

Desarrollo de Sonda Capacitiva para Medición Distribuida de Humedad de Suelo

Ignacio Leguizamo¹, Juan C. Abdala¹, Jairo N. Trad¹, Guillermo G. Riva^{1,2}

¹ INSUS - Córdoba, Argentina

legui.ignacio@gmail.com, {jcabdala, jtrad, griva}@insus.com.ar

² Laboratorio de Comunicaciones Digitales-UNC, UTN-FRC, CONICET

Resumen Resulta prioritario a la hora de aumentar el rendimiento y mejorar la competitividad en el sector agropecuario utilizar los recursos de forma eficiente. Para que esto sea posible deben conocerse con mayor detalle las características intrínsecas de las zonas productivas, como ser el contenido volumétrico de agua en suelo. Con el fin de satisfacer esta necesidad de mayor resolución espacial y temporal en las mediciones de humedad de suelo, se diseñó e implementó una sonda de cuatro sensores para medición de humedad de suelo a diferentes profundidades, con capacidad de formar una red mediante comunicación inalámbrica. Se diseñó e implementó un sensor capacitivo con bajo consumo de corriente ($< 12mA$) y tiempo de respuesta menor a $10ms$; y una red en la cual se registraron enlaces de hasta 1500m, dependiendo del terreno y las alturas de las antenas.

Keywords: Agronomía de Precisión · Redes Inalámbricas de Sensores · Sonda de Humedad de Suelo.

1. Introducción

Para obtener sistemas de producción más competitivos y aumentar el rendimiento del sector agropecuario, se deben incorporar nuevas técnicas que permitan incrementar y/o mantener la productividad de los cultivos y al mismo tiempo reducir los costos de producción. En documentos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) se exhiben pérdidas de más de \$10.000 millones por año en el sector productivo debido a la no utilización de las tecnologías disponibles [1] [2] [3]. Estas, en la mayoría de los casos, resultan demasiado costosas y de difícil aplicación debido a la falta de las mismas y a la necesidad de importarlas. Según esto, desarrollar estas tecnologías en nuestro país resulta no solo conveniente sino también estratégico. Una de las áreas prioritarias del Gobierno Argentino es la optimización de los sistemas de producción agropecuarios, detallado en el *Libro Blanco de la Prospectiva TIC* (Tecnologías de la Información y la Comunicación). Asimismo, en el *Proyecto 2020 del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación*, se destacan las tecnologías basadas en sensores para monitoreo y sistemas inteligentes basados en la combinación de tecnologías de sensores y redes de comunicaciones. En el desarrollo de la agroindustria, y más específicamente en agricultura de precisión, se destacan como focos tecnológicos el uso de sensores remotos, comunicaciones inalámbricas, y manejo de la información.

Las redes inalámbricas de sensores se perfilan como una de las más apropiadas para dar soporte a los sistemas de información en la producción agrícola y el manejo del agua [4] [5] [6] [7]. Utilizando dichas redes, se pueden ajustar las técnicas de cultivo, dosis de agua e insumos mediante un manejo sitio-específico, que considera las variaciones de las características intrínsecas en toda el área de producción. Dicho sistema permite también mejorar la producción en campos que disponen de riego. Para ello, es imprescindible por cuestiones ambientales y económicas utilizar sistemas que monitoren la humedad del suelo superficial y a diferentes profundidades y que a su vez tengan la capacidad de actuar en consecuencia.

El uso de las sondas como sistemas de monitoreo ya sea continuo o portable, es muy amplio y variado. Estos sistemas se utilizan en monitoreo dinámico de agua en diferentes tipos de suelo y cultivos, en fincas, rosadales, viñedos, campos de algodón, etc [8] [9]. Dentro de las sondas comerciales pueden nombrarse las desarrolladas por las empresas Sentek, AquaSpy y AquaCheck, entre otras [10] [11] [12]. Estas entregan el valor en frecuencia a diferentes profundidades y algunas también la temperatura y la conductividad dieléctrica. Pueden encontrarse modelos que ofrecen comunicación inalámbrica entre la sonda y el registrador manual, o conexión cableada a módulos de comunicación con GPRS o 3G [13]. Sin embargo existen grandes dificultades para utilizar estos productos en Argentina, ya que son dispositivos en su mayoría importados, de poca disponibilidad en el mercado local, sin soporte técnico y de elevado costo. Si bien existen prototipos de sondas de fabricación nacional, estas no se comercializan aún [14].

En función de lo antes expuesto, se realizó una red inalámbrica para la medición distribuida de humedad de suelo para aplicación en agronomía de precisión. Se hizo énfasis en el desarrollo de una Sonda Capacitiva de Humedad de Suelo, pudiendo así reemplazar su importación y fomentar la investigación y la aplicación de nuevas tecnologías en la agricultura. Puede observarse en la Figura 1 el diagrama general del sistema y la primera versión implementada de dicha sonda. Con esta se podrá obtener la humedad de un terreno o sustrato a diferentes profundidades y en base a esto realizar los estudios y tareas pertinentes.

