

# Sensor Network for Monitoring and Fault Detection in Drip Irrigation Systems Based on Embedded Systems

F. Capraro, S. Tosetti, and P. Campillo

**Abstract**—New methodologies in precision irrigation, aimed at monitoring and controlling the irrigation based on the crop water demand, allow to improve the water use efficiency in the agricultural production process. Measuring the soil water content to determine how much and when to irrigate is one way to control the crop irrigation. This work presents the development and setup of a wireless monitoring network of measurement stations based on embedded systems, that concentrate measurement of soil moisture, pressure in the irrigation lines, and water flow. A base station coordinates the communication with the measurement stations, saves the data in a local database and then upstream the data to a web server so the information can be remotely accessed. The design of the measurement stations is based on a microcontroller, MC9S08QE32 from NXP, while the base station is based on a Raspberry Pi3. The communication between the nodes is performed at 470MHz in a mesh mode configuration. In order to show the performance and reliability of the proposed system, results obtained from three irrigation treatments monitoring in a tomato crop are presented.

**Index Terms**—Microcontroller, Sensors, Software, Embedded Systems, Precision Irrigation.

## I. INTRODUCCIÓN

EL advenimiento de nuevas tecnologías y procesos en la agricultura moderna han sido acompañados fuertemente por el desarrollo de diferentes sistemas embebidos (SE) que han sido incorporados en la maquinaria agrícola, líneas de producción de materia prima, sistemas de gestión, sistemas de monitoreo y control remoto, trazabilidad, entre otros. Con las implementaciones de los SE se han logrado mejorar los resultados de diferentes tareas sistemáticas que requieren de gran esfuerzo y dedicación por parte del operario; consiguiendo mayor precisión en las tareas y reducción del tiempo de ejecución de las mismas [1]. Los SE, además, permiten el registro permanente de información sobre lo acontecido durante el proceso a fin de optimizar los recursos empleados y maximizar la producción al final de la campaña.

This work has been supported in part by National Scientific and Technical Research Council (CONICET) and National University of San Juan (UNSJ).

F. Capraro, Instituto de Automática, UNSJ – CONICET, Av. San Martín 1109 (oeste), Ciudad Capital (J5400ARL), San Juan, Argentina. (e-mail: fcapraro@inaut.unsj.edu.ar).

S. Tosetti, Instituto de Automática, UNSJ – CONICET, (e-mail: stosetti@inaut.unsj.edu.ar).

P. Campillo, Instituto de Automática, UNSJ – CONICET, (e-mail: campillo@inaut.unsj.edu.ar).

El concepto de Agricultura de Precisión (AP), que lleva por objetivo la gestión de parcelas agrícolas en base a la observación de la variabilidad del cultivo, se comenzó a desarrollar a mediados de la década el 80 en Estados Unidos; en donde los campos o parcelas cultivadas se dividían en grillas y en cada punto se recopilaba información manualmente para conocer la variabilidad del cultivo. A inicios de la década del 90, se comienzan a implementar SE en maquinarias de siembra y de cosecha mediante la integración de sensores y sistemas de posicionamiento global (GPS) para conocer la variabilidad del rendimiento en el lote durante la cosecha. Luego se incorporaron los sistemas de asistencia para el guiado de la maquinaria, conocidos como banderilleros satelitales. Estos desarrollos basados en SE han mejorado significativamente el desempeño y funcionalidad de los sistemas agrícolas en la medida que los dispositivos sensores y de comunicación fueron evolucionado tecnológicamente.

En tiempos más recientes, la incorporación de los SE en la agricultura ha favorecido el desarrollo de herramientas de monitorización altamente requeridas para efectuar la gestión de los recursos y el seguimiento adecuado de los cultivos [2]. Para analizar la variabilidad espacial y temporal de una parcela cultivada es necesario conocer la dinámica y estado de diversos factores tales como: el suelo, el agua, el cultivo y el clima; para caracterizar la heterogeneidad de la zona cultivada [3]. En este ámbito, se disponen de SE que integran dispositivos como sensores, microcontroladores, arreglo de puertas lógica programables (FPGA), entre otros, para lograr el registro sistemático de datos y el procesamiento de información [4].

### A. Riego de Precisión y Problemática en el Manejo del Riego

Existen regiones en donde el desarrollo de la agricultura requiere de la instalación de sistemas de riego y es allí donde toma relevancia el enfoque de Riego de Precisión (RP) [5]. El RP consiste en la aplicación precisa de agua para satisfacer los requerimientos específicos de plantas o de unidades de manejo, y minimizar el impacto ambiental adverso [6]. El concepto de RP es un nuevo enfoque sobre la gestión precisa del riego en donde el rendimiento hídrico del cultivo se optimiza mediante la correcta programación del riego a través de la decisión acertada de cuándo, cuánto y dónde regar. Para esto es necesario disponer de tecnologías basadas en SE que realicen la recolección automática y sistemática de datos y el procesamiento en tiempo real de la información; por ejemplo,

nivel de humedad en el perfil de suelo, crecimiento y demanda hídrica de los cultivos, y condiciones climáticas del lugar.

En las regiones de los Valles Cordilleranos de Argentina uno de los factores críticos es la disponibilidad y el uso del recurso hídrico. La región se caracteriza por bajos niveles de lluvia y un elevado nivel de evapotranspiración (ET0), registrándose niveles anuales de 87mm y 1576mm respectivamente en el Valle del Tulum, San Juan [7]. Estos registros indican que el desarrollo de la agricultura sea totalmente dependiente del riego. Es por ello que los productores deben implementar sistemas de riego presurizados (por goteo, aspersión y subsuperficiales) para cubrir la demanda hídrica del cultivo. La incorporación de estos sistemas permite además aumentar la eficiencia de la aplicación de riego (relación entre la cantidad de agua disponible en la zona de raíces de la planta y la cantidad de agua suministrada) entre el 80 al 95%, frente a sistemas de conducción por inundación o surco que logran entre 30 a 60%.

Actualmente, el contexto económico y medioambiental propone el desafío de aumentar la productividad del agua (relación entre la cantidad de producto cosechado y la cantidad de agua aplicada) mediante la programación precisa y adecuada del riego [8] y la detección rápida de problemas en el funcionamiento del equipo de riego.

