

Sensor inteligente de humedad en hojas para uso en cultivos agrícolas

Arjona Lucas M.¹; Pucheta Julián A.²;
Gallina, Sergio H.³, Salas Carlos A.⁴

Departamento de Electrónica
Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas,
Universidad Nacional de Catamarca

1: FTyCA, UNCa, lucas_arjona_88@hotmail.com;
2: FTyCA-UNCa, FCEFyN-UNC; jpucheta@efn.uncor.edu.ar;
3: FTyCA, UNCa, sgallina@teco.unca.edu.ar,
4: FTyCA, UNCa, calberto.salas@gmail.com

Resumen: Se describe el desarrollo de un sensor de humedad en hojas cuyo funcionamiento es de principio capacitivo. Este sensor permite obtener información sobre la humedad en el entorno de la planta, sin afectar al desarrollo del cultivo al no ser invasivo ni destructivo.

La combinación de un transductor con un microcontrolador facilitó el desarrollo del dispositivo bajo el estándar IEEE 1451, lo que permite su interconexión a una red digital, a un costo competitivo. Las funcionalidades que presenta el dispositivo lo hace apto para ser usado en campo dentro de un sistema de control automático.

Palabras Clave: sistema automático, sensor capacitivo, riego agrícola, IEEE 1451

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo pretende abordar el desafío tecnológico de detectar la necesidad de agua en los cultivos agrícolas en tiempo real, con características adecuadas para su simple instalación en los sistemas operativos y de costo acorde al sector destinatario del producto. El desarrollo se enfoca en la Región NOA, particularmente el Valle de Catamarca, que por su clima y escasez de agua superficial, el uso eficiente del agua constituye una de las prioridades en la Provincia.

Existe una variedad de métodos y sistemas para la aplicación de riego (superficial, por goteo, mediante aspersores, microrriego, entre otros) cada uno con sus ventajas y limitaciones; sin embargo, alrededor de los 90' se inició un concepto, que aún hoy continúa desarrollándose ampliamente, denominado Riego de Precisión [1].

El resultado obtenido fue el desarrollo de un sensor inteligente de humedad de hoja que puede ser incorporado a un sistema automático de gestión de riego y reducción del uso del recurso agua midiendo variables fenológicas; a costo competitivo.

La característica de inteligencia que se incorporan al sensor se basa en el cumplimiento de estándares IEEE 1451 [2],[3],[4].

2. PROPUESTA ACTUAL Y ANTECEDENTES

El desarrollo de un sensor inteligente de humedad de hojas desarrollado en el Departamento de Electrónica de la Universidad Nacional de Catamarca, toma como punto de partida:

- Los estudios para la medición del contenido de agua en el follaje que se realiza en el mismo Departamento.
- El sensor capacitivo para la estimación del contenido de agua en la vegetación, [5],[6],[7] y el sensor capacitivo para la detección de humedad del suelo [8] desarrollado por el Instituto de Automática (INAUT) de la Universidad Nacional de San Juan

El desarrollo de tecnologías para detectar la humedad de la hoja es un tema actual y de investigación activa [8],[9], así como los enfoques de control automático hacia sistemas bio-ecológicos [10],[7], [11]

Otros métodos para determinar el contenido de agua en hoja tales como: mediante podómetros, que miden la resistencia o conductividad hidráulica en la superficie de las hojas; el empleo de *LVDT's (Linear Variable Differential Transformers)* en broches y fibra óptica aplicados a para determinar el espesor de la hoja y la técnica de *NMR (Nuclear Magnetic Resonance)*, también fueron estudiadas pero descartadas por ser invasivas o no poderse aplicar en terreno.

2.1 Principio de funcionamiento

El método capacitivo se basa en la medición de la capacidad de un condensador cuyo dieléctrico variará debido a la incorporación de agua, ya que el aire tiene una permitividad dieléctrica relativa $\epsilon_r = 1$, el hielo $\epsilon_r = 5$ y el agua $\epsilon_r = 80$ en promedio.