La premisa del proyecto es que luego de ser instaladas, las sondas adquieran los perfiles de humedad sin que deban ser manipuladas por el personal, transmitiendo la información a una base de datos central para su posterior visualización y análisis. Este trabajo presenta los siguientes aportes:

- desarrollo de una sonda capacitiva de humedad de suelo, etapas de comunicación y de alimentación
- diseño e implementación de un sistema inalámbrico para agronomía de precisión

La estructura del presente trabajo se describe a continuación: en la sección II se describen métodos y materiales utilizados, mientras que en la sección III se detallan los ensayos y mediciones realizados. A continuación en la sección IV se presentan las conclusiones y se finaliza en la sección V con la presentación de las futuras líneas de trabajo.

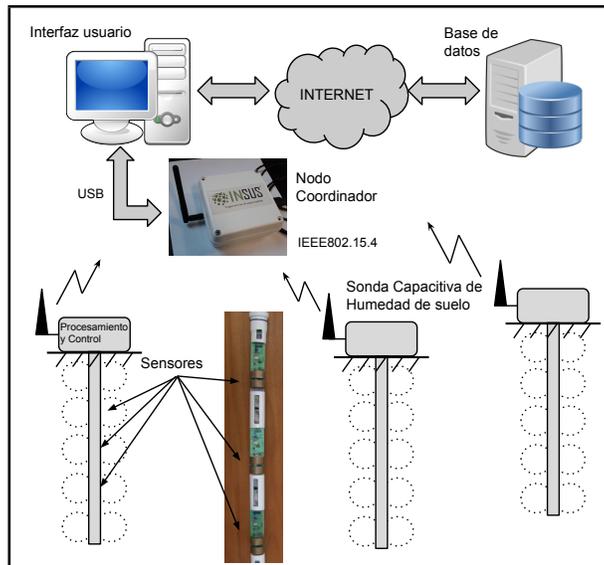


Figura 1: Diagrama general del sistema.

2. Método y Materiales

La red a implementar consta de un *nodo coordinador* y de varias *sondas capacitivas inalámbricas* comunicadas inalámbricamente con el primero. Tanto los *sensores capacitivos de humedad de suelo* como el *nodo coordinador* fueron diseñados e implementados en su totalidad.

2.1. Nodo Coordinador

El *Nodo Coordinador* tiene conexión vía USB a una computadora con acceso a la Web, en donde se almacenan los datos obtenidos de las SCI (Figura 2). Es el coordinador el encargado de realizar el pedido a las SCI, controlar y direccionar la red.

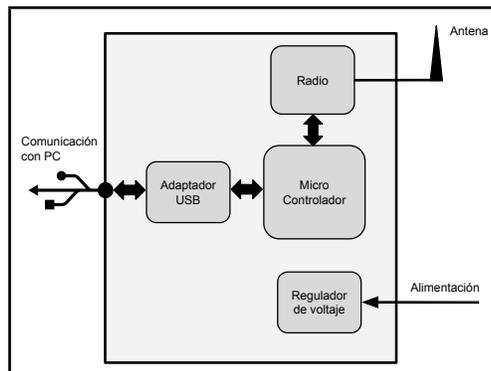


Figura 2: Diagrama Nodo Coordinador.

2.2. Sonda Capacitiva Inalámbrica

Debido a la demanda de sondas de humedad de suelo para aplicación en agronomía de precisión, se decidió diseñar e implementar una sonda de humedad de suelo, con la premisa de que sea de bajo consumo y de fácil acceso a los consumidores locales.

De las diferentes tecnologías disponibles para la medición de humedad de suelo, las características que hacen elegible al método capacitivo por sobre el de dispersión de neutrones son la sencillez para realizar mediciones continuas, sin licencias, capacitación específica ni regulaciones de seguridad propios de la fuente radioactiva de estos dispositivos. En tanto, en comparación con los sensores basados en reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), es la posibilidad de obtener medidas reales del perfil del suelo, con una mínima de perturbación, poco invasivos y no destructivos.

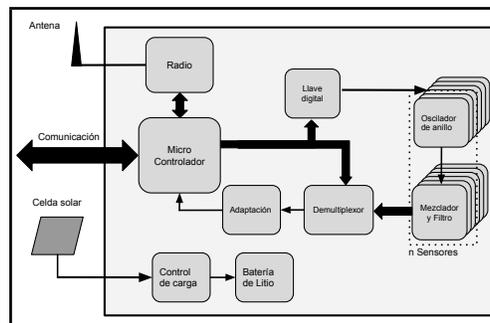


Figura 3: Diagrama Sonda Capacitiva Inalámbrica.

