

## SISTEMA DE MEDICIÓN Y REGISTRO AUTÓNOMO DE VARIABLES ASOCIADAS A MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS.

S. Garassino<sup>1</sup>, R. Korpys<sup>2</sup>, G. Fernández<sup>3</sup>

Grupo de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Electrónica (GID-IE) – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Misiones (UNaM) – C.P. 3360 – Oberá – Misiones - Argentina  
Tel. 03755-422169 – Fax 03755-422170 e-mail: garassino@fio.unam.edu.ar

**RESUMEN:** En el presente trabajo se exponen los resultados de un proyecto de investigación destinado a desarrollar un sistema de medición y registro autónomo de variables asociadas a microcentrales hidroeléctricas. Para la determinación del punto óptimo de funcionamiento de una microcentral hidroeléctrica (MCH) es necesario contar con información de parámetros ambientales, físicos, mecánicos y eléctricos, que permitan caracterizarla en forma confiable. El principal objetivo de este trabajo, es desarrollar un sistema de medición y registro de las principales variables asociadas a una MCH; que sea autónomo, económicamente viable y tecnológicamente apropiado. Se presenta un sistema distribuido de controladores y un sistema central, que permite a través de diferentes transductores primarios; medir y registrar las principales variables relacionadas a la operación de una MCH. La implementación se realizó con componentes de alcance local y costo accesible.

**Palabras clave:** Microcentral hidroeléctrica, medición, registro, economía, accesibilidad de componentes.

### INTRODUCCIÓN

Una microcentral hidroeléctrica es una fuente de generación de energía renovable alternativa (Perujo et.al; 2003), con mínimo impacto ambiental en su entorno. Presenta dependencia funcional asociada a factores tales como: ubicación de la misma, fenómenos climáticos, constructivos, de demanda de energía y calidad de servicio. En el momento del diseño de una MCH se efectúan distintas suposiciones, dado que en la mayoría de los casos no se cuenta con información previa científicamente relevada de la influencia de su locación y de otros factores externos; por lo cual, no se logra en primera instancia, la operación óptima de la MCH.

Las microcentrales son de baja potencia de generación (<100 kVA) y requieren, para ser competitivas, bajo costo de operación y mantenimiento; por lo cual se las diseña para funcionar en forma autónoma. Generalmente se ubican en lugares apartados de poca población, no se encuentran interconectadas a un sistema mayor, y las operaciones y mantenimiento mínimos se reservan a lugareños. Para poder perfeccionar la operación de una MCH ya construida y actuar en consecuencia, es necesario contar con información del valor de variables relacionadas a la misma, registradas en forma confiable.

La Facultad de Ingeniería de la UNAM, ubicada en la ciudad de Oberá, Provincia de Misiones, posee una larga trayectoria en diseño, instalación y automatización de MCH; habiendo instalado un número importante de unidades en varias provincias, tales como Misiones, Neuquén y Salta; desarrollando y transfiriendo know-how al medio. De esta forma, se cuenta con un equipo interdisciplinario, en condiciones para llevar adelante el proyecto, instalación y operación de MCH. La Facultad actualmente opera en forma automática la MCH denominada “Tigre”, ubicada en la localidad de Campo Ramón, distante unos 15 km de la ciudad de Oberá. Docentes-investigadores han diseñado, construido, mantenido y operado esta MCH hasta la fecha, estando operativa por más de 10 años. Existe un convenio con la Cooperativa Eléctrica de Oberá (C.E.L.O), para la inyección de la energía proporcionada por la MCH “Tigre” al sistema interconectado y de esta forma poder solventar parte de lo consumido por la propia Unidad Académica. La potencia pico entregada es del orden de los 80 kW; siendo muy dependiente del régimen pluvial. Por lo expuesto, esta central se convierte en un ambiente de experimentación y desarrollo propicio para este proyecto, involucrando a docentes-investigadores y alumnos que comienzan con actividades de investigación en la problemática del desarrollo de energías alternativas, sustentables y tecnologías apropiadas.

El principal objetivo del proyecto en curso es medir y registrar metodológicamente los valores de las principales variables relacionadas a una MCH a lo largo del tiempo, de forma autónoma y con mínima intervención humana. Para ello se desarrolló un sistema de controladores electrónicos distribuidos, de medición y registro local; y un sistema de almacenamiento de datos central.

