



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial**

Diseño de Sensores de Humedad de Suelo Basados en Técnicas de Freflectometría de la Frecuencia (FDR)

TRABAJO FIN DE GRADO

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y
AUTOMÁTICA (GIEyA)**

Autor: Daniel García Martínez
Director: Manuel Jiménez Buendía
Codirector: Jose Alfonso Vera Repullo

Cartagena, Septiembre de 2016



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Manuel Jiménez y Jose Alfonso Vera todo el tiempo que han dedicado a este proyecto y su apoyo durante todo el desarrollo del mismo. También agradecer al Dr. Martin Oates por su colaboración y aportación de su extendida experiencia en el campo de la instrumentación y la electrónica.

Por otra parte, agradecer a todas las personas que me han apoyado, no solo durante la realización de este proyecto, sino durante toda mi etapa universitaria. Gracias mamá por la confianza y la paciencia que has depositado en mí desde el primer día hasta el último, sin dudar en ningún momento. Gracias Miriam por tu paciencia mientras esperabas que volviese a casa y tu apoyo en los momentos más difíciles.

Por último, y no por ello menos importante, agradecer a "Marinero's Team" y Alejandro, esas personas que comenzaron siendo compañeros de clase y han acabado siendo, además de buenos amigos, el apoyo tan necesario en el día a día de esta etapa.

RESUMEN

Para un sistema eficiente de riego localizado, es esencial obtener un indicador de la humedad del suelo de una planta o grupo de plantas, para conseguir determinar si es necesario regar, cuándo debe de hacerse y qué cantidad de agua se debe aplicar. Adicionalmente, es muy importante que el coste de los sensores de humedad de suelo se minimice tanto como sea posible. En este proyecto, se aborda el desarrollo de un sensor de humedad de suelo de bajo coste. En concreto, se continúan los estudios ya realizados en el campo de la tecnología de la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR, Frequency Domain Reflectometry), siguiendo las líneas de investigación del Dr. Martin Oates. Las técnicas basadas en FDR han demostrado ser menos sensibles a los niveles de salinidad que las técnicas basadas en la resistividad del suelo, como los dispositivos Wenner, aunque su funcionamiento depende de la frecuencia de oscilación aplicada. En base esto, se plantea el desarrollo de un sensor basado en la tecnología FDR, con el cual se pueden medir diferentes variables muy importantes en la agricultura, a un precio que permita utilizar estos sensores individualmente en cultivos donde sea necesario conocer exactamente el estado de cada planta. Para el desarrollo del prototipo de sensor FDR, se utiliza la plataforma Arduino como elemento de procesamiento y control. Para la implementación de la electrónica necesaria, se utilizan diferentes amplificadores operacionales, determinando cuál de ellos es el más adecuado para el proyecto según su relación prestaciones/precio. El prototipo desarrollado, mide temperaturas y humedades en la tierra y en el aire, siendo capaz además de enviar todos los datos registrados a través de un enlace de comunicación vía radio de bajo coste. En este proyecto, se abarca desde la puesta en marcha del prototipo diseñado por el Dr. Martin Oates, hasta la realización de pruebas en campo con el mismo, incluyendo el desarrollo del software necesario tanto para la realización de medidas como para las comunicaciones y la programación de una interfaz gráfica a modo de sistema SCADA.

Índice de contenidos

1.	Introducción y Objetivos.....	1
1.1.	Introducción	1
1.1.1.	El Riego y la Agricultura.....	2
1.2.	Objetivos.....	4
2.	Estado del Arte	5
2.1.	Método del Tacto	5
2.2.	Método Gravimétrico	6
2.3.	Método Volumétrico	8
2.4.	El Método Wenner.....	9
2.5.	La Sonda de Neutrones	11
2.6.	El método TDR.	11
3.	Sensor FDR desarrollado	13
4.	Elementos del sensor FDR	15
4.1.	Microprocesador	15
4.2.	Circuito de Instrumentación.....	18
4.2.1.	Filtro Paso Bajo RC.....	19
4.2.2.	Amplificador operacional y rectificador.....	26
4.2.3.	Circuito oscilador.....	27
4.3.	La Sonda FDR Capacitiva	28
4.4.	Sensor de Temperatura Dallas DS18B20.....	33
4.5.	Sensor de Humedad y Temperatura Ambiental DHT11	36
4.6.	Módulo de comunicaciones NRF24L01	37
4.7.	Desarrollo del Data Logger	39
4.7.1.	Almacenamiento de datos.....	41
4.7.2.	Visualización de datos.....	42