Los sensores entregan un valor de frecuencia en función del contenido de agua de un sustrato, utilizando un método indirecto de medición. Dicho método se basa en obtener la frecuencia de un oscilador que hace uso de un capacitor de anillos (Figura 4). Éste genera un campo disperso en el sustrato a medir, utilizándolo como dieléctrico y variando su capacidad en función del contenido de agua. Esta variación del dieléctrico genera un cambio en la frecuencia del oscilador pudiendo así utilizarlo como transductor. O sea que la variación del contenido volumétrico de agua en el suelo produce un cambio en la frecuencia de oscilación del sensor.

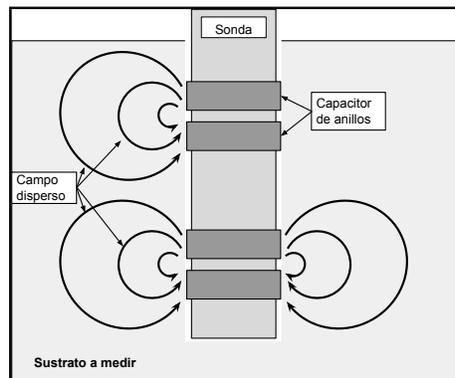


Figura 4: Sonda de humedad de suelo por método capacitivo.

La sonda, en su primera versión, está compuesta de cuatro sensores individuales conectados a una etapa digital, la cual controla la activación de los sensores y obtiene la frecuencia de cada uno de ellos. Puede observarse en la Figura 5, el diagrama en bloques de cada sensor, con las etapas principales del mismo. En este se distingue el oscilador con capacitor de anillos, el mezclador con oscilador local a cristal, el filtro activo pasa bajas y la etapa de adaptación de nivel de la señal.

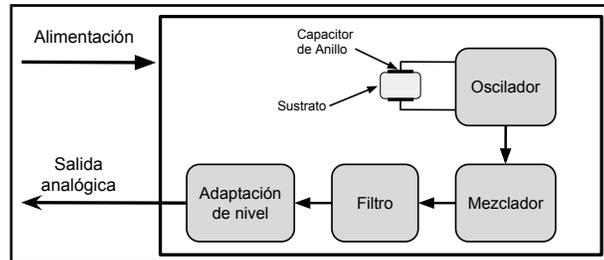


Figura 5: Diagrama en bloques del sensor capacitivo de humedad de suelo.

La frecuencia del oscilador de RF, Ecuación 1, del sensor de humedad de suelo es definida por:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L * C_T}} \quad (1)$$

donde:

f_o frecuencia de oscilación (Hz).

L inductancia del oscilador (H).

C_T capacitancia total (F).

La capacitancia total C_T está definida como se indica en la Ecuación 2.

$$C_T = \frac{1}{C_\varepsilon^{-1} + C_p^{-1} + C_a^{-1}} + C_i \quad (2)$$

donde:

C_T capacidad total.

C_ε capacidad desconocida

C_p capacidad del plástico

C_a capacidad del aire

C_i capacidad interna en paralelo

En la Figura 6 se observan las capacidades que conforman la capacidad total

A continuación se describen en detalle los diferentes bloques funcionales que conforman los sensores de humedad de suelo: oscilador con capacitor de anillos, mezclador Butler, filtro activo pasa bajas y comparador de nivel.

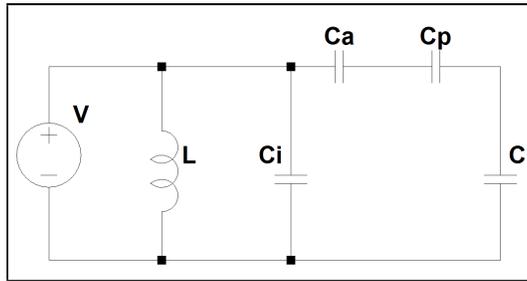


Figura 6: Circuito resonante según la disposición de la sonda.

Oscilador con capacitor de anillos Luego de varios ensayos con osciladores Clapp, los cuales son muy afectados por las variaciones de temperatura y tensión de alimentación, se optó por diseñar un oscilador LC utilizando un circuito integrado comercial. Este cuenta con un oscilador local configurable mediante una red externa y entrada de señal de RF. La salida de la mezcla se obtiene de dos pines del integrado, que pueden acoplarse por distintos métodos. Este mismo circuito integrado se utiliza en la etapa de mezclado, pero con una configuración diferente. En la configuración como oscilador se anula la entrada del mezclador y se utiliza un cuadripolo externo para producir la oscilación.

Mezclador Butler Esta configuración utiliza una derivación LC a masa, la cual otorga un camino de baja impedancia a las componentes armónicas inferiores a la deseada [15]. Debido a la disposición de los componentes se genera un filtro pasa altas en la entrada de realimentación. Este debe sintonizarse a la frecuencia de la quinta armónica para que sea esta la frecuencia de oscilación. Puede observarse en la Figura 7 una simulación en LTSpice la cual se simula este filtrado y se obtiene la respuesta en frecuencia.

