

OBRAS Y SISTEMAS DE SEGURIDAD DE PRESAS Y BORDOS

Proyecto: HC1312.1

INSTRUMENTACIÓN

Ricardo Andrés Álvarez Bretón

Diciembre 2013

Subcoordinación de Obras y Equipos Hidráulicos

Antecedentes.

Resumen.

1. Estación Hidrométrica itinerante.

1.1 *Fundamento de la tecnología.*

1.2 *Actividades.*

1.2.1 *Programación de menús y mensajes fáciles de entender.*

1.2.2 *Programación de tres métodos para determinar la velocidad media de cada vertical.*

1.2.3 *Implementación de un protocolo de comunicación que contemple un método para detección y corrección de errores.*

1.2.4 *Programación de un sistema de reinicio desde el módulo de control en caso de falla.*

1.2.5 *Implementación de un sistema electrónico para detección de nivel de agua con sensibilidad ajustable.*

1.2.6 *Implementación de un sistema electrónico para corrección de la desviación de la vertical provocada por el arrastre de flujo.*

1.2.7 *Rediseño y fabricación del PCB (tarjeta de circuito impreso) del módulo de sensores.*

1.2.8 *Desarrollo de un registrador portátil de datos de aforo.*

1.2.9 *Desarrollo de una aplicación multiplataforma para cálculo de gasto.*

1.3 *Pruebas.*

1.4 *Conclusiones.*

1.5

2. Metrosonda.

2.1 *Fundamento de la tecnología.*

2.2 *Actividades.*

2.2.1 *Desarrollo de un enrollador para almacenamiento de cable portátil.*

2.2.2 *Desarrollo de un sistema electrónico para medición de longitud de cable.*

2.2.3 *Programación la tarjeta electrónica del medidor de cable.*

2.2.4 *Desarrollo de una sonda con sensor de nivel de agua y fondo.*

2.2.5 *Desarrollo de una sonda con sensor inteligente para detección de superficie y fondo.*

2.2.6 *Diseño del sistema de toque de fondo con sensor inteligente (sustitución de mecánico a electrónico).*

2.2.7 *Programación de la sonda con sensor inteligente para detección de superficie y fondo.*

2.3 *Pruebas.*

2.4 *Conclusiones.*

3. Limnómetro electrónico

3.1 *Fundamento de la tecnología.*

3.2 *Actividades.*

3.3 *Pruebas.*

3.4 *Conclusiones.*

Anexos.

Anexo 1: Fotos del proyecto.

Antecedentes.

El IMTA ha trabajado en proyectos relativos a la seguridad de presas por encargo de la Comisión Nacional del Agua. Las experiencias que se han tenido a lo largo del desarrollo de estos trabajos en campo permiten considerar valioso el desarrollo de equipos de medición con tecnología propia. En la mayoría de los casos, en México, la instrumentación se lleva a cabo a partir de equipos especializados ya existentes en el mercado, estos equipos son importados a costos altos, aunado a las desventajas que implica la importación de tecnología, como son; a) La tecnología desarrollada en un país no siempre es la más adecuada para otro, debido a que las condiciones en infraestructura, tanto como en las condiciones culturales y sociales no son las mismas. b) Cuando los equipos adquiridos dejan de funcionar no se cuenta con un soporte dentro del país en donde puedan ser reparados ó se les de mantenimiento. C) Se genera dependencia tecnológica, fomentando un atraso del desarrollo científico nacional.

Es bien sabido que los estudios de campo son básicos para cimentar adecuadamente una estructura flexible y que los procedimientos constructivos tienen mucho que ver con el comportamiento seguro de toda obra hidráulica, ya sea una presa o un bordo, y que no es menos importante el mantenimiento de las obras durante su vida útil por lo que una inspección metódica se hace más que necesaria, por ello, contar con instrumentos de fácil operación y que cuenten con soporte técnico a la mano, permitirá obtener la información requerida para tomar decisiones oportunas que eviten riesgos innecesarios en las obras hidráulicas. Es necesario seguir realizando investigaciones y desarrollos de tecnologías que deriven en patentes licenciadas.

Resumen.

El presente informe muestra los resultados relacionados con el desarrollo de tres tecnologías con la finalidad de llevar a cabo su implementación en campo. En la medida en que estas tecnologías logren un alto grado de aceptación por parte de sus beneficiarios, estas pueden derivar en patentes licenciadas.

La primera de las tecnologías desarrolladas funge como un asistente electrónico en las operaciones de aforo con molinete, que aporta una serie de facilidades electrónicas y mecánicas que resuelven de forma satisfactoria los problemas relacionados con la metodología de campo. Esta tecnología lleva por nombre "Estación Hidrométrica Itinerante" (EHI).

La EHI ya cuenta con patente en trámite y se han realizado varias pruebas de su funcionamiento en laboratorio y campo las cuales han resultado satisfactorias.

La segunda tecnología es una sonda de nivel portátil, que sirve para la medición del nivel de agua en pozos, piezómetros, tanques y aguas subterráneas. La innovación en esta tecnología es el desarrollo de un medidor digital de cable para determinar profundidades y un sensor inteligente que permite determinar la superficie del agua y el fondo, discriminando falsas mediciones. Estas características hacen que la sonda se pueda utilizar de forma sencilla, rápida y precisa para medir el nivel del agua y la profundidad del sondeo.

La tercera tecnología es un limnómetro electrónico, esta tecnología se diseñó con un indicador de lectura directa a través de una pantalla de cristal líquido, de esta manera se eliminan errores de observación debidos a las lecturas de escalas. El limnómetro electrónico es capaz de reiniciarse a cero en cualquier punto del rango de operación para facilitar las comprobaciones relativas, es empleado para conocer con precisión la columna de agua de un vertedor con una resolución de 0.01mm, determinando la superficie del agua por medio de un sensor. La innovación de este instrumento es que es capaz de convertir la medición de la columna de agua en una medición de gasto para un vertedor específico de pared delgada, gracias a la ecuación del vertedor programada en la memoria del dispositivo, dicha ecuación está sustentada en la norma internacional estándar ISO1438/1-1980 "Medición de flujo líquido en canales abiertos y en canales venturi".

Estación hidrométrica itinerante.

1.1 Fundamento de la tecnología.

En la actualidad, en la red hidrométrica nacional existen diversos factores que impiden que esta opere con coberturas más amplias y de mayor confiabilidad. Entre estos se tiene. A) Unadiminución drástica en la cantidad de estaciones en operación.B) En una gran cantidad de estaciones no existe un manejo digital de la información hidrométrica, por lo que es difícil, costoso y poco eficiente integrar esta información en bases de datos. C) El no seguimiento de la metodología estándar en los procesos manuales de aforo y cálculo del gasto. D) La falta de personal para el desempeño de tales funciones.Es por esto, que con base a la necesidad de mejorar los procedimientos empleados en México para el establecimiento y operación de las más de 600 estaciones hidrométricas, se diseñó y construyó el prototipo de un sistema electrónico auxiliar en las operaciones de aforo con molinete, denominado “Estación Hidrométrica Itinerante”. Este dispositivo también podrá ser empleado ampliamente en Distritos de Riego, para medir en canales de distribución de agua y controlar las dotaciones en el sistema.

Desde el comienzo de las estaciones hidrométricas y hasta la fecha, el método más comúnmente empleado para determinar el caudal de una corriente de agua está basado en medidores mecánicos de velocidad, llamados molinetes hidráulicos. Estos instrumentos no son costosos y resultan fáciles de usar y reparar. Por otro lado, durante los últimos 20 años se han desarrollado nuevas tecnologías que utilizan técnicas acústicas, de radar o por imágenes para la medida del caudal, sin embargo estas técnicas no se encuentran suficientemente documentadas en normas y si no se usan adecuadamente no se obtendrán los resultados esperados.

La EHI es un dispositivo destinado a realizar operaciones de aforo con molinete por suspensión desde un puente, una pasarela o desde una canastilla, con la finalidad de obtener la medición del caudal en una conducción abierta, artificial o natural.Basado en la norma ISO 748“Medición del flujo líquido en canales abiertos - Métodos de área Velocidad”.

De acuerdo a la norma ISO 748 cuando se afora con molinete, se tiene que dividir la sección transversal de la corriente en franjas verticales o “dovelas” (ver figura 1), con el objetivo de calcular el caudal a través de cada franja, se mide en cada una de éstas el área y la velocidad media del agua y se multiplican para obtener el caudal por franja. El caudal total se calcula sumando los caudales de todas las franjas en que se dividió la sección transversal, tal como se muestra en las ecuaciones (1)-(2).

$$Q_i = A_i * \bar{V}_i \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2)$$

El ancho de cada franja depende del ancho del cauce y de la variación de la velocidad en la sección transversal. Para conseguir mayor precisión en la medición del área y en consecuencia del gasto, el ancho de cada franja debe ser menor mientras mayor sea la variación de la velocidad.

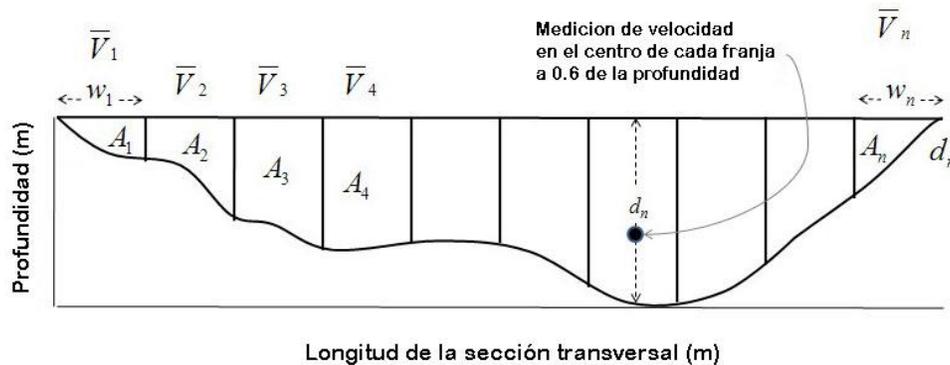


Figura 1. Esquema de la sección transversal de un cauce.

Para determinar el área de la sección transversal es necesario primero medir el ancho de la corriente y dividirla en franjas marcadas a lo largo de la sección transversal, luego dividir el ancho de cada franja en dos partes iguales y marcar el punto medio del ancho de cada franja, se miden las profundidades (tirantes) sobre los puntos marcados.

El área de cada franja se obtiene multiplicando el tirante promedio correspondiente a la franja y el ancho de la franja.

Ya que la velocidad varía a lo ancho de la sección transversal y sobre cada vertical, no se debe medir en un solo punto. Por el contrario, como ya se mencionó, hay que dividir la sección en franjas verticales y medir la velocidad en la vertical central de cada una de ellas. Los métodos para obtener la velocidad media en cada franja, empleando el molinete, se diferencian esencialmente por la profundidad a la cual se hacen las mediciones de la velocidad en la vertical. Como son el método del 60 por ciento, el método de 20-80 por ciento y el método del 20-60-80 por ciento. El último es el que brinda una mejor estimación de la velocidad media de una vertical.

Entre los problemas más frecuentes en el método tradicional de aforo con molinete se encuentra, que por la importancia de la medición del gasto se tienen que realizar varias mediciones en tiempos cortos, sin embargo, esto resulta ser demasiado arduo y tedioso para el operador. Así mismo se tienen problemas debido a la baja confiabilidad y repetibilidad al realizar las mediciones del tirante, ya que en la mayoría de los casos es difícil conocer con exactitud la superficie libre del agua y el fondo del cauce, las mediciones dependen en gran medida de la pericia y experiencia del operador. Otro inconveniente resulta de la transmisión de los pulsos generados por el molinete. En la actualidad se utilizan cables eléctricos que tienen que extenderse desde el molinete hasta la estructura donde se encuentra el operador, que con ayuda de auriculares y un cronómetro realiza el conteo de pulsos por minuto, estos cables eléctricos hacen que la manipulación del equipo de aforo sea complicada. Por último

cabe mencionar que, el no llevar un adecuado registro de las mediciones puede ocasionar confusiones y errores en el cálculo final del gasto.

La “Estación Hidrométrica Itinerante” (EHI), resuelve de forma satisfactoria los problemas relacionados con la metodología de campo, aportando una serie de facilidades electrónicas y mecánicas, reduciendo el tiempo de trabajo y mejorando la calidad de los datos obtenidos.

La EHI está compuesta de tres partes principales, el módulo de control, el módulo de sensores y el sistema escandallo molinete (ver figura 2), las cuales se conforman como un solo dispositivo que dota al operador de la capacidad de realizar las operaciones de aforo de una manera integral, realizando mediciones del tirante y velocidad del flujo de forma electrónica, eliminando complicados sistemas de cables eléctricos gracias a sus sistemas de comunicación inalámbrica, además, brinda al operador la capacidad de almacenar las mediciones realizadas, con la intención de posteriormente transmitir las a un registrador de datos, pudiendo así trasladar la información a una computadora o un servidor vía modem celular.

El hardware diseñado para la EHI consta de dos módulos: El módulo de control y el módulo de sensores. Los cuales están constituidos básicamente por un microcontrolador, baterías como fuente de energía, un radio transceptor, elementos sensores en caso del módulo de sensores y dispositivos de interfaz humana para el caso del módulo de control. Cada uno de ellos es explicado a continuación.

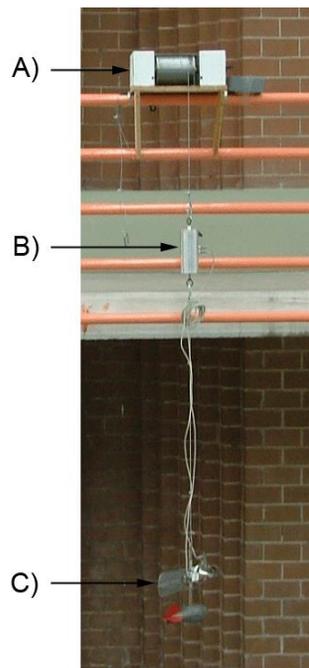


Figura 2. Instalación de la EHI en un puente, A) módulo de control, B) módulo de sensores, C) sistema escandallo-molinete.

El módulo de control (ver figura 3) puede ser instalado en una canastilla, un puente o una pasarela, a través de éste, el operador podrá manejar el equipo para realizar las mediciones correspondientes en cada dovela.

El módulo de control cuenta con una pantalla (figura 3-C) para la visualización de mediciones, así como, un teclado (figura 3-D) para programar de forma directa la

ecuación característica del molinete y el número de dovelas de la sección transversal del cauce, así como otros parámetros de configuración del equipo. Por medio de un sistema mecánico de enrollamiento de cable (figura 3-A) se hace descender o ascender los instrumentos de medición (sistema escandallo-molinete), este mecanismo es accionado de forma manual con una manivela (figura 3-B) o en su defecto puede ser accionado por un motor eléctrico, cuenta con un sistema de autobloqueo que evita el descenso no deseado del sistema escandallo-molinete.

El módulo de control emplea alarmas auditivas que alertan al operador del dispositivo, cuando el molinete toca la superficie del agua, cuando el escandallo toca el fondo del cauce y cuando el molinete se encuentra en el punto adecuado para la medición de la velocidad. Gracias a sus sistemas electrónicos se mide el tirante de cada dovela y la posición del molinete con respecto a la superficie libre del agua.

El módulo de sensores envía un comando al módulo de control que avisa cuando el molinete ha tocado la superficie libre del agua y otro comando cuando el escandallo llega al fondo, el módulo de control hace activar alarmas sonoras que alertan de los correspondientes sucesos.

El módulo de control cuenta con un sistema de medición de longitud de cable que con ayuda del comando de detección de fondo y el comando de detección nivel de superficie de agua, es capaz de determinar la distancia en milímetros desde la superficie libre del agua hasta el fondo. Su funcionamiento se basa en medir con un encoder cuantos grados gira el tambor de enrollamiento de cable que baja el sistema escandallo-molinete. El encoder está acoplado en una de las flechas del tambor.

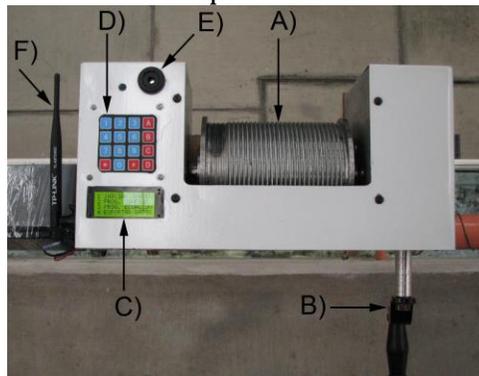


Figura 3. Módulo de control. A) Tambor de enrollamiento de cable, B) Manivela, C) Pantalla LCD, D) Teclado de membrana, E) Alarma sonora, F) Antena.

El módulo de sensores (ver figura 4), cuenta con tres sensores: un sensor de nivel por conductividad que determina la superficie libre del agua, un sensor magnético de contacto con el fondo que indica cuando el escandallo ha llegado al fondo y un contador de revoluciones por minuto de molinete. La señal de estos sensores es transmitida de forma inalámbrica al módulo de control por medio de comandos.

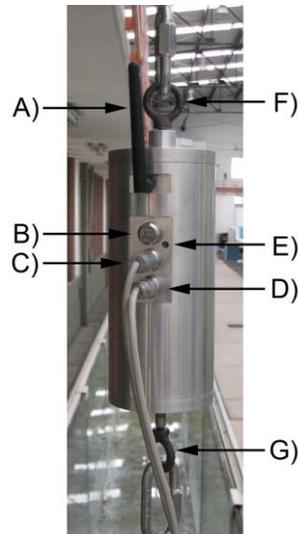


Figura 4. Módulo de sensores, A) Antena, B) Conector de cargador de batería, C) Conector de sensor de nivel por conductividad, D) Conector de molinete, E) Indicador de carga de batería, F) Argolla sujetadora de cable, G) Argolla sujetadora con sensor de contacto con el fondo.

El módulo de sensores está fabricado de un material que es ligero, resistente a la corrosión y capaz de soportar los esfuerzos (principalmente de tensión) a los que estará sometido cuando se encuentre instalado, está diseñado aun para ser sumergido sin sufrir daños en sus sistemas electrónicos. El módulo de sensores se instala suspendiéndolo del cable de acero del módulo de control por medio de una argolla sujetadora (figura 4-F) y acoplando a los conectores, aprueba de agua, los cables del sensor de nivel y del molinete (figura 4-C y 4-D).

El sensor de nivel por conductividad (figura 5-D) se sujeta entre el molinete y la aleta del molinete, de esta manera el sensor queda alineado con respecto a la mitad de las copas del molinete. El sistema escandallo-molinete, se instala suspendiéndolo del extremo superior de la solera (figura 5-A) con un cable de acero a la argolla sujetadora inferior (figura 5-G) del módulo de sensores y conectando los cables de señal del molinete y el sensor de nivel de agua por conductividad al módulo de sensores.

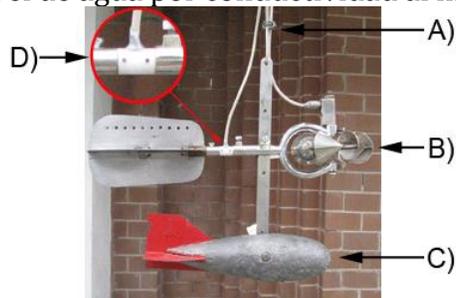


Figura 5. Sistema escandallo-molinete, A) Cable de acero, B) Molinete, C) Escandallo, D) Sensor de nivel.

El principio de funcionamiento del sensor de nivel de agua por conductividad es el siguiente: cuando el sensor entra en contacto con un medio líquido conductivo se genera una pequeña corriente en los electrodos (figura 5-D), la presencia de esta corriente es detectada por un circuito controlado por un microcontrolador, el cual envía un comando de detección de “nivel de superficie de agua”.

El sensor magnético de contacto con el fondo está conformado por el switch de efecto Hall A1101 y un mecanismo de vástago magnético. La parte inferior del módulo de sensores (ver figura 4-G) es el vástago magnético, en la argolla de este vástago se sujeta por medio de un cable el sistema molinete-escandallo. Al estar suspendido el sistema molinete-escandallo este generará una tensión en el cable, lo cual provoca que se comprima el resorte y se aleje el vástago magnético del sensor A1101 lo suficiente para no activarlo, cuando el escandallo toque el fondo del cauce la tensión del cable dejará de actuar sobre el resorte y éste se expandirá, acercando el vástago magnético al sensor A1101 lo suficiente para que este se active y mande una señal al microcontrolador que a su vez envía el comando de “detección de fondo”.

Para medir las revoluciones por minuto del molinete se programó un contador de pulsos y un temporizador en el microcontrolador. La medición comienza cuando desde el módulo de control se envía el comando para “medición de velocidad de flujo”, entonces, cuando el molinete envíe un primer pulso, el temporizador se iniciará y el contador de pulsos se establecerá en cero, comenzando a contar hasta el siguiente pulso, una vez que el temporizador llegue a 60 segundos, es detenido el contador de pulsos y el valor de este registro corresponde a las RPM del molinete.