Se diseña al área sensora en forma de dos "E" enfrentadas, formando un condensador que luego será aislado para lograr el efecto capacitivo y evitar la conductividad. La capacidad de dicho elemento varía entonces según lo haga el contenido de humedad en su superficie.

El sensor tiene las ventajas de no ser invasivo ni destructivo como los métodos tradicionales; permite la medición continua y transmisión de los datos; además posee un sensor de temperatura para establecer compensaciones y la hoja electrónica de datos (TEDS), lo que permite decir que se trata de un sensor inteligente.

Algunas de las dificultades encontradas son : a) diseño de un sistema electrónico inmune a las capacitancias parásitas debido a que el condensador diseñado es del orden de los pF de capacidad; b) el sistema debe tener la resolución suficiente como para detectar pequeñas cantidades de agua en la superficie sensora y la sensibilidad adecuada para ser aplicado al control automático.

Es así que la conjunción sensorial en un algoritmo de control permite aplicar la cantidad de agua necesaria al cultivo, y dará lugar a un riego de precisión [1], generando los beneficios de maximizar el uso del agua, incrementar áreas cultivables o reducir costos de producción.

3. DESARROLLO

El sensor responde al diagrama en bloques de la figura 1, en la misma se observan los siguientes módulos:

- Sensor capacitivo
- Sensor de temperatura
- Acondicionamiento de señal
- Conversión analógica digital
- Hoja electrónica de datos (TEDS)
- Registro de estado
- Lógica de control
- Comunicaciones

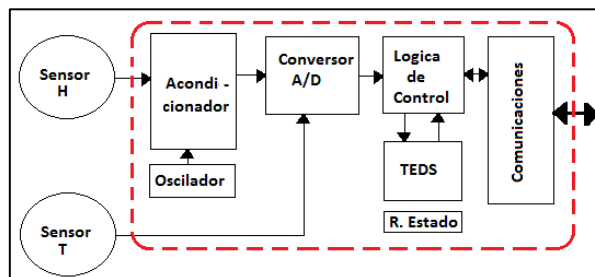


Figura 1: Esquema Interno del Sensor Capacitivo.

3.1 Sensor capacitivo

El sensor consiste en un dispositivo electrónico que se coloca a la altura del follaje del cultivo y con una inclinación promedio de acuerdo a la ubicación de las hojas, así medirá la humedad sobre las hojas e imitará su escurrimiento. Principalmente consta de dos partes como muestra la Figura N° 2.

El Área Sensora (el sensor propiamente dicho) diseñada a partir de un condensador cuyas placas se encuentran en un mismo plano y que varía al existir un cambio en el dieléctrico en las cercanías de él.

El condensador sensor diseñado tiene una capacidad al aire libre de $50\text{pF} \pm 8\text{pF}$ medidos con un multímetro digital Mega Lite M890G.

Adicionalmente, el sensor posee un sensor de temperatura (CI LM35) para realizar correcciones y calibraciones en la medición de la humedad de hoja. Luego se definirá algún algoritmo de calibración para generar datos compensados por temperatura.

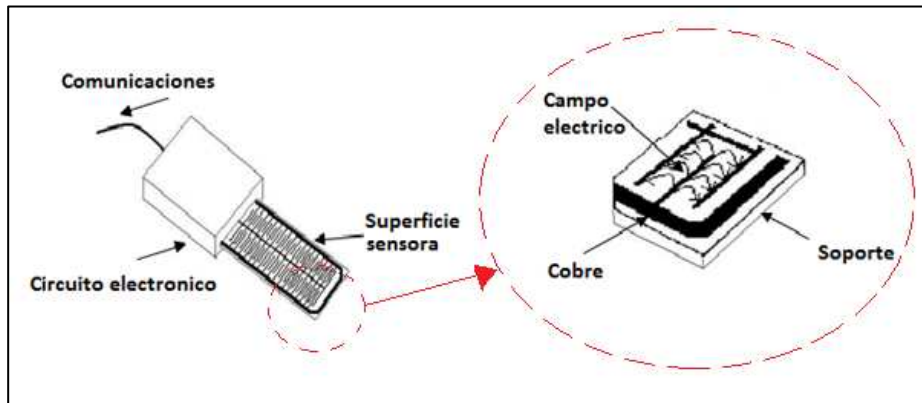


Figura 2: Cuerpo del Sensor Capacitivo de Humedad de Hoja

3.2 Acondicionamiento de la señal

En la etapa de acondicionamiento, la medición de capacitancia debe hacerse con un circuito inmune a las capacidades parásitas. El esquema utilizado se muestra en la figura 3.