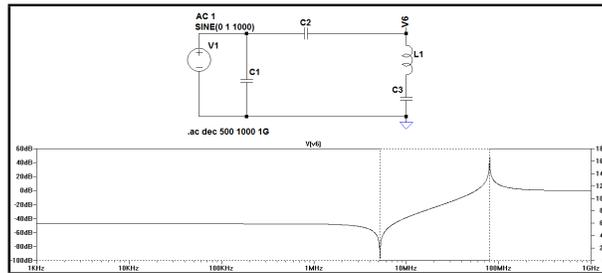


Figura 7: Simulación configuración Butler.

Filtro activo Luego de la etapa de mezclado se filtra la señal para obtener la diferencia entre las dos frecuencias de trabajo de los osciladores [16]. El ancho de banda del filtro pasa bajas está en función de la variación del oscilador que lleva el capacitor de anillos. Siendo que el Sallen-Key, está configurado como amplificador, no se ve influenciado por las características del filtro como en el caso de los configurados como Multiple FeedBack. Debido a esto se puede obtener una mayor respuesta en alta frecuencia para el mismo amplificador operacional, en comparación con las otras topologías. Dadas estas ventajas se escogió la topología Sallen-Key.

Comparador de nivel Como última etapa antes del microcontrolador se utiliza un comparador de nivel con histéresis, para llevar la señal sinusoidal a una de forma cuadrada y dar mayor inmunidad al ruido [16]. Previo al comparador se necesita un circuito que de a la señal de alterna un cierto nivel de voltaje de continua y si es necesario, amplificación. Para esto se utiliza un divisor resistivo en conjunto con un resistor variable, con el fin de dar el valor apropiado de continua como referencia positiva en una configuración no inversora. Luego de esta etapa funciona el comparador de nivel que tiene como referencia 2,5V y un nivel de histéresis calculado en función de la amplitud de la señal y del posible ruido asociado a esta. En este sentido, el tamaño de la ventana de histéresis va a depender de cuan ruidosa sea la señal.

Multiplexación Debido a la disposición de varios sensores trabajando en radio frecuencia (RF), surge la necesidad de accionarlos individualmente con el fin de realizar la medición y el posterior tratamiento de las señales. Para ello se necesita canalizar (*multiplexar*) dichas señales, logrando una mejora en la inmunidad a las interferencias entre sensores. Se hace énfasis también en el ahorro energético, dado que el consumo de corriente de toda la etapa de procesamiento y control es aproximadamente igual a la de un sensor, el ahorro es más que significativo cuando en una sonda de 8 sensores solo se encuentra activo uno por vez. Estas activaciones individuales se realizan por un período corto de tiempo por lo que se obtiene el perfil casi en tiempo real.

La multiplexación se realiza a través de una llave digital, la cual no interfiere ni modifica el funcionamiento de las etapas. Para la canalización de las señales se implementaron dos multiplexores de los cuales uno activa el sensor correspondiente y otro toma la señal del mismo. Esta acción se realiza con los pines de direccionamiento (ADDRESS SEL 0 a 1) y con el pin de habilitación (E*).

Etapa digital El procesamiento digital, control y captura de los valores medidos se desarrolla con un módulo ATZB-A24-UN de baja potencia y rango extendido para transmisión en IEEE 802.15.4. Este combina un microcontrolador ATmega1281, un transceptor AT86RF230, un amplificador de potencia de bajo ruido, y conexión para antena externa activa. En la Figura 8 puede verse el diagrama en bloques del mismo.

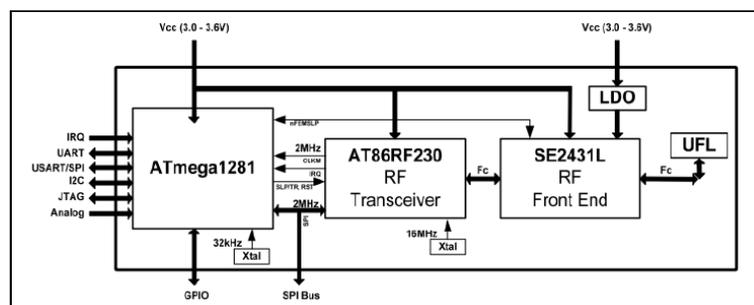


Figura 8: Módulo de comunicación.

Algunas de las funciones que realiza el microcontrolador se detallan a continuación:

Control de sensores Mediante tres líneas de control y una de habilitación se accionan los multiplexores mediante los cuales se alimenta y se obtiene la señal de cada uno de los sensores. De esta forma se evitan problemas de interferencia y se reduce notablemente el consumo energético del sistema.

