

Teoría de Control

Trabajo Práctico Integrador: Riego Automatizado

| Grupo N° 4 - Integrantes: | | |
|---------------------------|-----------|------------------------------------|
| Apellido y Nombres | Legajo | E-Mail |
| Oyhanarte, Nahuel | 154.566-8 | noyhanarte@est.frba.utn.edu.ar |
| Domingo, Hernán Leandro | 130.631-5 | hdomingo@est.frba.utn.edu.ar |
| De Luca, Rodrigo | 139.814-3 | cdelucagallego@est.frba.utn.edu.ar |
| Rial, Jorgelina Valeria | 138.140-4 | jrial@est.frba.utn.edu.ar |
| Constenla, Juan Manuel | 120.441-5 | juanconstenla@est.frba.utn.edu.ar |

| Profesor | Curso |
|------------------------|-------|
| Ing. Julio Rossini | K4571 |
| Ing. Carlos Orlandelli | K4571 |

Índice

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| Índice | 2 |
| Introducción | 3 |
| Objetivo | 3 |
| Alcance | 3 |
| Marco Teórico | 4 |
| Sistemas de Control | 4 |
| Leyes de Control | 6 |
| Desarrollo | 7 |
| Funcionamiento del sistema | 7 |
| Medición | 9 |
| Diagrama de bloques | 10 |
| Componentes | 10 |
| Entradas | 14 |
| Salidas | 15 |
| Algoritmo de Control | 15 |
| Perturbaciones | 16 |
| Implementación teórica | 17 |
| Implementación práctica | 18 |
| Conclusión | 19 |
| Bibliografía | 20 |
| Anexo A: listado de partes | 21 |
| Anexo B: algoritmo de control | 22 |

Introducción

Un vivero, comprendido por una serie de plantaciones en un espacio finito, usualmente cerrado y de carácter urbano/semi-urbano, tiene entre sus principales preocupaciones el manejo de las variables ambientales y biológicas que repercuten en el bienestar y crecimiento de las plantas a su cargo. Entre ellas podemos mencionar la temperatura del lugar, la humedad (tanto ambiental como terrestre), los nutrientes / fertilizantes y la luz solar.

En particular, el manejo del agua en plantaciones (sean urbanas o agrícolas, de menor o mayor escala) ha sido históricamente un proceso con toma de decisiones manuales, que implica mayormente el accionar de un sistema de riego en base a parámetros climáticos y biológicos.

Incluso a día de hoy, con la tecnología que nos rodea en casi todas las áreas de nuestra vida, las decisiones sobre cuándo y cuánto regar un determinado cultivo siguen dependiendo de la intuición y la experiencia humana, sin apoyarse en la automatización e inteligencia que las máquinas pueden brindar.

La automatización de ciertos controles puede ofrecer, principalmente en plantaciones grandes (granjas, campos o viñedos), un ahorro significativo de agua y un aumento de la productividad, con sus consecuentes beneficios económicos y ecológicos. En cuanto a plantaciones domésticas, puede ayudar a ahorrar bastante tiempo y evitar olvidos que pueden llevar a que las plantas mueran por inanición.

Objetivo

El presente trabajo busca realizar un análisis detallado del funcionamiento de un vivero, en particular de su sistema de control de riego, para el manejo automático del agua dentro en un entorno urbano/semi-urbano. A partir de la medición y análisis de dos variables principales, la temperatura ambiente y la humedad en tierra, se controla una bomba de riego que permite mantener la humedad dentro de los umbrales deseados, aumentando así la eficiencia del sistema y disminuyendo el estrés hídrico de la planta.

Alcance

El foco estará puesto en un sistema, de pequeña/mediana escala, que permita controlar el riego en un vivero o huerta; aunque los principios, materiales y tecnología aquí presentados

permiten extrapolar el sistema a uno de mayores dimensiones (granja, viñedo, plantación rural, etc.) sin mayores diferencias.

Los puntos de interconexión que tendrá con el mundo exterior serán:

- Sensor de temperatura ambiente
- Sensor de humedad en tierra
- Bomba de agua (actuador)

La variable que se controlará es la humedad en tierra de las plantas teniendo también en cuenta la temperatura ambiente, por lo tanto las señales de entrada serán la temperatura ambiente (señal digital) y la humedad en tierra (señal analógica), esta última deberá ser convertida a una señal digital en el microcontrolador. La realimentación será negativa y será la humedad medida en tierra.

Al centrarnos en un sistema de pequeñas / medianas dimensiones no tendremos en cuenta perturbaciones que podrían ser significativas en un ambiente de mayor escala, como podrían ser, cantidad de luz solar a la que está expuesta la plantación, el radio de dispersión del agua regada, corrientes de aire circulantes, etc.

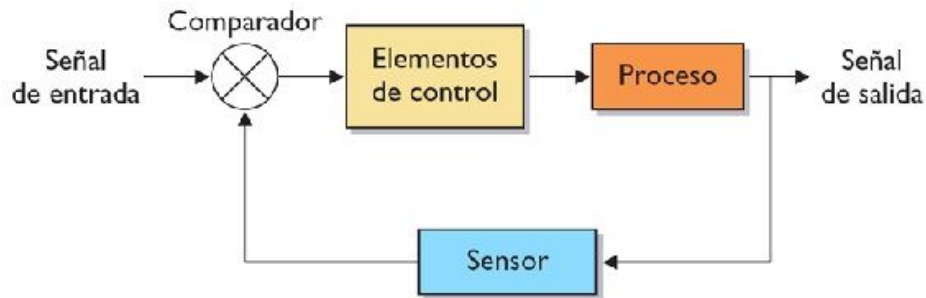
Marco Teórico

Sistemas de Control

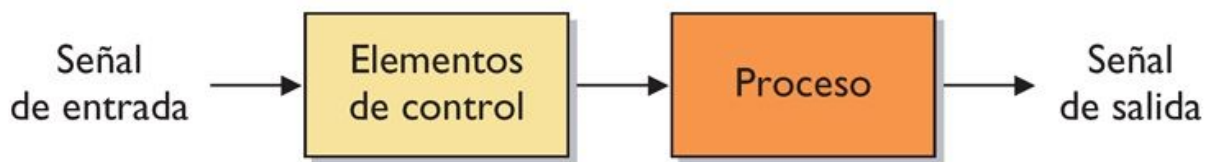
Un sistema de control consiste en un conjunto de dispositivos tendientes a mantener una o varias variables en consideración dentro de ciertos límites prefijados.