La capacidad parásita C_{p3} se puede reducir apantallando los cables de conexión del sensor; las capacidades C_{p1} y C_{p2} debidas a los cables de conexión no influyen en la medida aunque una C_{p2} muy alta podría hacer que el circuito oscile.

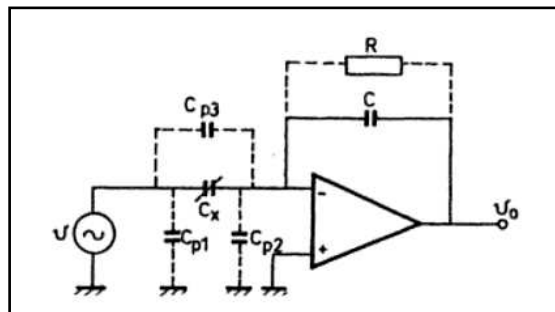


Figura 3: Amplificador de carga.

La salida que se obtiene será:

$$v_0 = -v \frac{C_x}{C} \quad (1)$$

Donde C_x viene a ser nuestro condensador diseñado. Se observa una relación lineal entre la salida y la capacitancia.

3.3 Oscilador

El oscilador está construido a base de un C.I. 555 en operación como astable a 10KHz.

Este oscilador fue incluido en el prototipo por su facilidad de implementación, en el próximo desarrollo será reemplazado por un oscilador a cristal o con la utilización del uno de los *timers* internos del MCU. Esto le dará una mayor precisión al sensor.

3.4 El Microcontrolador (MCU)

Los módulos restantes, Conversor A/D, TEDS, Registro de estado, Comunicaciones y lógica de control se implementan sobre un micro-controlador, esto facilita la implementación y reduce el tamaño del conjunto.

3.4.1 Conversión A/D

El módulo conversor Análogo/Digital del MCU PIC 16F877 tiene 8 canales de entrada. La conversión de la señal analógica aplicada a uno de los canales, se plasma en número binario de 10 dígitos.

Para operar el modulo ADC se cuenta con 4 registros, dos de ellos son para almacenar el resultado de la información: ADRESH y ADRESL y dos para la configuración del modulo [12]

De los 8 canales disponibles se utilizan dos, uno para la señal del sensor de humedad y otro para el sensor de temperatura ambiente.

La siguiente ecuación permite calcular el tiempo de adquisición de datos para 1024 pasos del convertidor A/D. T_{AMP} sería el tiempo de respuesta del amplificador, T_C sería el tiempo de carga del condensador que guarda el dato y T_{COFF} sería el coeficiente de temperatura (que este solo se utilizaría para temperaturas $> 25^\circ$).

$$T_{AD} = T_{AMP} + T_C + T_{COFF} \approx 19,72\mu s \quad (2)$$

El convertidor A/D requiere un mínimo de 12 T_{AD} para la conversión de los 10 bits. Para realizar conversiones correctas el reloj del convertidor A/D debe seleccionarse para asegurar un tiempo mínimo de T_{AD} de 1,6 ms.

3.4.2 Registro de estado

El estado del transductor está representado de tal manera que es accesible mediante los comandos correspondientes. La situación incluye información relativa al funcionamiento del dispositivo. La Tabla 1 resume los bits de estado.

b15	b14	b13	b12	b11	b10	b9	b8	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0
Abierto a la industria	Abierto a la industria	Abierto a la industria	Corrección de datos	Reservado	Reservado	Reservado	Canal Operativo	Error de hardware	Evento/dato	Datos/evento perdido	Registro de estado auxiliar disponible	Reservado	Reset	Reconocimiento de disparo	Solicitud de servicio

Tabla N° 1: Registro de estado del sensor

El bit de *solicitud de servicio* se activa cuando el canal está solicitando el servicio y se borrará al leer.