En las instalaciones de riego presurizado, el control de las operaciones de riego se realiza manualmente o empleando controladores temporizados que abren y cierran las válvulas sistemáticamente según el programa establecido (control a lazo abierto). El usuario ajusta los tiempos de programación del riego (intervalo y duración del riego) en base a registros de ET0 de referencia obtenidos desde estaciones meteorológicas o informes de años anteriores, además de su experiencia.

Bajo esta metodología, se observa que generalmente el aporte de agua es mayor al requerido provocando un incremento de entre el 20 y el 50% del costo asociado al riego. Otros factores que impactan en el aumento del costo son: el sobredimensionamiento del sistema de riego, excedente en el bombeo de agua, el consumo energético innecesario, la aceleración del desgaste del sistema de conducción, filtrado y bombeo, el aumento de las tareas de mantenimiento, la reducción del agua disponible, la disminución de la eficacia de los fertilizantes, entre otros más.

Otro aspecto en donde la aplicación de SE puede generar un impacto positivo es en el monitoreo del funcionamiento del sistema riego, ya que, en aquellos sistemas de riego instalados en grandes áreas cultivadas, la detección tardía de fallas impacta en un aumento del costo asociado al manejo del riego de entre el 5 y el 10% y un decremento entre el 5 y el 30% en la cantidad de producto cosechado por efecto de estrés hídrico en el cultivo y desbalanceo del perfil de humedad en el suelo.

La investigación y desarrollo de dispositivos basados en SE para la agricultura es un área que continúa evolucionando. En el orden internacional hay empresas que comercializan sensores y sistemas de monitoreo. Sin embargo, estos productos presentan algunos inconvenientes tales como: el alto costo de implementación, solo permiten el registro de una o dos variables por zona de medición, el resguardo de los datos se realiza en sistemas cerrados bajo licenciamiento y en servidores

web propietarios, además de carecer de soporte posventa a nivel local. Por todo lo anterior, los sistemas comerciales disponibles hasta el momento no cumplen con los requerimientos o no llegan a brindar una solución adecuada a la problemática local.

Otro problema identificado respecto a los SE en agricultura, tanto de diseño experimental como en productos comerciales, es que la monitorización se realiza de manera aislada sobre el suelo, cultivo, clima o equipo de riego; pero nunca teniendo en cuenta su combinación. Por otro lado, estos dispositivos tampoco consideran las dificultades asociadas al correcto manejo del riego; sino que se limitan a registrar variables que el usuario debe monitorizar continuamente para luego dejar en sus manos la correcta interpretación y análisis para determinar los ocurrido en el sistema de riego o en el cultivo.

En atención a la problemática que actualmente enfrenta el sector agropecuario con respecto a la escasez del recurso hídrico y la gestión del riego, la cual requiere una solución tecnológica adecuada y acorde al tipo de agricultura que se desarrolla localmente, en este trabajo se presenta el diseño de un sistema de monitorización en tiempo real basado en SE, que permite registrar el nivel de la humedad en el suelo (a distintas profundidades) en forma conjunta con el nivel de presión y caudal circulante en la línea de riego, para ello se utiliza una red de estaciones de medición alojadas en la zona cultivada. El procesamiento de los datos en un servidor web permite crear gráficos temporales de cada variable y la generación automatizada de alarmas ante fallas en el sistema de riego.

## II. MÉTODOS Y MATERIALES

### A. Descripción de la Red de Monitorización

El sistema está compuesto por una red de estaciones de medición (Estación Remota) que se instalan en la zona cultivada. Cada estación remota registra las variables medidas por sensores y luego se envían de manera inalámbrica hacia una "Estación base" donde se concentra toda la información. En la Fig. 1 se presenta un esquema con los principales elementos que conforman la red monitorización: estaciones remotas, estación base, y red de comunicación inalámbrica. Seguidamente se realiza una breve descripción sobre el diseño de cada elemento.

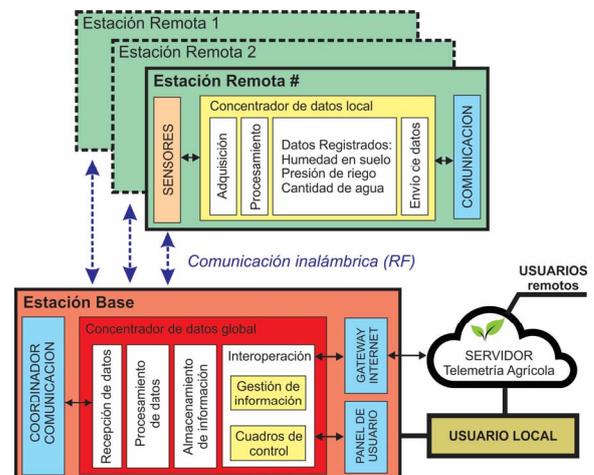


Fig. 1. Estructura de la red de monitorización de riego.

### B. Estación de Medición Remota

Las estaciones de medición se han desarrollado especialmente para ser instaladas dentro de una zona cultivada. La Fig. 2 muestra un esquema con los elementos que la conforman: datalogger, sensores, módulos de energía y comunicación RF.

El módulo principal es el “registrador de datos” (datalogger); fue diseñado en el Instituto de Automática según el concepto de SE. Se basa en un microcontrolador (MCU) de 8 bits, MC9S08QE32, de NXP (ex Freescale) [9]. La selección del mismo se realizó considerando las características: disponibilidad comercial, bajo costo, reducido consumo, sencilla integración; y por contar con convertor analógico/digital con resolución de 12 bits, reloj interno de presión, puerto serie (UART), y de puertos de entrada/salida.

El datalogger cuenta con una fuente de alimentación dual (3,3v y 5v), un reloj de tiempo real con alimentación externa, un conjunto de llaves electrónicas (basadas en transistores) que permiten el encendido y apagado de los sensores, una serie de filtros de adaptación de las señales analógicas que ingresan al MCU, conexión al módulo de comunicación RF, y conexión al módulo de programación del MCU. Los sensores y el módulo de comunicación son energizados desde el mismo datalogger.