Podemos clasificarlos en dos grandes tipos:

- Sistemas de control de lazo abierto: la salida no tiene efecto sobre el sistema de control, esto significa que no hay realimentación de dicha salida hacia el controlador para que éste pueda ajustar la acción de control.
- Sistemas de control de lazo cerrado: la acción de control está en función de la señal de salida; es decir, en los sistemas de control de lazo cerrado o sistemas de control con realimentación, la salida que se desea controlar se realimenta para compararla con la entrada (valor deseado) y así generar un error que recibe el controlador para decidir la acción a tomar sobre el proceso, con el fin de disminuir dicho error y por tanto, llevar la salida del sistema al valor deseado.



VS



Podríamos considerar de **lazo abierto** un sistema simple con un temporizador que active/desactive la irrigación, según una programación predefinida del día y hora de la semana, sin considerar las condiciones medioambientales o del cultivo, como si ese día hubiera llovido o las plantas se encontraran particularmente secas. La principal ventaja de estos sistemas es su simplicidad, bajo costo y mantenimiento sencillo.

Asimismo, un sistema de **lazo cerrado**, como el que se estudia en este trabajo, consta de realimentación que le permite ajustar la señal de salida según la diferencia que posea con la entrada. Esto capacita al sistema para decidir, con cierto grado de autonomía e inteligencia, el momento y la cantidad propicias de agua según lo que sus algoritmos consideren necesarios.

La principal limitación de estos sistemas es encontrar la mejor posición de los sensores en el suelo o de las plantas, debido a la variabilidad espacial de las propiedades del suelo o del desarrollo del cultivo, que puede hacer difícil determinar un lugar representativo del terreno. Se necesita, además, un conocimiento adecuado de las relaciones agua-suelo-plantas, de la dinámica de las raíces o de la evolución y desarrollo de los órganos del cultivo.

Otra posible clasificación incluiría sistemas de tipo manual o automático, según requieran intervención de un operador humano para su toma de decisiones o sean capaces de manejarse de forma autónoma.

Leyes de Control

Los controladores pueden ser de diversos tipos, en función de las acciones básicas de control que se puedan realizar. En general, estas acciones básicas dan lugar a los sistemas discontinuos, incluyendo a las acciones de control on/off y de control de varias posiciones. Por otro lado, los sistemas continuos incluyen los controles proporcional, integral y derivativo, entre otros.

A continuación se describen las más importantes:

1. **On/Off:**

En este tipo, el elemento de control sólo proporciona dos niveles: On (encendido) y Off (apagado). El actuador tiene, por tanto, sólo dos posiciones fijas, que en la mayoría de los casos son, simplemente, conectado y desconectado.

El principal inconveniente de este controlador se produce en el momento en que se debe producir la conmutación a un determinado estado, ya que puede ocurrir que el sistema oscile con mucha frecuencia.

2. **Control de varias posiciones:**

El funcionamiento es similar al controlador on/off, con la diferencia de que puede tener más de dos estados de salida. Igual que el controlador on/off, se pueden producir oscilaciones en cada cambio de fase.

3. **Control proporcional:**

En un controlador proporcional se genera una señal de control proporcional al error. El mayor problema con este tipo de control es el llamado error en estado estacionario, provocado por perturbaciones exteriores, los cuales no pueden ser corregidos por el control proporcional.

4. **Control proporcional integral (PI):**

El modo de control integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la señal y el valor de referencia, integrando esta desviación en el tiempo y sumándose a la acción proporcional. Su valor de salida varía en razón proporcional al tiempo en que ha permanecido el error y la magnitud del mismo.

5. **Control proporcional derivativo (PD):**

El controlador derivativo se opone a desviaciones de la señal de entrada, con una respuesta que es proporcional a la rapidez con que se producen éstas.

6. Control proporcional-integral-derivativo (PID):

Si se combinan las tres acciones de control, surge el controlador PID que no presenta error de desplazamiento y reduce la tendencia a las oscilaciones.

Se trata de aprovechar las ventajas de cada uno de los controladores de acciones básicas, de manera que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral y, mientras que si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa. Ofrece una respuesta muy rápida y una compensación de la señal de error inmediata en el caso de perturbaciones.

Desarrollo

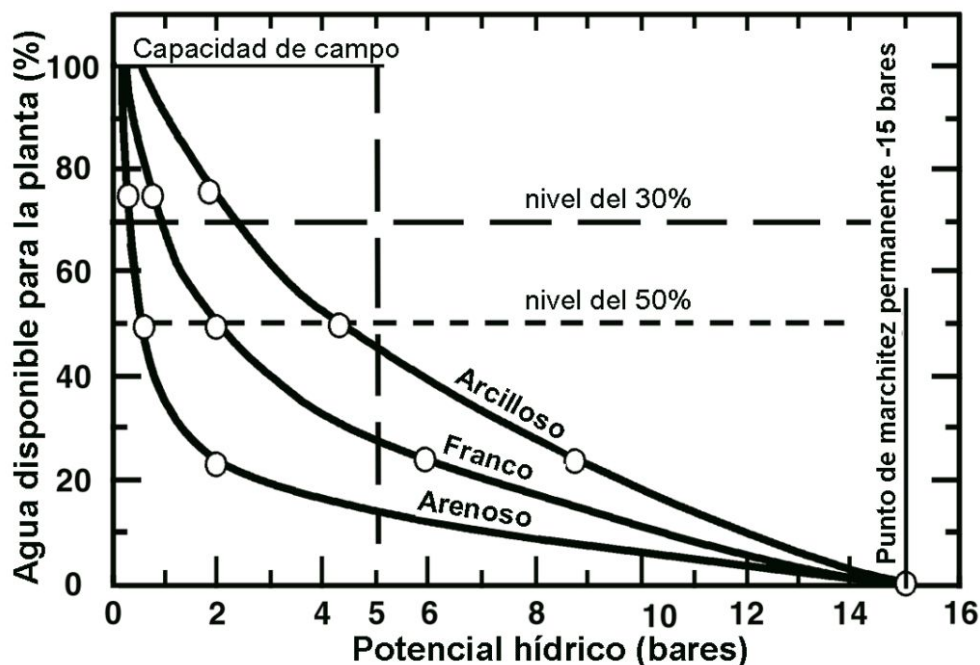
Funcionamiento del sistema

El sistema elegido busca mantener la humedad de las plantas de un vivero alrededor de un valor esperado o de referencia, previamente ingresado por el usuario. En la práctica, este valor está sujeto al tipo de plantación y las condiciones medioambientales de la misma (como ser el tipo de suelo), y está asociado a dos preguntas: ¿cuándo regar? y ¿cuánta agua aplicar?