El bit de *reconocimiento de disparo* será activado cuando se reconoce un disparo para iniciar una medición, se borrará cuando se lee.

El bit de *reset* se establece después de que el canal ha sido reiniciado por cualquier razón. Esto se borrará al leer.

El bit de estado *canal auxiliar disponible* se ha fijado en “0” ya que no se implementa un registro de estado auxiliar

El bit de estado *error de hardware* se establece en “0” ya que no se ha desarrollado una función de autotest.

El bit de *pérdidas de datos o de evento* se fijará coincidente con una pérdida de muestreo de datos o la recepción de un comando no reconocido.

El bit *datos / evento* se establece al finalizar un ciclo de 10 lecturas. Esto se borrará al leer o comienzo de un nuevo ciclo.

El bits de *canal operativo* se establecerán cuando el canal del transductor esta desbloqueado. El sensor se bloquea durante la inicialización o por un comando de bloqueo.

El bit de *correcciones habilitadas/deshabilitadas* Este bit se ha establecido en “1” ya que se encuentran en desarrollo, algoritmos de corrección del valor medido, con relación a la temperatura.

3.4.3 TEDS (Hoja Electrónica de datos)

La Hoja de Datos Electrónica del Transductor (TEDS) proporciona una forma estandarizada de documentar electrónicamente las capacidades y características del dispositivo. Este documento electrónico puede ser leído por aplicaciones que deseen utilizar el dispositivo y por lo tanto las capacidades del dispositivo pueden ser descubiertos en tiempo de ejecución. El concepto TEDS, el cual es desarrollado y refinado en las normas IEEE 1451.0 [4], 1451.2 [3] 1451.4, establece un mecanismo robusto para identificar y explotar las capacidades de los dispositivos. Los TEDS plenamente desarrollados consta de tres componentes: las TEDS Básica, el TEDS estándar y extendido, y el Área de Usuario.

Las TEDS de nuestro sensor fueron implementadas en la memoria EEPROM del MCU y contiene todas las particularidades del canal y su estructura responde al estándar IEEE 1451.0

Las TEDS desarrolladas incluyen el campo de identificación denominado TEDSID, este campo tendrá la estructura y valores que se muestran en la tabla N° 2.

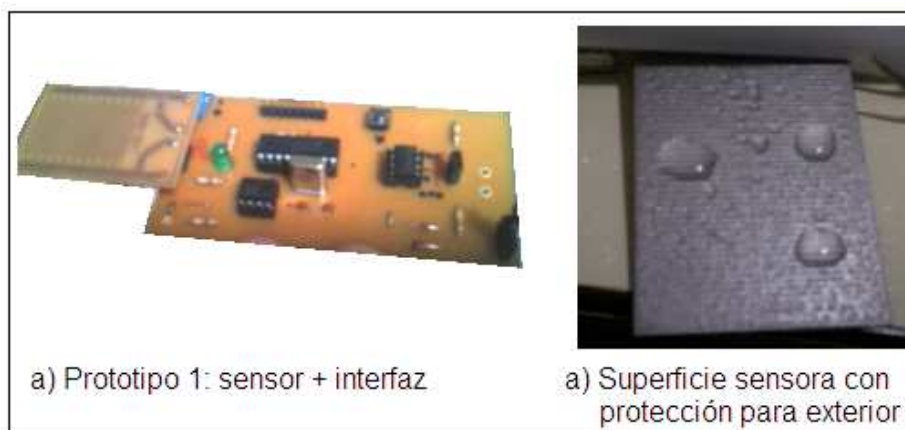
Contenido	Valor para ChannelTEDS	Valor para NameTEDS
Identificación del campo cabecera	03 _h	03 _h
Longitud de los datos	04 _h	04 _h
Familia 1451 a la que pertenece	00 _h	00 _h
Clase. Identifica la TED	03 _h	0C _h
Versión	01 _h	01 _h
Número de octetos en el campo de longitud de todas las tuplas, excepto en estas	01 _h	01 _h

Tabla N° 2: Campo cabecera de las TEDS

Como se puede observar en el Anexo 1, la información de las TEDS incluye el tipo de transductor, las unidades físicas del transductor, el modelo de datos, la información de tiempo como el tiempo de actualización, periodo de muestreo, etc. y una suma de comprobación de integridad de datos.