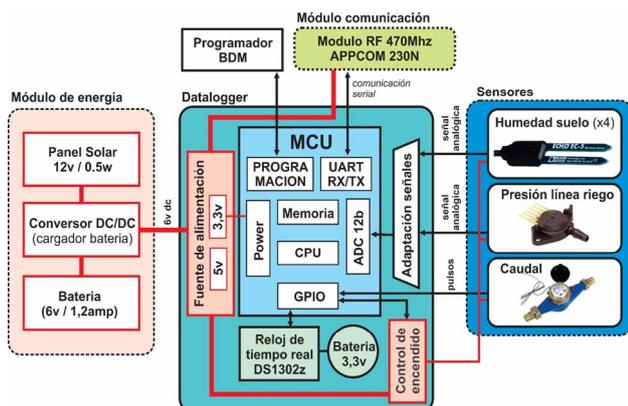


Fig. 2. Diagrama de la estación de medición remota.

El datalogger registra la medición de seis sensores. Cuatro sensores de humedad de suelo modelo EC-5, de Decagon Devices (alimentación 3,3v y salida analógica entre 0,4 a 1,2v) se instalan a diferentes profundidades del suelo; un sensor de presión MPX5700GP de Freescale Semiconductors (alimentación 5v y salida analógica que varía entre 0,2 a 5v) permite medir la presión en la cañería de riego; y un caudalímetro (de tipo turbina) modelo YF-DN50 de la marca SEA (alimentación 5v y salida de pulsos) permite registrar la cantidad de agua que circula por la cañería de riego. Las señales de los primeros cinco sensores se registran con el convertor analógico/digital del MCU. La señal del caudalímetro es ingresada a un canal de contador de pulsos del MCU. Además de ello, se registra el nivel de tensión de alimentación de la estación y la tensión de referencia interna del MCU (bandgap) [10]. El resultado de la conversión A/D de la señal de cada sensor, contenida en el registro del ADC (ADCR), es apilado en la memoria del MCU para luego enviarse a la estación base cuando sea solicitado.

El módulo de energía se conforma por un panel solar de 12v/500mW, cargador de batería, y batería de 6v/1,2Amp/h.

El módulo de comunicación inalámbrico se conecta al puerto serie del MCU (UART), mediante las líneas de TX, RX, y habilitación del módulo (se amplía en el apartado II-D).

Las tareas de selección de los componentes electrónicos y diseño del circuito impreso fueron de relevancia ya que el sistema debe afrontar las condiciones de uso extremas en campo, como es la ocurrencia de fuertes vientos, lluvias acompañadas de tormentas eléctricas, gran amplitud térmica, y alto nivel de humedad. La primera versión del SE presentó buen desempeño en el laboratorio, pero al instalarse en el campo se registraron fallas y problemas, así surgió el requerimiento de acondicionar por completo el dispositivo. Las consideraciones más importantes sobre el diseño del prototipo final fueron:

(i) El rango de temperatura de funcionamiento de los componentes electrónicos es el “industrial” (entre -25 a 80°C).

(ii) El tamaño de resistencias y capacitores de montaje superficial (SMD) debe ser 2B-1206 o mayor para lograr una superficie de soldado adecuada (entre los componentes y el circuito impreso), ello está asociado a la complejidad de soldado con la tecnología disponible localmente. Sin embargo, en componentes de menor tamaño suelen ocurrir fallas de contacto debido a los cambios de compresión y expansión de componentes y soldaduras [11], originados por la gran amplitud térmica que se presenta diariamente en la zona cultivada o desprendimiento de las soldaduras a causa de las vibraciones generadas por las ráfagas de viento sobre la estación.

(iii) Realizar el tropicalizado del circuito electrónico recubriendo al mismo con un baño de resina [12] (líquida o spray) o barniz especial [13] a fin de otorgar protección extra y mejorar la fijación de los componentes electrónicos. Los circuitos electrónicos que operan en ambientes húmedos y con altos cambios de temperatura, aun montados con gabinetes estancos, sufren condensación o depósito de polvo, que logran oxidar y degradar las soldaduras y componentes electrónicos.

(iv) El conexionado de los sensores con la estación debe realizarse con fichas de conexionado con conectores que posean revestimiento antioxidante, por ejemplo, los conectores de audio (plug estéreo); con este tipo de conectores se logra mejor contacto, rapidez de conexionado (en campo) y fijación mecánica. No es conveniente el uso de borneras para inserción de cable desnudo ya que, antes las condiciones de operación mencionadas en zonas cultivadas, el proceso de oxidación del cable es acelerado y agresivo provocando fallas en la recepción de las señales de cada sensor por falso contacto o corte.

(v) Montar al SE en gabinetes estancos antiestáticos a fin de reducir al máximo la concentración de energía eléctrica estática que suelen dañar o afectar a los componentes electrónicos del SE, en especial al MCU. En la región cordillerana de Argentina esto es un problema serio, ya que ante la ocurrencia de viento Zonda (viento caliente y seco) o tormentas de verano se alcanza alta concentración de energía estática que dañan los equipos.

(vi) El tipo de baterías o pilas empleadas deben ser de bajo riesgo de explosión o alojarse dentro de bolsas ignífugas para evitar la generación de focos de incendio en la zona cultivada.

(vii) El panel solar debe contar con una superficie de protección adecuada (por ej. vidrio de 3mm de espesor) que no resulte afectada ante la alta exposición solar; afectando el rendimiento de la celda solar y la recarga de batería.

De manera general, para el diseño se tuvo en cuenta la norma ISO 15003:2006 referentes a dispositivos electrónicos de uso en la agricultura [14]; como así también se consideraron las referencias de diseño del Electronic Industries Association (EIA) y Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC).

C. Estación Base

La estación base cumple la función de concentrador de datos de toda la red, cada 10 min se realiza una solicitud de datos.

La misma opera sobre una plataforma Raspberry Pi3, equipada con una pantalla de 7" con control táctil (puerto HDMI), teclado y ratón (puertos USB), y un nodo concentrador de la red inalámbrica APPCOM (puerto comunicación UART). Se instaló el sistema operativo Raspbian basado en Linux (de la Fundación Raspberry Pi).