Las RPM del molinete son transmitidas al módulo de control, donde el microcontrolador de este módulo, calculará la velocidad de flujo por medio de la ecuación característica del molinete programada al inicio de la secuencia de medición.

1.2 Actividades.

En la primera etapa del prototipo de la EHI, fue fundamental probarlo en diferentes entornos del laboratorio para detectar errores en el funcionamiento o inestabilidades provocadas por posibles perturbaciones, además con el primer prototipo, fue posible demostrar sus alcances y la factibilidad del concepto preliminar.

Las actividades realizadas en este proyecto están centradas en los resultados obtenidos en las pruebas y la evaluación del primer prototipo de la EHI, y tienen como objetivo mejorar el desempeño del dispositivo. A continuación se describen detalladamente cada una de ellas.

1.2.1 Programación de menús y mensajes fáciles de entender.

La interfaz de usuario es el medio con que el usuario puede comunicarse con el equipo, con este fin, se desarrolló una interfaz de hardware y una interfaz de software para la EHI. La interfaz de hardware es el conjunto de dispositivos que permiten que el usuario intercambie datos con el equipo, ya sea introduciéndolos, leyéndolos o escuchándolos, en el caso de la EHI son teclado, pantalla visualizadora y una alarma audible (buzzer), mientras que la interfaz de software es la destinada a entregar información acerca de los procesos y herramientas de control, a través de lo que el

usuario observahabitualmente en la pantalla los sonidos que el equipo hace por medio de la alarma.

El diseño de la interfaz es crítico para el manejo del equipo, una interfaz bien diseñada permite que la comunicación se desarrolle de la forma más fácil y cómoda posible para el usuario. Sin embargo, las interfaces no siempre son intuitivas y el usuario no acierta a manejarlas correctamente.

La interfaz de software desarrollada en el módulo de control de la EHI, se ha rediseñado para que el técnico aforador interactúe con el equipo, por medio de menús de configuración sencillos de entender y mensajes que guíen paso a paso al técnico operador en el procedimiento de aforo con molinete, sirviéndole también como un asistente electrónico.

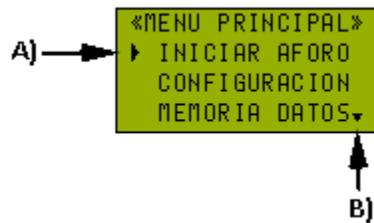


Figura 6. Menú principal, A) Puntero para seleccionar elementos del menú, B) Flecha que indica que existen más elementos del menú al navegar hacia abajo.

Se rediseñó la manera en la que se navega por los distintos menús. Por ejemplo, al iniciar el equipo muestra en la pantalla el menú principal (ver figura 6), cuando se presionan los botones “Arriba / Abajo” (ver figura 7) se mueve el puntero triangular (figura 6-A) a través de las diferentes opciones del menú y al presionar la tecla “Entrar” se selecciona la opción indicada por el puntero. La flecha de la esquina inferior/superior derecha (figura 6-B) indica que existen más opciones del menú navegando hacia abajo/arriba. Para regresar a un menú o pantalla anterior basta con presionar la tecla “Escape”. En la figura 8 se muestra un diagrama de la nueva estructura de navegación programada.

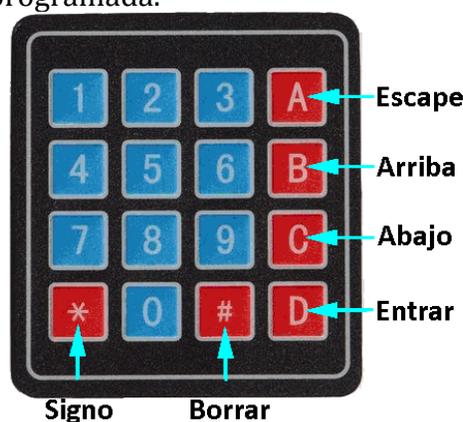


Figura 7. Botones de navegación del teclado del módulo de control.

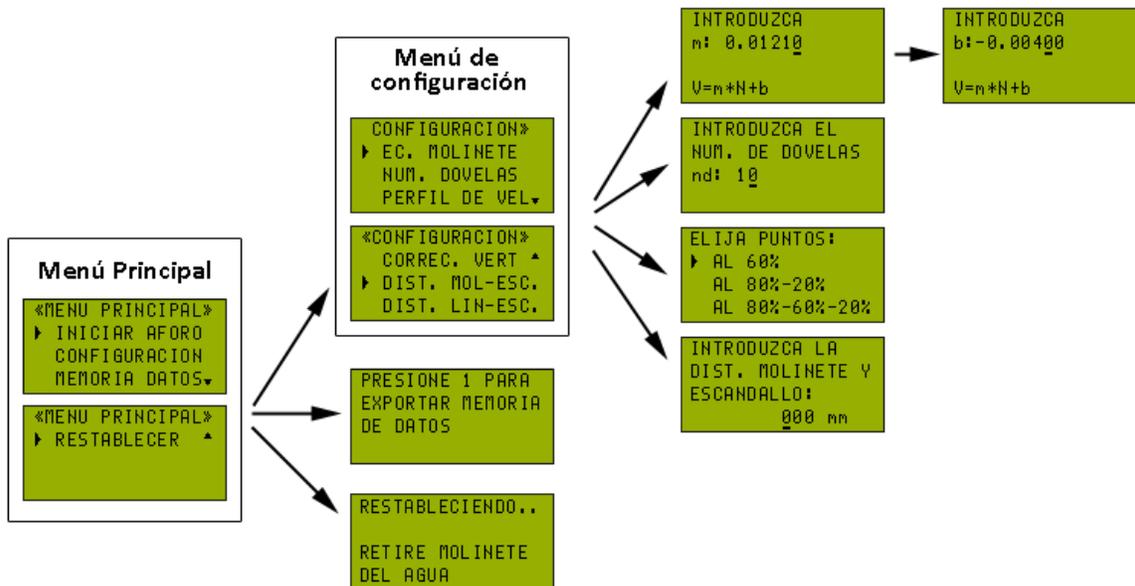


Figura 8. Estructura de navegación de los menús en la EHI.

En algunas opciones del menú de configuración es necesario que el usuario introduzca algún valor numérico, por ejemplo, las constantes de la ecuación característica del molinete o el número de dovelas en que está dividida la sección transversal del cauce. Para este propósito se programó una interface en la que el usuario puede introducir cada dígito del valor numérico por medio del teclado y en caso de cometer algún error es posible eliminar cada uno de los dígitos introducidos por medio de la tecla “borrar”. Una vez introducidos todos los dígitos del valor numérico se presiona la tecla “entrar”, de esta forma son guardados los parámetros de configuración en la memoria no volátil del dispositivo, por lo que no es necesario introducirlos cada vez que se desee realizar un aforo, a menos que haya cambiado alguno de los parámetros configurados.

La interfaz utilizada durante el proceso de aforo también fue mejorada. Por ejemplo, para comenzar el proceso de aforo, basta con entrar en la opción “iniciar aforo” del menú principal. La pantalla 1 (ver figura 9) indica la dovela en la que se debe posicionar el equipo, y una vez en la posición indicada, se presiona la tecla “1”, y se despliega la pantalla 2 que indica bajar el molinete, cuando el molinete toca la superficie libre del agua apenas la mitad de las copas, se activa una alarma sonora, en ese instante, se toma automáticamente como referencia la superficie libre del agua, y se visualiza en la pantalla 3, la posición en centímetros del molinete a partir de esta referencia. Una flecha apuntando hacia abajo en la parte izquierda de la pantalla 3 indica seguir bajando el molinete, conforme se baja el molinete aumenta la lectura de profundidad en la pantalla 3, cuando el escandallo toca el fondo del cauce se activa una segunda alarma sonora y se muestra en la pantalla 4 la profundidad total o tirante en esa dovela, al presionar la tecla “1” se despliega la pantalla 5 mostrando la profundidad del molinete en centímetros y el porcentaje de profundidad, una flecha apuntando hacia arriba en la parte izquierda de la pantalla 5 indica subir el molinete, conforme se sube el molinete disminuye la lectura de profundidad y porcentaje de profundidad que muestra la pantalla 5, cuando se ha llegado a una profundidad de

medición, típicamente al 60 % del tirante, se activa de nuevo una alarma sonora, que indica medir la velocidad en ese punto, al presionar la tecla “1” como indica la pantalla 5, se inicia la medición de velocidad y se despliega la pantalla 6 mostrando la barra de progreso de la medición, al llenarse la barra se muestra la pantalla 7 visualizándose la velocidad del flujo en metros por segundo y las revoluciones por minuto del molinete, al presionar la tecla “1”, se muestra de nuevo la pantalla 1 pero indicando posicionar el equipo en la siguiente dovela. Este procedimiento se repite en todas las dovelas. El equipo almacena automáticamente en su memoria no volátil todas las mediciones realizadas para que puedan ser descargadas posteriormente.



Figura 9. Pantallas que sirven de guía en el proceso de aforo con la EHI

1.2.2 Programación de tres métodos para determinar la velocidad media de cada vertical.

Para determinar la velocidad media en cada vertical o dovela, la EHI utiliza el método de puntos reducidos conforme a la norma ISO 748. Como una mejora, se han programado tres métodos para que sean utilizados de acuerdo a las condiciones de cada sitio, a continuación se describe cada uno de estos.

Método de un punto. Se deben realizar las observaciones de velocidad en cada vertical colocando el molinete a 0.6 de la profundidad total por debajo de la superficie (figura 10-A y 12-A). El valor obtenido se considerará como la velocidad media de la vertical. Este método se emplea en corrientes poco profundas.

Método de dos puntos. Las observaciones de velocidad se deberán hacer en cada vertical colocando el molinete a 0.2 y 0.8 de la profundidad total por debajo de la superficie (figura 10-B y 12-B). El promedio de los dos valores puede considerarse como velocidad media en la vertical (ecuación 3), este método es el más empleado y se usa cuando ya se conoce el comportamiento de la velocidad en la sección.

$$V_{media} = \frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2} \quad (3)$$

Método de tres puntos. Las observaciones de velocidad se realizan exponiendo el molinete en cada vertical a 0.2, 0.6 y 0.8 de la profundidad total (figura 10-C). Este método se emplea en canales cubiertos por vegetación acuática para obtener una mejor medición de la velocidad media, el promedio para este método se obtiene de la ecuación 4.

$$V_{media} = 0.25(V_{0.2} + 2V_{0.6} + V_{0.8}) \quad (4)$$

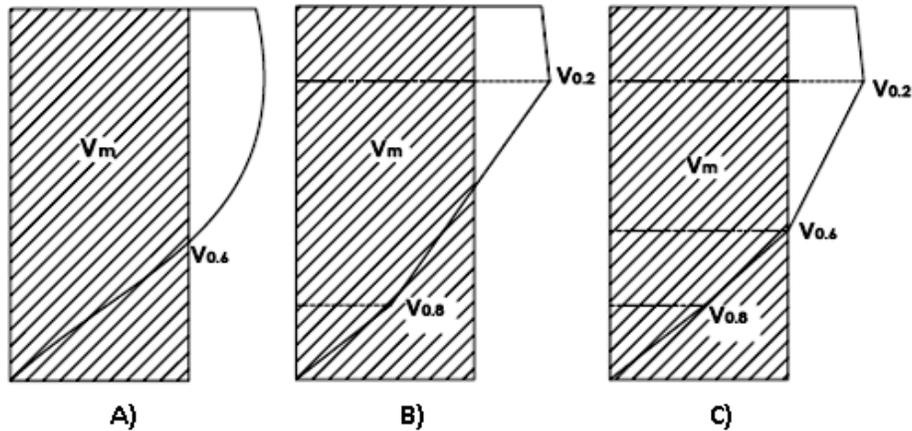


Figura 10. Determinación de la velocidad media en una vertical o dovela. A) Método de un punto, B) Método de dos puntos, C) Método de tres puntos. Por medio de la opción “Perfil de velocidad” del menú de configuración es posible seleccionar uno de los métodos antes mencionados (ver figura 11-A). De acuerdo al método seleccionado se realizan una, dos o tres mediciones de velocidad por cada vertical.

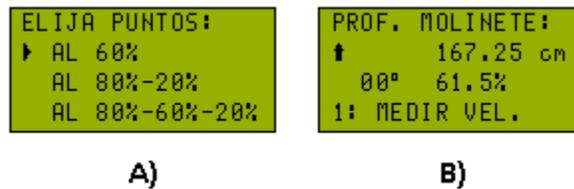


Figura 11. A) Pantalla deselección de puntos de medición de velocidad, B) Pantalla para posicionar verticalmente el molinete en los puntos de medición de velocidad. Se ha programado una pantalla como la representada en la figura 11-B para que sea posible posicionar el molinete con precisión en las profundidades de medición. En esta pantalla se muestra en todo momento la profundidad del molinete en centímetros, así como el porcentaje de profundidad que le corresponde. Se han programado alarmas sonoras que se activan cuando el molinete pasa por el 80, 60 y 20 por ciento de la profundidad (ver figura 12), según sea el método elegido, recordando al operador donde debe hacer las mediciones de velocidad.

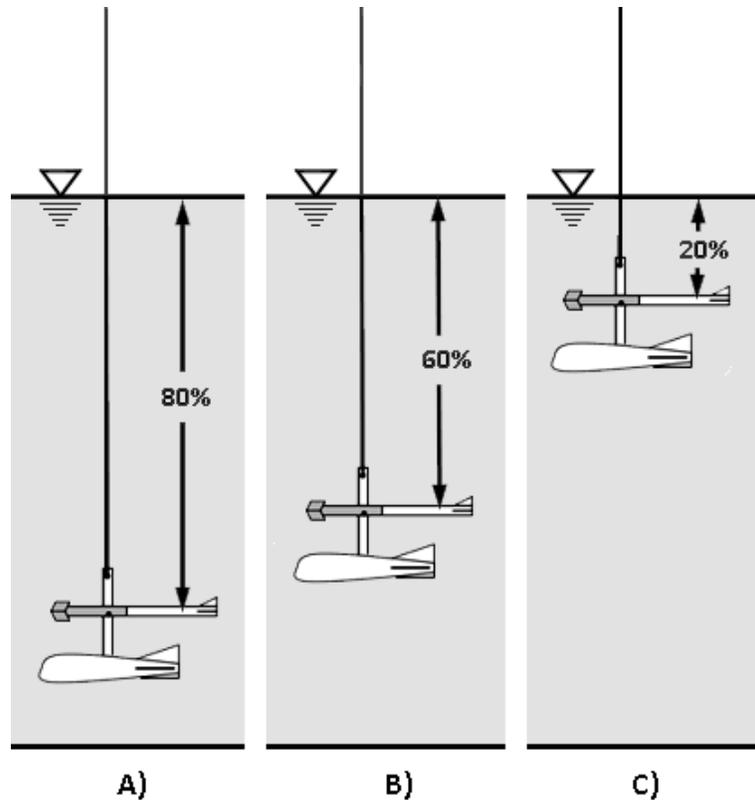


Figura 12. Posicionamiento del molinete A) al 80% de la profundidad total, B) al 60% de la profundidad total, C) al 20% de la profundidad total.

Todas las mediciones son almacenadas en la memoria no volátil del dispositivo, en el caso de las mediciones de velocidad son almacenadas junto con la posición vertical en la que se encuentra el molinete cuando se realiza la medición, al transferir la información al software de cálculo (se explica detalladamente en capítulos subsecuentes), la velocidad media en cada dovela se obtiene de acuerdo al método seleccionando y utilizando las ecuaciones correspondientes (ecuaciones 3 o 4).

1.2.3 Implementación de un protocolo de comunicación que contemple un método para detección y corrección de errores.

Para la comunicación inalámbrica entre el módulo de control y el módulo de sensores se utilizan dos radio módems "Xbee". Estos módems inalámbricos utilizan el protocolo de red IEEE 802.15.4 para crear redes punto a multipunto o para redes punto a punto. Fueron diseñados para aplicaciones industriales que requieren una alta inmunidad al ruido, sin embargo, al realizar pruebas en el laboratorio, se detectaron algunas fallas en el sistema de comunicación inalámbrica, principalmente problemas de sincronización dividido a la pérdida ocasional de algún comando. Esto provocaba en ciertas ocasiones que el módulo de control y el módulo de sensores dejaran de comunicarse hasta ser reiniciados.

El sistema de comunicación inalámbrica implementado debe ser capaz de transmitir datos entre el módulo de control y el módulo de sensores con cierto nivel de precisión. Sin embargo, siempre que una señal electromagnética fluye de un punto a otro, está

sujeta a interferencias imprescindibles debido al calor, el magnetismo y diversas formas de electricidad. Esta interferencia puede cambiar la forma o la temporización de la señal. Si la señal transporta datos binarios codificados, tales cambios pueden alterar su significado. Esto quiere decir que uno o más bits de una unidad de datos determinada, cambia de uno a cero o de cero a uno. Para comprender el impacto de este cambio, podemos imaginar que cada grupo de 8 bits es un carácter ASCII. Un error de un solo bit podría alterar completamente el carácter ASCII enviado (por ejemplo 'A' 1000001b) y en el receptor obtendría un carácter completamente diferente (por ejemplo 'I' 1001001b).

Si bien es imposible evitar que ocurran errores, un buen diseño que permita detectar y corregir los posibles errores ocurridos durante la transmisión, brindara un alto grado de confiabilidad en la comunicación.

Para detectar errores en los datos transmitidos entre el módulo de control y el módulo de sensores se ha implementado una técnica llamada chequeo de paridad "par de carácter". Este método hace uso del agregado de un bit de control. Se trata de una técnica simple usada en los sistemas de comunicación digitales y es aplicable a nivel de byte, ya que su uso está directamente relacionado con el código ASCII. Un código de paridad par se obtiene añadiendo a un código binario, un bit de control, ese bit se denomina bit de paridad par, estese elige de forma que el número de unos en cada dato sea par, si el número de unos ya es par, se agrega un cero, si el número de unos no es par se agrega un uno para hacerlo par. Si se envía el dato y durante la transmisión se produce un error, el receptor puede detectarlo al comprobar la paridad del dato transmitido. Si el dato tiene paridad par, se supondrá que no ha existido error en la transmisión, si no es así, significa que algún bit ha cambiado de valor, y entonces se ha producido un error en la transmisión (ver figura 13).

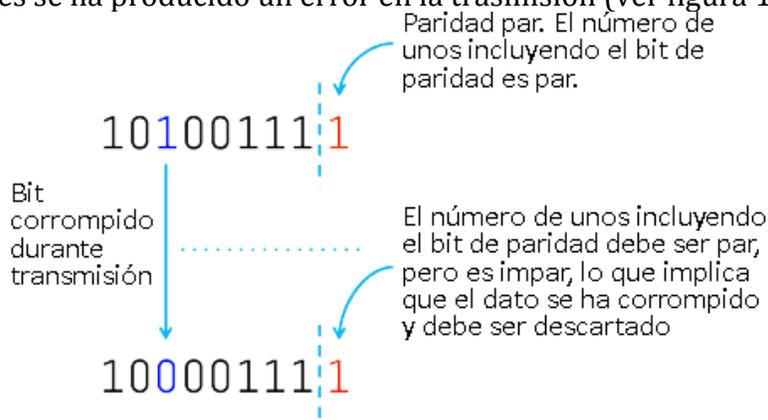


Figura 13. Técnica de detección de errores de chequeo de paridad par.

Este método o algún otro, no aseguran inmunidad a errores, basta con que dos bits cambien su valor simultáneamente para que el error no sea detectado pues la paridad será correcta y el dato no. Sin embargo, como la mayoría de la comunicación entre el módulo de control y el módulo de sensores se realiza mediante comandos en código ASCII, es posible disminuir aún más la probabilidad de un error, descartando las combinaciones de bits que no se presenten en la lista de comandos (ver tabla 1).

Comando	Código binario	Descripción
A(CK)	01000001	Confirmación de recepción correcta.
N(ACK)	01001110	Confirmación de recepción errónea.
R(abortar)	01010010	Comando para abortar comunicación y reiniciar programa de la estación de sensores.
L	01001100	Comando para iniciar programa de la estación de sensores.
B	01000010	Comando que indica activación del sensor de superficie.
D	01000100	Comando que indica activación del sensor de fondo.
C	01000011	Comando para continuar con un ciclo de medición.
S	01010011	Comando para salir de un ciclo de medición.
M	01001101	Comando para iniciar medición de rpm del molinete.

Tabla 1. Lista de comandos en código ASCII para comunicación inalámbrica entre el módulo de control y el módulo de sensores.

Se eligió este sencillo sistema para detección de errores debido a que es muy fácil implementarlo en los microcontroladores de los módulos de control y sensores, además, debido a que solo se utiliza un bit de control y no disminuye demasiado la eficiencia y por lo tanto la velocidad en el canal de transmisión no sufre modificaciones a comparación de otros métodos.

