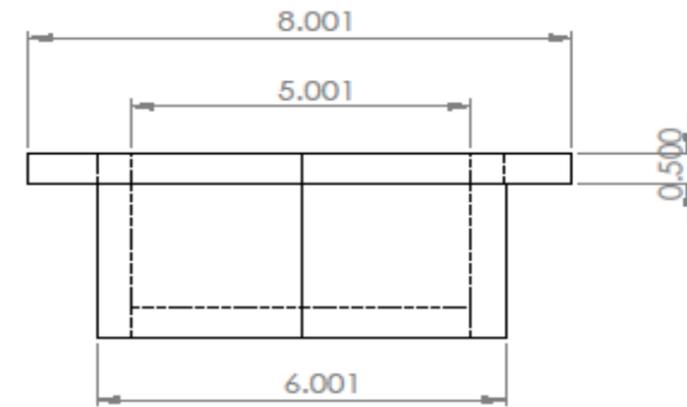
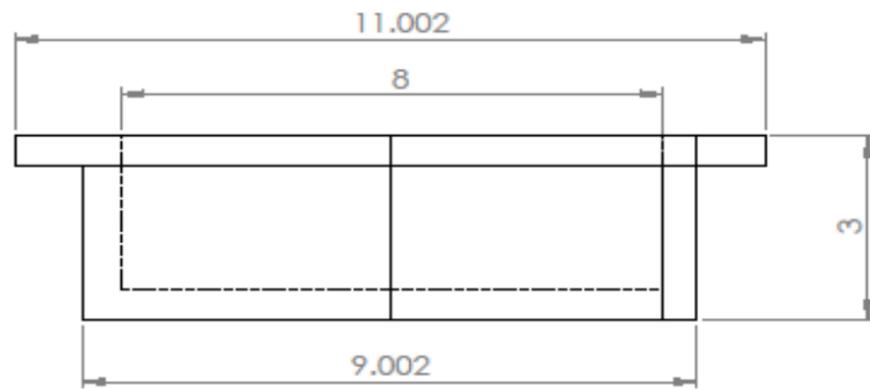
Diseño para la maquinación de tarjeta electrónica.



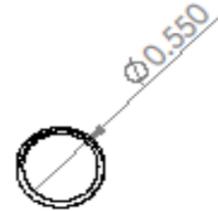
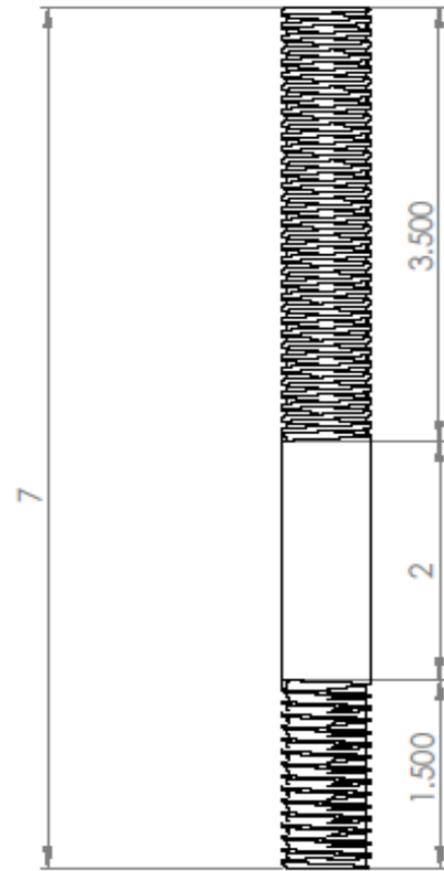
Tarjeta electrónica del instrumento con componentes.