### ANTECEDENTES, CONDICIONES Y VARIABLES

Dado que no existe una bibliografía específica sobre la temática abordada, los principales antecedentes tenidos en cuenta corresponden a los informes y publicaciones correspondientes a los trabajos de investigación, desarrollos y experiencia de la Unidad Académica, en el área. En los desarrollos de micro-aprovechamientos hidroeléctricos efectuados por la Facultad de Ingeniería de Oberá, la medición, y registro de las variables más críticas, y las acciones de control; ha sido implementada a través de equipos comerciales que miden variables eléctricas (tipo Power Logic) y controladores lógicos programables (PLC). Otras variables, que hacen a la operación eficiente de una MCH, directamente no son consideradas. La principal

<sup>1</sup> Decano de la Facultad de Ingeniería, Docente e Investigador de la UNaM.

<sup>2</sup> Director del Departamento de Electrónica, Docente e Investigador de la UNaM, miembro de la IEEE.

<sup>3</sup> Docente e investigador de la UNaM.

dificultad que se presenta, es la cantidad de variables involucradas y la posibilidad de ocurrencia de un número importante de eventos de distintas características: eléctricos, atmosféricos, mecánicos, etc; a ser registrados. Por tal motivo resulta conveniente diseñar un sistema en base a microcontroladores que sea a su vez económico y flexible, en el sentido de poder adaptarse a través de la programación, a las características de la gran variedad de parámetros y de situaciones de funcionamiento.

De acuerdo al relevamiento realizado, las principales variables a medir y registrar son:

- Cantidad de precipitaciones pluviales en la zona (en mmH<sub>2</sub>O por período analizado).
- Potencias eléctricas en juego: activa, reactiva y aparente ( en kW, kVAR y kVA ).
- Valores de tensión generados ( en V ).
- Frecuencia de la tensión generada ( en Hz ).
- Nivel de agua del embalse ( en m, o equivalentemente presión de entrada a la turbina ).
- Nivel de vibración del generador ( en m<sup>2</sup>/s ).
- Valores de corrientes entregadas ( en Ampere ).
- Volumen de agua turbinada ( en m<sup>3</sup> ).
- Total de energía eléctrica generada ( en kW-h ).
- Coseno fi ( coseno del ángulo de desfase entre la tensión y corriente ).
- Temperaturas en distintas partes de la microcentral ( en °C ).
- Humedad Ambiente ( %H relativa ).
- Velocidad de rotación del generador ( en revoluciones por minuto o RPM ).
- Precipitaciones pluviales ( en mm).

Las cuales presentan sustanciales diferencias a la hora de la medición y el almacenamiento. Por ejemplo, la cantidad de precipitaciones pluviales en la zona, no requiere de un registro segundo a segundo, sino un promedio diario. A la inversa, el registro de la frecuencia de la tensión generada, en el caso de una microcentral aislada, requiere de un registro instantáneo; por lo que resulta necesaria la adecuación de un intervalo de muestreo y registro diferente, en función de cada variable medida.

En cuanto a la normativa, no existe una específica para las microcentrales, pero se aplican múltiples que se encuentran dispersas entre diversas áreas, desde normas relacionadas a seguridad; como eléctricas y civiles. Para cada una de estas variables se recopiló información sobre características de las mismas, unidades de medidas, formas y aparatos de medición, normas y reglamentaciones asociadas a las variables (ver referencias). En base a esta recopilación, se determinaron los transductores primarios para convertir cada parámetro a una señal eléctrica equivalente.

#### **JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA**

Con el avance de la tecnología, se tiende a realizar mediciones y registros de forma distribuida (Dochain, D et. al;2003). Resulta la elección natural, en procesos que requieren de muy distinta velocidad de atención, como es este caso. Por otra parte, dado que las distintas variables también se encuentran espacialmente separadas, pudiendo estimarse el ámbito cercano a una MCH en el orden de 1 km<sup>2</sup>; se procede a realizar la conversión localmente y muy próxima a cada fuente de información; transformando la señal analógica medida a un formato digital establecido. Además, la adopción de la distribución del procesamiento de variables, trae como consecuencia un aumento significativo de la denominada relación señal/ruido, considerando que los procesos clásicos de transmisión de señales analógicas poseen un bajo nivel de rechazo a las interferencias. Atendiendo a éstas cuestiones generales, se implementó la solución propuesta, consistente en un controlador local para cada variable, con su respectivo transductor primario, acondicionamiento de señal, procesador de señales específico, en función de sus características y conversión del valor de la variable a digital. Cada controlador se comunica con un sistema de registro central, implementado a través de una PC, para la transmisión del valor digitalizado. Un esquema de esta red se presenta a continuación, en la figura 1.