El "USART" es un periférico que incorpora el microcontrolador "ATmega16" para comunicaciones seriales, este periférico es utilizado para transmitir datos entre la estación de control y la estación de sensores por medio de los radio módems "Xbee".

Para implementar el método de chequeo de paridad de carácter, la "USART" en su transmisor incorpora un generador de paridad, el cual calcula el bit de paridad para la trama de datos seriales haciendo una operación lógica "or-exclusiva" por hardware de todos los bits de datos, el control lógico del transmisor inserta el bit de paridad entre el último bit de datos y el primer bit de parada de la trama que se envía. En el receptor de la "USART" se integra un comprobador de paridad, este calcula la paridad de los bits de datos en la trama de entrada y compara el resultado con el bit de paridad de la trama serial, una bandera de error de paridad puede ser leída por software para comprobar si la trama tuvo un error de paridad.

Para hacer uso del generador y del comprobador de paridad fue necesario modificar la rutina de inicialización del "USART", programando los bits UPM1 =1 y UPM0 = 0 en el registro "UCSRC" (ver figura 14).

El bit UPM1 cuando es puesto a uno, habilita el generador y el comprobador de paridad en el transmisor y el receptor respectivamente. El bit UPM0 puesto en cero selecciona la paridad par. De esta forma, el transmisor generará y enviará automáticamente la paridad par de los bits de datos de transmisión dentro de cada trama y el receptor generará un valor de paridad de los datos entrantes y lo comparará con el valor UPM0. Si se detecta una discrepancia, se activará la bandera PE en el registro "UCSRA".

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	URSEL	UMSEL	UPM1	UPM0	USBS	UCSZ1	UCSZ0	UCPOL	UCSRC
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	1	0	0	0	0	1	1	0	

Figura 14. Registro de control y estado del USART, UCSRC.

Con las modificaciones realizadas en la rutina de inicialización del “USART”, ahora es posible detectar errores en la transmisión de datos, simplemente leyendo la bandera PE en el registro “UCSRA” antes de leer el buffer de recepción “UDR”. Si la bandera PE es igual a uno, significa que hubo un error de transmisión en el último dato enviado.

Una vez implementado el sistema “detector de errores” es necesario contar con un código para poder corregir los errores detectados, el requerimiento automático de repetición se centra en las técnicas de corrección hacia atrás, en estos sistemas cuando el receptor ha detectado errores en una trama ó bloques de tramas procede a pedir a el transmisor que repita los datos que se recibieron con error. Debe observarse que esto requiere dar al sistema de comunicación algún medio para facilitar el diálogo en ambos sentidos, de donde se deduce que el extremo receptor debe abandonar el papel pasivo en la comunicación para participar en forma activa en el proceso.

Los radio módems “Xbee” son transceptores por lo que no existe ningún inconveniente para implementar alguna técnica de requerimiento automático de repetición. De hecho, la implementación de un protocolo “Stop-and-wait” puede solucionar tanto los problemas de corrección de errores así como los de pérdida de datos por atenuación.

El protocolo “Stop-and-wait” consiste en intercambiar las tramas una a una. Cuando el receptor recibe una trama procede a validarla, si resulta que no contiene errores envía una señal de confirmación hacia el transmisor, esta señal se denomina ACK (confirmación). Por el contrario, si hay errores se envía hacia el emisor una señal de recepción errónea denominada NACK (negativa de confirmación). Mientras espera la recepción de ACK ó de NACK el transmisor mantiene el mensaje enviado en un buffer, cuando recibe NACK vuelve a enviar el contenido del buffer, si por el contrario recibe un ACK copia en el buffer la trama ó bloque siguiente y procede a enviarla (ver figura 15-A). En muchos casos, y mientras espera la llegada de NACK ó ACK, el transmisor arranca un temporizador. El temporizador se detendrá al llegar cualquiera de las señales de confirmación, si el temporizador llega a su término sin recibirlas, envía nuevamente la trama sin confirmar y arranca nuevamente el temporizador (ver figura 15-B). Si esta situación se repite un cierto número de veces se procede a abortar la comunicación pues no se recibe respuesta del receptor. Generalmente tanto el receptor como el transmisor dispondrán de un contador para determinar el número de veces que se ha intentado retransmitir una trama sin éxito. De alcanzar el contador el valor prefijado se procede a abortar la comunicación. Normalmente esta situación es transitoria y puede deberse a picos de tráfico, de persistir señala anomalías en los equipos.

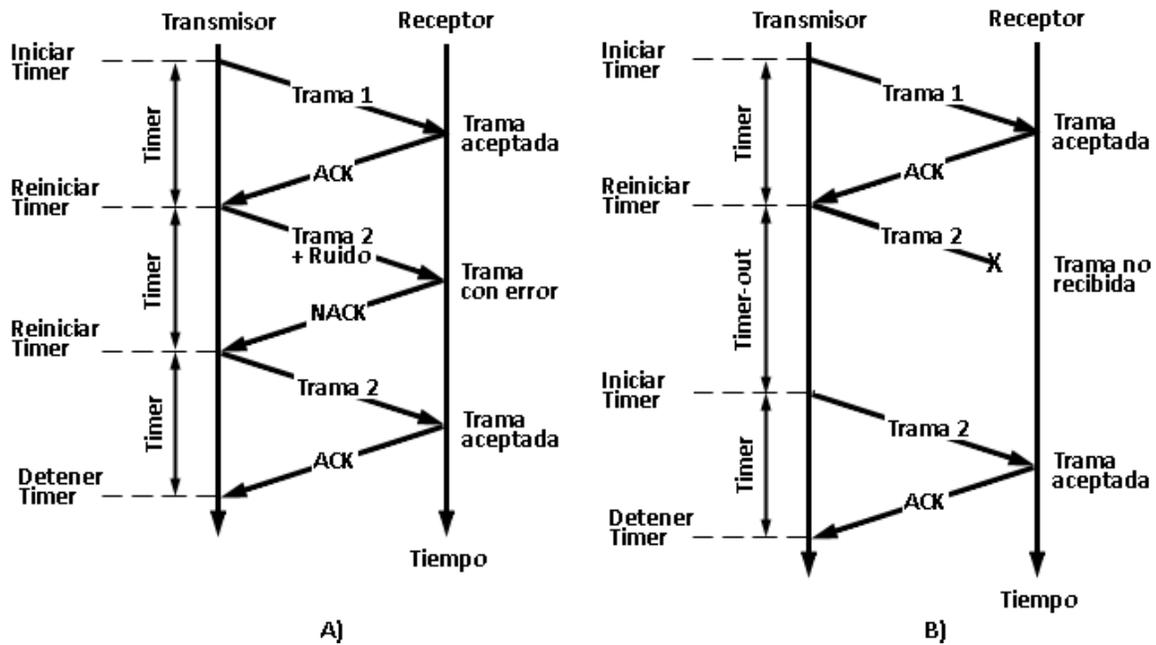


Figura 15. Protocolo "Stop-and-Wait" A) Corrección de datos con error, B) Retransmisión de datos no recibidos

Para implementar el protocolo "Stop-and-wait" se programó una subrutina de recepción de datos y una subrutina de transmisión de datos, tanto para el módulo de control como para el módulo de sensores. En la subrutina de recepción de datos (ver figura 16) se programó un bloque de código para detectar errores en la transmisión, donde se genera un error si la bandera PE es igual a uno (error de parida) o si el caracter recibido no se encuentra en la lista de comandos. El timer programado para la subrutina de transmisión de datos tiene una duración de 200 ms.

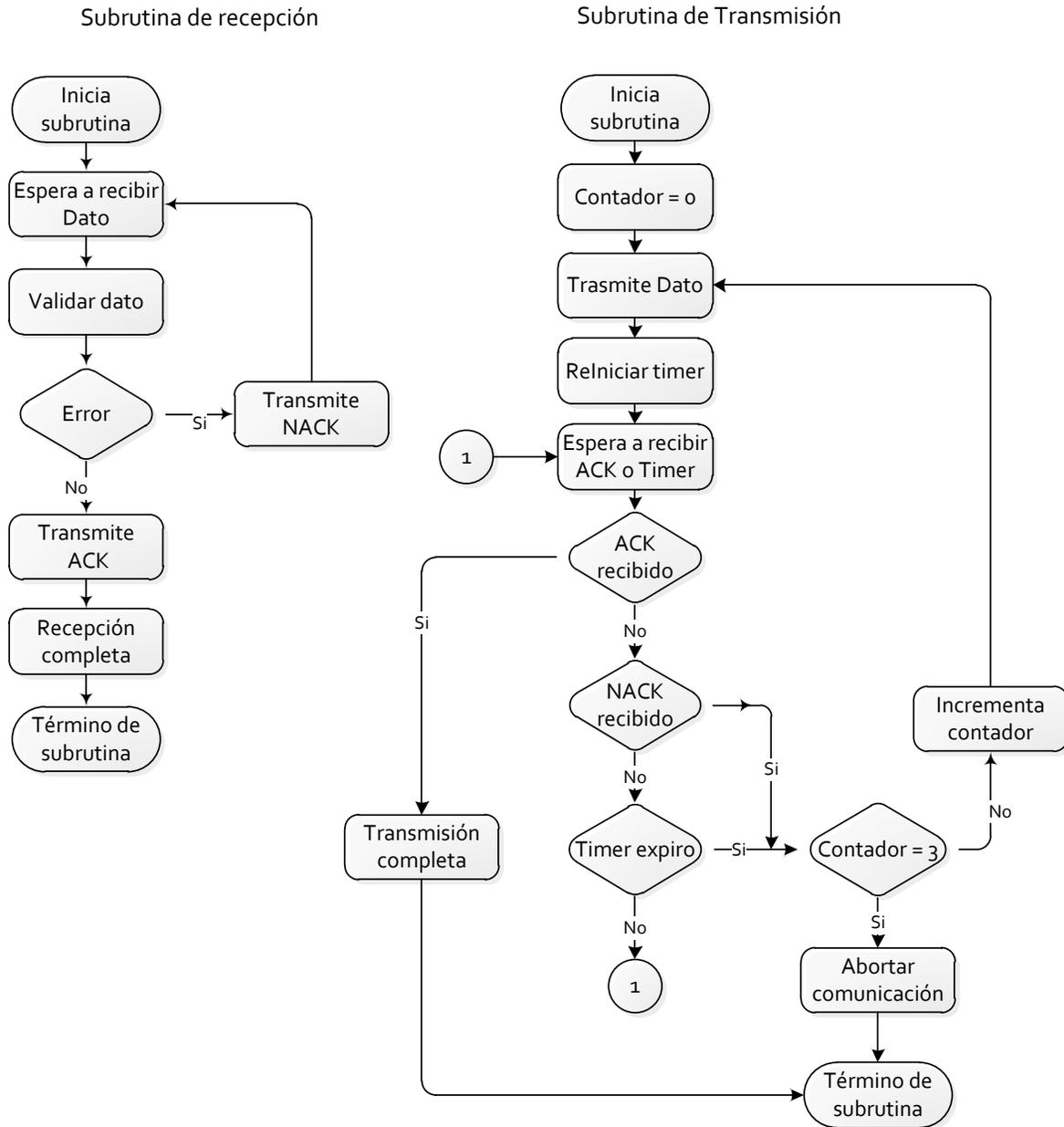


Figura 16. Diagrama de flujo de subrutinas de recepción y transmisión de datos.

1.2.4 Programación de un sistema de reinicio desde el módulo de control en caso de falla.

Es necesario considerar que durante las operaciones de aforo pudiese presentarse alguna falla, no solo un mal funcionamiento del equipo (bug), sino también un manejo inadecuado o alguna situación imprevista que pudiera afectar la medición en ese momento. Por ejemplo, atascamiento por maleza en el fondo, apagado del equipo por accidente, mal funcionamiento de algún sensor.

Un reinicio forzado de hardware puede ser útil para corregir estos inconvenientes, sin embargo si no se realiza de forma adecuada puede ocasionar la pérdida o corrupción

en la memoria de las mediciones ya realizadas o una incorrecta sincronización entre la estación de control y la estación de sensores.

Considerando lo anteriormente descrito, se ha programado un sistema de reiniciemoto sincronizado que permite reiniciar solamente las mediciones en la dovela donde se ha producido el error, manteniendo intacta la memoria de las mediciones de las dovelas anteriores, por lo que no es necesario realizar de nuevo la mediciones desde la primera dovela.

Para reiniciar el equipo correctamente es necesario seleccionar la opción “restablecer” del menú principal (ver figura 17-A), En ese instante se envía automáticamente el comando R (ver tabla 1) al módulo de sensores, indicando el reinicio de su programa, de esta forma se logra un reinicio sincronizado de ambos módulos.El módulo de control, toma la última posición de la memoria y borra el bloque de memoria que corresponde a la última dovela realizada, sin alterar los demás bloques. Mientras sucede esto se muestra una pantalla como la representada en la figura 17-B, indicando al operador del equipo que el molinete debe estar fuera de agua ya que se reiniciarán las mediciones en esa dovela. Al terminar el restablecimiento del equipo aparecerá una pantalla (figura 9-1) indicando la dovela (dovela donde se produjo el error) en la que debe estar posicionado el equipo para iniciar nuevamente las mediciones.



Figura 17. A) Opción restablecer del menú principal, B) Pantalla de reinicio.

1.2.5 Implementación de un sistema electrónico para detección de nivel de agua con sensibilidad ajustable.

El principio de funcionamiento del sensor de nivel se basa en la diferencia de conductividad entre el aire y el agua. Cuando el sensor entra en contacto con alguna solución acuosa se establece una pequeña corriente eléctrica entre sus electrodos, esta corriente es amplificada por el transistor BC557 para llevar a saturación al transistor BC547 (ver figura 18-A), la señal de salida es transformada a niveles de voltaje(niveles lógicos) TTL por medio del disparador Schmitt HEF40106B para obtener una señal digital(S3 en la figura 18) que pueda ser leída por el microcontrolador de la estación de sensores. De esta forma cuando el sensor esté fuera del agua, el microcontrolador deberá leer un cero digital y cuando el sensor esté dentro del agua el microcontrolador deberá leer un uno digital.

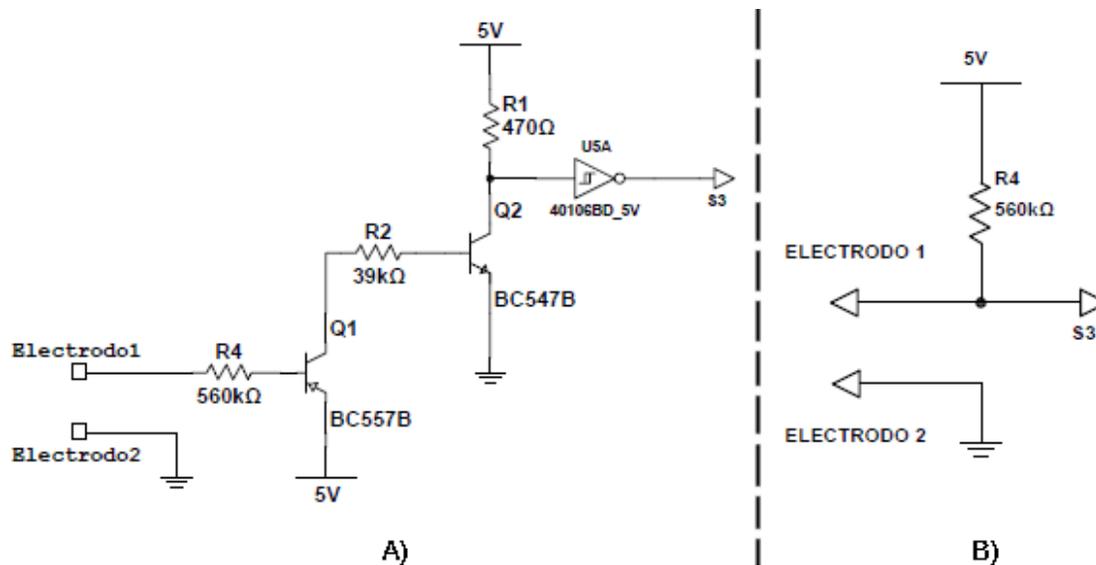


Figura 18. Circuito para detección de nivel de agua por conductividad A) digital B) analógico.

En cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será su conductividad. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, la cantidad conducida dependerá en gran medida del número de iones presentes, pero también de la movilidad que estos puedan tener. Por ejemplo, un aumento en la temperatura disminuye la viscosidad del agua y permite que los iones se muevan más rápidamente, aumentando la conductividad. En un caso opuesto, puede que una solución acuosa esté tan llena de iones que se restringe la libertad de movimiento y disminuye la conductividad. Es común encontrar casos de dos diferentes concentraciones con la misma conductividad o de una solución acuosa con diferentes regiones de conductividad.

Al realizar pruebas en el laboratorio con el sensor de nivel utilizando el circuito de la figura 18-A, se encontró que en algunas ocasiones, al retirar el sensor del agua, este seguía activado, debido a que en la superficie del cuerpo del sensor se formaba una ligera capa de agua que a no ser que escurriera completamente hacia conducir una pequeña corriente entre los electrodos del sensor.

En fluidos con cierta viscosidad es común que ocurra esto y en ciertas aplicaciones puede solucionarse eligiendo correctamente el largo de los electrodos o haciendo que la separación entre los electrodos sea la suficiente como para que no se forme una capa continua de líquido entre ellos. Sin embargo, pueden resultar diseños muy intrincados para fabricar o de grandes dimensiones. Y en todo caso, no asegurarían el funcionamiento correcto del sensor en fluidos con diferentes grados de viscosidad.

Una solución más conveniente, es poder ajustar la sensibilidad del sensor para que no detecte concentraciones de iones tan pequeñas como las encontradas en la capa de agua que se forma en la superficie del sensor, pero si debe ser capaz de detectar concentraciones más grades de iones como cuando el sensor se encuentra sumergido en el agua.

Para cambiar la sensibilidad del circuito de la figura 18-A, es posible remplazar las resistencias R2 y R1 por resistencias variables y ajustar la ganancia de amplificación

del transistor Q1 de tal forma que la corriente amplificada lleve a saturación al transistor Q2 solo cuando el sensor este dentro del agua y no cuando este mojado. Sin embargo, aun si, se remplazaran los transistores por transistores con un bajo factor de amplificación, resultaría en un circuito con un rango de ajuste de sensibilidad muy estrecho.

Este problema fue solucionado cambiando el diseño del circuito. En la figura 18-B se muestra el nuevo circuito, la salida S3 se conecta a la entrada AIN1 del comparador analógico del microcontrolador del módulo de sensores (en el anexo se encuentra el diagrama eléctrico completo). El comparador analógico del microcontrolador ATmega16 es un periférico que permite comparar los valores de la entrada AIN1 con los valores de AIN0, Cuando el valor del voltaje en la entrada AIN1 es mayor que el valor de AIN0, se activa la bandera ACO, la cual puede ser leída por software. De tal manera que al conectar los niveles de voltaje de los electrodos a la entrada AIN1, la sensibilidad puede ser ajustada fácilmente por software fijando el valor del umbral AIN0. Cuanto mayor sea el valor de AIN0 menor será la sensibilidad del sensor y cuanto menor sea el valor de AIN0 mayor será la sensibilidad. El valor de AIN0 fue elegido convenientemente para que solo se active la bandera ACO cuando el sensor se encuentra sumergido y no cuando solo esta mojado o húmedo. La figura 19 muestra la respuesta de la bandera de salida ACO a la señal de entrada de los electrodos cuando están secos, sumergidos y mojados.

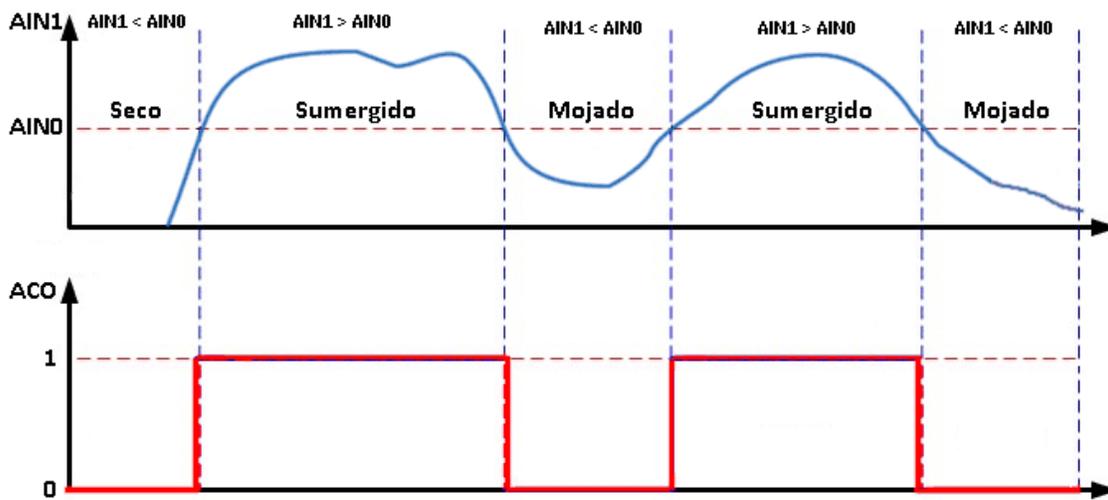


Figura 19. Niveles de AIN1, AIN0 y ACO, cuando el sensor de nivel está seco, sumergido y mojado.