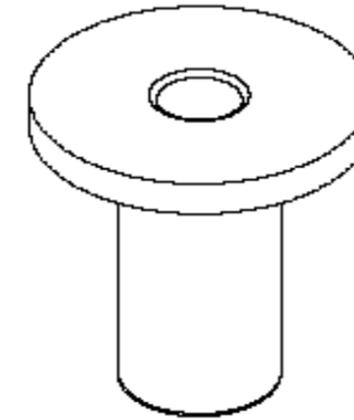
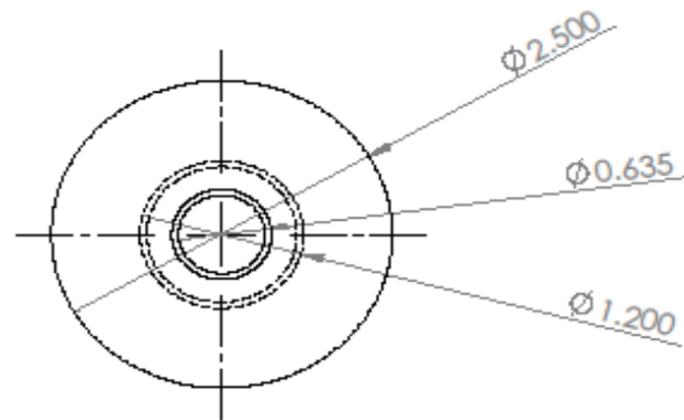
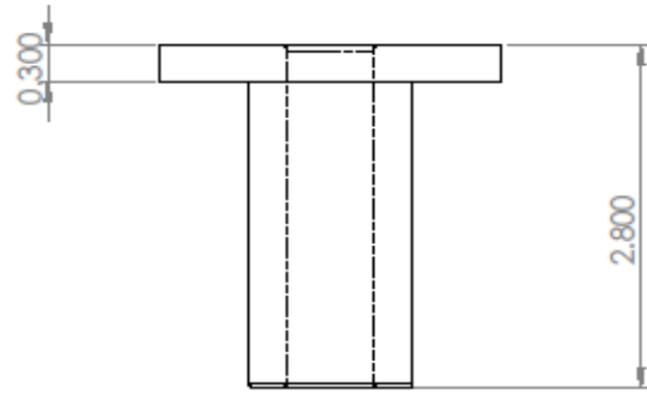
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN CM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: +/- .01 ANGULAR: —		ACABADO: <b>Puñdo</b>		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VVVAS	NO CAMBE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE		FIRMA	FECHA		TÍTULO: <b>Carcasa base</b>	
DEBJ.					N.º DE DEBUJO <b>1 / 6</b>	
VERIF.					A3	
APROS.					ESCALA:1:1	
FABR.					HOJA 1 DE 6	
CAUD.				MATERIAL: <b>Resina poliester</b>		
				PESO:		



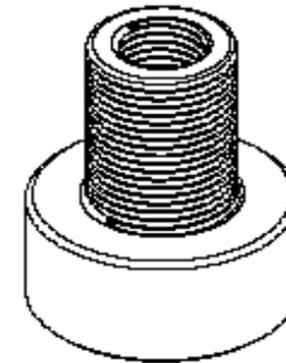
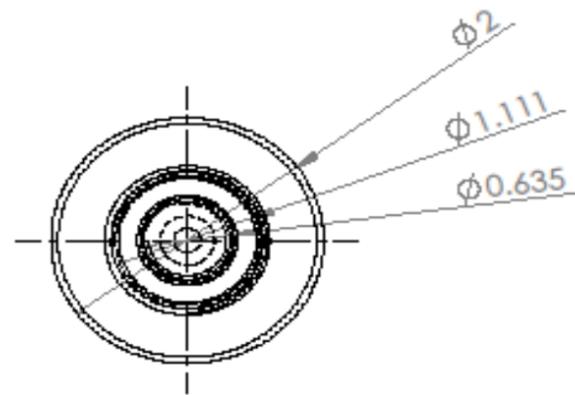
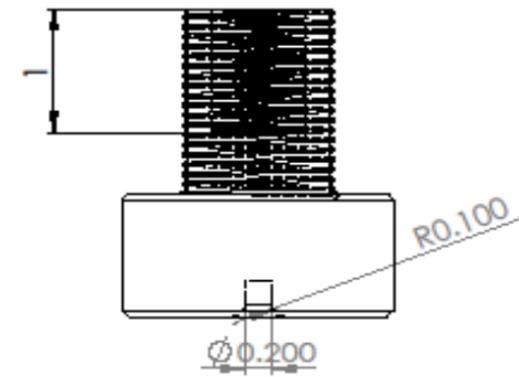
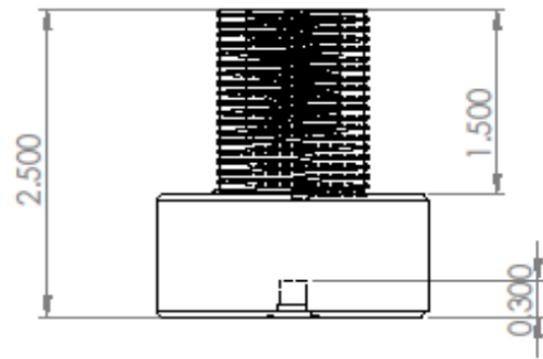
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN CM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: +/- .01 ANGULAR: —				ACABADO: <b>Puñdo</b>		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VINAS		NO CAMBE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE				FIRMA		FECHA		TÍTULO: <b>Carcasa tapa</b>			
