

# SENSOR DE HUMEDAD CONDUCTIVO EN SÓLIDOS CON APLICACIÓN EN INVERNADEROS

Elias Fliger, Ing. Leandro Padovani

*Ingeniería en Automatización y Control Industrial*  
*Universidad Nacional de Quilmes*  
*Av. Calchaquí 5800*  
*(1888) Florencio Varela*  
*correo: iaci@unq.edu.ar*

Resumen: Diseño y construcción de sensor de humedad conductivo en sólidos con aplicación en invernaderos. Se ha buscado un instrumento de bajo costo, sencilla implementación y capaz de transmitir una señal estándar de 4-20mA, con la menor incidencia de ruido y errores posibles. Además, debe ser capaz de enviar la señal de múltiples sensores de manera de ocupar una única entrada de un PLC.

Palabras clave: sensor, implementación, diseño económico, transmisión, señales analógicas, electrónica.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de nuestro trabajo ha sido el de realizar un sensor de humedad conductivo en sólidos para ser implementado en un invernadero, que regule desde un Controlador Lógico Programable (PLC) el porcentaje de humedad en tierra.

Se propuso armar, con el menor costo de materiales y mano de obra realizables, un sensor que sea capaz de manipular, según sea conveniente, la humedad de la tierra dentro de un invernadero con la mínima dificultad posible. Esto significó, no sólo una interface sencilla entre el sensor y el actuador (en este caso, regadores), sino una económica y fácil instalación, puesta en marcha, mantenimiento y lectura del sensor, de acuerdo con el ambiente al que se debe adaptar.

### *1.1 Principio de medición, métodos de sensado y unidades de medida.*

El principio de medición de humedad en sólidos está expresado como *Contenido de Humedad*, que es la cantidad de agua existente en una sustancia sólida por unidad de peso o de volumen del sólido seco (Creus Solé, 1993). Para ello existen diversos métodos de medición de acuerdo con las exigencias de cada aplicación:

- Secado Térmico.
- Método Conductivo.
- Método Capacitivo.
- Método Infrarrojo.
- Método Radiactivo.

Analizando los métodos anteriores y estudiando los diferentes casos de aplicación, hemos accedido a tomar como piedra fundamental la publicación de electrólisis Schugurensky y Fullana (2000) cuya problemática ha sido similar a la nuestra, aunque se nos han presentado diferentes necesidades de instalación del sensor.

Centrados en ese origen, adoptamos el método conductivo, consistente en hacer pasar una corriente a través de unos electrodos en contacto con la tierra (Creus Solé, 1993). Las sales disueltas en el agua forman un puente conductivo de una cierta resistividad que aumenta o disminuye de acuerdo con el grado de humedad presente en el sólido. Esto produce una caída de tensión entre los bornes de los electrodos que es, finalmente, transmitida al PLC para controlar el grado de apertura de los regadores..

## 2. CONSTRUCCIÓN

De acuerdo con los aspectos anteriores a tener en cuenta, se debieron hallar los valores de resistencia de la tierra con el cambio de contenido de humedad. Para tales fines, se emplearon una fuente de tensión conocida y un voltímetro para determinar la caída de tensión en los electrodos, estando la tierra saturada de agua o con 100% de humedad. Con el valor obtenido, se calculó el valor de resistencia de la tierra para la condición de saturación y de manera análoga se procedió para porcentajes inferiores de humedad con saltos de 10%, hasta determinar la resistencia de la tierra completamente seca.

Los valores de resistencia obtenidos fijaron una referencia para acondicionar la señal de salida del sensor y establecer los valores máximos y mínimos que el PLC deberá tener en cuenta. Estos resultados quedaron fijados en la tabla 1.

Tabla 1 Resistencia de la tierra para 0% y 100% de humedad, determinando los extremos de la escala de medición.

	Resistencia [Ohm]
Tierra 100% humedad	230
Tierra 0% humedad	6130

Cabe destacar, que el instrumento no puede tener una fuente de tensión continua de sensado ya que podrían dañarse los electrodos al entrar en contacto con el agua, por efecto de la electrólisis (Schugurensky y Fullana, 2000). Entonces, por medio de una fuente oscilante de tensión, se inyectó una señal de onda cuadrada a las puntas de prueba para evitar su degradación.

Finalmente, como requisito constructivo, se deseaba armar una placa electrónica que fuese capaz de acoplar más de un sensor, en caso de expandir las instalaciones del invernadero, de manera tal que sólo se aprovechara una sola entrada del PLC, de la forma más sencilla y económica posible.

### 2.1 Esquema electrónico.

Con una idea clara sobre las características de la variable a medir, se continuó con el armado del prototipo electrónico antes de realizar una versión definitiva del instrumento.