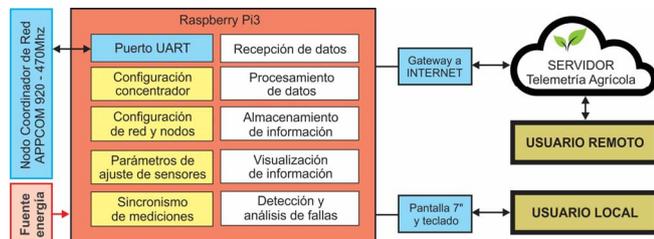


Fig. 3. Diagrama de la estación base empleada como concentrador de datos dentro de la red de medición.

En la plataforma se ejecutan cinco procesos: configuración, comunicación, manejo de datos, gestión de la información, y panel de usuario. Los programas se realizaron en Python [15].

El proceso de “configuración” se utiliza para configurar todos los elementos de la red de medición. El proceso registra en un archivo (de configuración) los parámetros de funcionamiento de todos los elementos de la red de comunicación inalámbrica, los parámetros de calibración de los sensores (coeficientes de recta de calibración de sensores de humedad de suelo, función de conversión de presión, y coeficiente de integración del caudalímetro), y sincronización horaria de todas las estaciones.

El proceso de “comunicación” permiten la interacción entre la estación base y cada estación remota. Se definió un protocolo de comunicación y una serie de comandos para conformar la comunicación entre la estación base y las estaciones remotas. En la figura 4 se presenta dos cadenas de caracteres en donde se indica la estructura de envío de una orden a la estación remota y la cadena de caracteres en forma de respuesta.

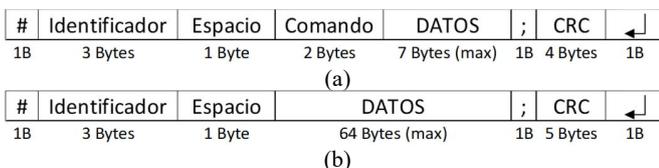


Fig. 4. Protocolo de comunicación entre la estación base y estaciones remotas. (a) Orden enviada por la estación base. (b) Respuesta de la estación remota.

Para el envío de comandos, la trama se inicia con el carácter numeral ‘#’ (Hex 23), para así indicar a la estación remota que debe procesar una orden. Luego se especifica el identificador del dispositivo y un comando conformado por dos caracteres del alfabeto (2 bytes) relacionados a la función; los mismos se listan en la tabla 1. Solo el comando WD requiere anexar fecha y hora en el campo “Datos” de la cadena de caracteres, el bloque de datos culmina con el carácter punto y coma ‘;’ (Hex 3B). Al final de la trama se incorpora un código de redundancia cíclica (CRC); éste se obtiene a partir de la suma hexadecimal de todos los caracteres de la cadena (desde el carácter ‘#’ hasta el carácter ‘;’). El valor del CRC en representación decimal se incorpora a la trama en forma de texto (ASCII). El fin de trama se indica con “retorno de carro” (Hex 0D).

La trama de respuesta enviada por la estación remota es similar a la anterior. En el bloque de “Datos” se inserta la información solicitada en respuesta al comando recibido.

TABLA I  
COMANDOS TRANSMITIDOS DESDE EL CONCENTRADOR

Comando	Descripción
<b>CM</b>	Solicita la cantidad de datos almacenados en memoria.
<b>EM</b>	Solicita el inicio de envío de todos los datos en memoria.
<b>NM</b>	Solicita una nueva página en memoria.
<b>FM</b>	Indica fin de solicitud de datos en memoria.
<b>UM</b>	Solicita la última medición realizada.
<b>RM</b>	Borra toda la memoria.
<b>FO</b>	Solicita que se realice una nueva medición (forzada).
<b>ID</b>	Solicita el número de identificación de la estación.
<b>WD</b>	Envía la fecha y hora para actualizar el RTC externo.
<b>RD</b>	Solicita fecha y hora actual del RTC externo.

En este proceso, un programa informático se encarga de realizar la comunicación entre la estación base y las estaciones remotas y solicitar la última medición realizada. El proceso requiere mantener sincronizada la hora y fecha de cada estación junto con el concentrador, por lo cual una vez al día se actualiza automáticamente el registro de cada estación. Ante el inconveniente de no recibir la respuesta o detectar un error en la trama, se efectúan hasta tres reintentos de comunicación. Si por algún problema en la red de comunicación no se logra la transferencia de los datos, la estación remota tiene autonomía para respaldar las mediciones anteriores; restablecida la comunicación, se envía la información en bloques de 64 bytes.

El proceso de “manejo de datos” administra el almacenamiento de los datos. Se toman los datos de cada trama recibidas, se ordenan y almacenan los mismos en un archivo .txt (contenedor local), y posteriormente se envían al servidor web para ser incorporados a una base de datos relacional (MySQL). Previamente los datos requieren ser convertidos a un valor de medición de las variables; ya que el dato recibido corresponde a la conversión A/D registrada por el ADC del MCU.

Primero se realiza la conversión de la tensión del MCU (1)

$$V_{dd} = \frac{4095 \cdot 1,2 \text{ volt}}{ADCR_{BG}} \tag{1}$$

donde:  $V_{dd}$  es la tensión de alimentación del MCU, 4095 es el máximo valor de conversión A/D (12bits),  $1,2V$  es la tensión de referencia, y  $ADCR_{BG}$  es el resultado de la conversión A/D del

canal bandgap (AD27) almacenado en el registro del ADC.

Para determinar el valor de tensión de cada medición registrada en el ADC, se efectúa la conversión según (2)

$$V_{med} [volt] = \frac{1,2 \text{ volt}}{ADCR_{BG}} \cdot ADCR_{med} \quad (2)$$

donde,  $ADCR_{med}$  es el dato (o medición) contenido en la trama recibida desde la estación.

El valor de la humedad en el suelo se estima mediante (3).

$$Hum \text{ suelo} [\%] = a \cdot V_{med}(humedad) + b \quad (3)$$

donde,  $a$  y  $b$  son parámetros de ajuste del sensor de humedad del suelo que surgen de una calibración in-situ posterior a la instalación de los sensores [16]. Se puede efectuar una calibración rápida al considerar que la medición varía entre el 10% y el 40% de la tensión de alimentación; considerando la alimentación de 3,3v corresponde un rango de 0,33 y 1,32volt, resultando los parámetros de ajuste  $a=101,01$  y  $b=-33,33$ .