Frecuencia Se obtiene la frecuencia de las señales al contar los ciclos de estas durante un período de tiempo. Esta *ventana temporal* es el tiempo que cada uno de los sensores se mantiene activo, es la que define la mínima frecuencia que puede detectar y por ende su resolución. La lógica implica obtener la mayor resolución posible pero eso impacta fuertemente en el consumo energético, por lo que es una relación de compromiso.

Transmisión de los datos Mediante configuraciones del firmware se puede variar la potencia de transmisión con el fin de reducir el consumo, como también configurar al dispositivo en modo *dormido*. Los datos se transmiten mediante el protocolo IEEE 802.15.4.

2.3. Control de carga de batería

Debido al estudio sobre las fuentes de energía disponibles, se seleccionó las tipo Ion Litio como las adecuadas para nuestra aplicación. Sin embargo, estas necesitan una curva de carga muy específica para su mejor desempeño y vida útil. Por ello se analizaron varios circuitos integrados dedicados a tal fin que cumplieran de manera satisfactoria dichas especificaciones. El controlador elegido para esta tarea es el BQ2057, de la empresa Texas Instrument (Figura 9). Éste presenta gran precisión y facilidad a la hora de fijar la corriente de carga, regulación de voltaje y acondicionamiento de la batería.

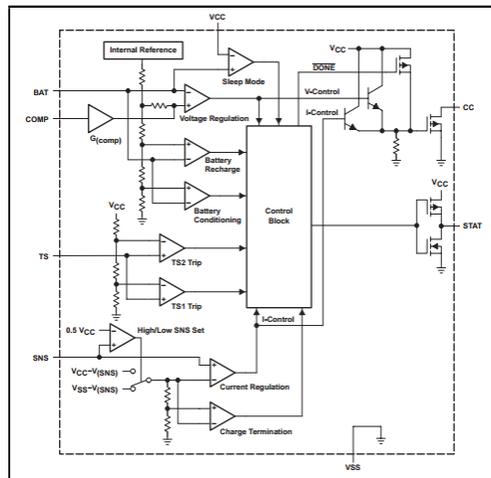


Figura 9: Circuito interno BQ2057DKG.

Cuenta además con monitoreo de temperatura, terminación de carga en función de esta si se excede del límite configurado, indicación de estado de carga y auto compensación de la tasa de carga en función de la resistencia interna de la batería. Para hacer uso de esta última funcionalidad, debe conocerse la resistencia interna de la batería, la cual varía para cada modelo de batería.

Tasa de Carga La tasa de carga, o corriente máxima a la cual se alimenta la batería cuando se esta cargando, se configura mediante el valor de una resistencia serie. En esta se mide un voltaje fijo que en nuestro caso es de 105mV, por lo que el valor de la resistencia *reguladora* está dado por dicha tensión y la corriente deseada. De manera sencilla puede configurarse la tasa de carga dentro de ciertos valores lógicos.

Transistor de potencia Debe utilizarse un transistor como llave, el cual puede ser PNP o MOSFET canal P. Para la selección del mismo se calcula la potencia que debe poder disipar, en función de ésta se calcula la temperatura de juntura, la cual deberá ser inferior a la provista por el fabricante. Luego se calcula la ganancia mínima y un voltaje colector-emisor mayor al máximo de entrada.

Panel solar El sistema tiene la capacidad para conectarse a una celda o panel solar, siempre y cuando se respete el rango de voltaje de trabajo definido en las especificaciones. Se realizaron ensayos de corriente de cortocircuito y voltaje a circuito abierto sobre diferentes celdas, para obtener el punto máximo de potencia.

3. Ensayos y Mediciones

En esta sección se describen algunos de los ensayos, mediciones y resultados obtenidos a lo largo de todo el trabajo.

3.1. Caracterización de capacitor de anillos

Con el fin de conocer las características a las diferentes frecuencias de trabajo se utilizó un Analizador Vectorial (VNWA), el cual cuenta con varias funciones interesantes en su software. Haciendo uso de los parámetros S medidos pueden obtenerse los valores de Inductancia y Capacidad, tanto serie como paralela. También cuenta con una función denominada *Analizador de Cristales*, en la cual se detallan los cristales en función de su modelo distribuido. En la Figura 10 puede verse un barrido en frecuencia del capacitor de anillos montado en la placa de medición. La frecuencia de inicio es 75MHz y la de fin 85MHz. Se dispusieron varios marcadores con el fin de obtener el valor de capacidad serie, el cual va en aumento conforme aumenta la frecuencia. Además se grafican dichos marcadores en el ábaco de Smith.

3.2. Consumo energético

El consumo de corriente en la sonda varía según la etapa en que se encuentre la misma: midiendo humedad, transmitiendo la información o en modo de bajo consumo. En el Cuadro 1 se comparan algunos de los sensores disponibles en el mercado, su consumo de corriente, tiempo de lectura y carga. Los datos se obtuvieron de los manuales de usuario y las páginas Web respectivas.