Parte fundamental del sistema entonces es la medición de la humedad de la tierra que rodea a la planta, permitiendo, con la ayuda de algoritmos, poder responder las preguntas previamente planteadas y anticiparse así a condiciones desfavorables.

Un método que se usa comúnmente para determinar cuándo regar es monitorear la disminución de agua en el suelo. Cuando una planta crece, utiliza el agua del suelo alrededor de su zona de raíces. Cuando el perfil del suelo está lleno de agua y alcanza lo que se llama capacidad de campo (CC), se dice que el perfil está al 100% de su contenido de humedad disponible o a aproximadamente 0.1 bares de tensión (la tensión es una medida que determina la fuerza con la que las partículas del suelo retienen a las moléculas de agua: a mayor retención de humedad, más alta es la tensión).

La siguiente figura muestra tres curvas típicas para suelos arenosos, arcillosos y francos:



A medida que las plantas agotan el agua, la tensión en el suelo aumenta. Las plantas utilizan el agua del suelo hasta que el nivel de humedad alcanza el punto llamado “marchitamiento permanente” (PMP), una vez que se llega a este punto las plantas ya no pueden seguir obteniendo agua del suelo y mueren de sed. Dependiendo del tipo de planta y del tipo de suelo, el PMP ocurre a diferentes niveles de humedad; en la mayoría de los cultivos agronómicos, ocurren cuando la tensión en el suelo es de aproximadamente 15 bares (esto significa que el suelo está reteniendo el agua en sus poros con tanta fuerza que, para que las plantas puedan utilizar esta agua, deben crear una fuerza de succión mayor a 15 bares de tensión). El agua disponible para la planta (ADP) entonces es la diferencia en contenido de humedad entre la capacidad de campo y el PMP.

La programación del riego se fija de acuerdo a un porcentaje de abatimiento del ADP. A este nivel de reducción se le conoce como Déficit Permitido en el Manejo del Riego (DPM). La mayoría de las investigaciones en riego recomiendan regar los cultivos en surcos tales como algodón, maíz y sorgo de grano, cuando el DPM se acerca al 50%. Para los cultivos de hortalizas, el DPM comúnmente se establece al 40% o menos, debido a su mayor sensibilidad al estrés hídrico. Estas cantidades o déficits aseguran que el estrés hídrico no sea tan severo que pueda causar una pérdida considerable de la cosecha. Para poder planear un punto apropiado de riego, necesita hacerse un monitoreo cuidadoso del ADP durante toda la temporada.

Para determinar luego el contenido de humedad del suelo, hay diversos mecanismos con distinto grado de sofisticación, que serán evaluados a continuación.

Empezamos por definir humedad del suelo, la cual es la cantidad de agua por volumen de tierra que hay en un terreno; existiendo varias técnicas para la medición de la misma, agrupadas en:

- gravimétricas,
- tensiométricas,
- atenuación de neutrones,
- disipación de calor, y
- técnicas dieléctricas.

La medición exacta se realiza de forma gravimétrica, extrayendo una muestra de tierra y midiendo su peso antes y después de su secado. Es la única medida directa, ya que el resto de las técnicas se basan en mediciones indirectas según propiedades del suelo, que varían dependiendo de su contenido de agua, siendo de ellas las más precisas la TDR (reflectometría de dominio de tiempo) y la sonda de neutrones.

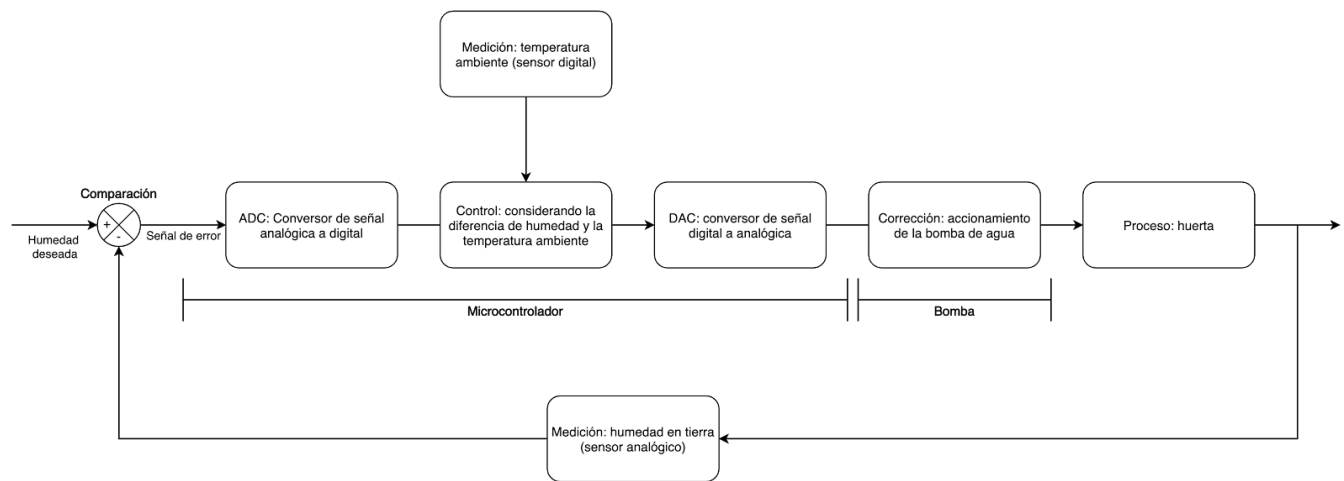
A los efectos de este trabajo, nos concentraremos en las técnicas dieléctricas, utilizando sensores capacitivos que, si bien requieren de calibración previa y carecen de extrema precisión, son de bajo costo y fácil accesibilidad, lo que facilita su implementación en contextos a los que apunta esta solución. Para ello, se colocarán sensores de humedad en tierra en determinadas plantas “testigo”, que serán representativas del estado del vivero en general. El riego se considerará único y compartido entre todas las plantaciones, aunque podría eventualmente sub-dividirse en secciones controladas de forma independiente, acorde al tamaño del vivero y la variabilidad presente entre sus plantas (ya que cada tipo de cultivo posee distintas propiedades de absorción de agua).