Para conocer la presión de agua en la línea de riego, se emplea la ecuación de ajuste brindada por el fabricante en (4)

$$Presión [bar] = \frac{\left(\frac{V_{med}(presión)}{5}\right) - 0,04}{0,12858} \quad (4)$$

La cantidad de agua que circula por la cañería de riego se calcula en base a la señal (tipo cuadrada) del caudalímetro, donde la frecuencia ( $Fr$ ) es proporcional al caudal ( $Q$ ) (5). La cantidad de agua se determina por la integración de la medición de  $Q$  durante un periodo de tiempo (6). El valor  $K$  es provisto por el fabricante del caudalímetro, para el presente caso  $K=0,2$ .

$$Fr [Hz] = K \cdot Q \left[ \frac{\text{litro}}{\text{min}} \right], \text{ donde: } Q \left[ \frac{\text{litro}}{\text{min}} \right] = \frac{Fr [Hz]}{K} \quad (5)$$

$$Volumen \text{ agua} [\text{litro}] = \frac{\text{Pulsos acumulados}}{k \cdot 60 \text{ seg}} \quad (6)$$

El proceso de “gestión de la información” analiza los datos y genera las alarmas de forma automatizada ante la ocurrencia de “eventos programados” o por “fallas” en el sistema.

Los *eventos programados* son alarmas que se disparan cuando el nivel de una variable esta por fuera del rango de operación definido por el usuario. Se pueden generar dos alarmas por cada variable registrada, asignando un umbral máximo y mínimo de operación. En cada alarma se configura: activación, valor de umbral, tiempo mínimo de permanencia fuera del umbral.

Las alarmas por *fallas* son generadas a partir del análisis permanente del estado de funcionamiento del sistema de medición y sistema de riego; según se detalla a continuación:

*AL1: Estación fuera de servicio.* Una estación de medición no responde o no se reciben los datos correctamente.

*AL2: Sensor dañado o desconectado.* Un canal de medición activo en la estación registra un valor nulo o fuera de rango.

*AL3: Nivel de carga bajo.* Nivel de carga de batería en la estación baja y/o problemas con el módulo de recarga.

*AL4: Sector de riego obstruido.* Combinación de alto nivel

de presión en la cañería y bajo volumen de agua.

*AL5: Sector de riego dañado o abierto.* Combinación de bajo nivel de presión en la cañería y alto nivel de caudal.

*AL6: Riego deficitario.* Descenso del nivel de la humedad en suelo no obstante se realiza la aplicación del riego en condiciones normales de presión y volumen; para ello se analiza la pendiente de variación del nivel de humedad en combinación con el nivel presión en la cañería de riego y cantidad de volumen entregado.

*AL7: Riego excesivo.* Ascenso acelerado del nivel de la humedad del suelo y/o detección de nivel de saturación en combinación con el nivel presión en la cañería de riego y volumen entregado mayor al umbral de riego asignado.

El proceso de “panel de usuario” es un entorno visual (Fig. 5) donde el usuario puede monitorizar la información de cada estación y alarmas. Desde el mismo entorno se permite escribir comandos al concentrador de la red para realizar tareas de configuración remota, mantenimiento, y detección de fallas en las estaciones de medición distribuidas en la red.

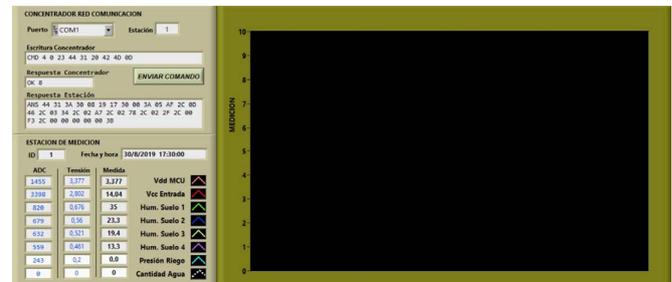


Fig. 5. Panel de monitorización (local) de las estaciones de medición.

#### D. Red de Comunicación Inalámbrica

Para la transferencia de datos se ha utilizado una red inalámbrica con topología en malla (mesh network) de la firma APPCOM. La red opera en banda libre de 470MHz, y la comunicación es basada en un protocolo propietario, denominado WRNET bajo el método host/cliente. Cada dispositivo en la red es identificado por una dirección de “nodo\_id” y la red por una dirección “red\_id”. En las estaciones remotas se integra un transceptor APC230N (half-duplex) con antena de 3dBi y configurado a máxima potencia (100mW). En la estación base se integra un concentrador APC910M [17] con una antena yaqui de 3 elementos (15dBi). Es posible lograr enlaces de hasta 2.000m de alcance en zonas cultivadas. La configuración de la red mesh y la comunicación entre nodos se efectúa desde el concentrador lograrse hasta 3 saltos de nodos.

#### E. Código de Programa del MCU

Los códigos de programación del MCU se realizaron en lenguaje ensamblador (assembler) utilizando el entorno de desarrollo integrado (IDE) CodeWarriors, versión 10.2, de la firma NXP y el módulo Processor Expert, en entorno Eclipse.

El programa se ha estructurado según el diagrama de flujo presentado en la Fig. 6. Inicialmente se realiza la configuración de todos los registros que determinan el modo de operación del MCU (tipo de oscilador, clock, puertos, registros, etc). En segundo lugar, se configura un sector del bloque de memoria de programa (flash), que corresponde aproximadamente al 50%

del final del bloque que se emplea para el resguardo temporal (backup) de las mediciones aún no enviadas a la estación base.

Algunos parámetros de la configuración de los módulos del MCU son; Clock: fuente de oscilador externo 32KHz, modo funcionamiento FFE (enganchado), clock interno 8MHz. Reloj de tiempo real configurado en interrupción de 1 segundo. Conversor ADC: 12bits, 1MHz, interrupción habilitada al concluir la conversión. Módulo de comunicación serie: 9600 baudios, 8 bits, 1 bit de stop, sin paridad, con interrupción RX.