Como puede verse en la figura 1, el circuito consta de seis etapas bien diferenciadas:

1. Fuente de tensión continua estable regulable de +/- 5 V y 300 mA.
2. Oscilador de onda cuadrada de 10 Vpp.
3. Resistencia referencia y bornes de sensado.
4. Rectificador de media onda.
5. Promediador.
6. Transmisor de 4-20 mA.

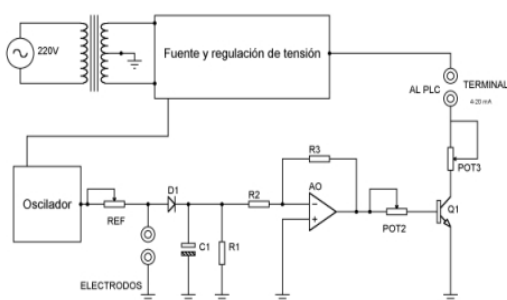


Fig. 1. Esquema electrónico del sensor de humedad.

Uno de los inconvenientes que se presentó durante la construcción del sensor fue la aparición de una onda cuadrada cuyos valores pico diferían levemente, ocasionando un valor medio de onda no nulo y con la consiguiente electrolización de las puntas de prueba. El problema fue corregido desde uno de los reguladores de tensión de la fuente de alimentación, dándole la posibilidad de ajustar la tensión de salida y obtener una onda cuadrada con valor medio nulo.

La etapa osciladora ha sido armada a partir de un esquema básico del popular temporizador LM555 (Millman y Grabel, 1993). Se diseñó para que en su salida se obtenga una onda cuadrada de valor medio nulo con frecuencia de aproximadamente 1,5 kHz, mientras que los valores pico de onda quedan establecidos entre la tensión de entrada y la tierra, del circuito integrado. Además, dado que en una misma placa coexistirán hasta un máximo de tres sensores, se implementó una etapa osciladora por cada par de electrodos y, de esta manera, reducir errores en la medición de cada instrumento.

En la salida del oscilador se encuentra una resistencia variable que sirve como referencia a los electrodos de sensado cuando la tierra posee un 100% de humedad. En este punto era preciso tener una referencia variable ya que las sales presentes en cada tipo de tierra pueden cambiar con el tiempo o las necesidades, permitiendo la corrección de la lectura del sensor en caso de ser necesario.

Luego, se empleó un simple rectificador de media onda que entregará un valor medio máximo de aproximadamente 5 V, con la ayuda de un filtro RC, a la entrada del promediador.

Las señales provenientes de cada electrodo se promedian electrónicamente con un amplificador operacional LM358. En caso de ser útil, es posible desacoplar cada una o todas las entradas al promediador mediante unos jumpers, como puede verse en la figura 2.

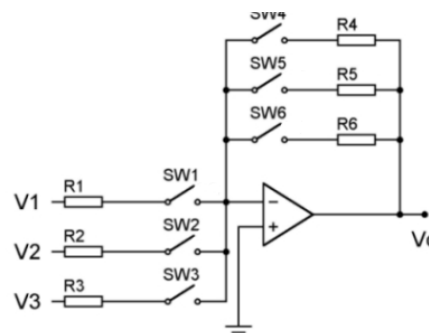


Fig. 2. Promediador de las señales provenientes de tres sensores.

De esta forma, siempre se mantiene un promedio de los valores medidos y, al mismo tiempo, es un esquema conveniente por dos motivos. En primer lugar, permite analizar individualmente las señales de

cada uno de los sensores. En segundo lugar, cumple con las necesidades de instalación al hacer uso de una sola entrada del PLC y no tener que emplear una entrada diferente por cada señal, desaprovechando la capacidad del controlador.

Finalmente, tenemos el lazo de corriente provisto por un transistor bipolar NPN 2N2222, conectado como emisor común (Millman y Grabel, 1993). Posee dos potenciómetros, uno en la base y otro en el colector, que sirven para ajustar tanto el alcance (span) como el cero de la escala del instrumento. Entonces, la variación de la corriente de base  $I_B$  del transistor, gobierna en forma activa la polarización de la juntura, de manera tal que la corriente de colector  $I_C$  se ve modificada con  $I_B$ . La corriente de colector es la que será transmitida al PLC como señal estándar de 4-20 mA de corriente continua, en forma analógica, para que éste último tome las decisiones pertinentes sobre los regadores.

### 3. ENSAYOS Y RESULTADOS

Para realizar los ensayos de humedad, se tomaron 10 muestras iguales, en peso, de tierra seca tamizada y homogeneizada, a las que se les agregaron cantidades crecientes en 10%, respecto del peso total, de agua.