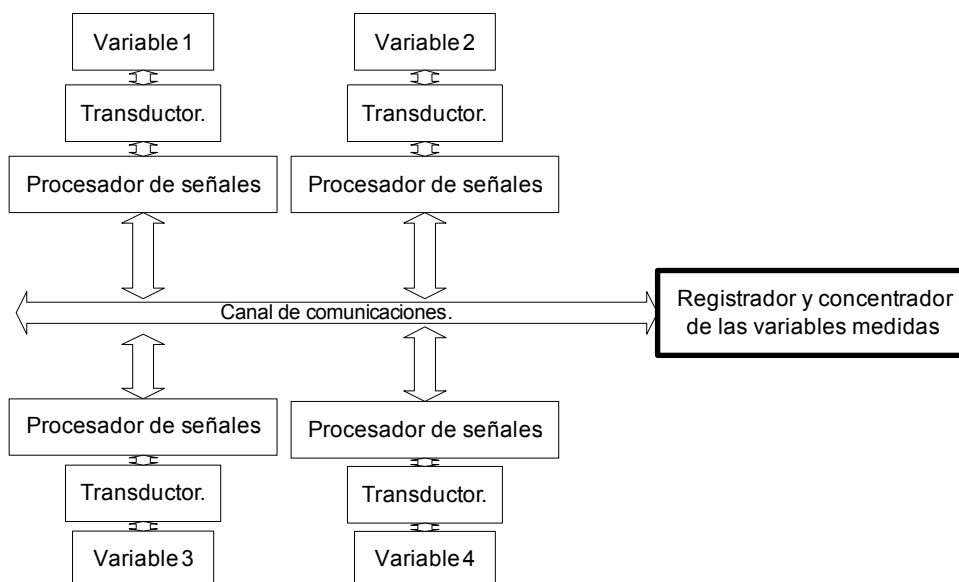


Figura 1. Esquema general desarrollado.

A continuación se describe un ejemplo concreto, a través del cual se visualiza la solución propuesta:

Se mide mediante un transductor de presión basado en el principio de deformación mecánica de dos resistores eléctricos situados en un puente, la presión de columna de agua del reservorio de agua. Esta presión es proporcional al nivel de líquido del reservorio, indicando de forma indirecta el volumen de agua total disponible para ser convertido en energía eléctrica por el conjunto turbina-generador. La señal eléctrica de este transductor es acondicionada eléctricamente mediante amplificadores, correctores de escalas y filtros analógicos. Luego es convertida al dominio digital por medio de un conversor analógico-digital (A/D). A continuación se la trata mediante un procesador digital de señales, el cual se encarga del filtrado digital, formateado de unidades, manejo de la transmisión-recepción de información, etc. Un bloque denominado transmisor-receptor realiza el proceso de adecuación del formato físico entre el canal de comunicaciones y el procesador de señales. Sobre el canal de comunicaciones se trasladan los datos de las variables medidas al concentrador-registrador de datos. En la figura 2 se incluye un diagrama en bloques que describe este ejemplo.

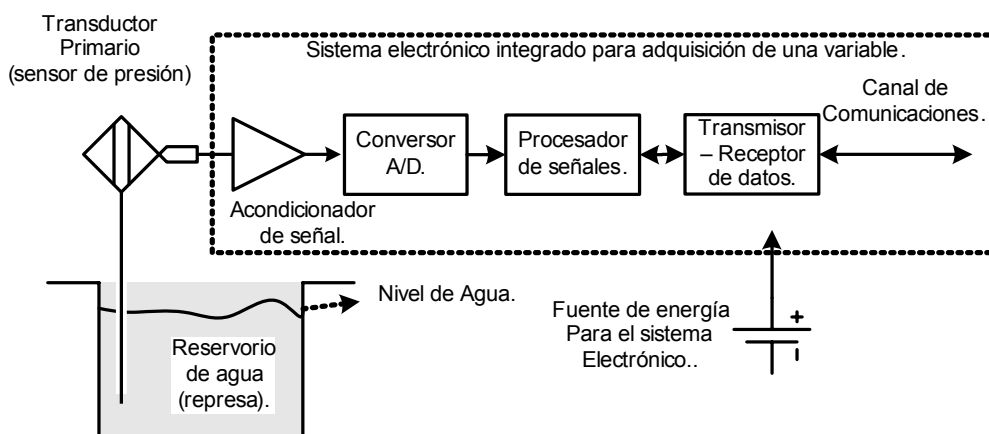


Figura 2. Esquema del procesamiento de una variable.