Como mejora se rediseñó la forma del sensor de nivel agua para que pueda ser fácilmente atornillado entre la cola del molinete y el timón estabilizador (ver figura 5), con el objetivo de que cuando el molinete se encuentre sumergido apenas la mitad de las copas, el sensor se active. El cuerpo del sensor se fabricó en acero inoxidable al igual que los electrodos. Con una pieza de teflón se realizó un aislante entre los electrodos ya que este material además de ser un excelente aislante eléctrico posee gran impermeabilidad y mantiene sus cualidades en ambientes húmedos (ver figura 20).

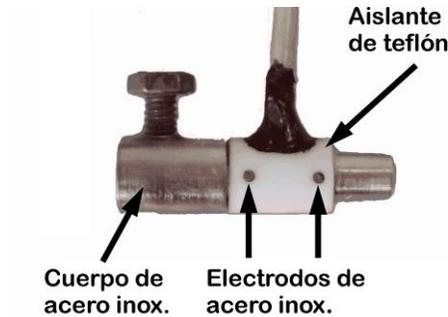


Figura 20. Sensor de nivel de agua.

1.2.6 Implementación de un sistema electrónico para corrección de la desviación de la vertical provocada por el arrastre de flujo.

MEJORAS A LA EHI

Metodologías para corrección de profundidades por desviación de la vertical.

El aforo con molinete tiene su fundamento en el método área-velocidad. Los errores en las mediciones de profundidad de cada dovela afectan directamente en el cálculo del área hidráulica, mientras que los errores en el posicionamiento del molinete en las profundidades de medición de velocidad de flujo, afectarán en la estimación de la velocidad media. Por lo tanto, una incorrecta medición de estas profundidades influye drásticamente en la precisión del caudal determinado.

Normalmente para realizar la tarea de medir las profundidades del molinete, es necesario utilizar una sonda flexible, la cual está constituida esencialmente de un cable de acero en el cual se sujetan por medio de una solera de acero inoxidable, el molinete y un contrapeso conocido como "escandallo". El escandallo está colocado al final de la solera y sirve para mantener en suposición al molinete y evitar en lo posible que sea desviado de la vertical por la corriente de agua.

Las variables principales a considerar en la selección de un peso adecuado del escandallo son el tirante y la velocidad media del flujo. La norma ISO 3454-1983 recomienda la siguiente relación para estimar el peso del escandallo:

$$m = 5 \bar{v} D \quad (5)$$

Donde \bar{v} es la velocidad media del flujo en metros/segundo, D es el tirante en metros en la sección más profunda del cauce y m es peso del escandallo en Kg.

A pesar del empleo de pesos conforme a la ecuación 5, en la práctica, no se puede evitar totalmente la desviación del cable de la vertical hacia aguas abajo. Esta condición se presenta más frecuentemente en cauces relativamente profundos (mayores a 3 metros) o con velocidades de flujo mayores que 2 m/s (ISO, 1983), y dificulta el empleo de cualquier método en la determinación del caudal. En tal situación el cable se aleja de la posición vertical formando un ángulo de inclinación θ ,

denominado ángulo de arrastre (ver Figura 21). Como consecuencia de esto las mediciones de profundidad del agua deben ser corregidas.

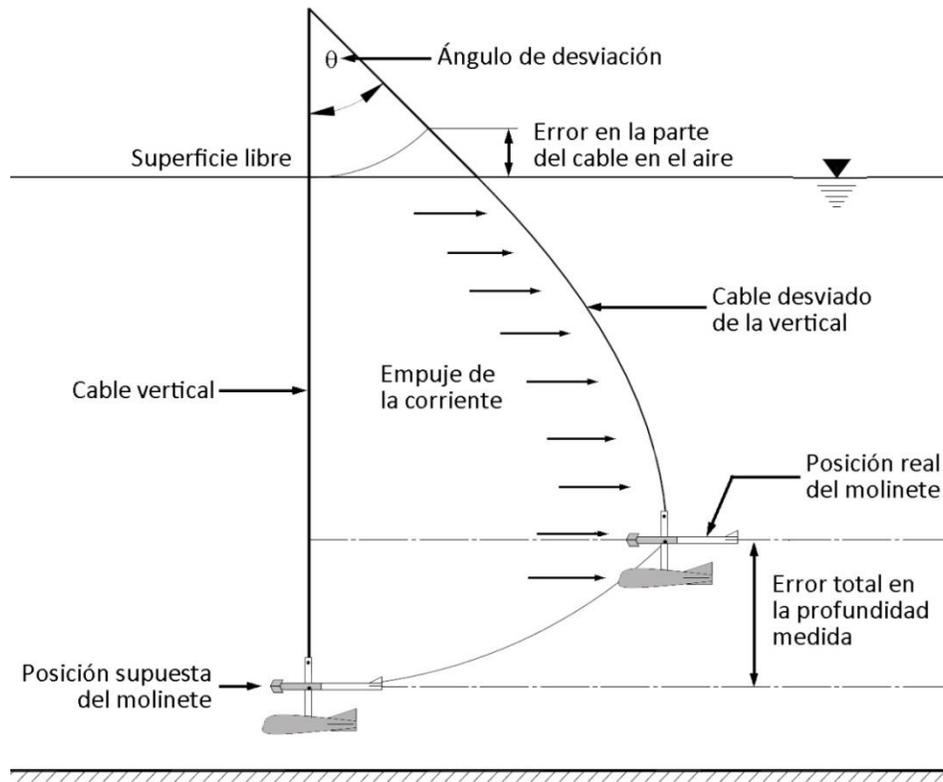


Figura 21. Arrastre del cable cuando se afora en un cauce profundo con alta velocidad.

Existen dos métodos para determinar la corrección que se debe aplicar a la profundidad medida del molinete, los cuales se han publicado en la norma ISO 748-1997 y el documento ISO/TR 9209-1989. Sin embargo, en la práctica en México la tendencia ha sido tratar de mitigar el efecto del arrastre, o ignorarlo, en vez de corregir los datos de aforo.

En un sentido estricto, los métodos desarrollados en la norma ISO 748 y el documento ISO/TR 9209, fueron desarrollados para determinar la corrección cuando se mide el tirante mediante un sondeo. Sin embargo, su aplicación puede ser extendida a la corrección de la profundidad del molinete cuando se determina la velocidad media de una vertical. En dichos métodos, se distinguen dos componentes de la corrección, una se aplica a la parte del cable en el aire, y la otra corresponde a la parte sumergida (denominadas "airline correction" y "wetline correction" en inglés). El método publicado en el reporte técnico ISO/TR 9209-1989 fue desarrollado por la Secretaría de Recursos Hídricos y Electricidad de la República Popular de China. En contraste con el método de la ISO 748, no se desprecia la fuerza horizontal en el escandallo en reposo en el cauce. Esto se debe a que en el caso de corrientes rápidas en cauces poco profundos se pueden presentar presiones considerables en esta zona. Además, se toma en cuenta diferentes pesos de escandallo y diámetros de cables de suspensión. Sin embargo, el método de la norma ISO 748 es más fácil de implementar en un sistema electrónico de corrección automática y se mantiene para cualquier escandallo o

cablediseñado para minimizar el efecto de la resistencia a la corriente de agua. A continuación se describen los procedimientos para la determinación de las correccionessegún la norma ISO 748.

La corrección de la parte del cable en el aire se determina a partir de una relación trigonométrica básica. En la figura 22, esta corrección está representada el segmento \overline{DE} .

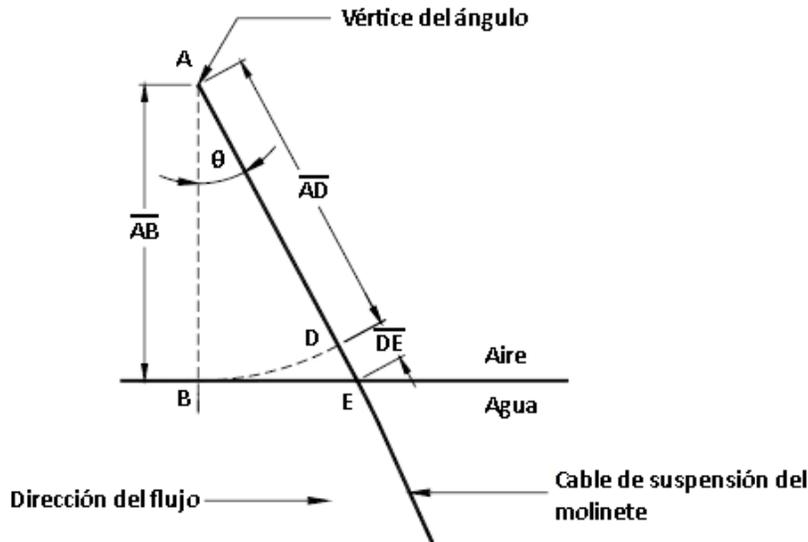


Figura 22. Corrección aplicable a la parte del cable en el aire.

La magnitud de \overline{DE} depende del ángulo con la vertical θ y la distancia \overline{AB} y se obtiene de la siguiente manera:

$$\overline{DE} = \overline{AB} * (\sec \theta - 1) \quad (6)$$

La corrección de la parte mojada del cable según el “Manual de Aforo de Caudales” de la Organización Meteorológica Mundial se fundamenta en un principio elemental de la mecánica: Si se aplica una fuerza horizontal de magnitud conocida a un peso suspendido de una cuerda, la cuerda toma una posición de reposo con un ángulo respecto a la vertical. La tangente del ángulo es igual a la fuerza horizontal dividida entre la magnitud del peso. Si se aplican varias fuerzas horizontales y verticales a la cuerda, la tangente del ángulo en la cuerda encima de cualquier punto es igual a la suma de fuerzas horizontales bajo de este punto, dividida por la suma de fuerzas verticales por debajo del punto de análisis.

Este concepto establece que la distribución de la fuerza horizontal en el cable de línea mojada es conforme con el perfil de velocidad en la vertical y se determina el error total en la estimación de la profundidad medida mediante la suma de los productos de cada décimo de la profundidad y la función $(1/\cos\theta)-1$ de los ángulos correspondientes. Esta función está establecida para cada décimo de la profundidad mediante la relación tangente de las fuerzas actuantes abajo de cualquier punto.

La solución general de este método ha sido resumida en una tabla, en la tabla 2 se muestra el factor de corrección k para ángulos de 4 a 34 grados según la tabla publicada de la norma ISO 748. Esta solución fue desarrollada con base en los

conceptos explicados y estudio empíricos hechos en ríos en EUA, y según la literatura, se mantiene para cualquier escandallo o cable diseñado para minimizar la resistencia de la corriente. Para utilizar la tabla 2, el ángulo de arrastre debe ser superior a 4 grados, el valor de θ debe redondearse al grado más próximo de la tabla para obtener el factor de corrección K. Entonces se obtiene la corrección de la parte mojada del cable con la siguiente relación:

$$CORR_{\overline{EF}} = \overline{EF} - \overline{BC} = K * \overline{EF} \quad (7)$$

Donde $CORR_{\overline{EF}}$ es la corrección de la parte mojada del cable en metros, \overline{EF} es la longitud de la parte curva sumergida del cable en metros y \overline{BC} es la profundidad vertical de la parte mojada del cable en metros.

Ángulo de desviación θ	Factor de Corrección K	Ángulo de desviación θ	Factor de Corrección K
4	0.0006	20	0.0204
6	0.0016	22	0.0248
8	0.0032	24	0.0296
10	0.0050	26	0.0350
12	0.0072	28	0.0408
14	0.0098	30	0.0472
16	0.0128	32	0.0620
18	0.0164	34	0.0698

Tabla 2. Factores de corrección de línea mojada.

La corrección de la parte mojada del cable también se puede calcular por medio de la ecuación 8. Esta ecuación polinómica se derivó del trabajo de Ken Wahla partir de los datos de la Tabla 2 y reproduce los valores de la tabla con diferencias de unos pocos milímetros. Esta ecuación puede ser programada en la EHI para calcular rápida y fácilmente las correcciones de línea húmeda.

$$CORR_{\overline{EF}} = \overline{EF} - \overline{BC} = (0.0004081 - 0.0001471 * \theta + 0.00005731 * \theta^2) * \overline{EF} \quad (8)$$

Donde $CORR_{\overline{EF}}$ es la corrección de la parte mojada del cable en metros, \overline{EF} es la longitud de la parte curva sumergida del cable en metros, \overline{BC} es la profundidad vertical de la parte mojada del cable en metros y θ el ángulo con la vertical en grados. La metodología para realizar la corrección por desviación de la vertical (ver figura 23) consiste en:

- Medir la distancia vertical \overline{AB} .
- Sumergir la sonda hasta que el escandallo toque el fondo y medir \overline{AF} .
- Calcular la longitud superficial del cable $\overline{AE} = \overline{AB} \sec \theta$.
- Obtener la longitud sumergida del cable $\overline{EF} = \overline{AF} - \overline{AE}$.
- Calcular la profundidad real con $\overline{BC} = (1 - K) \overline{EF}$.

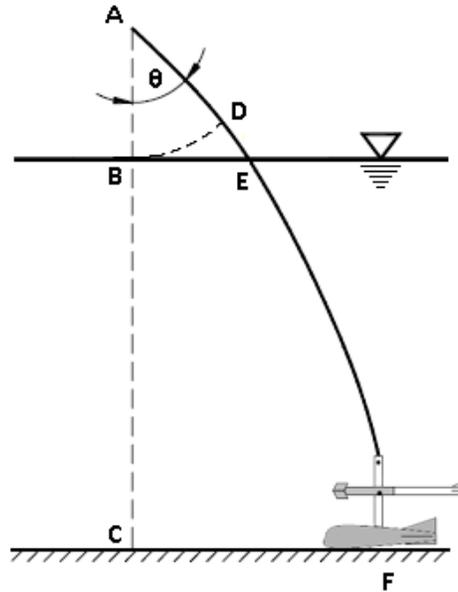


Figura 23. Corrección por desviación de la vertical.

Métodos de medición de inclinación con un acelerómetro.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, es evidente que para implementar un sistema electrónico de corrección continua de posición del molinete, es necesario encontrar un sensor que permita medir el ángulo de arrastre de la vertical. Existe una gran variedad de sensores y transductores de ángulo para la medida de posición angular. Sin embargo se optó por el uso de un sensor de inclinación de tipo acelerómetro, ya que este dispositivo usa la aceleración de la gravedad como un vector para determinar la orientación de un objeto en el espacio, lo cual brinda grandes ventajas con respecto a otros sensores, además que por sus pequeñas dimensiones íntegro en la tarjeta electrónica de la estación de sensores resulta más sencillo. A continuación se presenta una breve descripción de los acelerómetros MEMS y posteriormente se explican los métodos de medición de inclinación con estos sensores.

Un acelerómetro MEMS es un dispositivo electromecánico que mide las fuerzas de aceleración, estos dispositivos se fabrican a escalas de décimas de micrones con niveles de sensibilidad y error muy pequeños, típicamente como unidad de medida utilizan la gravedad (g 's). Se puede considerar a los acelerómetros MEMS como el dispositivo micro electromecánico más simple de los sistemas MEMS, ya que su construcción básica consiste en poco más que una masa suspendida de una viga de prueba (también conocida como masa sísmica), con un cierto tipo de detección y de trazado de la desviación del circuito. Los acelerómetros MEMS están disponibles en una amplia variedad de rangos de medición, desde los capaces de detectar aceleraciones muy pequeñas hasta acelerómetros con rangos de medición de miles de g 's, además de modelos compuestos por uno, dos o tres ejes de medición. Los acelerómetros MEMS se pueden clasificar en grupos según sus mecanismos de transducción como piezoresistivos, capacitivos, piezoeléctricos y ópticos. Todas estas clases de acelerómetros tienen su masa de prueba en reposo cuando éstos no

experimentan aceleración y la transducción mecánica a eléctrica se realiza por medio del movimiento de su masa sísmica.

Los acelerómetros capacitivos tienen varias ventajas sobre otros tipos de acelerómetros que los hacen muy atractivos en aplicaciones donde se requiere un sensor de alto desempeño a costos bajos. Los acelerómetros capacitivos tienen una baja dependencia a la temperatura a diferencia de los piezoresistivos, poseen una buena respuesta en corriente directa, alta sensibilidad, baja disipación de potencia y una estructura simple. Sin embargo, su principal desventaja es su alta sensibilidad a la interferencia electromagnética, por lo que se necesita un sistema de protección mediante un empaquetado especial para proteger al acelerómetro y a su circuito electrónico. El acelerómetro capacitivo mide la aceleración aprovechando el cambio en la capacitancia de un capacitor formado por su estructura. Uno de sus electrodos está colocado en la masa sísmica mientras que el otro permanece estacionario. Una aceleración provoca una variación en la distancia entre ambos electrodos, alterando su capacitancia inicial en proporción a la aceleración experimentada. Entonces, un circuito electrónico puede medir esta variación de capacitancia. La estructura básica de un acelerómetro capacitivo de sensado lateral es mostrada en la Figura 24.

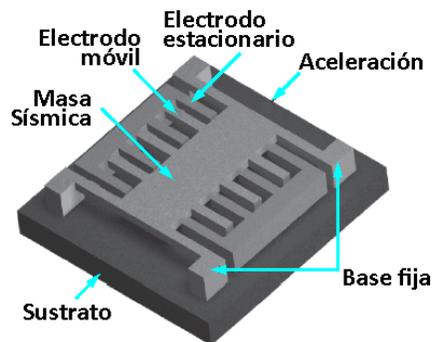


Figura 24. Estructura básica de un acelerómetro MEMS capacitivo de sensado lateral.

Es importante comprender las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de medición de inclinación utilizando acelerómetros, para lograr de acuerdo a la aplicación, una lectura de inclinación fiable y precisa. Los métodos que se exponen a continuación se basan en la utilización de uno, dos o tres ejes sensibles para determinar la inclinación de un acelerómetro.

Los acelerómetros pueden medir aceleraciones dinámicas y estáticas, un acelerómetro en modo estático puede ser utilizado para determinar la orientación de un objeto por medio del vector de aceleración de la gravedad, un acelerómetro en estado estático mide $-1g$ cuando su eje sensible es paralelo y apunta en dirección del vector de la aceleración de la gravedad y $+1g$ cuando su eje sensible es paralelo pero apunta en dirección opuesta al vector de la aceleración de la gravedad.

El método de medición de inclinación utilizando un solo eje sensible de un acelerómetro, tiene la ventaja de ser de bajo costo y fácil de implementar, con una simple relación trigonométrica es posible calcular el ángulo de inclinación. Sin embargo, este método está limitado a un solo plano de medición y solo es útil para mediciones de ángulos de -45 a $+45$ grados de inclinación. Supongamos un acelerómetro de doble eje (X,Y) montado perpendicularmente al vector de gravedad,

el algoritmo de inclinación se limita a un solo eje de sensibilidad, por ejemplo el eje X. En la figura 25 se muestra la inclinación de eje X de un acelerómetro. En este caso el eje Y siempre mantendrá una salida de 0g a lo largo de la rotación completa del eje X.

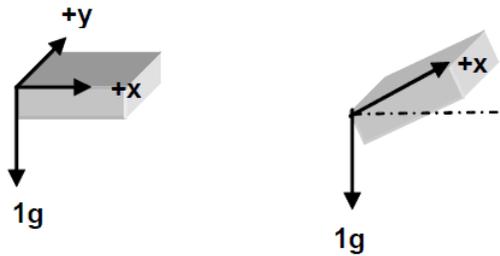


Figura 25. Método de medición de inclinación usando un solo eje sensible de un acelerómetro.

Si el eje X se utiliza para calcular el ángulo de inclinación del acelerómetro, se emplea la siguiente relación trigonométrica:

$$\theta = \sin^{-1} A_x \quad (9)$$

Dónde A_x es la aceleración de salida del eje X debida a la gravedad y θ es el ángulo de inclinación en grados.

En la figura 26 se muestra la salida en g's del acelerómetro al inclinar el eje X de -90 a +90 grados. Se observa que la sensibilidad a la inclinación (pendiente de la curva) disminuye en el intervalo de -90 a -45 grados y lo mismo sucede en el intervalo de +45 a +90 grados. Entre estos valores existe un problema de resolución que hace que este método de cálculo de inclinación sea inexacto, cuando la salida del acelerómetro se acerca a los valores próximos a un +1g o a los valores cercanos a -1g. De esta forma se confirma que este método solo es útil para mediciones de ángulos de entre -45 a +45 grados de inclinación.