Medición

Se pueden utilizar diversos métodos para determinar el uso de agua en el cultivo y ayudar a los agricultores a programar el riego. El método más común es usar una ecuación para calcular el uso de agua o la evapotranspiración (ET) de un cultivo de referencia y relacionar ese valor con la ET de otros cultivos. La ET se refiere a la pérdida de agua debido a la evaporación del suelo y a la transpiración de la planta. Al comienzo de la temporada de crecimiento de un cultivo, las plantas son pequeñas y la mayoría de las pérdidas de agua se deben a la evaporación del suelo. A medida que las plantas crecen y el follaje aumenta, hay más sombra en el suelo y la pérdida de agua se hace mayormente a través de la transpiración de la planta.

En ese momento, se puede determinar el uso diario de agua del cultivo usando las ecuaciones ETo con coeficientes del cultivo. Estos valores se restan al contenido total de agua que hay en el suelo y así se determina un nuevo contenido de humedad. Este proceso continúa hasta que la cantidad de agotamiento del ADP en el suelo alcanza una medida predeterminada (el DPM). Para muchos cultivos, el DPM se establece entre 40% a 50% en la zona de raíces del cultivo. Sin embargo, algunos cultivos, tales como los cultivos de hortalizas, son más sensibles a cambios fuertes de humedad del suelo y entonces el DPM se fija a un porcentaje más bajo.

Diagrama de bloques



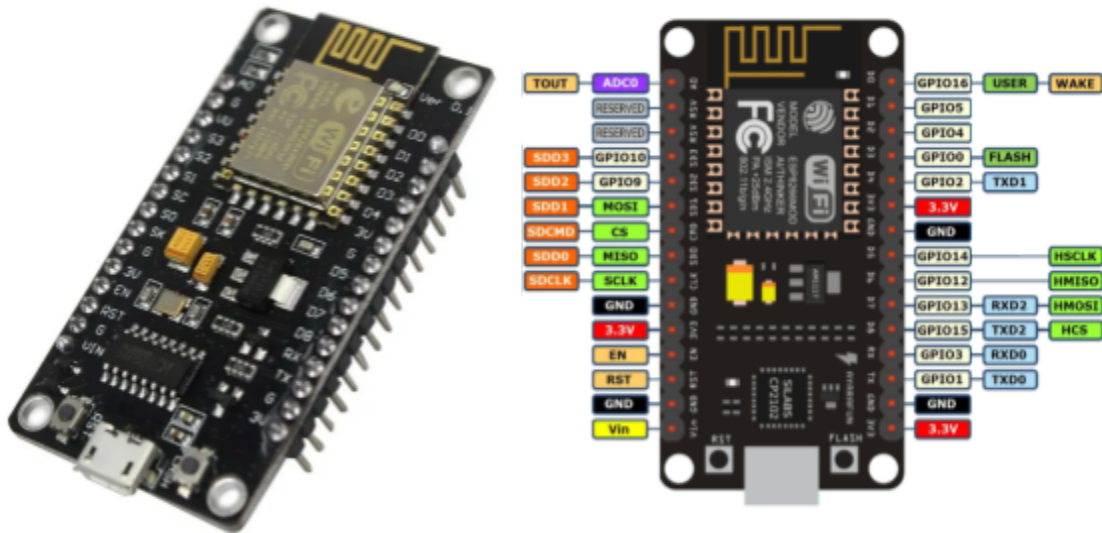
- Variable de referencia: humedad deseada ingresada por el usuario, según el tipo de cultivo y la zona donde se encuentre.
- Comparador (punto suma): calcula y emite la señal de error.
- Señal de error: diferencia entre humedad deseada (variable esperada) y humedad medida (variable de realimentación).
- Conversor ADC: convierte la señal de error analógica a digital, para ser procesada por la unidad de control.
- Control: acciona la bomba de agua según la señal de error y la temperatura ambiente.
- Conversor DAC: convierte la señal digital del controlador en analógica, para ser interpretada por el elemento corrector (actuador).
- Corrección (actuador): busca disminuir la señal de error, en este caso acciona la bomba de agua que riega la planta, aumentando su humedad.
- Proceso (planta): sistema de riego en la huerta o maceta (carga).
- Elementos de medición: sensor de humedad en suelo, sensor de temperatura ambiente.
- Realimentación: humedad medida en tierra por medio del sensor.

Componentes

- Controlador [\[A\]](#)

Se utilizará un microcontrolador NodeMCU, basado en el popular SoC (System On Chip) Espressif ESP8266 (encapsulado por ESP-12). El mismo es de bajo costo, orientado a aplicaciones IoT (Internet of Things), open source y fácilmente configurable.

Incluye además WiFi, 10 GPIO (General Purpose Input Output) pins, un convertidor ADC (analógico a digital) y un convertidor USB a Serial CH340.



- Sensor de humedad [\[B\]](#)

Se utilizará un sensor de humedad en suelo, capacitivo, para poder monitorear la humedad relativa en la tierra e introducir esta medición como entrada de nuestro sistema de control.

Especificaciones técnicas:

- Pines: data, GND, VCC
- Salida: analógica (0 ~ 3v DC)
- Voltaje de operación: 3.3 ~ 5.5v DC
- Corriente de operación: 5mA
- Dimensiones: 98mm x 23mm (largo x ancho).
- Peso: 15g



- Sensor de temperatura [\[C\]](#)

Se utilizará un sensor de temperatura (y humedad ambiente) DHT22, a efectos de introducir también dicha medición como variable de entrada en nuestro sistema.