Se han especificado las características funcionales que deben cumplir cada uno de los bloques que conforman el esquema de funcionamiento de esta variable tomada como ejemplo, y de cada una de las seleccionadas como más relevantes. Para la implementación, se puede optar por hardware provisto por distintos fabricantes; adoptándose como criterio de selección su disponibilidad en el mercado electrónico nacional y costo accesible. Otro criterio considerado ha sido el de reducir el consumo energético de cada controlador.

Cabe resaltar el caso del acondicionador de señal, por su dependencia de cada variable. Se han especificado las características funcionales de los acondicionadores para cada caso. Constructivamente, se han implementado con electrónica convencional, manteniendo el consumo de energía por debajo del Vatio.

El costo de producción de cada módulo controlador es del orden o menor a los cincuenta dólares americanos. Es de carácter genérico y la única etapa que debe adecuarse a una variable particular dada, es el acondicionador de señal. La fuente de energía que alimenta al sistema electrónico puede ser de diverso tipo: baterías, acumuladores o celdas solares. En el caso de la adquisición continua de una variable, debe ser del tipo ininterrumpible.

Cada módulo requiere de una programación (software) adecuado al valor de la variable medida. La programación se realizó con herramientas basadas en software libre.

Para el registro principal de todos los valores de las variables, se ha optado por un sistema concentrado basado en una PC. Esto permite una reducción del costo total, y mantener temporalmente correlacionadas a todas las variables medidas. Posee una memoria no-volátil en la cual se almacenan y registran los valores obtenidos. No se pretende que el análisis de los valores relevados se efectúe en este sistema de registro. Es la intención tomar el registro de este sistema y llevarlo a un lugar más adecuado para su posterior análisis. Es capaz de gestionar al canal de comunicaciones, ordenando las transacciones del mismo, fijar el ritmo de muestreo de cada variable y determinar si se ha producido una falla en algún sensor. Para cumplir con este cometido, se ha optado por utilizar una PC de las denominadas notebook, con un sistema operativo linux instalado, un canal de comunicaciones del tipo serial, una memoria no-volátil del tipo SD-card. 6 celdas y un cargador de baterías.

En cuanto a las comunicaciones a nivel de enlace y red, los protocolos que han sido investigados no contemplan las necesidades de este proyecto: algunos son muy complejos para ser instalados en microcontroladores de propósitos generales, con cantidad de memoria acotada y bajo consumo de energía, como el denominado stack de TCP/IP y otros son muy elementales o anticuados. Es por ello que se ha propuesto un protocolo ad/hoc específicamente diseñado. Con el mismo se logra compatibilizar tramas de datos cortas, que sean fáciles de interpretar por todos los actores involucrados. Por otra parte, las especificaciones finales del protocolo de comunicaciones son independientes del hardware y el software a utilizar.

Siguiendo estos criterios, se ha especificado el formato de los datos que atraviesan el canal de comunicaciones bidireccional. Es un estándar ad-hoc diseñado al efecto, en función de la limitada capacidad de procesamiento del sistema integrado para la adquisición de una variable. Es un compromiso entre simplicidad de manejo por parte del concentrador y los módulos de procesamiento de las variables. En la figura 3 se aprecia el formato de una trama típica.

Estructura de una trama.

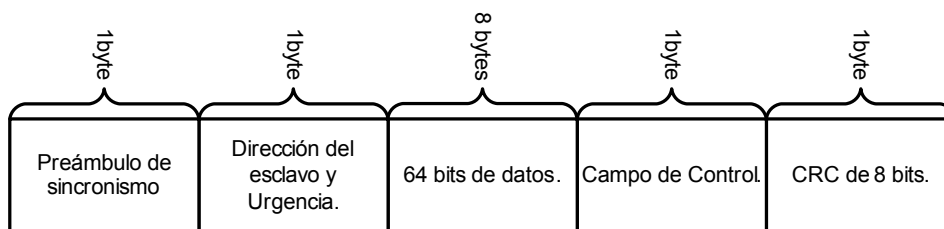


Figura 3. Formato de una trama.