Otra desventaja del método de medición de inclinación utilizando un solo eje sensible, es la incapacidad para saber la diferencia entre dos ángulos de inclinación que resultan en la misma salida de aceleración del sensor. La salida es una función sinusoidal, así que por ejemplo sería imposible saber a partir de una lectura de salida de 0,5 g si el acelerómetro se inclina 30 o 150 grados, observando solamente la salida del acelerómetro. Esta desventaja se supera mediante el uso de un método de medición de inclinación que utiliza dos ejes sensibles y se explica a continuación.

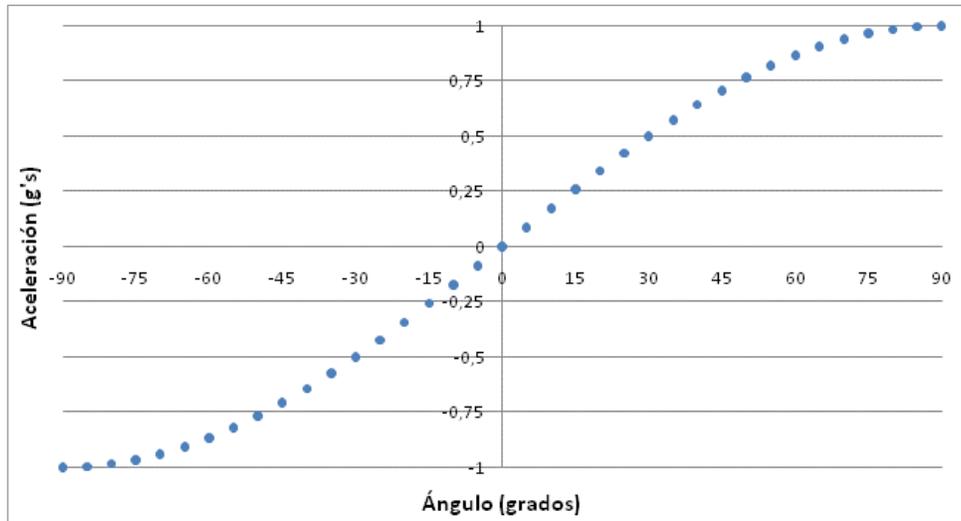


Figura 26. Salida del acelerómetro a una inclinación de -90 grados a +90 grados con el método de medición de un eje sensible.

El método de medición de inclinación utilizando dos ejes sensibles de un acelerómetro, resuelve los problemas de resolución y las dificultades de orientación de inclinación montando el acelerómetro de modo que el eje Y sea paralelo al vector de gravedad (ver figura 27). El uso de más de un eje para calcular la inclinación produce una solución más precisa.

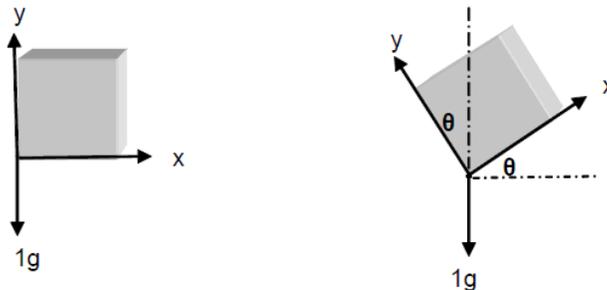


Figura 27. Método de medición de inclinación usando dos ejes sensibles de un acelerómetro.

El ángulo de inclinación utilizando el método de dos ejes sensibles se determina de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 A_X &= \sin \theta \\
 A_Y &= \cos \theta \\
 \frac{A_X}{A_Y} &= \tan \theta \\
 \theta &= \tan^{-1} \frac{A_X}{A_Y}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

La figura 4 muestra que cuando se usan dos ejes sensibles para medir la inclinación, la componente de la aceleración de la gravedad en el eje X sigue la función seno, mientras que la componente de la aceleración de la gravedad que actúa sobre el eje Y sigue la función coseno. Se puede observar en la figura 4 que la sensibilidad a la inclinación (pendiente de la curva) del eje X está en su máximo cuando la sensibilidad

del eje Y está en su mínimo y viceversa. Por lo tanto, se puede mantener la sensibilidad máxima de inclinación para una rotación de 0 a 360 grados, si se combinan la salidas de aceleración del eje X y el eje Y. Cuando las dos sensibilidades se combinan resulta en una sensibilidad constante de 17.45mg's /grado.

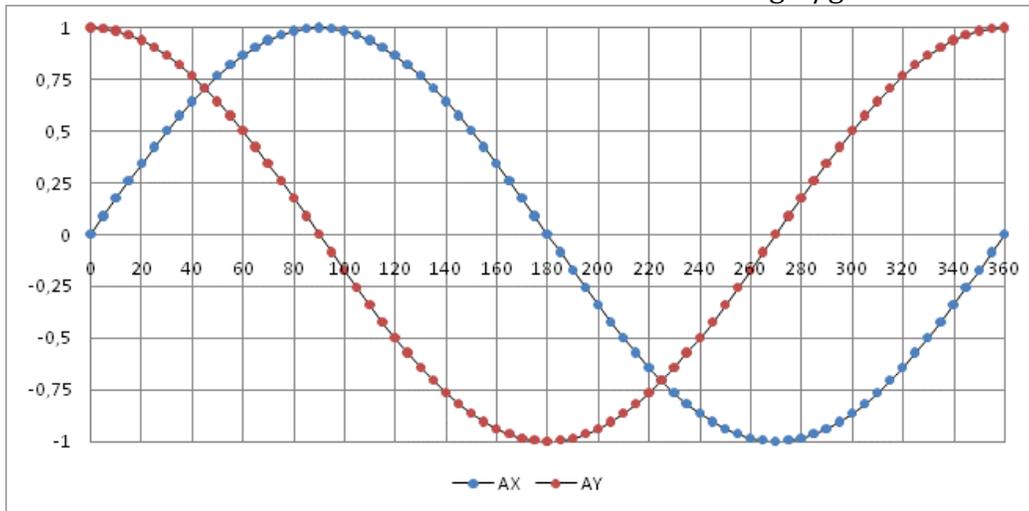


Figura 28. Función seno de la salida del eje X y función coseno de la salida del eje Y. El eje X y el eje Y del acelerómetro son ortogonales, por lo que cuando el eje Y experimenta una aceleración 1g, el eje X experimenta una aceleración de 0 g, es decir, el eje X y el eje Y son las componentes rectangulares del vector de aceleración de la gravedad, la resultante de estas componentes será igual a 1g, siempre y cuando el acelerómetro gire solamente en el plano X-Y.

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} = 1g \tag{11}$$

Al utilizar la ecuación 10 para determinar el ángulo de inclinación se mantiene una sensibilidad constante de 17.45 mg's/grado de inclinación a través de una rotación de 360 grados en el plano.

Es importante tomar en cuenta el signo de las aceleraciones del eje X y el eje Y para poder determinar el cuadrante de inclinación, esto debido a que las mismas salidas de aceleración del sensor pueden representar dos ángulos diferentes. Por ejemplo una inclinación de 45 grados y una inclinación de 225 grados, están representados por las mismas salidas del sensor $\tan(45) = 1$ y $\tan(225) = 1$. Conociendo el signo de la aceleración en el eje X y Y es posible determinar exactamente en qué cuadrante se inclina el acelerómetro (ver tabla 3). Entonces la primera tarea será ubicar el cuadrante para posteriormente calcular el ángulo de inclinación.

Cuadrante	Signo AX	Signo AY	Ecuación
Q1 (de 0° a 90° de inclinación)	+	+	$\theta = \arctan (AX / AY)$ (12)
Q2 (de 90° a 180° de inclinación)	+	-	$\theta = \arctan (AX / AY) + 180$ (13)
Q3 (de 180° a 270° de inclinación)	-	-	$\theta = \arctan (AX / AY) + 180$ (14)
Q4 (de 270° a 360° de inclinación)	-	+	$\theta = \arctan (AX / AY) + 360$ (15)

Tabla 3. Signos de las aceleraciones y cuadrantes de una rotación de 360 grados. El método de medición de inclinación utilizando tres ejes sensibles de un acelerómetro. Combina el eje Z con los ejes X y Y de tal forma que es posible conseguir una medición de la inclinación con la máxima sensibilidad constante que ofrece el método de dos ejes sensibles pero en todos los planos de inclinación a través de los 360 grados de rotación. Con este método es posible definir los ángulos de inclinación del acelerómetro en tres dimensiones.

Mediante las tres salidas del acelerómetro se determinan tres ángulos de inclinación, el ángulo Pitch (ρ) se define como el ángulo de eje X con respecto al plano ortogonal del vector de gravedad, el ángulo Roll (ϕ) se define como el ángulo del eje Y con respecto al plano ortogonal del vector de gravedad y el ángulo Theta (θ) es el ángulo del eje Z con respecto al vector de gravedad (ver figura 29).

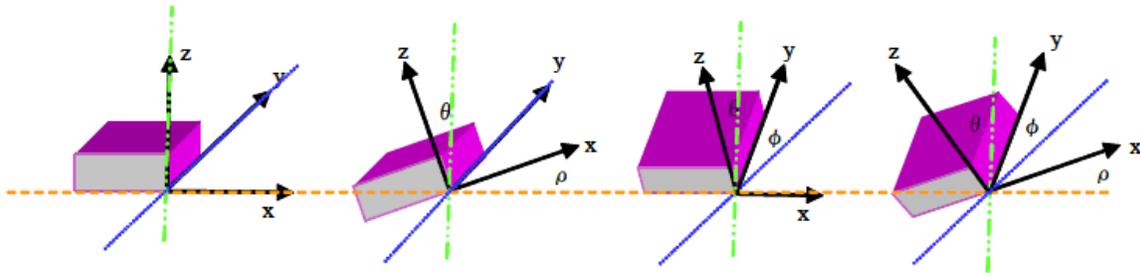


Figura 29. Método de medición de inclinación utilizando tres ejes sensibles de un acelerómetro.

Los ángulos Pitch, Roll y Theta se calculan con las siguientes expresiones:

$$\rho = \tan^{-1} \left(\frac{A_X}{\sqrt{A_Y^2 + A_Z^2}} \right) \quad (16)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{A_Y}{\sqrt{A_X^2 + A_Z^2}} \right) \quad (17)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A_X^2 + A_Y^2}}{A_Z} \right) \quad (18)$$

La resultante de las componentes en el eje X, Y y Z debidas a la aceleración de la gravedad son iguales a 1g cuando el acelerómetro permanece estático.

$$\sqrt{A_X^2 + A_Y^2 + A_Z^2} = 1g \quad (19)$$

Sistema electrónico de medición de inclinación.

Mediante el método de medición de inclinación utilizando tres ejes sensibles, es posible, por medio de la ecuación 18, determinar el ángulo de inclinación con respecto al vector de gravedad en tres dimensiones, esto resulta favorable para la medición del ángulo de desviación de la vertical en la EHI, debido a que integrar un sensor acelerómetro en el módulo de sensores resulta sencillo y sin importar la orientación o la forma en que se instale el módulo de control, siempre se medirá el ángulo correcto. En el mercado existe una gran variedad de sensores acelerómetros con

diferentes características y costos, la elección del acelerómetro adecuado depende de los parámetros de la aplicación. El sensor BMA180 es un acelerómetro MEMS de bajo costo (debido a los altos volúmenes de venta de productos tecnológicos con estos sensores en los últimos años) que cubre todas las características necesarias para poder medir el ángulo de desviación de la vertical utilizando el método de tres ejes sensibles.

El acelerómetro BMA180 es un acelerómetro digital tri-axial de alto rendimiento para medición de bajas g. Permite mediciones de aceleración estática, así como de aceleraciones dinámicas con muy alta precisión. Debido a sus tres ejes perpendiculares es posible obtener la orientación absoluta en un campo de gravedad. Este sensor inercial de Bosch, es un arreglo de dos chips en un mismo encapsulado. Por medio de un ASIC se evalúa la salida de tres canales de elementos micro-mecanizados para mediciones de aceleración que funcionan según el principio de capacitancia diferencial. El BMA180 proporciona una señal de salida digital de 14 bits a través del bus de interfaz SPI o el bus I²C. El rango de escala completa puede ser seleccionado a $\pm 1g$, 1.5g, 2g, 3g, 4g, 8g o 16g. Lleva incluido un filtro Butterworth de segundo orden de frecuencias seleccionables entre 10 Hz y 600 Hz para proporcionar un pre-acondicionamiento de la señal de aceleración medida. El consumo de corriente es típicamente de 650 μA a una tensión de alimentación de 2,4 V. No obstante, el sensor puede ser configurado en modo de bajo consumo de energía (modo sleep). Las dimensiones del sensor son: 3 X 3 mm y una altura de 0.9 mm. En aplicaciones de medición de inclinación se puede obtener una precisión por debajo de ± 0.25 grados y una resolución de 0.5 mg's (en modo 2g).

El principal reto en el diseño del sistema de medición de ángulo por desviación de la vertical, tiene que ver con la complejidad asociada a la captura y análisis de los datos entregados por el sensor BMA180. Con tal propósito en el microcontrolador ATmega16 de la estación de sensores se han desarrollado tres algoritmos, un algoritmo de transferencia de información entre el acelerómetro y el microcontrolador, un algoritmo de configuración e inicialización del acelerómetro y un algoritmo para el cálculo de ángulo de inclinación. A continuación se explica detalladamente cada uno de ellos.

El algoritmo desarrollado para la transferencia de información entre el microcontrolador ATmega16 y el acelerómetro BMA180, consiste en cuatro subrutinas, dos están destinadas a los detalles lógicos de bajo nivel requeridos para la transmisión y recepción de datos por medio del bus de comunicación SPI del microcontrolador, mientras que las dos restantes son rutinas de lectura/escritura para el acceso a los registros del mapa de memoria del acelerómetro BMA180.

El bus SPI (Serial Peripheral Interface) es el periférico utilizado para la comunicación entre el microcontrolador y el acelerómetro, permite la transferencia síncrona de paquetes de información de 8 bits a alta velocidad. La interconexión entre dispositivos SPI es del tipo maestro-esclavo. El maestro es la parte activa del sistema, tiene que generar una señal de reloj para que se realice la transferencia de datos serie sobre el bus, el dispositivo esclavo sólo recibe y envía datos si el maestro genera la señal de reloj necesaria. Sin embargo, el maestro genera la señal de reloj sólo al enviar datos, esto significa que el maestro tiene que enviar datos al esclavo para poder leer los datos enviados desde el esclavo. El SPI se compone de cuatro líneas de señal. Estas

líneas son: SCK (señal de reloj), MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out) y SS (Slave Select). En el anexo se encuentra el diagrama de conexión del bus SPI del acelerómetro con el del microcontrolador de la estación de sensores. El esclavo es controlado sobre el bus a través de la línea selectora SS, el esclavo es activado solo cuando el maestro selecciona esta línea.

El acelerómetro BMA180 solo puede emplearse como esclavo, por lo que antes de que toda comunicación tome lugar, es necesario configurar el microcontrolador en modo maestro con ajustes de comunicación compatibles con los del sensor BMA180. El bus SPI del microcontrolador se ha configurado estableciendo los bits del registro de control SPCR como se muestra en figura 30 y el bit SPI2X del registro SPSR como se muestra en la figura 31. Esta configuración establece el bus SPI del microcontrolador de la siguiente manera: SPI habilitado, SPI en modo maestro, bit MSB se transmite primero, transferencia de datos por flanco de bajada y frecuencia de transmisión $f_{osc}/4$. En modo maestro los pines SCK, MOSI y SS del puerto B del microcontrolador deben configurarse como salidas y el pin MISO como entrada.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	SPIE	SPE	DORD	MSTR	CPOL	CPHA	SPR1	SPR0	SPCR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	
Configuración	0	1	0	1	1	1	0	0	

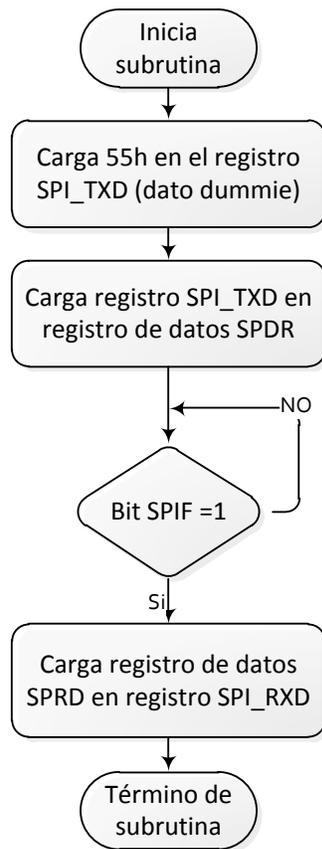
Figura 30. Configuración del SPCR Registro de control del SPI.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	SPIF	WCOL	-	-	-	-	-	SPI2X	SPSR
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	
Configuración								1	

Figura 31. Configuración del SPSR registro del SPI.

Las subrutinas desarrolladas para la transmisión y recepción de datos por el bus SPI se muestran en la figura 32, estas subrutinas hacen uso de dos registros de 8 bits, uno donde se almacenan los datos a transmitir (SPI_TXD) y otro donde se almacenan los datos leídos (SPI_RXD).

Subrutina de recepción SPI



Subrutina de Transmisión SPI

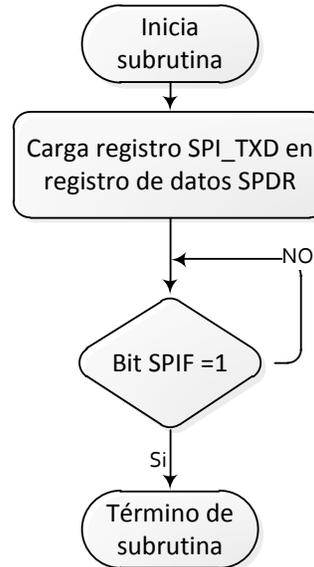


Figura 32. Subrutinas de transmisión y recepción de datos por el bus SPI.

Por medio de las subrutinas para la transmisión y recepción de datos por el bus SPI se han desarrollado rutinas de lectura y escritura para el acceso a los registros del mapa de memoria del sensor BMA180. El software requerido para acceder a ellos es relativamente sencillo, en general, lo único que se requiere es comprender como está organizado el mapa de memoria del sensor y como son los protocolos de lectura/escritura del mismo.

La memoria del sensor BMA180 está desarrollada con diversas arquitecturas físicas, básicamente utiliza registros de memoria volátil para operar (debido a que la memoria volátil se puede modificar y leer mucho más rápido que otro tipo de memoria), por lo que se destina una parte de la memoria volátil (“imagen”) para copiar el contenido de la memoria no volátil (EEPROM). Los valores de los registros de la EEPROM se copian automáticamente en los registros de la imagen después del encendido/reinicio por software. Todos los registros operacionales y de configuración por defecto son accesibles a través de la interfaz serie con el protocolo estándar SPI.

La memoria EEPROM puede ser utilizada para fijar los valores predeterminados de operación del sensor. Para evitar que algún registro de la EEPROM sea cambiado accidentalmente y el sensor funcione incorrectamente, la escritura se realiza de manera indirecta.

Hay 5 tipos de registros en el sensor: imagen, control, prueba, estado y datos. Todos los registros son de 8 bits. Solo los registros de imagen y control son accesibles tanto en modo lectura como escritura. Los registros de prueba están reservados para Bosch y no son accesibles para el usuario. La tabla 3 muestra un resumen de tipos de registros del sensor BMA180. En el anexo se encuentra el mapa de memoria completo, en este se muestran las direcciones de cada registro y los tipos de registros están representados por diferentes colores.

Tipo de registro	Función del registro	Comando
Registros de datos	Identificador del chip, versión del chip, datos de aceleración, datos de temperatura	lectura
Registros de control	activación de auto-prueba, reinicio por software, cambio a modo sleep, etc.	lectura/escritura
Registros de estado	Estado de interrupciones y estado de auto-pruebas, bytes de estado reservados para usuario.	lectura lectura/escritura
Registros de configuración	configuraciones funcionales (rango, ancho de banda, modo de operación, etc.), configuración de interrupciones.	lectura/escritura
EEPROM	Configuraciones predeterminadas de funcionalidad y configuraciones de interrupciones, almacenamiento de datos reservado para usuario, memoria reservada para Bosch Sensor tec.	escritura

Tabla 4. Tipos de registros del acelerómetro BMA180.

Para la escritura de un registro es requerida una secuencia de dos bytes por el bus SPI, un byte de control para definir la dirección del dato que se escribirá y el byte de datos. El bit MSB del byte de control debe fijarse en cero para indicar que es una operación de escritura, los 7 bits restantes indican la dirección del registro. La secuencia debe comenzar después de poner en bajo el pin SS y al término debe ponerse en alto nuevamente, la figura 33 representa una secuencia de escritura múltiple.