Este sensor es la evolución del DHT11, con la ventaja de poseer mayor precisión y rango de operación.

Nótese que también permite la medición de humedad ambiente pero a efectos de este trabajo dicho dato no aporta información significativa por lo que no será considerado.

Especificaciones técnicas:

- Pines: VCC, data, null, GND
- Salida: digital (tiempo de muestreo 2s).
- Voltaje de operación: 3.3 ~ 6v DC
- Corriente de operación: 2.5mA max.
- Dimensiones: 25mm x 15mm (largo x ancho).
- Peso: 2.4g



- Bomba de agua [\[D\]](#)

Para actuar sobre el proceso se prefiere el uso de una bomba de agua sumergible, accionada directamente desde el controlador. Nótese que se podría usar una electroválvula accionada por medio de un relay, pero implicaría que la altura del tanque de agua que suministra al sistema de riego sea mayor que la de la plantación bajo control, lo cual no siempre es posible o deseable.

Especificaciones técnicas:

- Voltaje de operación: 2.5 ~ 6v
- Corriente de operación: 180mA max.
- Caudal: 80 ~ 120l/h
- Tamaño de salida: 7.5mm
- Tamaño de entrada: 5mm
- Dimensiones: 40mm x 2.4mm (largo x ancho)
- Peso: 30g



- Alimentación [\[E\]](#)

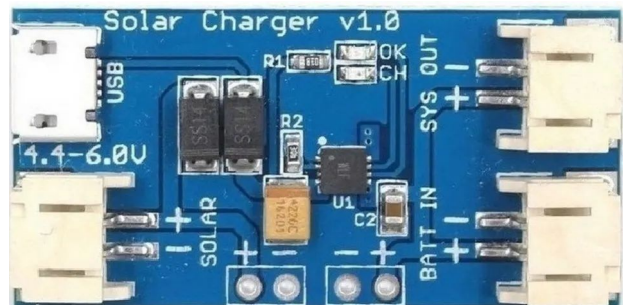
Para la alimentación de todos los componentes se utilizará un transformador de voltaje, con una entrega máxima de corriente de 800mA, entrada alterna de 220v, y una salida continua regulable entre 3 y 12v. El mismo permite proveer tanto al controlador (que a su vez alimenta los sensores), y a la bomba de agua.





Opcionalmente, para lugares aislados o remotos, sin acceso a la red de corriente eléctrica, se podría reemplazar la fuente previa por un panel solar con baterías de litio, las cuales permitirían acumular energía en horarios diurnos y días soleados para ser consumida tanto en horarios nocturnos como en días nublados.

Para esto se podrían utilizar pilas de Li-Ion de tipo 18650 a 3.7v, conectadas a un panel solar de 5v y una placa cargadora de baterías. [\[E\]](#) [\[G\]](#) [\[H\]](#)



Entradas

- **Humedad**

A través del sensor de humedad referido en el apartado anterior, se obtiene como input la humedad en tierra. La señal es de tipo analógica en un rango de 0 a 3V de corriente continua, que son convertidos por el ADC en una señal digital discreta que toma un rango finito entre 0 y 1023, luego de ser conectado por medio del pin de entrada analógico A0 del controlador NodeMCU.

En la práctica, la amplitud del intervalo depende de la calibración inicial del sensor (ya que difícilmente alcancemos 0% de humedad en condiciones normales de presión y temperatura), debiéndose medir inicialmente el valor reportado por el mismo en aire libre, y luego sumergido completamente en agua.

Por ejemplo:

- Valor reportado con sensor en aire (humedad al mínimo) = 520
- Valor reportado con sensor en agua (humedad al máximo) = 260

Entre ambos valores se configuran automáticamente 3 rangos posibles, siendo:

- Inundado = [260, 350)
- Húmedo = [350, 430)
- Seco = [430, 520)

Nótese que el valor de señal emitido por la sonda es inversamente proporcional a la humedad en tierra: 0v de salida = 100% de humedad, 5v de salida = 0% de humedad.

- **Temperatura**

Haciendo uso del sensor DHT22 mencionado en el apartado de componentes, se obtiene la temperatura ambiente en el sistema bajo análisis. La señal, en este caso, es de tipo digital y se obtiene directamente conectando el mismo al pin de entrada digital D0 del controlador NodeMCU. Esta medición es útil para evaluar la cantidad de agua a aplicar según las condiciones ambientales, ya que el coeficiente de evaporación influye en gran manera según la zona geográfica (latitud/longitud) donde se encuentre la planta, así como la época del año e incluso el momento del día en el que se esté ejecutando el algoritmo de control.

Salidas

En base a las entradas previamente clasificadas (humedad medida y temperatura ambiente), y considerando el valor de referencia (humedad esperada), se efectúan los cálculos necesarios para determinar si corresponde o no activar la bomba de riego. Nótese que la misma puede ser regulada tanto en potencia (variando el voltaje aplicado) y en duración (variando el intervalo de tiempo en el cual se aplica dicho voltaje). A efectos de simplificar la operatoria, en este trabajo sólo se opera sobre esta última variable (duración), dejando fija la potencia, prefijada con un voltaje de 5v.

Algoritmo de Control

En el presente sistema se eligió utilizar una ley de control proporcional por su simpleza y la poca influencia de perturbaciones exteriores considerando su ámbito doméstico. En el mismo se varía la duración de encendido de la bomba para irrigar agua así como el tiempo hasta la próxima medición dependiendo de las medidas tomadas de temperatura ambiente y humedad en tierra.

A efectos ilustrativos se ejemplifica una versión sencilla del algoritmo de control:

1. Se toma la medida de la humedad en tierra (HumTie)
2. Calcula señal de error: $\text{DifHum} = \text{HumEsp} - \text{HumTie}$
3. Si la señal de error (DifHum) es mayor a 0:
 - a. Lee la medición de TempAmb
 - b. Calcula duración de accionamiento de la bomba:
 - i. $\text{DurBomb} = (\text{DifHum} * \text{TempAmb}) / 10$
 - c. Acciona la bomba por el tiempo DurBomb (segundos)
 - d. Se calcula el tiempo para la próxima medición (para que la tierra pueda absorber la humedad irrigada): $\text{ProxMed} = \text{DurBomb} * 2$
4. Si la señal de error es 0: se setea $\text{ProxMed} = 5$ (minutos)
5. Pasado ProxMed vuelve al punto 1.