3.4.4 Comunicaciones

El microprocesador utiliza un driver para enviar y recibir datos empleando la norma RS-485. Con las señales digitalizadas, en MCU se encarga de generar una trama en donde se especifica el nodo sensor, el destino, la temperatura, un dato que corresponde entre 0 y 100 proporcional a la capacitancia del área sensora, en dato obtenido del conversor a/d del proceso de medición de capacidad (dato original digitalizado) además de un bit de paridad para verificar errores. Los tiempos de envío son programables desde segundos hasta varias horas.



a) Prototipo 1: sensor + interfaz

a) Superficie sensora con protección para exterior

Figura 4: Primer Prototipo implementado para pruebas.

A través del primer prototipo implementado (figura 4) se logró perfeccionar la trama y la transmisión de datos por el protocolo RS-485 y además corregir problemas de diseño.

3.5 Funcionamiento

El transductor podrá estar en estado operativo o no operativo, esta situación se establece según el estado del bit *canal operativo* en el registro de estado. En estado no operativo el transductor no realiza ninguna acción y espera el comando de desbloqueo. En estado operativo, el funcionamiento del transductor se representa en el diagrama de estado de la figura N° 5

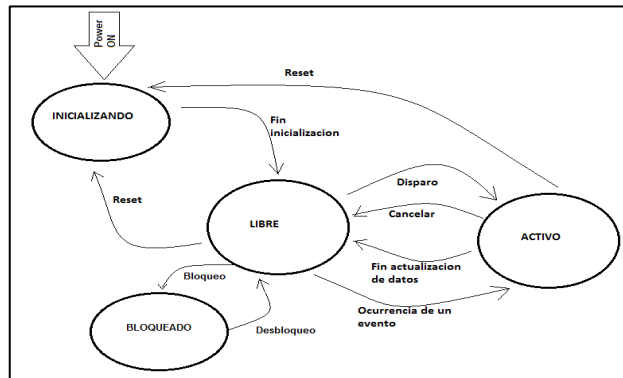


Figura 5: diagrama de estados del sensor operativo

En el estado de *inicializando*, se produce la auto-identificación del canal en el sistema donde se conecta, se limpia el buffer de datos y se actualiza el registro de estado. La inicialización puede provenir por el encendido (power-on) o por la llegada de un comando *Reset* desde el exterior.

En el estado *libre* el transductor ya se ha identificado y se encuentra tomando muestras en forma libre, se ha previsto un buffer que almacene hasta un máximo de 10 muestras.

Al estado *activo* se ingresa por la llegada de un comando seguido de una señal de disparo, si el comando recibido es válido se ejecuta y se establece la señal de reconocimiento de disparo, si el disparo es invalido se establece el bit de *datos/evento perdido*.

3.6 Comandos

El sensor es capaz de reconocer comandos que permiten su operación y control, en esta etapa se han desarrollado los comandos detallados en la tabla N° 3:

Código	Nombre	Acción
9F _h	Reset	Reinicia el sensor, limpia el buffer
90 _h	Bloqueo	Pone no operativo el canal
91 _h	Desbloqueo	Pone operativo el canal
80 _h	Leer_datos	Envía datos leídos (valor medio de las ultimas 10 lecturas)
82 _h	Leer_registro	Envía el registro de estado
A1 _h	Leer_TEDS	Envía las TEDS

Tabla N° 3: Comandos reconocidos por el sensor

El comando *Leer_datos(MAC)* se muestra en la figura 6, en la misma se aprecia que el sensor solamente envía datos, a solicitud de la interface del transductor (STIM), lo que permite la reducción del uso de la red. También se puede ver que el comando permite identificar un sensor en particular dentro de una red mediante una identificación o numero MAC.