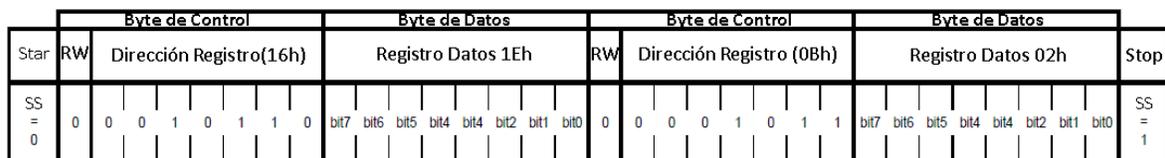


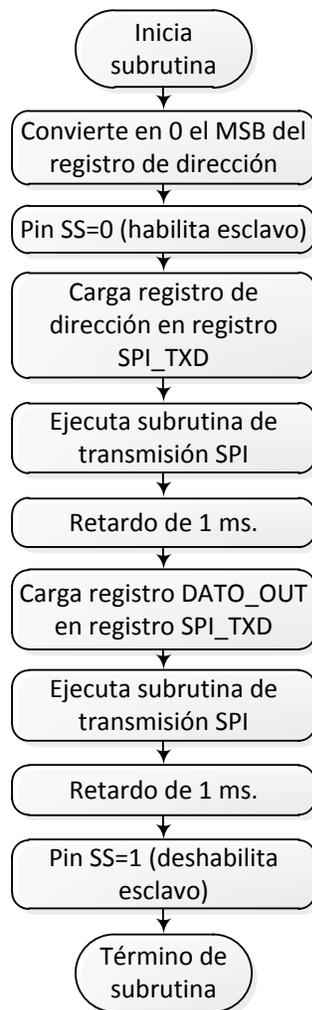
Figura 33. Ejemplo de escritura múltiple de registros del sensor BMA180 por el bus SPI.

Para la lectura de un registro la secuencia consiste en un byte de control que define la primera dirección que se leerá seguido de los bytes de datos, en el caso de lecturas múltiples, el direccionamiento incrementa automáticamente. El bit MSB del bit de control debe fijarse en uno para indicar que es una operación de lectura, la figura 34 representa una secuencia de lectura múltiple.

Star	RW	Byte de Control								Byte de Datos								Byte de Datos								Byte de Datos								Stop								
		Dirección Registro (02h)								Registro Datos - Dirección 02h								Registro Datos - Dirección 03h								Registro Datos - Dirección 04h																
SS = 0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	SS = 1

Figura 34. Ejemplo de lectura múltiple de registros del sensor BMA180 por el bus SPI. Las rutinas desarrolladas de lectura/escritura para el acceso a los registros del mapa de memoria del acelerómetro BMA180 se muestran en la figura 35, hacen uso de tres registros de 8 bits, un registro donde se almacena la dirección, el dato a escribir (DATO_OUT) y el dato leído (DATO_IN).

Subrutina de escritura BMA180



Subrutina de lectura BMA180

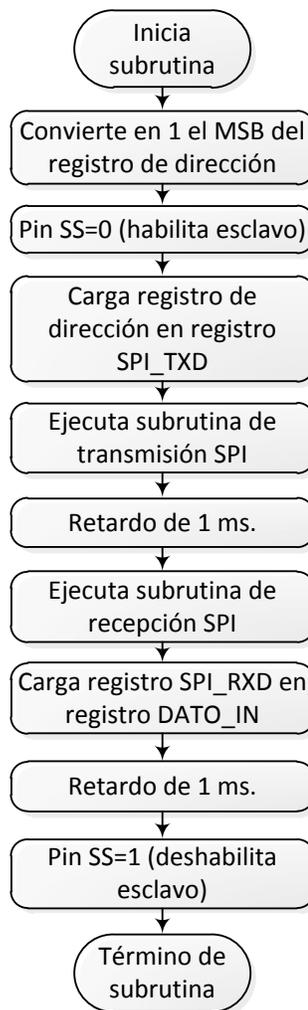


Figura 35. Subrutinas de lectura y escritura para sensor BMA180. (ms = mili segundos).

El algoritmo de configuración e inicialización del acelerómetro consiste en el establecimiento de los valores de operación del sensor BMA180 de acuerdo a la

aplicación. La subrutina de la figura 36 inicializa el acelerómetro y lo configura para trabajar en un rango de ± 1 g con un filtro digital de 2 polos a 10 Hz. De esta forma es posible eliminar las componentes de aceleración dinámicas que pudiesen provocar errores en la medición del ángulo de inclinación (Típicamente, los componentes de la aceleración causados por el movimiento dinámico, sólo ocurren en un corto período de tiempo, mientras que la aceleración de la gravedad es permanente).

Subrutina de configuración BMA180

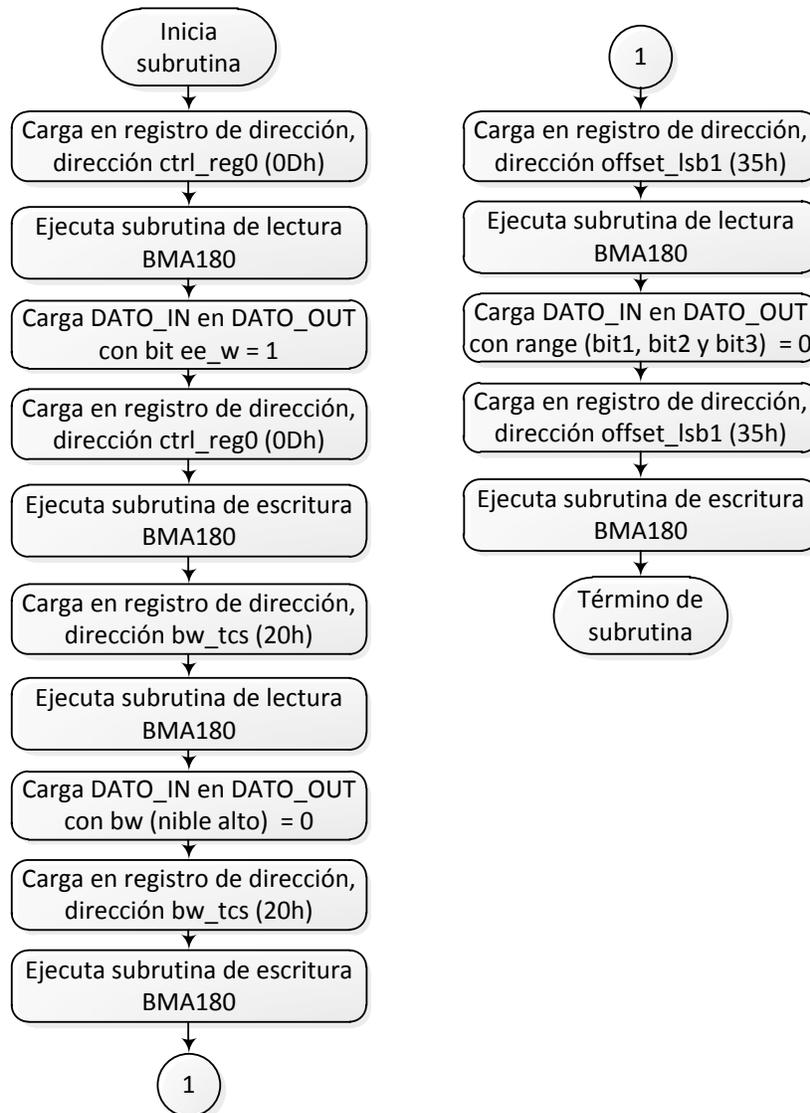


Figura 36. Subrutina de configuración del acelerómetro BMA180.

Para el correcto desarrollo del algoritmo de cálculo de ángulo de inclinación, es necesario examinar detalladamente todas las especificaciones y entender el significado de cada parámetro involucrado en la obtención de los datos de aceleración. A continuación se exponen las especificaciones estudiadas en la obtención e

interpretación de los datos de aceleración del sensor BMA180, así como el algoritmo desarrollado para el cálculo de ángulo de inclinación.

Las señales analógicas de aceleración en los ejes X, Y y Z son periódicamente digitalizadas por medio de un ADC de 14 bits y almacenadas en sus respectivos registros para ser leídas a través de la interfaz serial SPI. Cada dato de 14 bits está disponible en dos registros, un que contiene los primeros 6 bits del dato (registro `_lsb`) y otro que contiene los 8 bits siguientes (registro `_msb`). El registro `_lsb` y el registro `_msb` forman en total 16 bits con 14 bits de datos de aceleración y un bit `new_data_` (ver tabla 5).

Los datos de salida de aceleración son actualizados periódicamente, es por esto que el registro `_lsb` del dato de aceleración debe leerse primero para que la actualización del correspondiente registro `_msb` sea bloqueada hasta que también sea leído (de hecho, el contenido del registro `_msb` es copiado en un registro sombra y el acceso al registro `_msb` es re-direccionado a esta copia la cual no se ve afectada por las actualizaciones). Si el registro `_lsb` no se lee primero, el registro sombra nunca se actualizará y el valor del registro `_msb` siempre sería idéntico al valor de la primera lectura.

Los bits `new_data_x`, `new_data_y` y `new_data_z` son banderas que toman el valor de 1 cuando los registros de aceleración han sido actualizados y que toman el valor de 0 cuando se han leído sus respectivos registros de aceleración. Estas banderas se encuentran en el bit 0 de los registros `acc_z_lsb`, `acc_y_lsb` y `acc_x_lsb` y se utilizan para detectar si los datos de aceleración ya han sido leídos.

Nombre del registro	Dirección del registro	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0	Valor inicial
<code>acc_z_msb</code>	07h	acc_z (13:6 bit)								00h
<code>acc_z_lsb</code>	06h	acc_z (5:0 bit)						0	<code>new_data_z</code>	00h
<code>acc_y_msb</code>	05h	acc_y (13:6 bit)								00h
<code>acc_y_lsb</code>	04h	acc_y (5:0 bit)						0	<code>new_data_y</code>	00h
<code>acc_x_msb</code>	03h	acc_x (13:6 bit)								00h
<code>acc_x_lsb</code>	02h	acc_x (5:0 bit)						0	<code>new_data_x</code>	00h

Tabla 5. Registros de datos de aceleración del sensor BMA180.

Los datos de 14 bits de aceleración están codificados en complemento a “dos”. Este sistema permite la representación de números binarios de forma negativa, en donde el MSB (bit más significativo) es el bit del signo. Si este bit es cero, entonces el número binario es positivo, si el bit de signo es 1, entonces el número es negativo, los 13 bits restantes representan la magnitud del número binario. El cálculo del complemento a dos es muy sencillo de implementar en un microcontrolador, los números positivos se quedan igual en su representación binaria, mientras que en los números negativos se debe invertir el valor de cada uno de sus bits, es decir se realiza el complemento a uno de la cifra completa y se suma 1 al bit LSB (bit menos significativo).

Para convertir los datos digitales de aceleración en valores decimales de aceleración, se utiliza la ecuación 20.

$$A = \frac{A_{FS}}{2^{N-1}} * D \quad (20)$$

$$A = \frac{1}{2^{13}} * D \quad (21)$$

Donde A es la aceleración de salida, A_{FS} es la aceleración a plena escala, N es el número de bits del dato digital y D es el valor decimal del dato digital.

Haciendo $A_{FS} = \pm 1g$ y $N = 14$ en la ecuación 20 se obtiene la ecuación 21, es por medio de esta ecuación que se calculan los valores decimales de aceleración a partir de los valores digitales leídos del acelerómetro. En la tabla 6 se muestra una serie de mediciones para un rango de aceleración de $\pm 1g$.

Aceleración (A) en g's	valor digital (D)
-1.00000	10 0000 0000 0000
-0.99987	10 0000 0000 0001
-0.00012	11 1111 1111 1111
0.00000	00 0000 0000 0000
0.00012	00 0000 0000 0001
0.99975	01 1111 1111 1110
0.99987	01 1111 1111 1111

Tabla 6. Representación binaria de los datos de aceleración para un rango de $\pm 1g$.

El algoritmo desarrollado para el cálculo del ángulo de inclinación utiliza la ecuación 18 para obtener el ángulo de inclinación del sensor BMA180 con respecto al vector de gravedad. Para poder implementar la ecuación 18 en el microcontrolador es necesaria la programación de ciertas rutinas matemáticas, la precisión del cálculo de ángulo de inclinación depende en gran medida de los métodos matemáticos desarrollados en dichas rutinas. A continuación se describen brevemente las subrutinas matemáticas desarrolladas, y se muestra el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para el cálculo del ángulo de inclinación (ver figura 37).

Subrutina complemento a dos: esta subrutina ordena los datos de aceleración en dos registros de 8 bits para cada eje y calcula el complemento a dos de dichos registros si el dato de aceleración es negativo.

Subrutina multiplicación binaria: esta subrutina multiplica un número de 2 bytes por un número de 2 bytes y el resultado lo almacena en 4 registros de 1 byte cada uno.

Subrutina de división binaria: Esta subrutina divide un número de 4 bytes entre un número de 2 bytes por medio de restas sucesivas. Resta el divisor del dividendo, incrementa en uno el cociente y continua restando hasta que el dividendo sea menor que el divisor. Al final de la subrutina se obtiene el cociente y el residuo.

Subrutina de raíz cuadrada: Esta subrutina calcula la raíz cuadrada de un número de 4 bytes por medio de un método iterativo conocido como método del algoritmo babilónico.

Subrutina de tangente inversa: esta subrutina emplea el algoritmo CORDIC para calcular la tangente inversa de un número de 2 bytes. CORDIC es un algoritmo

iterativo que permite calcular funciones trigonométricas, este algoritmo utiliza sumas, desplazamiento de registros y LUTs.

En la figura 31 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para calcular en ángulo de desviación de la vertical. Una vez que el molinete se encuentra dentro del agua, el ángulo de desviación es calculado y enviado al módulo de control cada 500 milisegundos. El módulo de control calcula la corrección de posición por desviación de la vertical por medio del siguiente procedimiento (ver figura 38).

1. Al iniciar la medición de la dovela, el módulo de control inicia el contador de longitud.
2. Cuando el molinete toca la superficie del agua, el módulo de control almacena la lectura de longitud AE' y el ángulo ϑ' y reinicia el contador de longitud a cero.
3. El molinete se descende hasta tocar el fondo. En ese instante, el módulo de control almacena la lectura de longitud EF y el ángulo ϑ .
4. El factor de corrección k es calculado por el módulo de control a través de la ecuación 8.
5. La longitud corregida BC es calculada por el módulo de control por medio de las siguientes ecuaciones.

$$DE = AE' \left(\frac{\cos \theta'}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (16)$$

$$EF = DF - DE \quad (17)$$

$$BC = (1 - k) * EF \quad (18)$$

6. Al desplazar el molinete hacia arriba para posicionarlo en las profundidades de medición de velocidad, la posición del molinete es corregida automáticamente tomando la lectura de longitud EF y el ángulo ϑ de la posición actual y ejecutando los pasos 4 y 5.

Subrutina de calculo de ángulo de desviación.

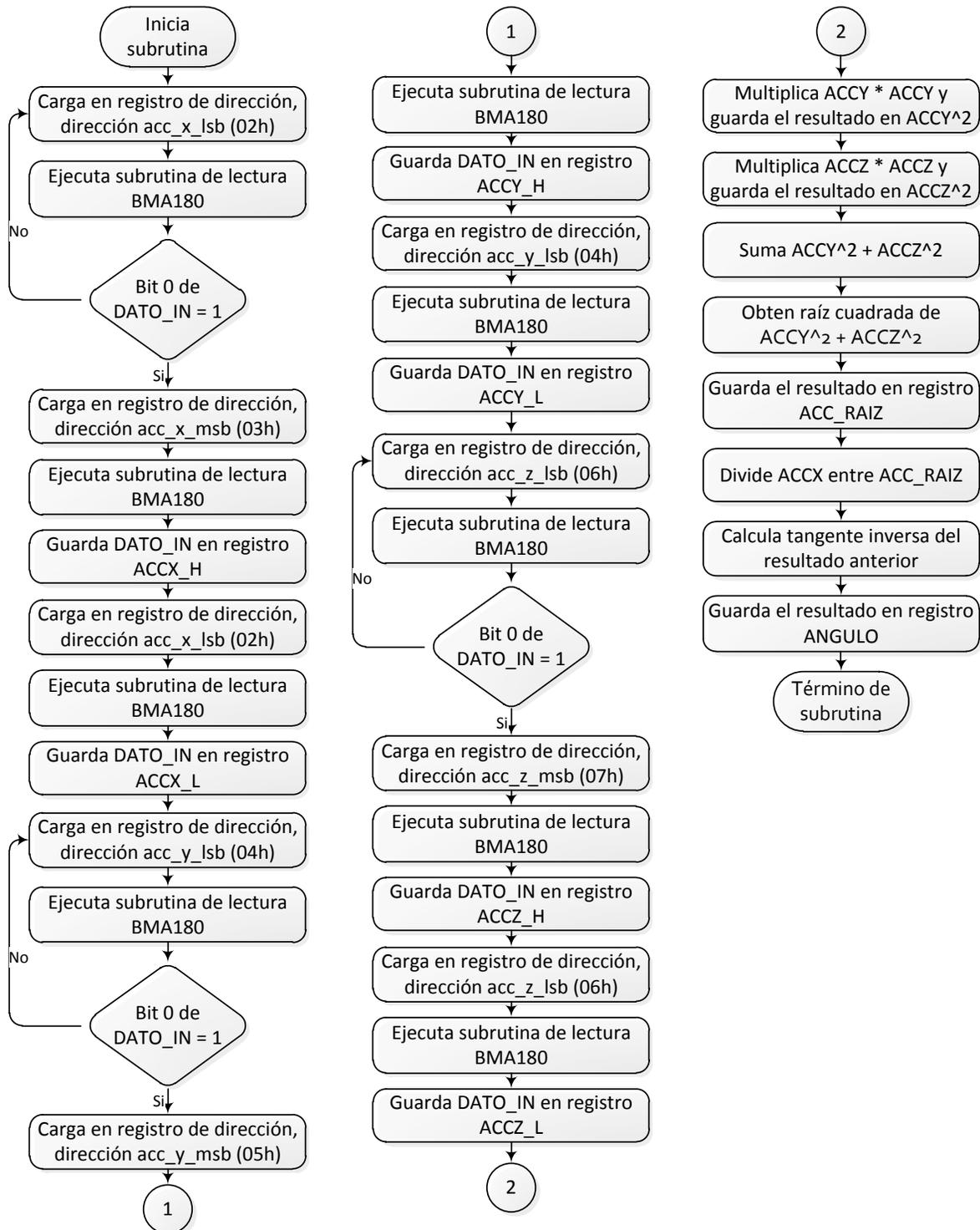


Figura 37. Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para cálculo del ángulo de desviación.

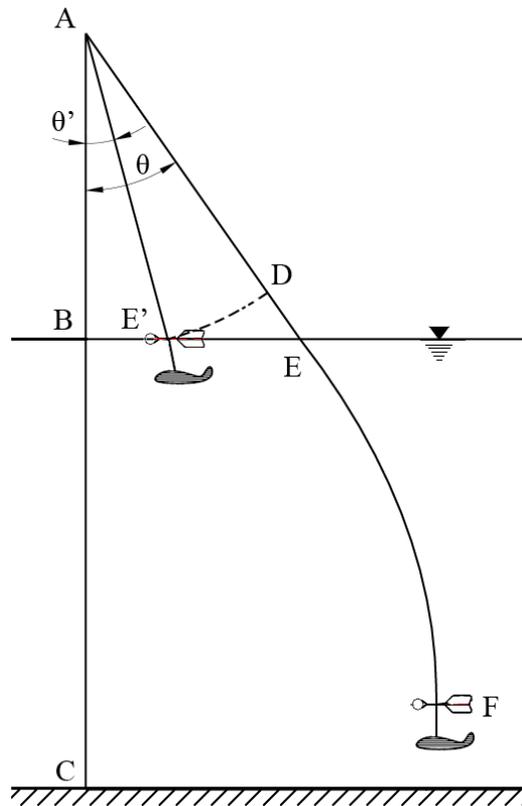


Figura 38. Corrección de posición del molinete por desviación de la vertical.

1.2.7 Rediseño y fabricación del PCB (tarjeta de circuito impreso) del módulo de sensores.

Con el objetivo de mejorar el funcionamiento de la EHI, se han realizado cambios en el firmware del módulo de control y en el caso del módulo de sensores, no solo se han realizado cambios en el firmware si no también se han agregado y rediseñado circuitos. Por tal motivo es indispensable el rediseño y construcción de una nueva tarjeta de circuito impreso para el módulo de sensores.

La construcción de esta tarjeta electrónica está basada en el diagrama electrónico "módulo de control" del apéndice. Un aspecto importante en la construcción de la tarjeta de circuito impreso son las dimensiones, ya que se debe tomar en cuenta que estará resguardada dentro del cuerpo cilíndrico del módulo de sensores (ver figura 4) Las dimensiones máximas para esta tarjeta son de 6 cm X 11 cm, por lo que es necesario fabricar un PCB de doble capa para el aprovechamiento de todo el espacio posible.