El formato de esta trama es bidireccional. Se transmite desde los procesadores de señales, como desde el registrador y concentrador de las variables medidas. El que inicia las comunicaciones es el concentrador. Los procesadores de señales responden a su consulta.

## DESARROLLO

La fotografía de uno de los prototipos electrónicos desarrollado, diseñado y construido en nuestro laboratorio, se presenta en la figura 4. En él se concentra todo el sistema integrado para la adquisición de la variable tomada como ejemplo anteriormente, nivel de agua del reservorio, como se indica en la figura 2.

No se incluye en el prototipo el sensor de presión que se ubica en el reservorio de agua y la fuente de energía. A nivel físico, el canal de comunicaciones es del tipo RS485, con una velocidad de transmisión de 115200 baudios. El convertor A/D, el procesador de señales y el transmisor-receptor de datos se encuentran en un solo chip electrónico ubicado próximo al centro de la fotografía. En este caso se trata de un microcontrolador modelo MC68HC908AP32 ([www.freescale.com](http://www.freescale.com)). Se han fabricado tres prototipos idénticos y se los ha colocado en red, conectándolos al registrador-concentrador de datos mediante el canal de comunicaciones; para la realización de las pruebas de laboratorio. En dichas pruebas de laboratorio se simuló el comportamiento de las variables y se procedió a optimizar el diseño de hardware y software.

Según se mencionó, uno de los criterios adoptados es que la cantidad de energía consumida sea lo menor posible, para lograr la mayor autonomía posible. Los prototipos desarrollados requieren una cantidad de energía eléctrica continua reducida (menor que un vatio) y pueden alimentarse de una batería de 6 Voltios.

Se ha ensayado otro prototipo que requiere menos tensión (3 V) y energía, basado en un microcontrolador más moderno (de la familia HCS08). Este prototipo alternativo puede funcionar con dos pilas de 1,5 Voltios y consumir potencias del orden de los milivatios, permitiendo un funcionamiento autónomo de varios meses, sin cambio de fuente de poder.

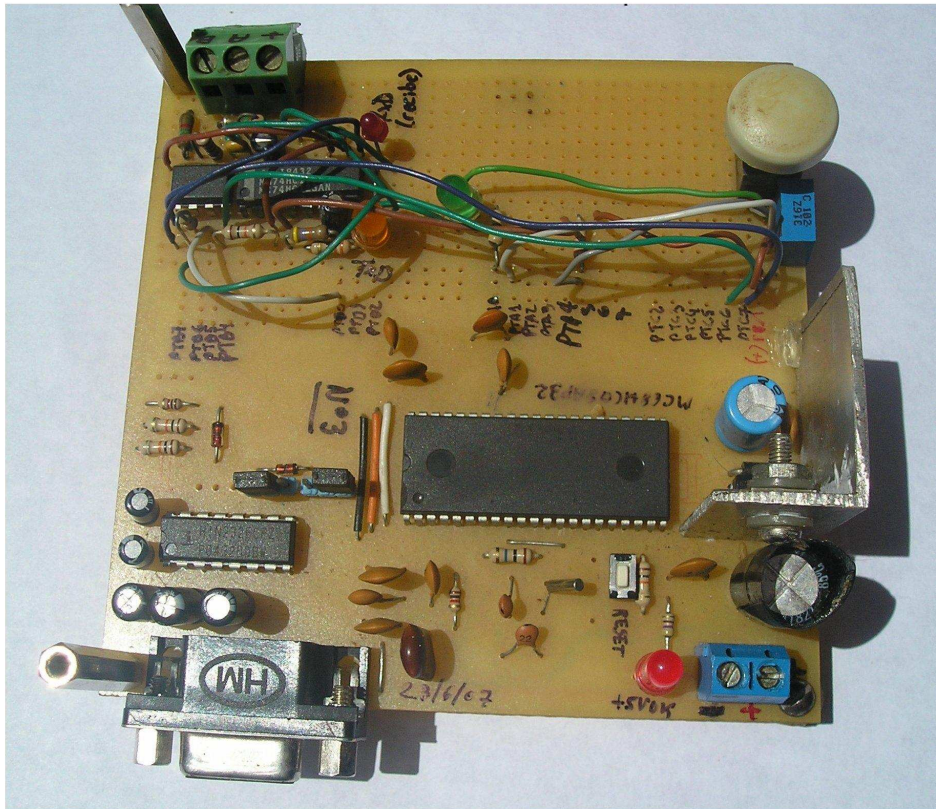


Figura 4. Fotografía de prototipo de un sistema electrónico integrado para el procesamiento de una variable.