DIBUJ.				VERIF.		APROB.		N.º DE DIBUJO <b>2 / 6</b>			
FABR.				CALID.		MATERIAL: <b>Resina poliester</b>		ESCALA: 1:1			
						PESO:		HOJA 2 DE 6			
								A3			



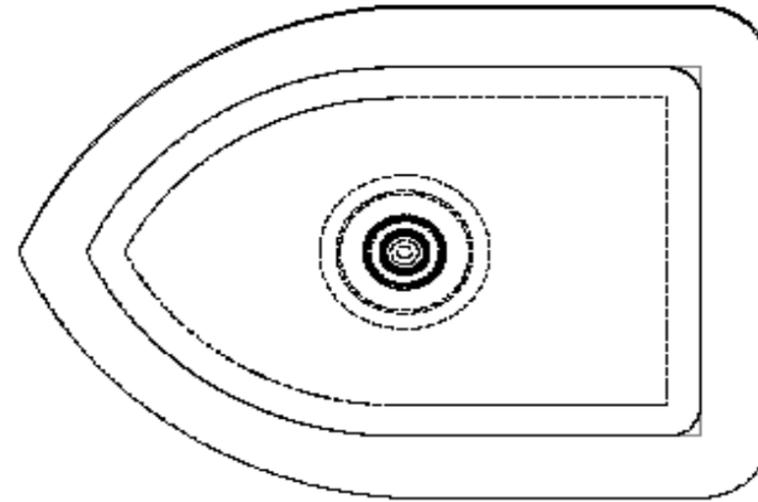
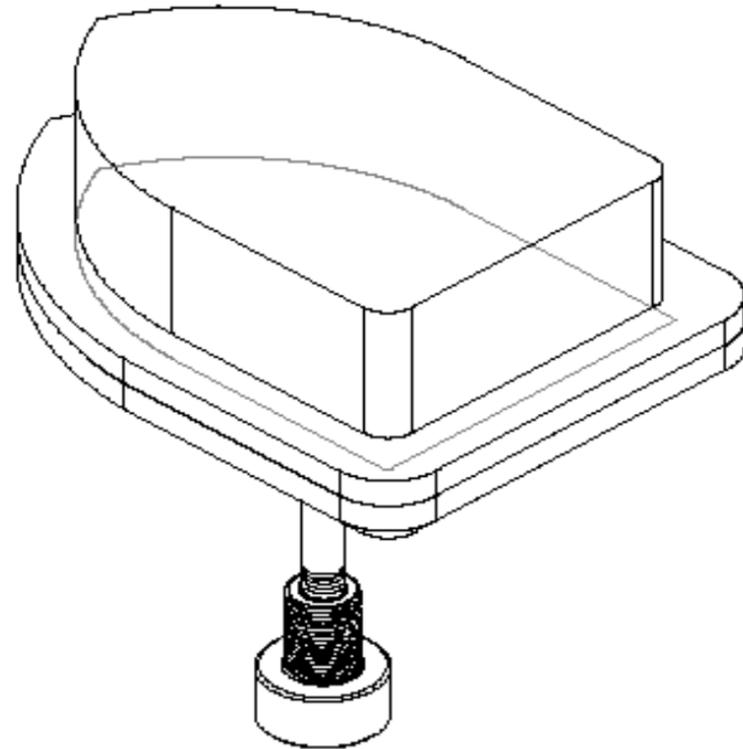
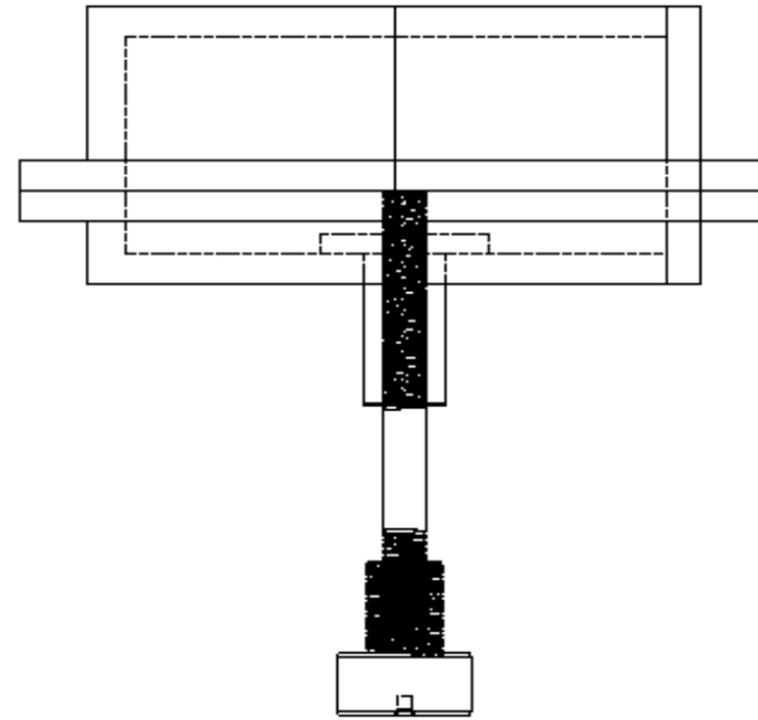
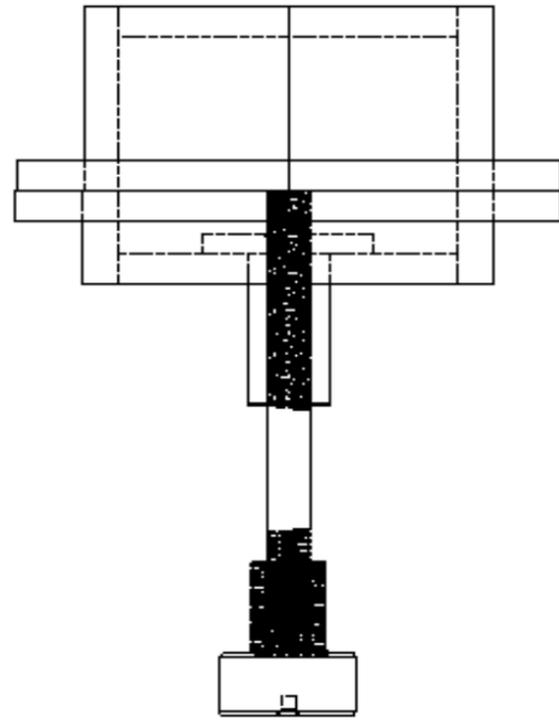
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN CM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: $\pm 0.01$ ANGULAR: $—$				ACABADO: <b>Cepillado</b>		RESARBA Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA				TÍTULO: <b>Eje</b>	
VERIF.							N.º DE DIBUJO <b>3 / 6</b>	
APROB.							A3	
FABR.							ESCALA: 2:1	
CAUD.						MATERIAL: <b>Acero inoxidable</b>	HOJA 3 DE 6	
						PESO:		



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN CM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: +/- .01 ANGULAR: —				ACABADO: <b>Cepillado</b>		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VINAS		NO CAMBE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE				FIRMA		FECHA		TÍTULO: <b>Soporte Eje</b>			