Obs.: el código completo puede encontrarse en el [Anexo B](#).

Perturbaciones

Al tratarse de un sistema de riego que puede estar expuesto a la intemperie, se han contemplado las perturbaciones causadas mayormente por efectos climáticos, según su afectación a los parámetros aquí considerados:

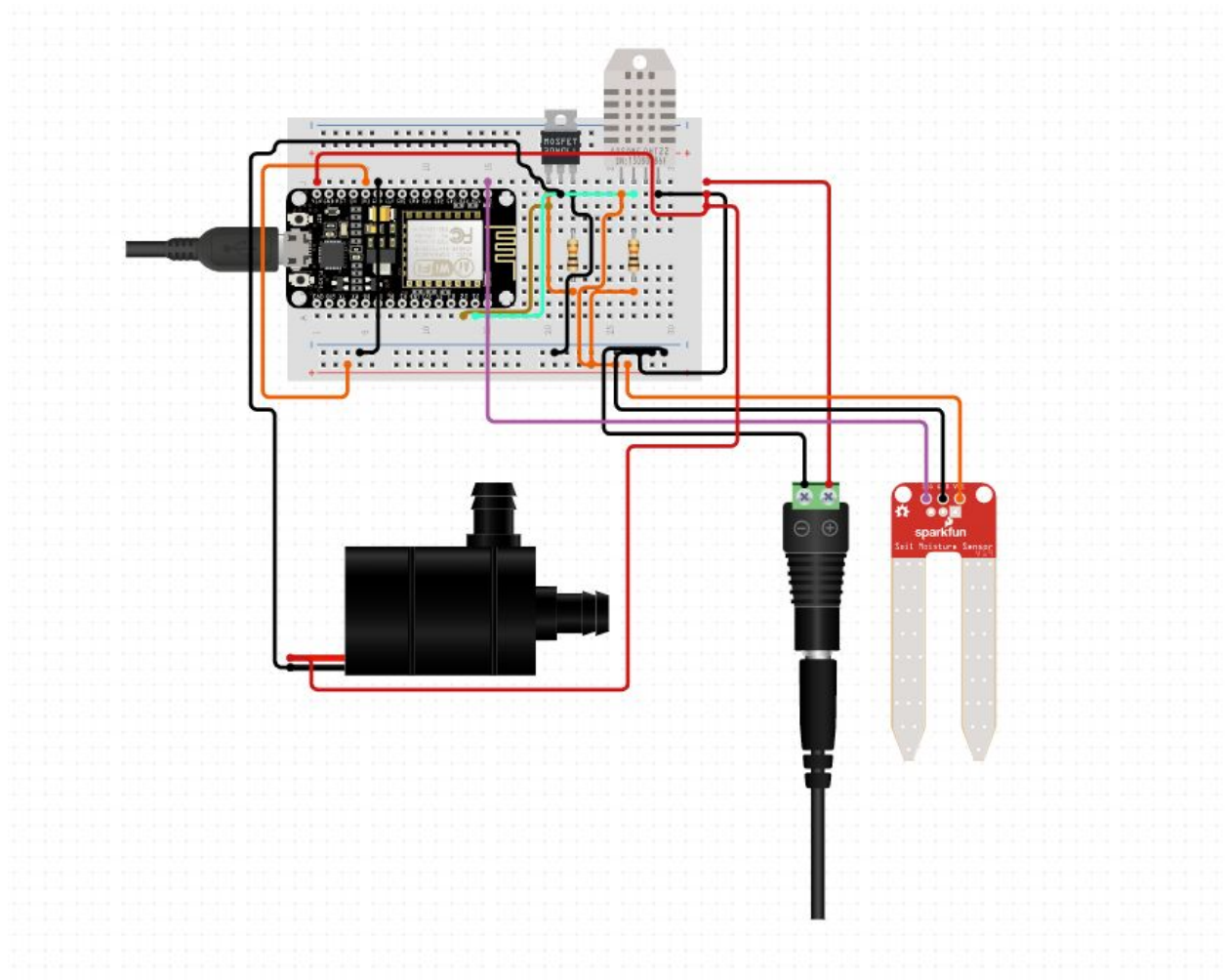
- Humedad en tierra: lluvias y sequías
- Temperatura ambiente: en días cálidos o fríos

Ambos tipos de perturbaciones fueron contempladas usando sendos sensores que retroalimentan el sistema y permiten ajustar la corrección del mismo regulando la cantidad de agua suministrada en cada aplicación así como el intervalo entre aplicaciones.

Asimismo, al tratarse de un sistema de lazo cerrado hay mayor rechazo a las perturbaciones a diferencia de uno sin realimentación.