Para el diseño del PCB se utiliza el software Ultiboard de National Instruments. En la figura 39 pueden verse los patrones generados para la capa superior y posterior respectivamente.

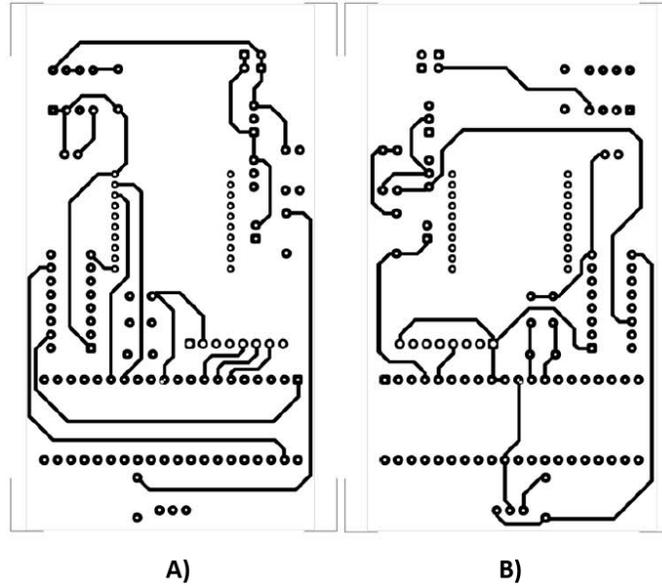


Figura 39. Patrones de PCB del módulo de sensores A) Cara posterior, B) Cara superior.

Una vez obtenidos los patrones se imprimen en hojas de transferencia térmica para PCB y se plasman en cada una de las capas de una placa de cobre de doble capa, se graban los patrones sumergiendo la placa en percloruro férrico, se limpia y perfora la placa para luego soldar los componentes y los puentes que conectan eléctricamente las capas conductoras del circuito impreso. Este proceso de fabricación de PCB se realizó en los talleres del laboratorio de hidráulica “Enzo Levi”. Sin embargo este procedimiento no es recomendado para una producción en grandes series debido a que lleva demasiado tiempo.

En la figura 40 puede verse la tarjeta electrónica fabricada con los componentes ya soldados. En ella se pueden apreciar las terminales de la batería, el detector de nivel de agua y el circuito de acondicionamiento de señal para la lectura de pulsos de molinete.

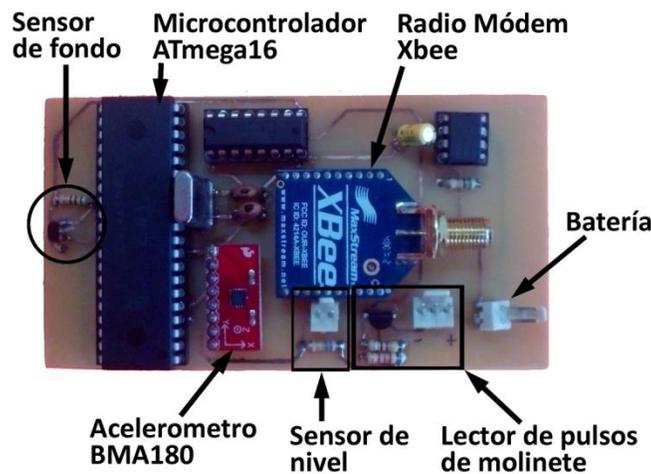


Figura 40. PCB del módulo de sensores.

Tanto el consumo de energía de la tarjeta electrónica del módulo de sensores, como la capacidad de entrega de carga de la batería, son cruciales para determinar el tiempo de operación del dispositivo, es por ello que se ha remplazado la batería del módulo de sensores por una batería con un alto rendimiento de 5.2V de litio ion y 9.2Wh, esta batería además de ser compacta posee una elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, puede operar con un elevado número de ciclos de regeneración.

1.2.8 Desarrollo de un registrador portátil de datos de aforo.

El registrador de datos de aforo (ver figura 41) es un dispositivo que se ha diseñado para recopilar las mediciones almacenadas en el módulo de control al termino de un aforo, fue construido por medio de la plataforma "Arduino UNO" y el escudo "Wireless SD". El escudo tiene incorporada una ranura para memorias SD y un zócalo que permite conectar directamente un radio modem "Xbee" al "Arduino".

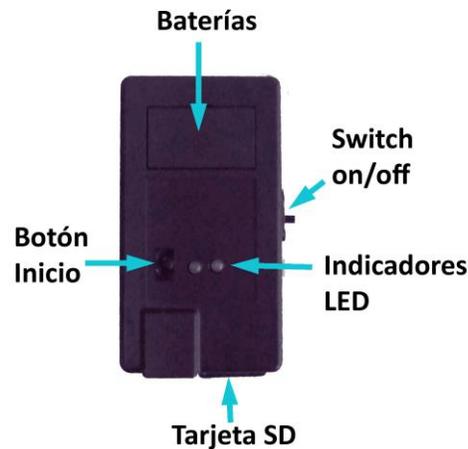


Figura 41. Registrador de datos de aforo.

Se ha diseñado y programado un algoritmo en la plataforma "Arduino" que permite descargar los datos de medición de la EHI de forma inalámbrica y crear automáticamente en una memoria SD un archivo de texto con todos los datos de aforo. Una vez terminado el proceso de aforo, el módulo de control muestra de nuevo la pantalla del menú principal. Para exportar los datos de medición al registrador de datos de aforo es necesario entrar en la opción "memoria de datos" (ver figura 42-1) del menú principal del módulo de control, con lo cual se mostrará una pantalla como la representada por la figura 42-2, al presionar la tecla 1, el microcontrolador del módulo de control redirección a el radio modem Xbee para enlazarse con el radio modem Xbee del registrador y organiza el bloque de memoria que será transmitido. Cuando la pantalla de la figura 42-3 es mostrada, es necesario que el registrador de datos de aforo esté listo para recibir los datos. Al encender el registrador se ejecuta una subrutina de verificación de la memoria SD (si existiera un error en la memoria SD el LED indicador encenderá intermitentemente en color rojo). El LED indicador encendido en verde señala que el registrador está listo para recibir los datos de la EHI. Basta con presionar el botón de inicio del registrador para que todos los datos de aforo de la EHI sean enviados inalámbricamente al registrador. Una vez que el

registrador ha recibido toda la información, este crea un archivo de texto en la memoria SD con todos los datos ordenados en forma de lista. El nombre del archivo de texto es construido a partir del número de aforo y las letras EHI (por ejemplo 00023EHI.txt), de esta forma se crea un archivo de texto por cada aforo. El encendido intermitente en color verde del LED indicador señala que el archivo ha sido creado satisfactoriamente, de lo contrario el LED indicador enciende intermitentemente en color rojo.

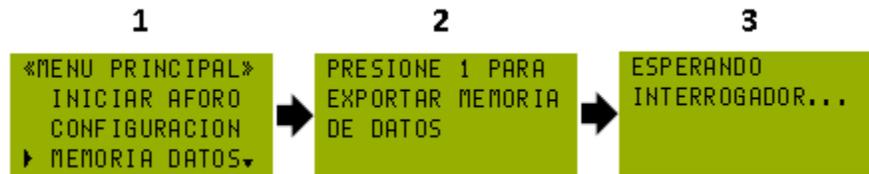


Figura 42. Pantallas para exportar mediciones al registrador de datos de aforo.

Con el registrador de datos es posible transportar la información del aforo realizado por la EHI sin la necesidad de llevar una computadora a campo, es posible almacenar archivos de diferentes aforos y de diferentes estaciones hidrométricas itinerantes con el mismo registrador, para posteriormente por medio de un software para una computadora leer estos archivos, realizar el cálculo del gasto y generar los reportes de medición de forma automática, de esta manera se pretende realizar un historial electrónico de cada estación hidrométrica.

En la actualidad se está trabajando en el diseño de un registrador de datos que sea capaz de mandar los archivos de texto con las mediciones a un servidor web por medio de la red de telefonía celular GPRS.

1.2.9 Desarrollo de una aplicación multiplataforma para cálculo de gasto.

Se desarrolló una aplicación multiplataforma (puede ejecutarse en Windows, Mac OS o GNU/Linux) por medio del entorno de desarrollo de aplicaciones C++ Builder 2009 con los siguientes objetivos: tener un registro adecuado de las mediciones, realizar de forma automática los cálculos según la norma ISO 748-1997 para la obtención del gasto total y generar reportes con las mediciones, resultados obtenidos y gráficos.

La aplicación desarrollada posee una barra de herramientas en la parte superior (ver figura 43) con 5 botones: botón “importar archivo” (1), “nuevo” (2), “calcular gasto” (3), “generar reporte” (4) y “imprimir reporte” (5). El botón “importar archivo” permite abrir una ventana de diálogo en la que el usuario puede seleccionar los archivos de texto de la memoria SD del registrador de datos de aforo. Al seleccionar un archivo de texto con los datos de aforo de la EHI, toda la información es extraída por la aplicación y ordenada en la tabla de la figura 43-9, donde se muestra por cada sondeo, el tirante, la velocidad medida en cada punto de la vertical y la profundidad de observación de cada velocidad medida. La ecuación del molinete utilizado es mostrada en los campos de la figura 43-8. El usuario debe llenar los campos que se muestran en la figura 43-7 con la información general de aforo (fecha, observador, estación, etc).

INFORMACIÓN GENERAL

FECHA: 22/03/2013
 OBSERVADOR: Maldonado Santiago José David
 ESTACIÓN: "Las Estacas"
 CORRIENTE: Río Amacuzac
 CUENCA: Río Yauatepec
 HORA DE INICIO: 14:50:40 LECT. ESC: 2.50
 HORA DE TÉRMINO: 15:51:31 LECT. ESC: 2.50

MOLINETE

m: 0.01215 ECUACIÓN $v = m * N + b$
 b: -0.00472
 MOLINETE:
 AFORO NÚMERO: 7

MÉTODO

RÍOS
 CANALES

DOVELA	TIRANTE[cm]	ANGULO	VEL [m/s]	PROF. DE OBSV.	ANGULO	VEL [m/s]	PROF. DE OBSV.	ANGULO	VEL [m/s]	PRC
1	184.8688	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	189.9536	1	0.11678	113.8632	1	0	0	0	0	0
3	194.8568	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	196.6728	1	0.12893	117.4952	1	0	0	0	0	0
5	228.9976	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	240.0752	1	0.16538	143.2824	1	0	0	0	0	0
7	252.9688	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	250.608	1	0.21398	150.1832	2	0	0	0	0	0

Figura 43. Pestaña mediciones de la aplicación para cálculo de gasto.

Para el cálculo del caudal es necesario introducir en la tabla de la figura 44-10 el ancho de cada sección, esto se realiza en la pestaña de resultados (ver figura 44). Al presionar el botón "calcular gasto" la aplicación calculará los gastos parciales y gasto total (figura 44-12). Los resultados, son tabulados (figura 44-11) y se muestran gráficas del perfil de la sección transversal (figura 44-14) y de la distribución de velocidades (figura 44-13). Mediante el botón "generar reporte" se genera automáticamente un reporte en formato PDF que contiene la información general de aforo, una tabla con todas las mediciones, los gráficos de la sección transversal y distribución de velocidades, la tabla de los cálculos parciales y el gasto total.

DATOS ADICIONALES

SECCIÓN	ANCHO(m)
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1

RESULTADOS

SECCIÓN	TIRANTE MEDIO[m]	ÁREA[m2]	VELOCIDAD MEDIA[m/s]	GASTO PARCIAL[m3/s]
1	1.899082	1.899082	0.11678	0.22177479596
2	2.043	2.043	0.12893	0.26340399
3	2.405292	2.405292	0.16538	0.39778719096
4	2.502902	2.502902	0.21398	0.53557096996
5	2.369426	2.369426	0.21398	0.50700977548
6	1.949476	1.949476	0.14108	0.27503207408
7	1.508642	1.508642	0.12893	0.19450921306

CAUDAL TOTAL [m3/s]: 2.5074778882

VELOCIDAD [m/s] vs **SECCIÓN [m]** (Graph 13)

PROFUNDIDAD [m] vs **SECCIÓN [m]** (Graph 14)

Figura 44. Pestaña resultados de la aplicación para cálculo de gasto.

1.3 Pruebas.

Se realizaron pruebas en el laboratorio “Enzo Levi” de cada una de las actividades desarrolladas en el proyecto, resultando todas satisfactorias. Por lo que se procedió a realizar una prueba de campo con el objetivo de comparar el caudal obtenido con la EHI y compararlo con el caudal obtenido con un ADCP.

Las pruebas de validación se realizaron en la estación hidrométrica "Las Estacas" la cual se localiza en el municipio de Tlaltizapan, Morelos y en un canal con sección trapezoidal aguas abajo de la estación hidrométrica. Como estructura para aforo en la estación hidrométrica se empleó una canastilla y en el caso del canal trapezoidal un puente ubicado en el cadenamiento 0+105. En ambas secciones se trabajó con 8 dovelas donde se realizaron mediciones de tirante y velocidad al 60 por ciento de la profundidad.

Para poder comparar los resultados obtenidos con la EHI se realizó un aforo en el mismo sitio con un perfilador acústico ADCP (AcousticDopplerCurrentProfiler) tipo “RiverSurveyor MG” (firmware 3.00, marca Sontek/ysi,USA) en modo dinámico, con rastreo de fondo (“Botton Tracking”). En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos en el río de las estacas y en el canal trapezoidal y en las figuras 45 y 46 se muestran las batimetrías obtenidas con ambos métodos.

En el río “las estacas” se realizó un aforo con el método tradicional con ayuda de un técnico aforador, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 8.

Resultados comparativos entre el aforo del ADCP y el obtenido con la EHI						
SITIO AFORADO	ADCP - TIRANTE MÁXIMO (m)	EHI - TIRANTE MÁXIMO (m)	ADCP - VELOCIDAD MÁXIMA (m/s)	EHI - VELOCIDAD MÁXIMA (m/s)	ADCP - GASTO PROMEDIO (m3/s)	EHI - GASTO PROMEDIO (m3/s)
RIO LAS ESTACAS	2,55	2,53	0,199	0,2	5,6	5,01
CANALLAS ESTACAS	1,51	1,53	1,006	1,12	5,43	5,79

Tabla 7. Cuadro comparativo de las pruebas de medición de gasto con el ADCP y la EHI.

Resultados comparativos entre el aforo obtenido por el técnico aforador y el obtenido con la EHI						
SITIO AFORADO	TIRANTE MÁXIMO (m)	EHI - TIRANTE MÁXIMO (m)	VELOCIDAD MÁXIMA(m/s)	EHI - VELOCIDAD MÁXIMA (m/s)	GASTO PROMEDIO (m3/s)	EHI - GASTO PROMEDIO (m3/s)
RIO LAS ESTACAS	2,53	2,53	0,31	0,2	6,821	5,01

Tabla 8. Cuadro comparativo de las pruebas de medición de gasto con el método tradicional y la EHI.

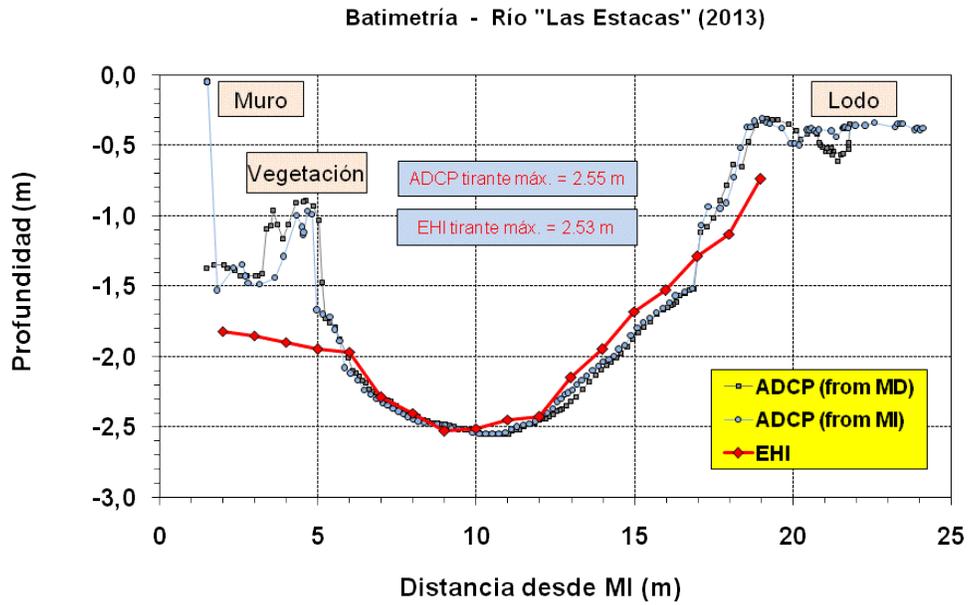


Figura 45. Comparación entre la batimetría obtenida con el ADCP y con la EHI en la estación hidrométrica "Las Estacas".

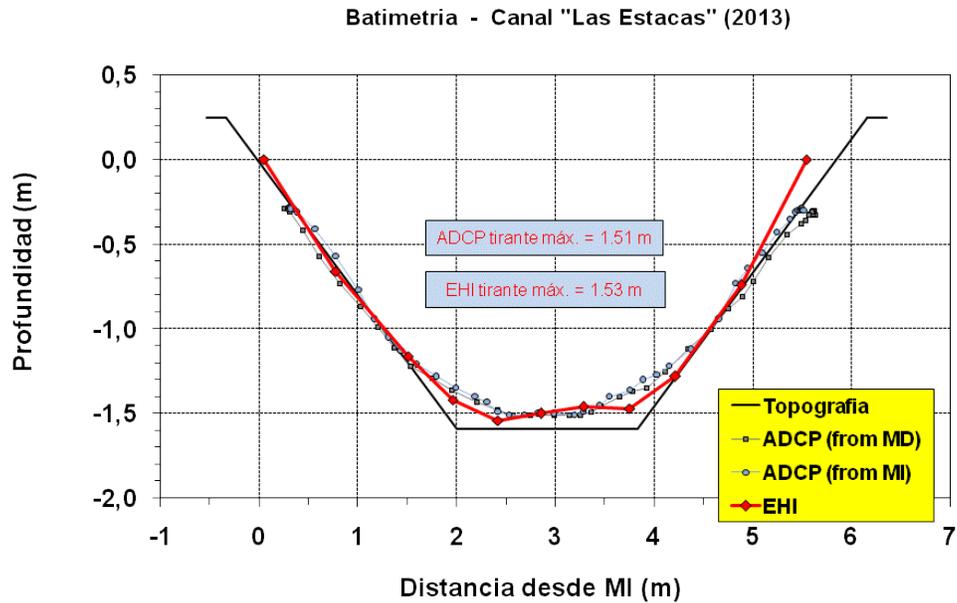


Figura 46. Comparación entre la batimetría obtenida con el ADCP y con la EHI en el canal trapezoidal.

1.4 Conclusiones.

El desarrollo de tecnología requiere de tiempo y de varias pruebas para hacerla llegar a la etapa final, buscando siempre perfeccionar el sistema. Es el usuario final quien decide si esta tecnología es la más adecuada para sus necesidades. Es por ello que es importante realizar una evaluación en los diseños del primer prototipo, tomando en cuenta en todo momento las necesidades del usuario.

Los sistemas de medición del prototipo fueron sometidos a pruebas de laboratorio y de campo, las cuales resultaron satisfactorias.

La siguiente etapa será una evaluación del usuario final (operador ó técnico aforador) quien dará el visto bueno al prototipo. De ser necesario se optimizaran los diseños de acuerdo a esta evaluación. En la actualidad el equipo tiene una patente en trámite previendo su posible comercialización.

A continuación se presenta la propuesta del documento de solicitud de patente denominado:

***“SISTEMA ELECTRÓNICO PARA DETERMINAR LA PROFUNDIDAD DEL MOLINETE-
ESCANDALLO, CUANDO HAY EFECTO DE ARRASTRE SOBRE LA LÍNEA DE
SUSPENSIÓN, EN AFOROS DE CONDUCCIONES ABIERTAS”.***

SISTEMA ELECTRÓNICO PARA DETERMINAR LA PROFUNDIDAD DEL MOLINETE-ESCADALLO, CUANDO HAY EFECTO DE ARRASTRE SOBRE LA LÍNEA DE SUSPENSIÓN, EN AFOROS DE CONDUCCIONES ABIERTAS.

Antecedentes de la invención

En los aforos o mediciones del caudal empleando molinete-escandallo suspendido con cable, desde una canastilla o un puente, el procedimiento normal de la medición del tirante en cada dovela y de la posición del molinete se hace con el mismo cable. Se ve afectada la medición de la longitud del cable por el empuje del flujo de agua cuando el contrapeso (escandallo) no es suficiente para mantener el cable en la vertical.