El peso de cada muestra de tierra alcanzó los 13,5 gramos, mientras que la saturación de humedad se logró con 12,0 gramos de agua. Así mismo, se buscó que las muestras no resultaran demasiado voluminosas para poder conseguir un grado uniforme de humedad en la masa de tierra, especialmente para las muestras con menor contenido de agua.

Por otro lado, se probaron distintas clases de puntas de prueba o electrodos, con la idea de reducir, en la mayor cantidad posible, errores por resistividad de los conductores y errores de manipulación de los electrodos. Las terminales son de cobre, con un diámetro de 2mm, a 7mm de distancia entre sí y con una longitud de exposición a la humedad de 15mm.

Los electrodos se colocan de forma tal que la superficie expuesta de los terminales ocupará una longitud de 7,5mm por encima y por debajo de la raíz de la planta, ya que sólo interesa el contenido de humedad alrededor de esa región en la tierra.

#### 3.1 Ensayos realizados.

Para la primer serie de ensayos, se tomaron las diez muestras de tierra con sus respectivos niveles de humedad y se realizaron cuatro mediciones sucesivas luego de haber calibrado el instrumento de acuerdo con la tierra saturada de agua, de modo de observar el alcance del sensor y desplazamiento de la curva esperada de medición. Los valores recopilados están tabulados en la siguiente tabla:

Tabla 2. Relación entre el porcentaje de humedad de la tierra y la corriente en el sensor, medida en mA.

Humedad	E1	E2	E3	E4	Prom [mA]
10	22,03	23,00	20,17	22,16	21,65
20	20,82	22,67	20,10	19,04	20,22
30	15,11	18,47	14,47	16,92	15,03
40	9,96	16,00	12,73	13,41	11,53
50	11,33	15,23	10,09	10,32	10,55
60	9,13	13,78	9,41	8,43	9,27
70	8,49	12,60	8,40	8,36	8,10
80	7,67	9,10	7,23	7,63	7,58
90	4,30	7,16	3,44	3,80	3,97
100	1,16	5,19	2,25	1,65	1,78

Se pudo apreciar que las curvas de respuesta obtenidas registraron un desplazamiento promedio de 0,97mA por debajo de la curva esperada de medición. Esto significa un error promedio de 6,06% respecto de la escala 4-20mA. Los errores máximos estuvieron concentrados en los extremos máximos y mínimos de la escala, en el orden del 15%, mientras que los errores mínimos se aglomeraron en los valores medios, entre el 30 y 70% de humedad, con una media del 8,5% de plena escala.

A la falta de calibración general del dispositivo, se encontraron como principales fuentes de error dos motivos esenciales:

- i) Una incorrecta homogeneización de la humedad en cada muestra de tierra, ocasionando valores muy dispares hacia los extremos de la escala, donde la tarea distribuir el agua uniformemente resultó ser más dificultosa.
- ii) Deficiente manipulación del sensor que produjeron resultados desiguales para una misma muestra, de acuerdo al lugar donde se colocaron los electrodos. Además, en algunos casos, no se tomaron en cuenta los tiempos de estabilización de la medición antes de registrar los valores

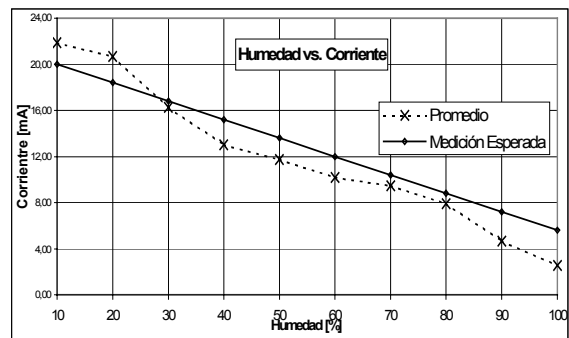


Fig. 3. Resultados obtenidos para el primer ensayo, en el que se muestra la relación entre el porcentaje de humedad en tierra y la corriente del sensor.

El segundo ensayo consistió en verificar que la señal transmitida a través de los conductores no sumara errores significativos a la entrada del PLC. Si bien, las dimensiones del invernadero no son grandes, algunos conductores tienen una longitud aproximada de 15 metros. Por lo tanto, se realizó una comparación de mediciones con conductores de 20 metros de longitud contra otros de 30 cm, para los rangos de humedad del 0-30% y 80-100% donde se localizaron los errores más groseros.

En la tabla 3 tenemos las siguientes referencias:

- Ensayo 1: ensayo realizado con 30cm de cable.
- Ensayo 2: ensayo con 20m de cable.
- H0, H15, H90: humedad de la tierra con 0, 15 y 90% respectivamente. Lo índices 1 y 2 indican a qué ensayo corresponden.