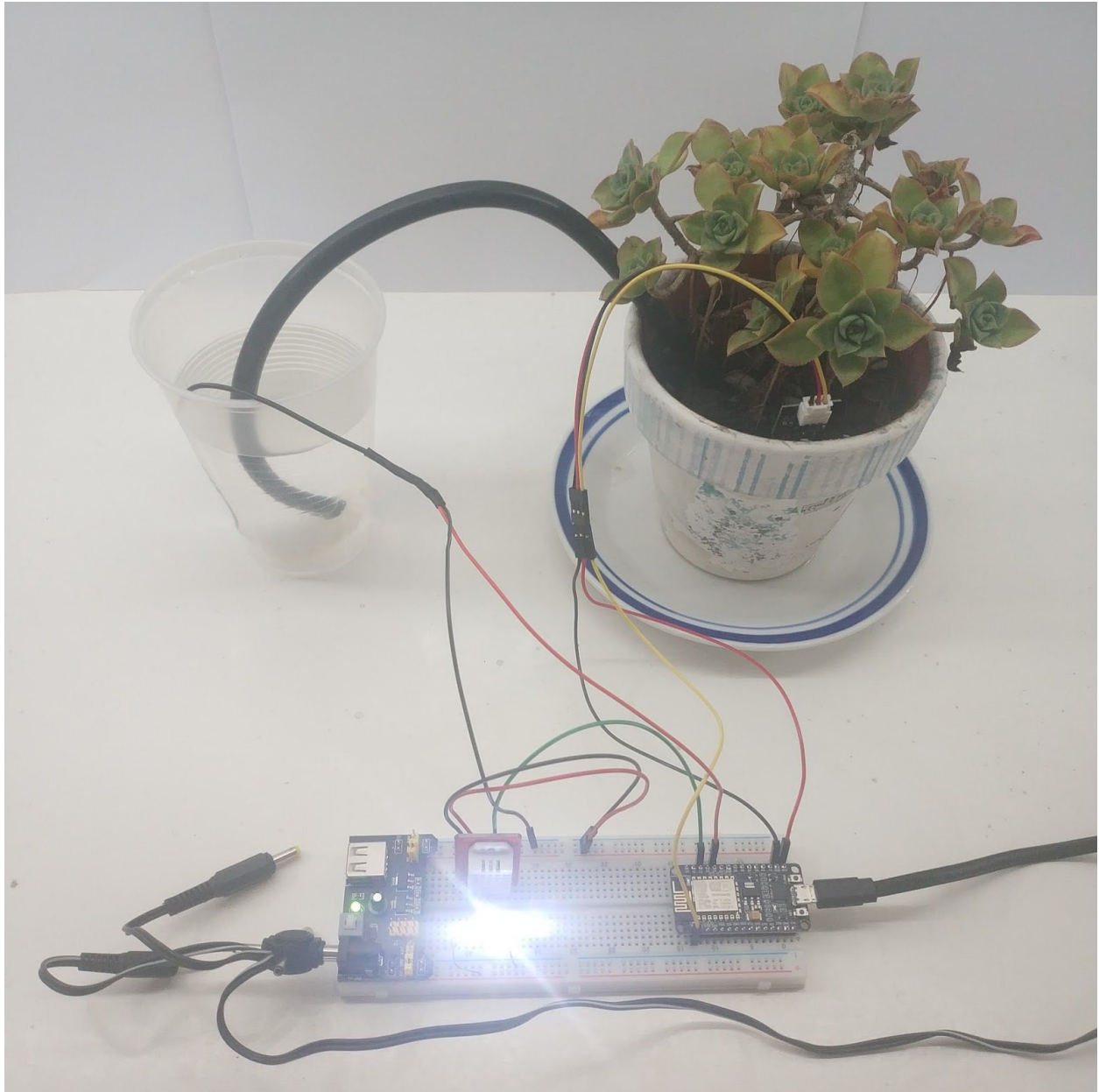
Implementación teórica

El diseño del circuito con los componentes analizados previamente quedaría de la siguiente manera:



Implementación práctica

Aquí el armado del sistema en la vida real, en fase de prototipo:



Conclusión

A efectos de este estudio se consideró una simulación limitada de la realidad, dado que un cálculo más preciso requeriría pruebas experimentales y análisis teóricos más extensos que los aquí presentados.

Como todo sistema dinámico, en particular aquellos que incluyen aspectos biológico-naturales como los del campo de la botánica o agricultura, la modelización y manejo de los mismos mediante sistemas de control como el estudiado es compleja y dificultosa de llevar a cabo con alto grado de precisión. No obstante, consideramos que con las observaciones y simplificaciones analizadas en el presente informe, se puede lograr el desarrollo de un sistema de control como el planteado: simple, de bajo costo y ciertamente eficiente para entornos urbanos que no requieran altos niveles de complejidad o exactitud.

De esta forma se logra demostrar la utilidad de los sistemas de control, particularmente aquellos de lazo cerrado, que permiten ser relativamente inmunes a las perturbaciones del ambiente y manejar con cierto grado de autonomía un proceso como el planteado.

Posibles mejoras:

- Del software:
Se podría refinar considerando el caudal volumétrico de agua irrigada por la bomba utilizada según el voltaje entregado, el coeficiente de evapotranspiración de la planta en estudio, y las condiciones propias de la instalación del sistema (radio de dispersión del agua regada, profundidad en tierra del sensor, corrientes de aire circulantes), entre otros factores de la vida real.
- Del hardware:
Los sensores y equipos utilizados han sido deliberadamente elegidos por su bajo costo y alta disponibilidad; sin embargo, para instalaciones con mayores exigencias se podrían utilizar elementos más sofisticados, como los sensores de humedad TDR explicados oportunamente, así como sistemas de cómputo más potentes que permitan cálculos más complejos (incluyendo información histórica, datos meteorológicos públicos, previsiones futuras, etc.)
- Del sistema de gestión:
El caso planteado no contempla el monitoreo del sistema o cambio de los parámetros de operación de forma remota, como tampoco incluye alertas o alarmas automáticas en caso de mal funcionamiento del mismo; aprovechando la potencia y la conectividad del controlador analizado se podría fácilmente vincularlo a la “nube” mediante Internet, publicando de forma periódica las mediciones, cálculos y decisiones efectuadas, permitiendo así su seguimiento desde cualquier parte del mundo.

Bibliografía

- [1] Fundamentos de los sistemas de control del riego y la fertilización
Ruiz Canales, A. (Dept. de Ingeniería. Universidad Miguel Hernández).
Molina Martínez, J.M. (Dept. de Ingeniería de los Alimentos y del Equipamiento Agrícola.
Universidad Politécnica de Cartagena)
- [2] Sistemas de control de riego
InfoAgro
- [3] Humedad del suelo
Wikipedia
- [4] Métodos para medir la humedad del suelo
Turfes.com
- [5] Teoría de Control para Informáticos
Fusario - Crotti - Bursztyn - Civalé (Editorial Alfaomega)
- [6] Ingeniería de Control
W. Bolton (2da Edición - Editorial Alfaomega)