Descripción del esquema de un prototipo:

El circuito se muestra en la figura 5. El componente principal es un microcontrolador modelo MC68HC908AP32 denominado IC1. Posee una unidad central de proceso de 8 bits, 32 kbytes de memoria tipo FLASH, 2 kbytes de memoria RAM, 8 conversores A/D de 10 bits, dos canales de comunicaciones seriales tipo UART implementados en hardware. El circuito IC2 sirve como interfase del tipo TTL-RS232, cuyo objetivo es permitir la programación de IC1 a través de un canal serie. El IC3 es un simple regulador de voltaje de 5V. IC4 se encarga de traducir niveles de norma RS485 a TTL y por la denominada borneral, se conecta a la red de comunicaciones global, juntamente con otros procesadores de variables. El bloque denominado circuito acondicionador de señal se ha colocado genéricamente aquí, y depende del tipo de variable a registrar. Por ejemplo, un conjunto de amplificadores operacionales que traduzcan una señal de 4-20 mA a 0-5V. Dentro de IC1 se realizan las funciones de conversión A/D, se procesa la señal y se formatea para ser transmitida por el canal RS485.

Las tramas de datos indicadas en la figura 3, circulan por el canal de comunicaciones de tipo RS485. Según esta norma, solamente un dispositivo conectado en este canal puede acceder al mismo. Es por ello que el concentrador de datos interroga a cada uno de estos prototipos, y éstos responden transmitiendo el valor medido y procesado de la variable conectada a él.

A cada uno de estos procesadores se le asigna una dirección de esclavo única y solamente responden cuando reciben tramas válidas dirigidas a ellos.

Cada sistema electrónico acondicionador de señal, puede medir más de una variable al mismo tiempo. Este es el caso de las mediciones de varias de las variables relacionadas a potencias, voltajes y corrientes entregadas por la MCH.

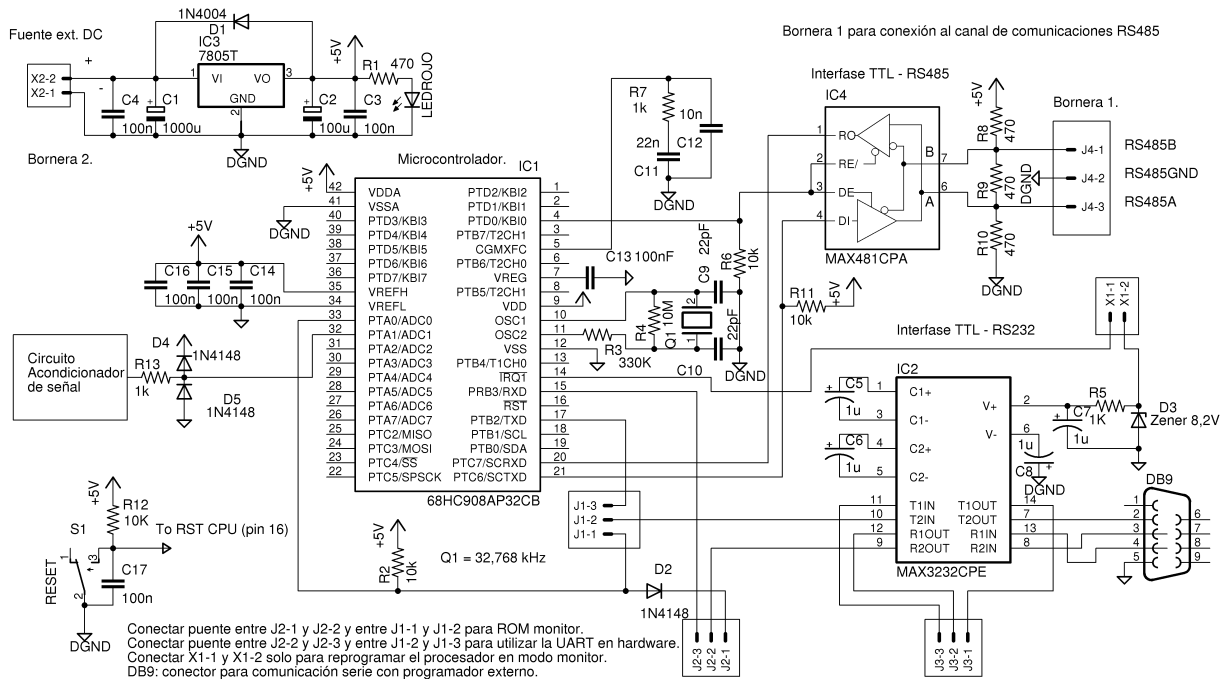


Figura 5. Plano eléctrico de un prototipo.