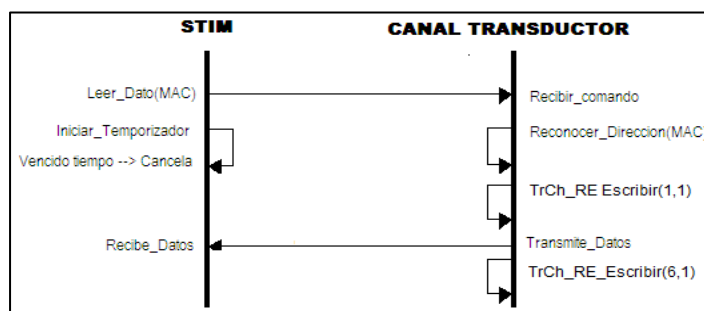


Figura 6: comando leer_datos(MAC)

En la figura 7 se muestra el diagrama de flujo del sensor en *estado operativo*, el comando de *bloqueo()* saca al sensor de este estado llevándolo a un estado de *sensor bloqueado* del cual solo podrá salir con una orden de *desbloqueo()* o *reset()*.

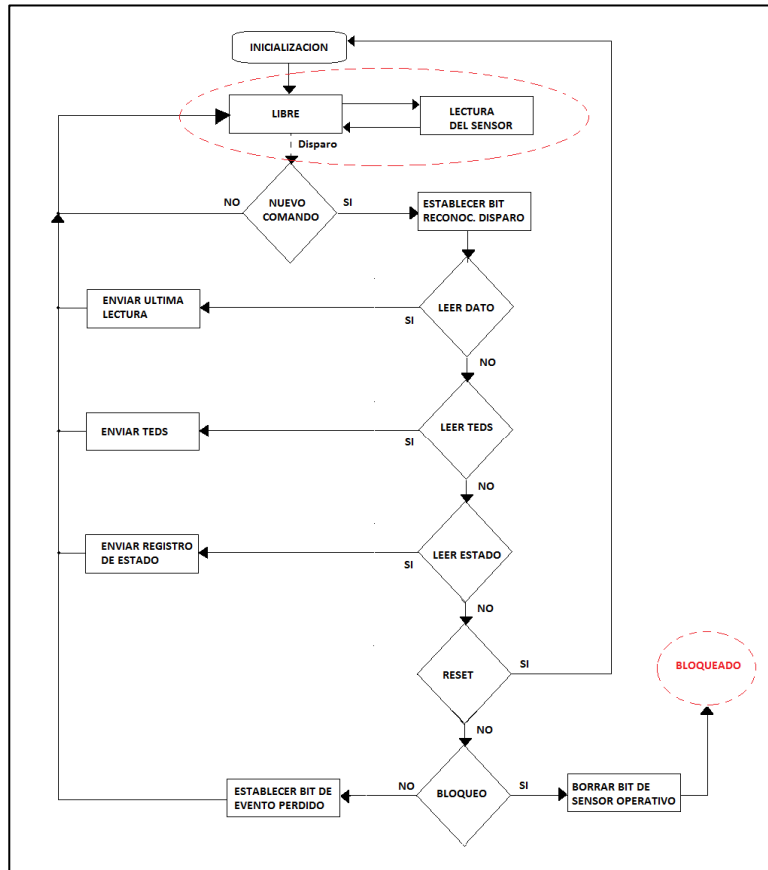


Figura 7: diagrama de flujo del sensor operativo

4. TRABAJOS FUTUROS

Al momento de escribir el presente artículo no se han desarrollado a) la técnica de auto calibración y b) la auto-identificación del sensor en un sistema. Se pretende implementar la auto-calibración mediante el método basado en la regresión lineal y la auto-identificación mediante algunos de los protocolos de auto identificación existentes.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado el desarrollo de un sensor inteligente para la medición de humedad en el follaje. El desarrollo ha agotado su fase inicial, luego de la concepción de la propuesta y las pruebas sobre el prototipo. Las primeras experiencias determinan que