Anexo A: listado de partes

- [A] Microcontrolador
NodeMCU: <http://www.nodemcu.com/>
ESP8266: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266/overview>
- [B] Sensor de humedad
SEN0193: https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193
- [C] Sensor de temperatura
DHT22: <https://www.adafruit.com/product/385>
- [D] Bomba de agua
JT80SL: <https://www.aliexpress.com/i/32920786247.html>
- [E] Alimentación
Fuente Zurich:
https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-872128784-zurich-ac-dc-adaptor-mw79gs-3-45-6-75-9-12-_JM
- [F] Batería Li-Ion 18650:
https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-756238149-pila-bateria-18650-2200-mah-reales-testeadas-37-v-mona-_JM
- [G] Cargador batería:
https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-815996577-cargador-bateria-lipo-uso-panel-solar-cn3065-arduino-mona-_JM
- [H] Panel solar:
https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-694673789-panel-solar-5v-125w-110x80mm-55v-max-250ma-arduino-_JM

Anexo B: algoritmo de control

```
#include "DHT.h"

#define LEDSTATUS 5 // led de status conectado al pin digital D1 (GPIO5)
#define PINTEMPERATURA 4 // sensor de temperatura conectado al pin digital D2 (GPIO4)
#define PINBOMBA 12 // bomba de agua conectada al pin digital D6 (GPIO12)
#define PINHUMEDAD 0 // sensor de humedad conectado al pin analógico A0
#define INTERVALO 60 // intervalo entre mediciones cuando NO hay que regar (segundos)
#define CONSTANTECAUDAL 50 // constante experimental según la potencia de la bomba y la superficie de riego
#define CONSTANTEABSORCION 10 // constante experimental según el tamaño de la maceta y la evapotranspiración de la planta

DHT dht(PINTEMPERATURA, DHT22); // inicializo sensor de temperatura ambiente

const int humedadAire = 840; // valor de humedad calibrado en aire
const int humedadAgua = 470; // valor de humedad calibrado en agua
int rangoHumedad = humedadAire - humedadAgua; // rango de humedad calibrado

float temperaturaMedida = 0;
int humedadMedida = 0; // valor medido de resistividad, inversamente proporcional a la humedad absoluta
int humedadMedidaAbsoluta = 0; // valor medido de humedad absoluta
int humedadMedidaRelativa = 0; // valor medido de humedad relativa (porcentaje entre humedadAire y humedadAgua)
int humedadDeseadaRelativa = 80; // valor esperado de humedad en % siendo 0% = seco (humedadAire) y 100% = humedadAgua
int diferenciaHumedad = 0; // valor de error entre humedad medida y humedad deseada

int proximaMedicion = 0;
int duracionBomba = 0;

void esperarTiempo(int tiempo){
  Serial.print("Esperando por ");
  Serial.print(tiempo);
  Serial.print(" segundos hasta la próxima medición...");
}

int tiempoTranscurrido = 0;
while (tiempoTranscurrido < tiempo){
  Serial.print(".");
  delay(1000);
  tiempoTranscurrido++;
}
}

void setup() {
  pinMode(LEDSTATUS, OUTPUT);
  pinMode(PINTEMPERATURA, INPUT);
  pinMode(PINBOMBA, OUTPUT);

  Serial.begin(9600); // abro puerto serial con tasa 9600 bps

  Serial.println("");
  Serial.println("");
  Serial.println(" << Sistema de Riego >> ");
  Serial.println(" Teoría de Control - UTN - FRBA ");
  Serial.println("Nahuel Oyhanarte <noyhanarte@est.frba.utn.edu.ar>");
```

```

Serial.println("Hernán Domingo <hdomingo@est.frba.utn.edu.ar>");
Serial.println("Jorgelina Rial <jrial@est.frba.utn.edu.ar>");
Serial.println("Rodrigo De Luca <cdelucagallego@est.frba.utn.edu.ar>");
Serial.println("Juan Manuel Constenla <juanconstenla@est.frba.utn.edu.ar>");
Serial.println("");

dht.begin();
delay(2000);
}

void loop() {
  Serial.println("");
  digitalWrite(LEDSTATUS, HIGH);

  // mido temperatura ambiente
  temperaturaMedida = dht.readTemperature();

  // registro temperatura ambiente
  if (!isnan(temperaturaMedida)) {
    Serial.print(F("Temperatura: "));
    Serial.print(temperaturaMedida);
    Serial.println(F("°C"));
  } else {
    Serial.println(F("Error al leer del sensor de temperatura."));
    temperaturaMedida = 20; // valor default en caso de error de medición
  }

  // mido humedad en suelo
  humedadMedida = analogRead(PINHUMEDAD);
  humedadMedidaAbsoluta = 1023 - humedadMedida;
  humedadMedidaRelativa = (humedadMedidaAbsoluta - (1023 - humedadAire)) * 100 / rangoHumedad;

  // registro humedad en suelo
  Serial.print("Humedad medida absoluta: ");
  Serial.println(humedadMedidaAbsoluta);
  Serial.print("Humedad medida relativa: ");
  Serial.println(humedadMedidaRelativa);
  Serial.print("Humedad deseada relativa: ");
  Serial.println(humedadDeseadaRelativa);

  // calculo señal de error
  diferenciaHumedad = humedadDeseadaRelativa - humedadMedidaRelativa;

  if (diferenciaHumedad > 0) {
    Serial.println("Indicación: Hay q regar!");

    // calculo duración de accionamiento de la bomba (segundos)
    duracionBomba = diferenciaHumedad * temperaturaMedida / CONSTANTECAUDAL;

    // activo la bomba (delay requiere milisegundos)
    Serial.print("Regando por ");
    Serial.print(duracionBomba);
    Serial.print(" segundos...");

    digitalWrite(PINBOMBA, HIGH);

    int tiempoRegado = 0;

```

```

while (tiempoRegado < duracionBomba){
  Serial.print(".");
  delay(1000);
  tiempoRegado++;
}
Serial.println("");

digitalWrite(PINBOMBA, LOW);

// calculo tiempo hasta la próxima medición
proximaMedicion = duracionBomba * CONSTANTEABSORCION;

// espero hasta la próxima medición (delay requiere milisegundos)
esperarTiempo(proximaMedicion);

} else {
  Serial.println("Indicación: NO hay que regar.");

  // espero intervalo pre-seteado antes de volver a chequear (delay requiere milisegundos)
  esperarTiempo(INTERVALO);

}
Serial.println("");
}

```