El programa principal del MCU, se ordenó a partir de la dirección \$8000. Dentro del programa principal (recuadro verde Fig. 6) se ejecutan tres tareas; en primera instancia se consulta la hora del RTC externo para indicar el momento de realizar una nueva medición (T0); si corresponde, se efectúa la medición de todas las señales, se tabulan las mediciones y se almacenan en memoria en un registro denominado “última medición”, a su vez las mediciones se almacenan (en forma de pila) en el bloque de la memoria flash [18] disponible para ello. Finalmente se verifica en el registro del puerto de comunicación serial la existencia de un comando que fuera enviado por la estación base, en caso favorable se realiza la acción (Tabla1).

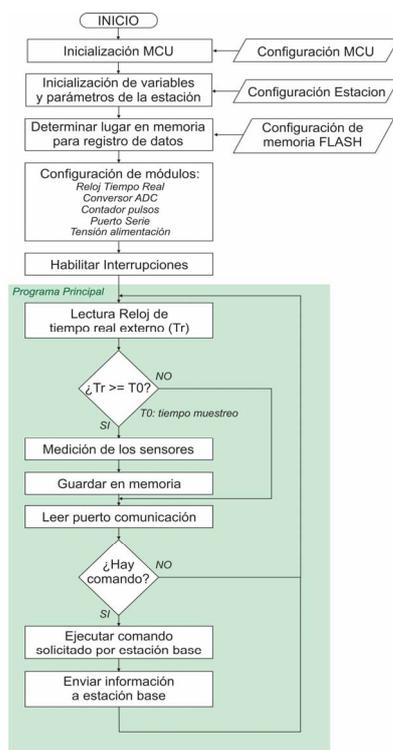


Fig. 6. Diagrama de flujo de programa principal del microcontrolador.

Además, se cuenta con una serie de programas (estructurados en subrutinas) dedicados a las siguientes operaciones:

- Lectura y escritura de RTC externo.
- Recepción y envío de mensajes por el puerto serie.
- Interpretación, ejecución, y envío de datos en respuesta a los comandos recibidos desde la estación base.
- Adquisición de las señales analógicas y promediación.
- Resguardo en memoria flash, paginado y borrado.
- Cálculos con operaciones matemáticas en 32 bits.

#### F. Diseño y Montaje

Se ha diseñado una placa electrónica (PCB) en doble cara (Fig. 7), los componentes electrónicos seleccionados (en su mayoría) son de montaje superficial, el MCU utilizado tiene la configuración de 28 pines (montaje SOIC). Para lograr la programación del MCU se incorporó un conector USB tipo B hembra y para la conexión al módulo de comunicación un conector RJ4-5 hembra. Para la conexión de los sensores se disponen seis enchufes (tipo estéreo) de 3,5mm. La placa se montó en una caja plástica para fijarse en riel DIN (de 8u).

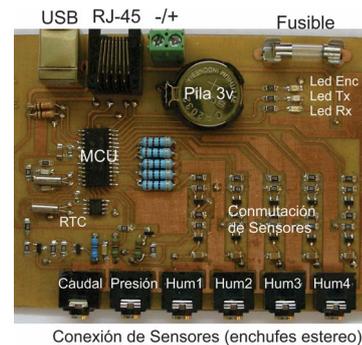


Fig. 7. Placa electrónica del registrador de datos (estación de medición).

### III. RESULTADOS

Se ha logrado el diseño y puesta en marcha de un concentrador de datos que realiza las mediciones y registros de diferentes variables que resultan de interés para la monitorización del riego y la detección de fallas en el equipo de riego. En la Fig. 8.a se presenta el ensamble del prototipo final.

Se ha logrado la puesta en marcha de una estación base que opera de coordinadora de una red de datos inalámbrica, concentra y almacena la información de cada estación, y realiza la función de puerta de enlace (gateway) a internet para transferir la información a un servidor web (Fig. 8.b).

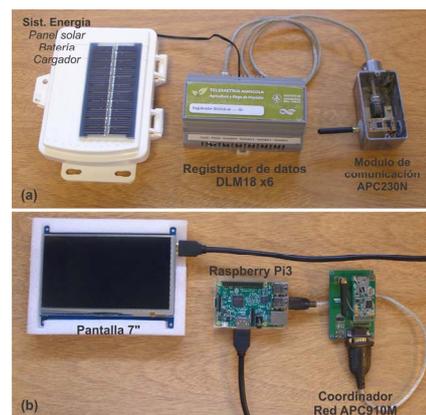


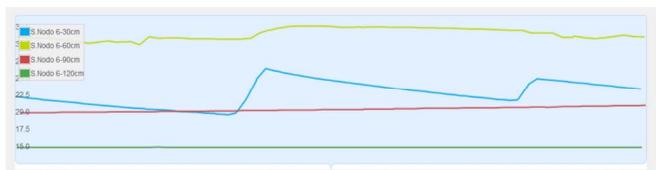
Fig. 8. Hardware de la red de medición. (a) Prototipo de concentrador de datos y accesorios en la estación de medición. (b) Estación base.

Un resultado importante del desarrollo ha sido el diseño de una estructura de almacenamiento para resguardar localmente los datos contenidos de cada puesto de medición. En la estación base se genera un archivo (.txt) de registro por cada estación, estructurado en 8 columnas, separadas por tabulación (Fig 9).

Fecha y hora	V_BG	V_In	Hum1	Hum2	Hum3	Hum4	Pres	Caud
05/02/2019 10:00	1473	3347	804	937	855	895	254	0
05/02/2019 10:10	1473	3357	805	937	855	895	253	0
05/02/2019 10:20	1473	3368	804	937	855	895	253	0
05/02/2019 10:30	1473	3380	804	937	854	896	254	0
05/02/2019 10:40	1473	3394	804	937	855	895	1027	14470
05/02/2019 10:50	1473	3411	804	937	854	895	1042	15902
05/02/2019 11:00	1473	3434	804	936	854	896	1012	14235

Fig. 9. Archivo de texto que registra los datos de cada estación de medición

Para realizar la monitorización y seguimiento de las variables en tiempo real y de manera gráfica, el usuario cuenta con acceso a la plataforma “Telemetría Agrícola” (alojada en un servidor web, <http://telemetria.inaut.unsj.edu.ar/inicio/>) para explorar toda la información referida a la red de estaciones de medición. En la siguiente figura se presenta el entorno donde el usuario hace el seguimiento de la humedad del suelo y del riego.