Tabla 3. Resultados obtenidos al realizar mediciones con conductores de 30cm y 20m, respectivamente.

Ensayo 1			
Prueba	H0.1	H15.1	H90.1
1	21,83	16,22	3,85
2	21,88	15,54	3,31
3	21,87	15,80	3,80
4	21,92	16,05	3,21
5	21,80	14,00	2,88
Promedio	21,86	15,52	3,41

Ensayo 2			
Prueba	H0.2	H15.2	H90.2
1	21,71	15,33	3,51
2	21,73	16,83	2,57
3	21,85	16,86	4,72
4	21,82	13,92	2,88
5	21,85	15,40	3,01
Promedio	21,79	15,67	3,34

Como se puede apreciar, la elección de la señal de 4-20mA es apropiada en nuestro caso como era de esperarse, ya que el ruido y la longitud de los conductores podrían acarrear serios problemas en la medición, sin necesidad de agregar una electrónica adicional de filtrado o de elevación de tensión.

#### 4. CONCLUSIONES

Finalmente, y luego de analizar los datos obtenidos, cabe preguntarnos acerca de la conveniencia, o no, de la construcción de un instrumento de medición. Frente al desafío presentado, se pueden enumerar una serie de ventajas y desventajas, que ayuden a lograr

un buen mantenimiento del equipo y seguimiento de las variables a medir por el sensor.

Desde un punto de vista pesimista, la decisión de diseño, armado, calibración e instalación de un equipo; depende casi por entero de la complejidad y conocimientos sobre el tema, sumado al tiempo que se puede emplear en investigación y ensayo del dispositivo.

Las dificultades que se encontraron durante el armado e instalación del sensor fueron las siguientes:

- i) Falta de elementos de calibración, por lo que se tuvo que preparar un método adaptado a nuestras necesidades.
- ii) Algunos detalles de índole técnico, como la alimentación del amplificador operacional (AO), que restringió a tres el número de sensores a montar sobre una placa, debido a una fácil saturación de la entrada al mismo. En cuanto a los electrodos, es conveniente una inspección constante ya que la humedad degrada significativamente el estado de las puntas, que producirán errores en la lectura.
- iii) El sensor no posee compensación de temperatura, aunque la fluctuación dentro del invernadero no sea muy grande. Además, frente a cambios de sales disueltas en agua, el sensor es sensible a variaciones grandes en la escala, corrimiento de cero y modificación del alcance, que deberán ajustarse manualmente.
- iv) En la instalación, se deben manejar dos caudales diferentes de agua con un mismo transmisor, para que la humedad en los dos sectores del invernadero sea la misma. Por lo tanto, el uso de promedios ayudó a solucionar parcialmente el problema.

Desde las ventajas podemos citar las siguientes:

- i) Facilidad de adquisición de los elementos electrónicos para construir el instrumento, ahorrando tiempo y dinero.
- ii) Esquema sencillo, de pequeño tamaño, facilitando la inspección y mantenimiento del sensor. Con la configuración elegida, es posible acoplar según sea conveniente, hasta tres sensores sin inconvenientes, usando sólo una entrada del PLC.
- iii) Presenta una curva lineal y una rápida respuesta frente a variaciones de humedad.
- iv) Interface entre el transmisor y el PLC muy sencilla, con muy buena inmunidad al ruido y útil para usar en grandes distancias debido a la señal estándar de 4-20mA en corriente continua.

Concluyendo, podemos decir que la ventaja de tener un esquema sencillo de construcción, de bajo costo y

sin estar limitados por el tiempo en el desarrollo del instrumento de medición, inclinó la decisión a comprometerse con el desafío. Estas primeras aproximaciones han servido de centro para nuevas ampliaciones y mejoras del dispositivo, con la idea de aumentar las ventajas y reducir al mínimo las contras.

Aún en situación de prueba, el sensor pudo ser adaptado fácilmente a cada caso de ensayo, con respuestas verdaderamente convenientes a la hora de implementar junto con el PLC, un sistema de riego automático.

#### REFERENCIAS

- Creus Solé, Antonio (1993).  
*Instrumentación Industrial*. Ed. Marcombo, 5ª edición; Barcelona.
- Millman, Jacob; Grabel, Arvin (1993).  
*Microelectrónica*. Ed. Hispano Europea; 2ª edición. Barcelona.
- Schugurensky, Carlos; Fullana, Rogelio (2000).  
*Invernadero experimental para validación de algoritmos*. XVII Congreso Argentino de Control Automático. 177-182. Buenos Aires, Argentina.