Utilizando el lenguaje fuente de un compilador para lenguaje "C" gratuito descargado de [www.sdcc-sourceforge.com](http://www.sdcc-sourceforge.com); que se compiló para trabajar en un host con un sistema operativo linux instalado, se realizó la programación de los prototipos de los procesadores de señales. Éstos módulos responden a interrogaciones periódicas del concentrador y base de datos, ubicados físicamente en otro lugar.

Esta red de comunicaciones alámbrica puede extenderse hasta distancias de 1,5 km. Los acondicionadores de señal se instalan muy cercanos a las variables a convertir. Un clásico ejemplo de las variables adquiridas es: la variable 1 se relaciona con un transductor de presión que se usa para medir el nivel del embalse; la variable 2 con un pluviómetro; y la variable 3 con la medición de temperatura de los cojinetes del generador eléctrico.

Se ha desarrollado el software asociado a cada módulo controlador y el correspondiente al concentrador, que se presentan en los diagramas de software, en la figuras 6 y 7.

Descripción del software instalado en cada módulo:

Se ha programado en el lenguaje conocido como "C". En una computadora externa se ha instalado un compilador denominado sdcc, que es de dominio gratuito, en el que se escriben los programas, se compilan y se programan los prototipos, a través del canal de comunicaciones RS232. Previamente, en cada uno de los microcontroladores se ha instalado un programa denominado bootloader, que permite que si luego del reset, recibe por el puerto serie un determinado patrón, se autoprograma con datos a través del referido puerto.

En la figura 6, se observa un diagrama de flujo simplificado del software instalado en ellos. Se ha procurado que sea lo más simple posible, de tal forma de poder implementarlo con el microcontrolador seleccionado.

El diagrama simplificado del software instalado en el concentrador y registrador es presentado en la figura 7. En este caso se indica el proceso de petición del valor de una variable determinada y el almacenamiento de la misma. Si ocurre un error, también se registra. A grandes rasgos, el proceso de registro se realiza en base a un temporizador interno del concentrador, que interrumpe a la CPU para que en ese momento tome y registre una variable. El intervalo de tiempo depende de la tasa de muestreo determinada para cada caso.

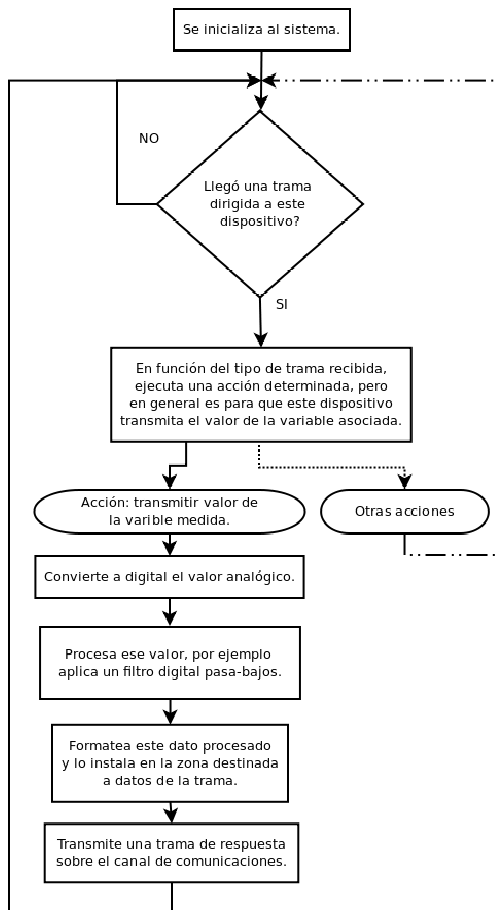


Figura 6. Diagrama simplificado del software instalado en los procesadores de señales.