es posible medir pequeñas cantidades de agua, que este dato se puede digitalizar, procesar y transmitir, lo que es coherente con la hipótesis que se tenía inicialmente. Aun se están en etapa de prueba y validación los algoritmos de calibración, en fusión con el sensor de temperatura y de auto identificación del sensor en una red de datos. La ventaja agregada al sensor, es su estandarización basada en la IEEE 1451 con capacidad de reconocer comandos externos y con su hoja electrónica de datos que permite su fácil inserción en redes de nodos inteligentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad Nacional de Catamarca (UNCa) a través del Proyecto “Desarrollo de una Plataforma de Control de entornos residenciales”, de la Universidad Nacional de Córdoba a través de la Secyt.

REFERENCIAS

- [1] Smith, R.J., Baillie, J.N., McCarthy, A.C., Raine, S.R. & Baillie, C.P. (2010) Review of Precision Irrigation Technologies and their Application. National Centre for Engineering in Agriculture Publication 1003017/1, USQ, Toowoomba.
- [2] IEEE 1451.1 Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators— Network Capable Application Processor (NCAP) Information Model. Approved 26 June 1999.
- [3] IEEE 1451.2 Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats. Approved 16 September 1997
- [4] IEEE 1451.0. Draft Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats. January 2007
- [5] Schugurensky C., Capraro F. “Control Automático de Riego con Sensores Capacitivos de Humedad de Suelo. Aplicaciones en Vid y Olivo”. INAUT. UNSJ. Argentina.
- [6] “Dispositivo sensor capacitivo para la medición de la humedad volumétrica y la temperatura de un medio circundante”. N/Ref.: 1246 AR. Presentada ante la Administración Nacional de Patentes el 10 de Noviembre de 2005 habiéndole correspondido el No. P 05 01 04714. (En trámite). Publicada en la Pag. 30 del Boletín de Patentes del Instituto Nacional de la Propiedad Industrial, N° 390 ISSN - 0325 – 6545 del 17 de enero de 2007.
- [7] Capraro, F., Shugurensky, C., Vita, F., Tosetti, S., Lage, A., Pucheta, J. “Intelligent irrigation control in agricultural soils: an application to grapevines”. Anales de la XII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, XII RPIC, Universidad Nacional de la Patagonia Austral Unidad Académica Río Gallegos, Argentina. (2007).

- [8] Schugurensky C., Fullana R. “Sensor Capacitivo del Contenido de Agua en la Vegetación”. INAUT. UNSJ. Argentina. Septiembre de 2010. AADECA 2010- XXII Congreso Argentino de Control Automático.
- [9] Schugurensky C., Fullana R. “Review of Vegetation Water Content measurement technologies”. INAUT. UNSJ. Argentina. 2010.
- [10] Y. Hashimoto, I. Farkas, H. Murase, E.R. Carson, A. Sano. “Control approaches to bio- and ecological systems”. Control Engineering Practice 12 (2004) 595–603.
- [11] S. Miresmailli, D. Badulescu, M. Mahdaviyani, R. Zamar and M. Isman. “Integrating plant chemical ecology, sensors and artificial intelligence for accurate pest monitoring”. In: Tomatoes: Agriculture Procedures, Pathogen. ISBN: 978-1-60876-869-1. Eds E. Aube and F. Poole. 2009 Nova Science Publishers, Inc.
- [12] PIC 1F877, Microchip®. Hoja de datos.

ANEXO 1: Campos, descripción y valores asignados a las TEDS

a. Transducer name TEDS

Es una TED obligatoria para el estándar 1451.0 y almacena el nombre por el cual se reconocerá al sensor en una aplicación.