En campo, debe hacerse una corrección de longitud cuando el método de aforo empleado es molinete-escandallo, suspendido desde un puente o una canastilla sobre una corriente de agua (de la cual se pretende determinar el caudal o gasto), que pueda ejercer un arrastre considerable del arreglo molinete-escandallo, sacando de la vertical al cable de suspensión (o línea de suspensión). Esta corrección sobre la longitud del cable es necesaria, pues normalmente con el mismo cable con que se suspende el molinete-escandallo, se efectúa la medición del posicionamiento del molinete dentro de la corriente de agua, a fin de determinar la velocidad del flujo en dicho punto; ya que según el método de aforo empleado, en cada dovela o sección de medida se deberá posicionar el molinete al 80%, y/o al 60% y/o al 20% de la profundidad o tirante de la corriente de agua. Si el cable de suspensión se mantiene vertical, no es necesario corregir la longitud del cable. Si por efecto de arrastre de la corriente, el cable se desplaza hacia la dirección de la corriente de agua más de 10° y hasta 36°, entonces se requiere la corrección de la longitud que se ha medido del cable para posicionar el molinete dentro de la corriente de agua.

Para ángulos mayores a 36°, será necesario emplear un escandallo de mayor peso.

Experimentalmente se ha encontrado que de acuerdo a la profundidad del arreglo molinete-escandallo, el ángulo de arrastre varía, siendo éste mayor cuanto más profundo se tiene el equipo de medición. Por ello cuando el molinete es movido del fondo del cauce hacia la superficie, el ángulo de arrastre se hace menor. Esta variación no se toma en cuenta cuando se efectúa una corrección por el operador que lleva a cabo el aforo, pues regularmente hace un solo cálculo para la mayor profundidad encontrada y no para las profundidades intermedias. Esto también es por la dificultad que representa hacer estos cálculos y ajustes en maniobras de campo, y por el tiempo empleado, si se considera que estas correcciones deben hacerse para todas las secciones de medición o dovelas consideradas en la línea de aforo, perpendicular al cauce, en estaciones hidrométricas.

Objetivo de la invención

El objeto de esta invención, es:

Realizar la corrección continua de la longitud del cable de suspensión del arreglo molinete-escandallo, cuando al encontrarse el arreglo inmerso en el agua, el empuje del flujo lo arrastra en dirección de la corriente, lo que se manifiesta al sacar de la vertical al cable de suspensión, pues el cable de suspensión se emplea también para medir la posición del equipo de aforo dentro del flujo de agua.

Son objetivos de la presente invención:

- Determinar la profundidad correcta del molinete-escandallo cuando haya efecto de arrastre sobre la línea de suspensión.
- Determinar cuando el peso del escandallo no es suficiente para efectuar el aforo.

- Diseñar y construir un sistema electrónico que permita al usuario (técnico aforador) disminuir los tiempos de trabajo.
- Diseñar y construir un sistema electrónico que permita al usuario (técnico aforador) reducir considerablemente los errores de posicionamiento del molinete dentro del flujo de agua.

Breve descripción de las figuras

La estación hidrométrica itinerante auxiliar en operaciones de aforo con molinete vista en la figura No.1, se conforma de dos partes principales; la estación de control (1) y la estación de sensores (2).

En la figura No. 2 la estación de control se encuentra integrada por:

- Un teclado (3) y display (4) donde se introducen y visualizan los parámetros y mediciones respectivamente.
- Alarmas auditivas (5) que avisan al operador cuando el molinete se encuentra en la superficie del cauce, cuando el escandallo ha tocado el fondo del cauce y cuando el molinete se encuentra en un sesenta por ciento de la profundidad total.
- Un sistema de comunicación inalámbrica para enlazar con la estación de sensores sin la necesidad de cables (6).
- Un sistema de posicionamiento que consta de un mecanismo para enrollar y desenrollar un cable de acero en el cual se encuentra suspendido un molinete con su escandallo (dicho mecanismo se puede ver en la figura No. 3), este mecanismo es

accionado de forma manual por medio de una manivela (7) o puede ser un motor y cuenta con un sistema de autobloqueo (8) que evita el descenso no deseado de la carga, además el sistema cuenta con sensor tipo encoder (9) para determinar la posición vertical del molinete.

La estación de sensores mostrada en la figura No. 4 se conforma de:

- Un sistema de comunicación inalámbrica para enlazar con la estación de control sin la necesidad de cables (10).
- Un sensor de conductividad que determina la superficie del cauce y se conecta en la parte (11).
- Un sistema de conteo electrónico que determina las revoluciones por minuto de un molinete (12).
- Un sensor de contacto con el fondo que determina cuando el escandallo ha tocado el fondo (13).
- Una capsula hermética sumergible la cual tiene como propósito proteger los elementos electrónicos del agua (14).

Descripción detallada de la invención

La invención aquí presentada integra diversos sensores electrónicos para medir la inclinación del cable o línea de suspensión tomando como referencia la vertical y por medio de un software procesa los datos en tiempo real y con una frecuencia tal que permite medir longitud del cable y corregirla de acuerdo con la variación de la relación longitud - ángulo de arrastre, al ser posicionado el molinete-escandallo en diferentes profundidades para efectuar el aforo de la corriente.

El dispositivo efectúa la corrección si el cable de suspensión se sale de la vertical para un ángulo mayor de 10° respecto de la vertical y hasta no más de 36° .

El dispositivo realiza la corrección continua (iterativamente) de la longitud del cable o línea de suspensión del molinete-escandallo, cuando las condiciones de aforo, no se pueden mejorar con un contrapeso mayor (escandallo).

El dispositivo permite al operador medir el tirante de agua, empleando la longitud corregida del cable que ha sido desplegado, eliminando el error en longitud que pudiera cometerse si no se detecta la diferencia de la longitud del cable.

De esta forma el dispositivo permite alertar al operador de:

- a) la posición del molinete dentro del flujo de agua, corrigiendo electrónicamente la desviación de la vertical que sufre el molinete cuando por efecto del arrastre de la corriente, el despliegue del cable es mayor que la profundidad real (corrige la medición de la longitud del cable permitiendo posicionar el molinete en la profundidad adecuada)
- b) que el escandallo empleado es insuficiente (en peso), al detectar una inclinación mayor de 36° .

Los dispositivos electrónicos empleados integralmente son:

- 1.- Dispositivo electrónico medidor de inclinación respecto de un plano vertical.
- 2.- Dispositivo electrónico medidor de longitud del cable desplegado, en cuyo extremo se encuentra el arreglo molinete-escandallo.
- 3.- Dispositivo electrónico para el despliegue de información
- 4.- Dispositivo electrónico para almacenamiento de información.

REIVINDICACIONES

El sistema se encuentra caracterizado por:

Dispositivo medidor de inclinación del cable
Aplicación a la corrección de longitud del cable

1. Un sistema de posicionamiento y medición de profundidad.

Este se encuentra integrado por tres sensores que son el de superficie de agua por conductividad (este se conecta en el conector (11) que se encuentra ubicado en la estación de sensores), el sensor de profundidad al contacto con el fondo conformado por un mecanismo de vástago con resorte diseñado para accionarse dentro de la estación de sensores (14), y otro sensor encoder tipo incremental (9) que en conjunto permiten conocer la profundidad en la que se encuentra el sistema para posicionarlo en don donde se lleven a cabo cada una de las mediciones. El sistema de posicionamiento es accionado mediante una manivela (o puede ser un motor) a través de un reductor que cuenta un mecanismo de auto bloqueo calculado para evitar el descenso no deseado de la carga.

2. Un sistema trasmisor inalámbrico de datos hermético.

El sistema está conformado, por una parte de programación en un sistema electrónico de comunicación inalámbrica de dos nodos, en el nodo 1 (colocado en la estación de control) que se encarga de enviar comandos para que sean ejecutadas cada una de las instrucciones que se llevaran a cabo en todo el procedimiento aforo con molinete así como la capacidad de interpretar mediante algoritmos programados las señales recibidas por el nodo 2 (colocado en la estación de sensores) para llevar a cabo la medición de tirante, velocidad y posición del sistema escandallo molinete.

Se hizo necesario un diseño a prueba de agua en los sistemas electrónicos que forman parte del nodo 2, para evitar errores en las mediciones y daños permanentes en los circuitos. Con tal fin se realizó el diseño de un contenedor hermético dentro de la estación de sensores (ver Figura 4) para alojar las tarjetas electrónicas.

Tanto para el sensor de conductividad que se tiene que encontrar referenciado al molinete como para el sensor generador de pulsos que se encuentra en el molinete se hicieron dos sondas que permiten conectarse a la estación de sensores.

3 Sensor de superficie de agua.

El principio de funcionamiento del sensor de superficie de agua por conductividad es el siguiente: cuando el sensor entra en contacto con un medio líquido se genera una corriente eléctrica entre los electrodos, la cual provoca el cierre del circuito, esta señal es captada por el micro controlador de la tarjeta electrónica del nodo 2 que se encuentra en la estación de sensores y es transmitido por RF un carácter que anuncia a la estación de control que ha ocurrido este acontecimiento.

4 Sensor de toque de fondo.

Como se menciono anteriormente el sensor de profundidad al contacto con el fondo es un mecanismo de vástago con resorte construido para accionarse dentro del contenedor sumergible y conformado por un sensor de efecto hall que es activado mediante un imán colocado en el embolo, el embolo permite aleja al iman del sensor cuando hay carga (escandallo molinete) mientras que lo acerca cuando la carga toca el fondo debido al resorte.

Resumen

El presente invento comprende el diseño y la construcción de un dispositivo estación hidrométrica itinerante auxiliar en operaciones de aforo con molinete, con el propósito de ayudar a los aforadores a reducir los tiempos de medición y obtener medidas confiables, se dividió el sistema en dos partes principales la estación de sensores y la estación de control,

El presente invento está caracterizado porque consta de un sistema de posicionamiento y medición de profundidad, un sistema transmisor inalámbrico de datos hermético, un sensor de superficie de agua, y un sensor de toque de fondo así como los programas ejecutados en las tarjetas electrónicas ubicadas en cada una de las estaciones que facilitan la transmisión libre de cable, la interpretación de cada señal de los sensores y el almacenamiento de la información obtenida.

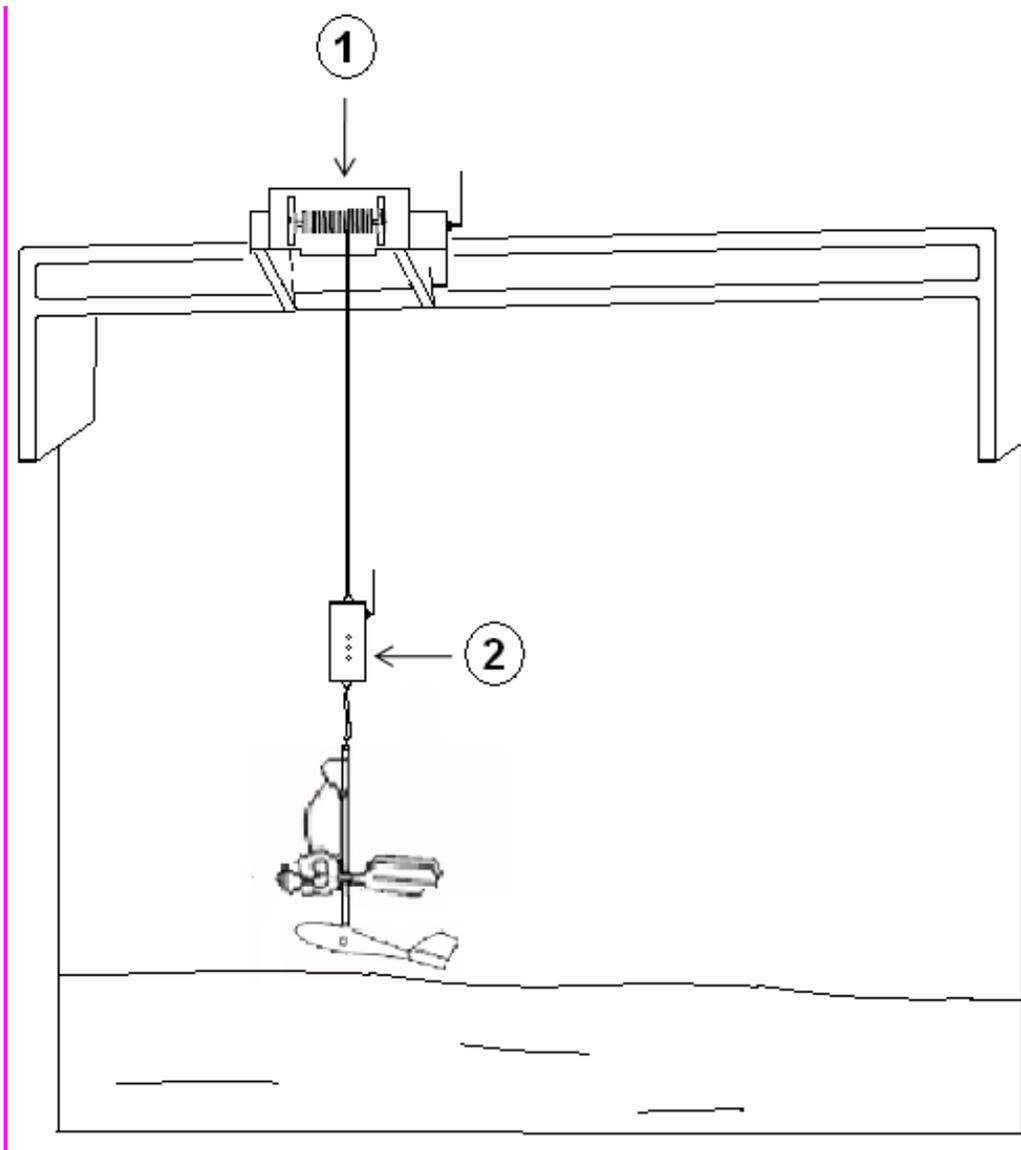


Figura 47

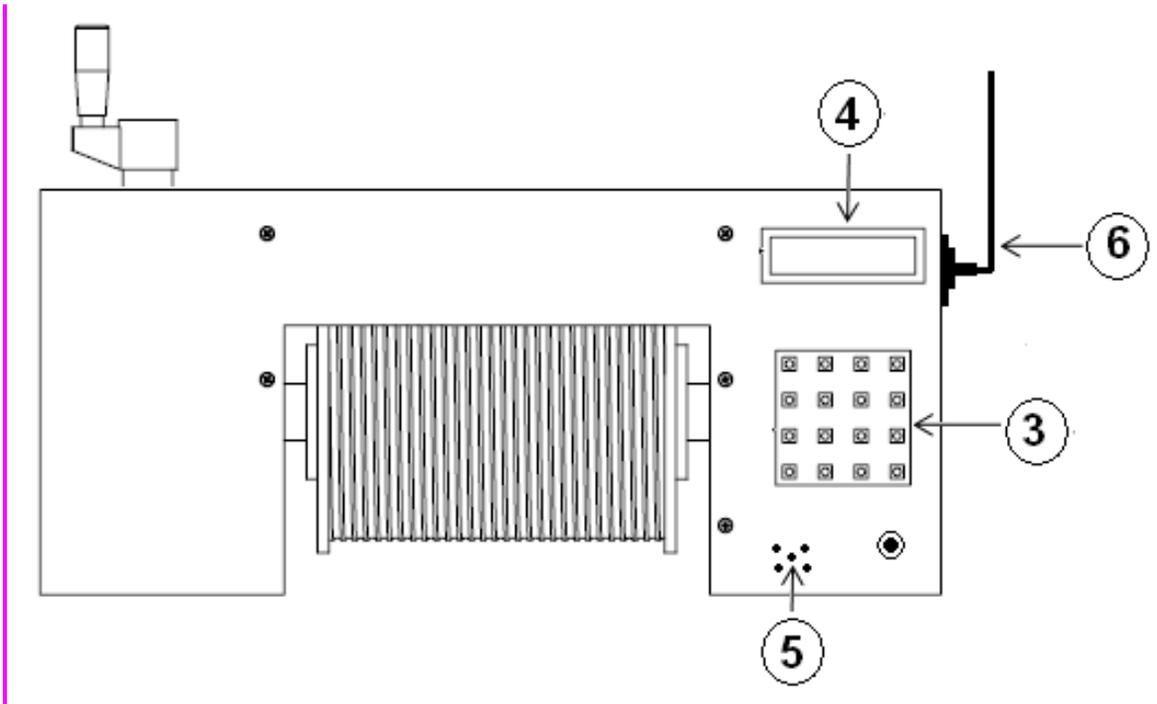


Figura 48

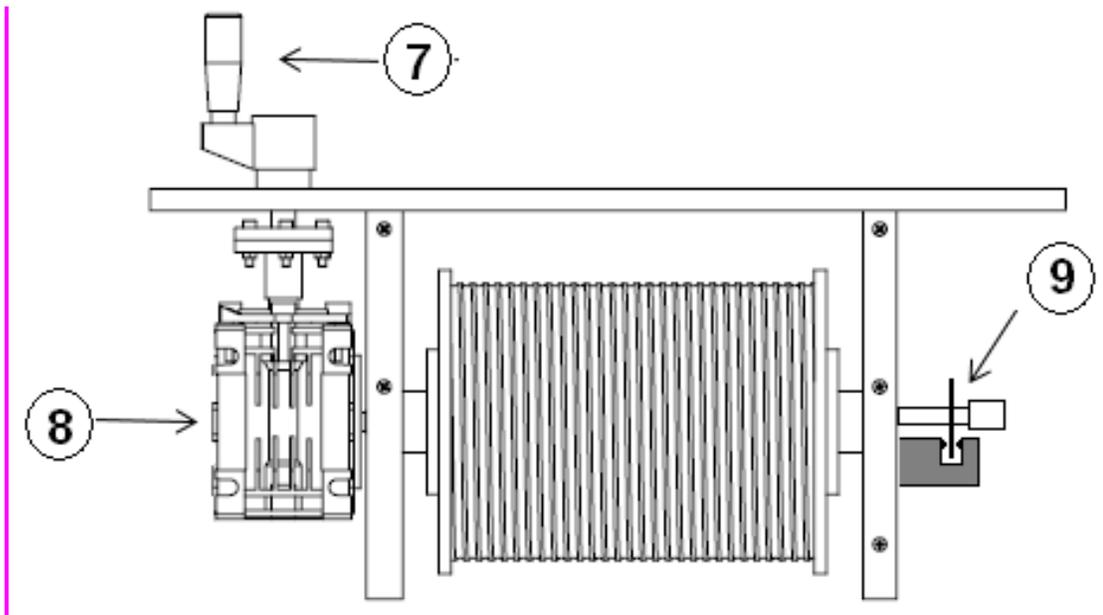


Figura 49

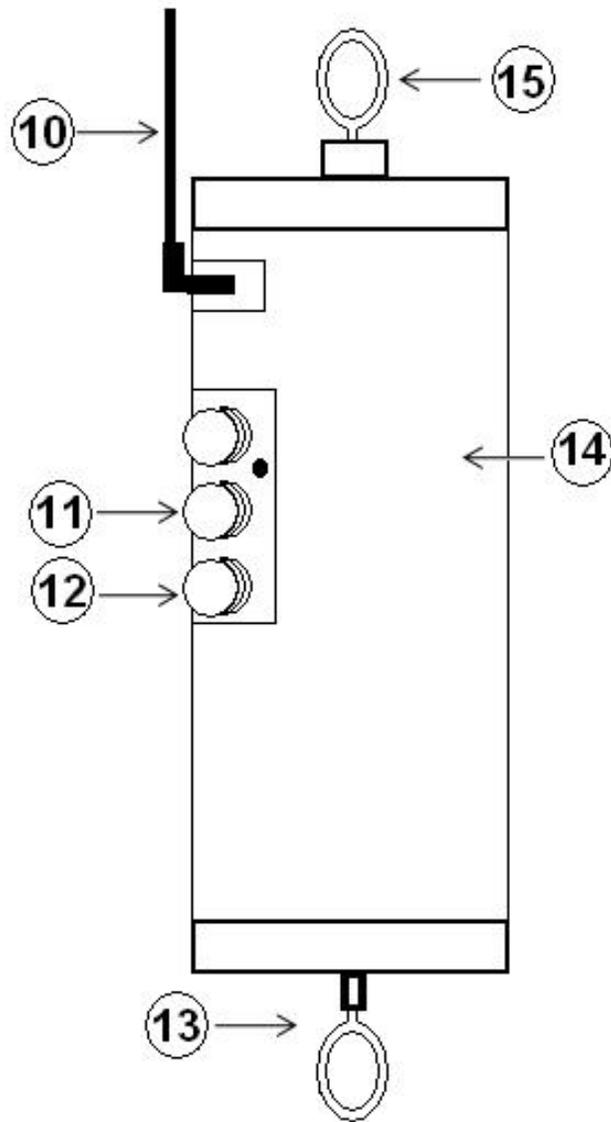


Figura 50