#### IV. CASO DE USO

Se ha logrado el desarrollo de una red de estaciones de medición de variables relacionadas al riego de precisión. El sistema cuenta con experiencias de uso realizadas durante dos años en parcelas agrícolas de la provincia de San Juan. Un caso de uso interesante se logró en una parcela de tomate con destino a industria, éste se presenta a fin de ilustrar la implementación.

El tomate es una de las hortalizas más importantes en el mundo; su consumo aumenta y con ello la superficie cultivada. En la provincia de San Juan se obtiene el mayor rendimiento nacional; a lo cual se asocia la alta demanda de agua para el riego. Para evaluar la eficiencia y productividad del agua durante la campaña 2018/19 se desarrolló un ensayo de riego controlado en un cuadro de tomate dentro del predio del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), en la localidad de Pocito. El ensayo consistió en instalar un sistema de riego con goteo de alto rendimiento y aplicar tres tratamientos de riego diferenciado (T0, T1 y T2).

Se instalaron tres estaciones remotas de medición, una en cada tratamiento de riego. Los sensores de humedad de suelo se colocaron a 30 y 50cm de profundidad (se calibraron a partir de muestras de suelo obtenidas in-situ). El sensor de presión y el caudalímetro se colocaron al inicio de la cañería secundaria del sistema de riego por goteo. La estación base se ubicó a 600m del cuadro de tomate. Los datos se resguardaron localmente cada 10 minutos en la estación base y en el servidor web de la plataforma Telemetría Agrícola para su visualización remota.

Las mediciones de todas las variables registradas se presentan en la Fig. 11. Estas resultaron de gran relevancia ya que permitieron a los usuarios efectuar la monitorización en tiempo real de lo acontecido en cada ensayo y ajustar las aplicaciones de riego según la demanda del cultivo (ETc).

Las alarmas automáticas permitieron detectar de manera inmediata y resolver inconvenientes en el equipo de riego por fallas de encendido de la bomba de riego (15 avisos), rotura de cañerías (9 avisos), taponamiento en la toma de agua en el reservorio (35 avisos), entre otros. También se alertaron fallas en las mediciones por daño de los sensores (3 avisos) y por corte de cable (5 avisos) originados por los operarios al realizarse las tareas habituales de labranza y limpieza del cultivo.

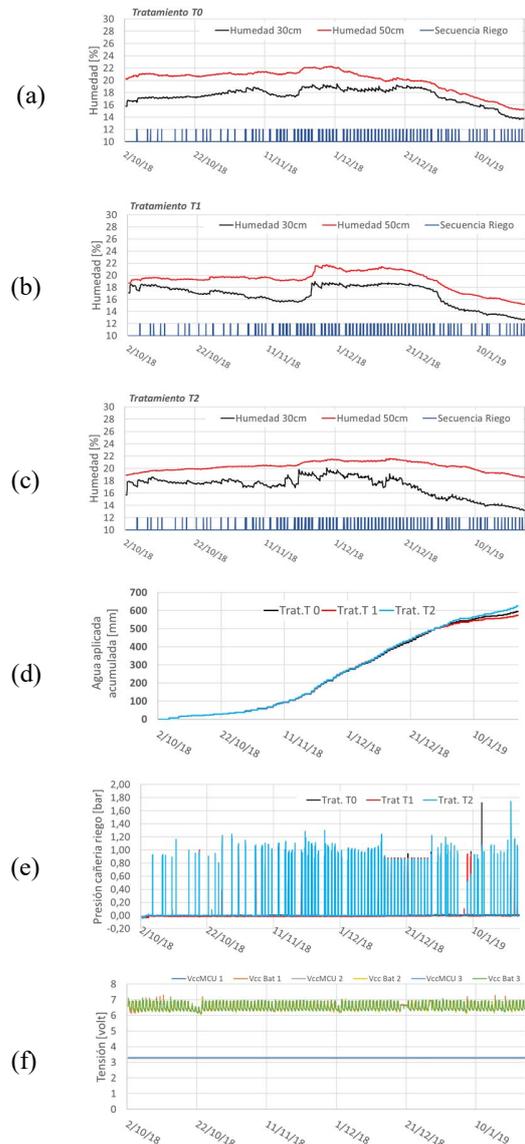


Fig. 11. Registro histórico sobre las variables medidas durante el periodo de ensayo de riego controlado en tomate para industria. (a) (b) (c) Evolución de la humedad en el suelo a 30 y 50cm de profundidad, en los tratamientos T0, T1 y T2 respectivamente. (d) Cantidad de agua aportada (lamina acumulada de riego) en cada tratamiento. (e) Registro de la presión en la cañería de riego. (f) Tensión de alimentación (Vcc) en cada estación de medición (Vcc Bat.) y tensión de alimentación en el microcontrolador (Vdd MCU).

#### V. CONCLUSIONES

La gestión del Riego de Precisión se basa en conocer lo que acontece (de manera espacial y temporal) en el intersistema suelo-cultivo-clima y en el equipo de riego (agua). Para ello se

requiere la medición sistemática de las variables del proceso, siendo ello la condición más adecuada pero la de mayor requerimiento en infraestructura, sensores y número de estaciones de medición, lo que implica una inversión de alto costo que es inaccesible a pequeños o medianos productores. Se detectó que una alternativa de menor complejidad y costo es combinar la información del nivel de humedad del suelo con el estado de funcionamiento del equipo de riego, resultando en una opción que brinda la suficiente información para realizar la adecuada programación de los turnos de riego y la detección de fallas en el sistema.

En la etapa de desarrollo de los SE, que potencialmente serán utilizados en la agricultura moderna, es de suma importancia considerar los factores críticos de diseño a fin de reducir la aparición de fallas en el dispositivo, como son: diseño adecuado del circuito impreso que permita al final del proceso de ensamblado el tropicalizado del mismo, selección adecuada en el tamaño y el rango de temperatura de operación de los componentes electrónicos, bajo consumo de energía, reducido tamaño, y red de comunicación inalámbrica de gran cobertura.