DIBUJ.				VERIF.		APROB.		N.º DE DIBUJO <b>4 / 6</b>			
FABR.				CALID.		MATERIAL: <b>Acero inoxidable</b>		ESCALA: 2:1		HOJA 4 DE 6	
PESO:										A3	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN CM ACABADO SUPERFICIAL: TOLENCIAS: LINEAL: +/- .01 ANGULAR: —				ACABADO:  Cepilado		REBARBAR Y ROMPER ARSTIAS VINAS		NO CAMBE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE				FIRMA		FECHA		TÍTULO:  <b>Tornillo Eje</b>			
DELU.				MATERIAL: Acero inoxidable		N.º DE DEBUJO		<b>5 / 6</b>		A3	
VERIF.				PESO:		ESCALA:2:1		HOJA 5 DE 6			
APROS.											
FABR.											
CALID.											



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN CM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: +/- .01 ANGULAR: —		ACABADO:  Varios	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS V.M.A.S	NO CAMBE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO: <b>Ensamble completo</b>	
VERIF.				N.º DE DIBUJO <b>6 / 6</b>	
APROB.				ESCALA: 1:2	
FABR.				HOJA 6 DE 6	
CAUD.				A3	
			MATERIAL: Resina poliester y Acero inoxidable		
			PESO:		