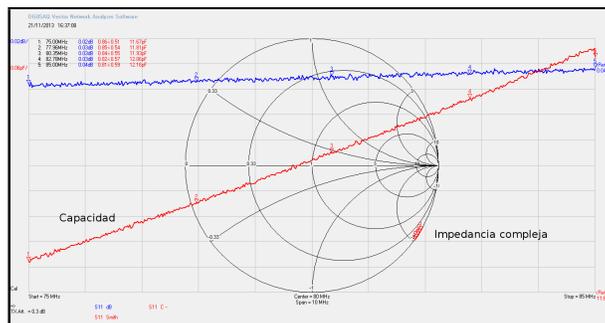


Figura 10: Capacitor de Anillos con Analizador Vectorial.

Medición Cuando se encuentra activo el sensor capacitivo, el consumo es de aproximadamente 45mA y se reduce a menos de 30mA cuando estos se apagan. La duración de la medición es de 10ms, los cuales 9 son para activación y establecimiento del sensor y 1ms para el conteo de los ciclos de la señal.

Cuadro 1: Comparación con sensores comerciales

Sensores	Corriente(mA)	Lectura(s)	Carga(mA*s)
Theta Probe M L1	33	1 a 10	33 a 330
Theta Probe M L2	20	1 a 5	20 a 100
5TM	10	0,15	1,5
EC-5	10	0,01	0,1
INSUS	12	0,005	0,06
EC-10 y EC-20	2 a 7	10	0,02 a 0,07
Hydra Probe	20 a 40	S/D	S/D
Hydra Probe II	30	S/D	S/D

Transmisión Concluido el ciclo de medición, el cual depende de la cantidad de muestras tomadas en cada sensor, se produce la transmisión de los datos donde se tiene un pico de hasta 80mA a máxima potencia de salida y disminuye a unos 30mA cuando *escucha*. El tiempo del pico de transmisión como la etapa de recepción son muy cortos, dependen del acceso al medio, pero nunca llegan siquiera al milisegundo. Puede observarse en la Figura 11 el pico de consumo en la transmisión y una posterior etapa de recepción, para luego pasar a un menor consumo dado por el apagado de la radio.

Bajo consumo Finalizados los procesos de medición y transmisión de los datos, la sonda pasa a un modo de bajo consumo que es de 2 a 3mA.

En el Cuadro 2 pueden compararse consumo de corriente, tiempo de lectura y carga de varias algunas sondas multisensores comerciales, cuando se encuentran midiendo(consumos por sensor).

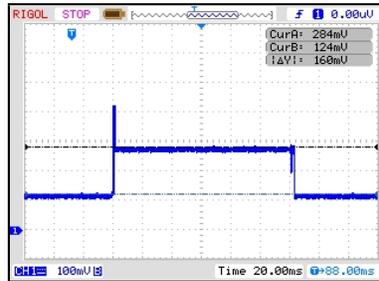


Figura 11: Transmisión y apagado de radio.

Cuadro 2: Comparación con sondas multisensores

Sonda	Corriente(mA)	Lectura(s)	Carga por sensor(mA*s)
AquaCheck	20	2	40
EasySMART	10	1,1	11
EnviroSCAN	105	0,045	4,725
EasyAG	102	0,045	4,59
AquaSpy Probe	65	0,03	1,95
INSUS	45	0,01	0,45

3.3. Sensibilidad del sensor

Se realizaron dos ensayos diferentes sobre varios sensores de humedad individuales en aire y en suelo, con el fin de estimar las distancias mínimas a las cuales estos pueden medir y a partir de estas calcular el volumen de sensibilidad del mismo. Dado que el modelado o simulación del campo eléctrico que generan los capacitores de anillos es extremadamente difícil y dependiente de cada tipo de sustrato, la única opción posible es la de realizar mediciones directas [17] [18].

Sensibilidad con sonda al aire En la Figura 12 se observa una sonda a la cual fue trasladándose una masa de agua, obteniendo así las distancias máximas a las cuales variaba la frecuencia de oscilación de los sensores. Con estas distancias se calculo el volumen efectivo al cual el sensor es sensible. Estas distancias variaban en función del sensor entre 44 y 65mm, medidos perpendicularmente desde el tubo de acceso.

Para realizar el cálculo del área se simplificó, suponiendo una forma rectangular. Se tomo como uno de los lados la distancia radial y el otro es la distancia formada por anillos y la separación entre los mismos.

$$Area_{anillos} = \pi * (R^2 - r^2) \quad (3)$$

donde:

R radio desde el centro hasta la distancia medida.

r radio desde el centro hasta el tubo de acceso.