Campo: TEDSID

Tipo de dato: UInt8 Bytes: 4

Descripción: Identificación

Valor: 03-04-00-0C-01-01

Campo: FORMAT

Tipo de dato: UInt8 Bytes: 1

Descripción: Define el formato de campo datos

Valor: 04-01-00

Campo: TCName

Tipo de dato: no definido

Descripción: Nombre del sensor "FTyCA-UNCa"

Valor: 46-54-79-43-41-2D-55-4E-43-61

Campo: LENGHT

Tipo de dato: UInt32 Bytes: 4

Descripción: Largo, incluye el checksum, no incluye este campo

Valor: 00-00-00-15

Campo: CHECKSUM

Tipo de dato: UInt16 Bytes: 2

Descripción: Suma de comprobación

Valor: FC-C5

b. Transducer channel TEDS

Es una TED obligatoria para el estándar y aporta información detallada sobre el transductor.

Campo: TEDSID

Tipo de dato: UInt8 Bytes: 4

Descripción: Identificación

Valor: 03-04-00-03-01-01

Campo: CALKEY

Tipo de dato: UInt8 Bytes: 1

Descripción: Capacidad de calibración del canal

Valor: 0A-01-01

Campo: CHANTYPE
Tipo de dato: UInt8 Bytes: 1
Descripción: Tipo de canal (0=sensor)
Valor: OB-01-00

Campo: PHYUNITS
Tipo de dato: UNITS Bytes: 11
Descripción: Nombre de la unidad física a medir o controlar, se mide humedad absoluta las unidades son g/m3
Valor: OC-0C-32-01-01-35-01-7A-36-01-7A

Campo:LOWLIMIT
Tipo de dato: Float32 Bytes: 4
Descripción: Límite inferior de operación del transductor (10%)
Valor: 0D-04-41-20-00-00

Campo:HILIMIT
Tipo de dato: Float32 Bytes: 4
Descripción: Límite superior de operación del transductor (100%)
Valor: 0E-04-42-C8-00-00

Campo: OERROR
Tipo de dato: Float32 Bytes: 4
Descripción: Error, incertidumbre típica del transductor (2%)
Valor: 0F-04-40-00-00-00

Campo: SELFTEST
Tipo de dato: UInt8 Bytes: 1
Descripción: Auto test (sin implementar)
Valor: 10-01-00

Campo: SAMPLE
Tipo de dato: No definido
Descripción: Describe el modelo de datos de la señal muestreada: entero con 10 bits validos.
Valor: 12-09-28-01-00-29-01-02-2A-01-0A

Campo: UPDATET
Tipo de dato: Float32 Bytes: 4
Descripción: Tasa de actualización del sensor, para 10muestras/seg. Tenemos 0,1 seg. (100 mS)
Valor: 14-04-3D-CC-CC-CD

Campo: RSETUPT
Tipo de dato: Float32 Bytes: 4
Descripción: Tiempo de preparación para lectura (25 µs)
Valor: 16-04-37-D1-B7-17

Campo: SPERIOD
Tipo de dato: Float32 Bytes: 4
Descripción: Tiempo que demora el sensor en tomar una muestra (100mS)

Valor: 17-04-3D-CC-CC-CD

Campo: WARMUPT

Tipo de dato: Float32 Bytes: 4

Descripción: Tiempo que demora en estabilizarse el sensor después de ser energizado (5 Seg)

Valor: 18-04-40-A0-00-00

Campo: RDELAYT

Tipo de dato: Float32 Bytes: 4

Descripción: Tiempo entre 2 comandos de lectura (tiempo necesario para llenar el buffer con 10 muestras nuevas) (100 mSeg)

Valor: 14-04-3D-CC-CC-CD

Campo: SAMPLING

Tipo de dato: No definido

Descripción: Define los atributos del muestreo (opera libremente sin pre-disparo)

Valor: 1F-03-30-01-02

Campo: LENGHT

Tipo de dato: UInt32 Bytes: 4

Descripción: Largo, incluye el checksum, no incluye este campo

Valor: 00-00-00-59

Campo: CHECKSUM

Tipo de dato: UInt16 Bytes: 2

Descripción: Suma de comprobación

Valor: F0-72