En este trabajo se presentó el desarrollo e implementación de una red de estaciones de medición diseñada especialmente para monitorizar el funcionamiento de un sistema de riego por goteo. Las pruebas realizadas en una plantación de tomate demostraron que el sistema es confiable y robusto para ser instalado a campo y que la información recopilada es de gran utilidad para logra el manejo eficiente del riego. Se destaca como principal aporte, la generación y envío automático de alarmas al detectarse fallas de funcionamiento (cañería dañada, fallas en el sistema de bombeo, taponamiento de mangueras, daño en electroválvulas de riego, entre otras). La detección de fallas se basó en la medición remota y análisis del nivel de humedad del suelo en combinación con el nivel de presión en la cañería y la cantidad de agua suministrada por el sistema de riego. Cuando no hay fallas, se logra verificar la aplicación correcta del turno de riego según lo planificado.

Frente a los SE de uso comercial, con el sistema desarrollado se resuelve: reducción del tamaño de los dispositivos a instalarse en la zona cultivada lo cual disminuye la exposición de las estaciones que suelen ser dañadas por los operarios de campo o robada; optimización y disminución significativa del consumo de energía, reducción de costo del equipo, mayor rango de cobertura y alcance entre estación base y estación de medición, datos disponibles al usuario final.

El monitoreo continuo del nivel de la humedad en el suelo a distintas profundidades permite al usuario realizar el ajuste rápido en la programación de los turnos de riego a fin de evitar inconvenientes en el desarrollo del cultivo; mantenido los niveles de humedad dentro de los parámetros óptimos. Ello permitiría implementar de manera adecuada y precisa diferentes tratamientos de riego controlado (por ejemplo, riego deficitario o restringido), a fin de ahorrar agua en periodos no críticos y aumentar la productividad del agua durante la campaña.

## REFERENCIAS

- [1] N. Zhang, M. Wang, N. Wang, "Precision agriculture - a worldwide overview". *Computers and Electronics in Agriculture* vol 36, num. 2, pp. 113-132. 2002
- [2] M. Grossi, A. Berardinelli, E. Sazonov, W. Beccaro, M. Omaña, "Sensors and Embedded Systems in Agriculture and Food Analysis." *Journal of Sensors*, vol. 2019, Article ID 6808674, 2 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6808674>.
- [3] P. Steduto, T. C. Hsiao, D. Raes, E. Fereres. "AquaCrop -the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles". *Agronomy Journal*. Vol. 101, pp. 426-437. 2009
- [4] Aqeel-ur-Rehman, A. Z. Abbasi, N. Islam, Z. A. Shaikh, "A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture". *Computer Standards & Interfaces*, vol 36, num. 2, pp 263-270, 2014 <https://doi.org/10.1016/j.csi.2011.03.004>.
- [5] R. J. Smith, J. N. Baillie, A. C. McCarthy, S. R. Raine, C. P. Baillie, "Defining precision irrigation" in *Review of precision irrigation technologies and their application*. National Centre for Engineering in Agriculture. University of Southern Queensland. Toowoomba. 2010.
- [6] S. R. Raine, W. S. Meyer, D. W. Rassam, J. L. Hutson, F. J. Cook, "Soil-water and solute movement under precision irrigation: Knowledge gaps for managing sustainable root zones". *Irrig. Sci.*, vol. 26, pp 91-100. 2007.
- [7] M. Gómez del Campo, A. Morales Sillero, F. Vita Serman, M. C. Rousseaux and P. S. Searles. "El olivar en los valles cálidos del Noroeste de Argentina". *Olivae*, no. 114, pp. 23-45. Spain. 2010.
- [8] L. S. Pereira, L. Cordery, I. Iacovides, "Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving". *Agricultural Water Management*, vol 108, pp 39- 51, 2012.
- [9] Manual de referencia microcontrolador MC9S08QE32/MC9S08QE16 Rev. 2011. Disponible en: <https://www.nxp.com/docs/en/reference-manual/MC9S08QE32RM.pdf>
- [10] Application Note. "Temperature sensor for the HCS08 microcontroller family". Freescale Semiconductor. Doc AN3031, Rev1. 2010
- [11] P. Duchi and A. M. Laügt "Cleaning PCBs in Electronics: Understanding Today's Needs". *ECS Trans*. vol 60, num 1, pp 817-822. 2014
- [12] Technical data sheet. RS 494-714 Modified Silicone Conformal Coating. RS. Available in: <https://docs.rs-online.com/1d7e/0900766b8158275e.pdf>
- [13] Technical data sheet. RS 199-1496 Tropicalised Varnish. RS manufacturer. Available in: <https://docs.rs-online.com/534d/0900766b815832a9.pdf>
- [14] International Standard ISO 15003:2006, Agricultural engineering - Electrical and electronic equipment - Testing resistance to environmental conditions. ISO, 2006. Available in: [www.iso.org/standard/38800.html](http://www.iso.org/standard/38800.html)
- [15] Python Software foundation. Available in: [www.python.org/psf/](http://www.python.org/psf/) (acceso agosto 2019)
- [16] D. Cobos and C. Chambers "Calibrating ECH2O Soil Moisture Sensors". Application Note. Decagon Devices. 2010.
- [17] User manual. APC910M, 17dBm Metering Concentrator Module. V2. 2009. Available in: [www.apcon.com.cn](http://www.apcon.com.cn)
- [18] Application Note. "Flash Programming Routines for the HCS08 and the ColdFire (V1) Devices". Freescale Semiconductor. Doc AP3942, 2009.



**Flavio Capraro.** Was born in San Juan, Argentina. He received the Electronics Engineering degree and the Ph.D. degree in Control Systems from the National University of San Juan, Argentina in 2004 and 2012, respectively. He is currently an Adjoint Researcher at the National Scientific and Technical Research Council (CONICET), Argentina. His interests include precision irrigation, sensors, embedded systems, and IoT.



**Santiago Tosetti.** Was born in San Luis, Argentina. He received the Electronics Engineering degree and the Ph.D. degree in Control Systems from the National University of San Juan in 2003 and 2012, respectively. He is currently and Adjoint Researcher at the National Scientific and Technical Research Council (CONICET), Argentina, His interests include control systems and robotics in agriculture.



**Pedro Campillo.** Was born in San Juan, Argentina. He received the Technical Degree in Electronics in 1995. He is with the National Scientific and Technical Research Council (CONICET) as Support Staff since 1983. His tasks include embedded system mounting, sensor calibration, electronic devices maintenance. His interests include printed circuit design, robotics, drones, sensors and industrial automation.