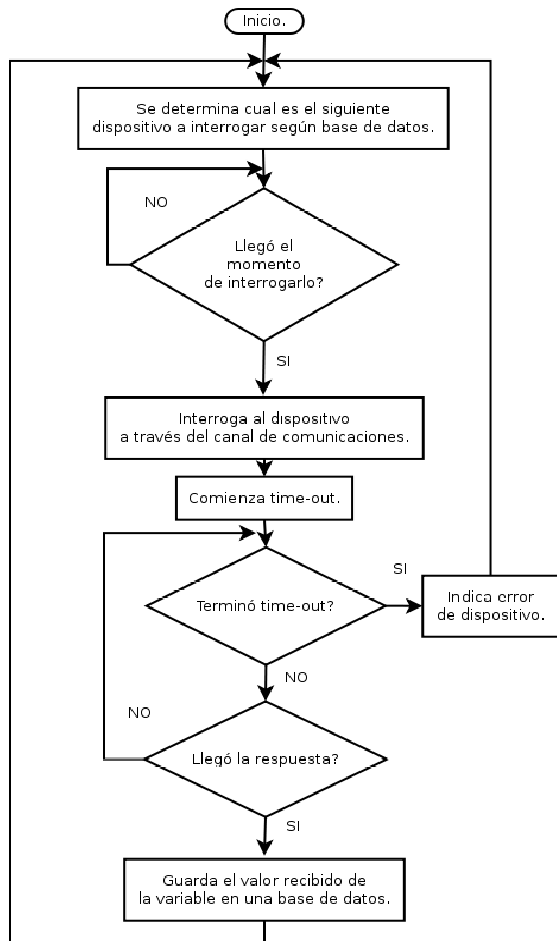


Figura 7. Diagrama simplificado del software instalado en el concentrador

Finalmente, se ha procedido a la instalación de los tres módulos implementados y el concentrador en campo (en la MCH Tigre mencionada precedentemente), encontrándose en la etapa de verificación y ajuste de funcionamiento definitivo.

## CONCLUSIONES

Como resultado del proyecto se ha logrado alcanzar la capacidad de desarrollar sistemas de medición y registro de variables para una MCH, en forma completa y con know-how local, evitando la utilización de equipos comerciales. De esta forma, se demuestra que es posible llegar al objetivo planteado con tecnología apropiada al medio local y económicamente viable. Los resultados de esta investigación son transferibles a pequeños aprovechamientos hidroeléctricos instalados en nuestro país.

## REFERENCIAS

Perujo, A.; Kaiser, R.; Sauer, D.-U.; Wenzl, H.; Baring-Gould, I.; Wilmot, N.; Mattera, F.; Tselepis, S.; Nieuwenhout, F.; Rodrigues, C.; Ruddell, A.; Lundsager, P.; Svoboda, V.; "Data monitoring and evaluation of renewable energy systems, in particular energy storage systems, and definition of categories of similar use," *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, vol.2, no., pp. 6 pp. Vol.2, 23-26 June 2003

Dochain, D.; Dumont, G.; Gorinevsky, D.M.; Ogunnaike, T.; "IEEE transactions on control systems technology special issue on control of industrial spatially distributed processes" *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol.11, no.5, pp. 609- 611, Sept. 2003

www.freescale.com; "MC68HC908AP32 Datasheet", 2009.

Normas consultadas y reglamentaciones: ISO 10816, DIN 1314 (2-77), IRAM 2410, IEC 61.036, ANSI C84.1-1982, IRAM 2001, IEC 60038, Resolución ENRE N° 465/96, ISO 4006: 1991, ISO 9951: 1993, DIN EN 607851: 1996, IEC 751: 1983,

Ley Nacional N° 24065, Decreto N° 1398/92, Resoluciones ENRE N° 0184/2000 y 99/97, IEEE 1139-1999, Resolución ENRE 209/1995, ANSI/IEEE Std 120-1989, IEEE 519-1992, IEC 1000-4-7.

#### **ABSTRACT**

In this paper we describe the results of a research project to develop a system for measuring and recording of variables associated with micro-hydro. To determine the optimum point of operation of a micro-hydropower (MHC) is necessary to have information on environmental parameters, physical, mechanical and electrical, to characterize reliably. The main objective of this work is to develop a system to measure and record the main variables associated with MHC, which is autonomous, economically viable and technologically appropriate. We present a distributed control system and a central system, which allows using different primary transducers, measure and record the main variables related to the operation of MHC. The implementation was done with locally available components and low cost.

**Keywords:** Micro-hydropower central (MHC), measurement , recording, economy, accessibility of components.