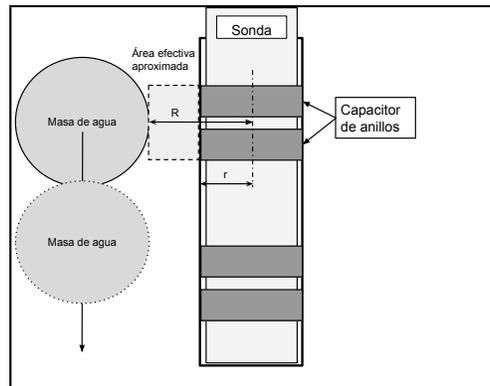


Figura 12: Medición de sensibilidad al aire.

$$Volumen_{sensibilidad} = Area_{anillos} * d \quad (4)$$

donde:

d lado o ancho de los anillos mas la separación entre ambos.

Los volúmenes estimados en base a las mediciones fueron de $0,631 dm^3$ a $1,1 dm^3$.

Sensibilidad con sonda en suelo El segundo método utilizado para estimar el volumen efectivo, consiste en introducir la sonda con sus diferentes sensores en un recipiente con una muestra de suelo y separadores plásticos (Figura 13). En el centro del recipiente se

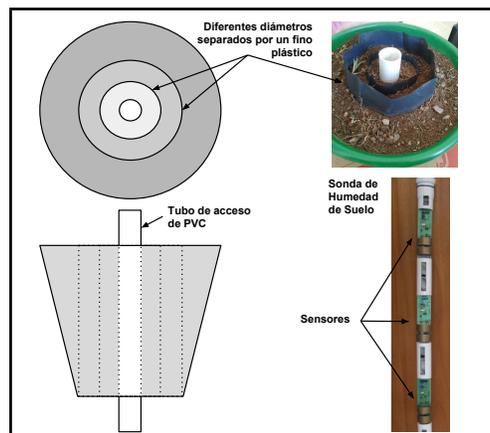


Figura 13: Estructura de medición en suelo.

encuentra el tubo de acceso por el cual se introduce y desde del cual se mide el radio de acción al cual el sensor se ve perturbado por la humedad. Los separadores sirven para frenar el avance del agua en dirección al sensor y poder aislar y poder suponer que el agua a llegado hasta cierta distancia. De estos ensayos se obtuvieron distancias entre los 40 y 50mm aproximadamente, lo cual se condice con lo obtenido con la sonda al aire,

dado que en suelo las pérdidas dieléctricas son mayores que en el aire, reduciéndose así el rango de acción de los sensores (volúmenes de $0,53dm^3$ a $0,74dm^3$).

3.4. Alcance de comunicación inalámbrica

Se realizaron varios ensayos para obtener el máximo alcance de comunicación entre sondas. En función de radios de fresnel calculados para diferentes distancias, se dispusieron las antenas a diferentes alturas y se ensayó en diversos terrenos con notables fluctuaciones entre los mismos. El alcance máximo logrado fue cercano a los 1500 metros.

4. Conclusiones

Una de las principales dificultades presentes en el desarrollo de la sonda fue lograr que todos los sensores funcionen con un mismo rango de variación en frecuencia y que presenten volúmenes de sensibilidad homogéneos. Debido a la frecuencia que trabaja el oscilador y el mezclador, se tuvieron distintas dificultades a la hora de su implementación práctica, necesiándose de varias iteraciones hasta lograr un diseño estable. A pesar de esto, se llegó a un sensor con bajo consumo de corriente (menor a 12mA) y tiempo de respuesta menor a los 5ms. Estas características y el hecho de ser producido localmente, pueden hacerlo competitivo respecto de los disponibles en el mercado. Sobre la sensibilidad de los mismo hay que realizar mejores y más exhaustivos ensayos para comprobar fehacientemente la distancia desde el tubo de acceso a la cual es sensible el sensor y el volumen efectivo de la sensibilidad.

Se logró diseñar e implementar una red de dos sondas comunicadas inalámbricamente con un nodo coordinador, el cual está conectado a una PC con acceso a la Web. Los datos obtenidos se almacenan y pueden ser visualizados desde la página Web del emprendimiento y también descargarse en forma de archivos.

Sobre la comunicación entre las sondas inalámbricas se consiguieron enlaces de hasta 1500m con antenas omnidireccionales. Esta distancia podría aumentar con mejores antenas y aumentando la altura a la cual se encuentran, para lo cual se necesitan nuevos ensayos en campo.

5. Trabajos futuros

Actualmente, se está desarrollando una ecuación que relacione el contenido volumétrico en función de la frecuencia de oscilación del sensor de humedad de suelo, y que a su vez sea útil para los diferentes tipos de suelo. Esto es un gran punto a favor, en contraste con sondas comerciales que solo despliegan el valor de frecuencia sin la función de relación.

Respecto del consumo energético, se puede mejorar los tiempos de adquisición y procesamiento, el tiempo que la radio se encuentra encendida y el apagado de los periféricos que no se encuentran funcionando en ese momento.

A pesar de tener la capacidad en el hardware para direccionar y utilizar 8 sensores, todavía no se ha ensayado con más de 4. Para realizar esto uno de los principales cambios es reducir el tamaño de los sensores, con lo cual se podrían disponer los puntos de medición más cercanos unos de otros.

Con el fin de corregir desviaciones por temperatura en los sensores, se están llevando a cabo mediciones de la misma a las mismas profundidades a las cuales se encuentran los sensores y se dispondrá en un futuro de medición de temperatura en conjunto con los de humedad de suelo.

6. Agradecimientos

Este trabajo se inició como proyecto final de la carrera de ingeniería electrónica, bajo la tutela del Prof. Ing. Guillermo G. Riva, a pedido del emprendimiento INSUS. Luego de finalizado el mismo y en vista de los resultados satisfactorios, se continuó con su desarrollo y evolución constante. Para todo el personal de la empresa, el mayor de los agradecimientos.

Actualmente hay gran interés de productores agropecuarios, como del INTA y el Departamento de Hidrología de la Universidad Nacional de Córdoba, con los cuales no solo se tienen canales abiertos de comunicación sino que también se ha planificado realizar pruebas en conjunto.

El proyecto *Sonda para Medición de Humedad de Suelo por Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia* fue aprobado en la 4° Convocatoria del Fondo de Innovación y Capital Humano de la Agencia de Desarrollo Económico de la ciudad de Córdoba (ADEC).

Referencias

1. Sitio on-line del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva: <http://www.argentinainnovadora2020.mincyt.gob.ar>.
2. Maroni, J. y Gargicevih, A., *Curso de Agricultura de Precisión*, INTA, (1996).
3. A. L. Orozco Corral. *Uso Eficiente del Agua de Riego Mediante Sondas de Capacitancia*. Aqua-LAC - Vol. 2 - N° 1 - (2010).
4. A. Valada, D. Kohanbash and G. Kantor. Design and Development of a Wireless Sensor Network System for Precision Agriculture. Robotics Institute, Carnegie Mellon University. June 2010.
5. Moghaddam, M.; Entekhabi, D.; Goykhman, Y.; Ke Li; Mingyan Liu; Mahajan, A.; Nayyar, A.; Shuman, D.; Teneketzis, D., *A Wireless Soil Moisture Smart Sensor Web Using Physics-Based Optimal Control: Concept and Initial Demonstrations*, Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of , vol.3, no.4, pp.522,535, doi: 10.1109/JSTARS.2010.2052918 (2010)
6. D. A. Robinson, C. S. Campbell, J. W. Hopmans, B. K. Hornbuckle, S. B. Jones, R. Knight, F. Ogden, J. Selker, and O. Wendroth. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review . *Vadose Zone J.* 7:358–389 doi:10.2136/vzj2007.0143.
7. Tyler W. Davis; Xu Liang; Chen-Min Kuo; and Yao Liang, *Analysis of Power Characteristics for Sap Flow, Soil Moisture, and Soil Water Potential Sensors in Wireless Sensor Networking Systems*, IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 12, NO. 6, JUNE 2012.

8. <http://www.sentek.com.au/casestudies/broadacre.asp>
9. <http://www.aquaspy.com/water-savings.html>
10. Sentek Technologies. EnviroSCAN Probe and EasyAG Probe. <http://www.sentek.com.au/products/monitoring.asp>
11. AquaSpy. Soil Moisture Monitoring Device. <http://www.aquaspy.com/solution.html>
12. AquaCheck Soil Moisture Management. Probes: AquaCheck Classic Probe, AquaCheck Sub-surface and AquaCheck Wireless. <http://www.aquachecktech.com/probes>
13. Sentek Technologies. Data retrieval. <http://www.sentek.com.au/products/data.asp>
14. C. Schugurensky y F. Capraro *Control Automático de Riego Agrícola con Sensores Capacitivos de Humedad de Suelo. Aplicaciones en Vid y Olivo*. Actas del XVIII Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ACCA), Santiago, CHILE. (2005).
15. R. J. Matthys, *Crystal Oscillator Circuits*, Revised edition (1992).
16. C. Driscoll, *Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales*, (1993).
17. T. J. Kelleners, R. W. O. Soppe, D. A. Robinson, M. G. Schaap, J. E. Ayars, and T. H. Skaggs. *Calibration of Capacitance Probe Sensors using Electric Circuit Theory*. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:430–439 (2004).
18. M. Schwank, T. R. Green, C. Mätzler, H. Benedickter, and H. Flühler. *Laboratory Characterization of a Commercial Capacitance Sensor for Estimating Permittivity and Inferring Soil Water Content*. Vadose Zone Journal 5:1048–1064 (2006).