4.7.3.	Reloj en Tiempo Real (RTC).....	44
4.7.4.	Módulo de comunicaciones	45
5.	Funcionamiento y programación	47
5.1.	Gestión del consumo	47
5.2.	Protocolos de comunicación.....	49
5.2.1.	SPI (Serial Peripheral Interface)	49
5.2.2.	One Wire	51
5.3.	Comunicaciones.....	54
5.4.	Sistema de adquisición SCADA.....	56
6.	Pruebas y resultados	61
6.1.	Calibración	61
6.1.1.	Materiales.....	61
6.1.2.	Calibración mediante balanza.....	62
6.1.3.	Calibración del sensor FDR.....	65
6.2.	Influencia de la temperatura.....	67
7.	Presupuesto.....	71
8.	Conclusiones y futuras líneas de trabajo	73
9.	Referencias.....	75

Índice de Figuras

Figura 1: Sonda para medir resistividad por el método Wenner.	10
Figura 2: Sonda de neutrones utilizada para medir la humedad del suelo.	11
Figura 3: Sensor TDR 300 Seedmech con GPS.....	12
Figura 4: Placa base de un sensor FDR.	15
Figura 5: Arduino Uno Revisión 3 y microprocesador AtMega328P-PU..	16
Figura 6: PinOut Atmega 328 P-PU	17
Figura 7: FTDI232	18
Figura 8: Circuito electrónico para medir con la sonda FDR, preparado para simulación en NI Multisim.....	19
Figura 9: Filtro paso bajo pasivo compuesto por un circuito RC serie. ..	21
Figura 10: Circuito no inversor con amplificador operacional.	26
Figura 11: Circuito rectificador de tensión.	27
Figura 12: Circuito comparador mediante amplificador operacional.	28
Figura 13: Estructura de un condensador y similitud con la sonda capacitiva FDR.	29
Figura 14 : Modelos de sonda FDR empleados: tipo plana (izquierda) y tipo diente (derecha).	33
Figura 15: Sensor DS18B20 en sus dos encapsulados disponibles.	34
Figura 16: Asignación de pines del sensor DS18B20.	35
Figura 17: Error típico del sensor DS18B20 (Valores suministrados por el fabricante).	35
Figura 18: Sensor DHT11.....	36
Figura 19: Módulo de comunicaciones RF NRF20L01.....	38
Figura 20: Esquema de conexión entre NRF24L01 y Arduino Uno.	39

Figura 21: Data Logger formado por Arduino Uno, Shield con RTC y TFT y módulo de comunicación radio.	40
Figura 22: Esquemático completo del data logger.....	40
Figura 23: Vista inferior del módulo TFT 1.8 + Lector SD	41
Figura 24: Formato de los datos almacenados en la tarjeta SD mediante el Data Logger desarrollado.	42
Figura 25: Visualización de los datos a través de la pantalla TFT con la que cuenta el Data Logger.	43
Figura 26: Resumen conexiones y comunicación en un bus SPI.....	50
Figura 27: Bus 1-Wire con alimentación en modo parásito.	53
Figura 28: Bus 1-Wire con alimentación en modo completo o normal...	53

1. Introducción y Objetivos.

1.1. Introducción

El futuro de la agricultura de regadío, depende en buena parte de la implementación de sistemas de riego de precisión, que permitan la utilización más eficiente de los recursos, entre los cuales, el agua es el mayor. El riego de precisión utiliza las tecnologías disponibles para realizar una programación óptima, estableciendo el momento en el que, según las características del cultivo, se necesita agua.

En los últimos años, los problemas del agua han sido objeto de una preocupación y un debate crecientes en el plano internacional. Del 26 de enero de 1992 tuvo lugar en Dublín la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente. Dicha conferencia destacó la necesidad de métodos innovadores para evaluar, desarrollar y manejar los recursos de agua dulce.

En 1993 el Banco Mundial publicó un exhaustivo documento de política en el que se definían sus nuevos objetivos en el sector de los recursos hídricos. La FAO, por su parte, ha establecido recientemente un Programa de Acción Internacional sobre el Agua y el Desarrollo Agrícola Sostenible (PAI-ADAS). De la misma manera, el PNUD, la OMS, el UNICEF, la OMM, la Unesco y el PNUMA están coordinando programas especiales relacionados con los recursos de aguas o participando en ellos.

El principal mensaje que emana de todas estas iniciativas es que el agua es un recurso cada vez más escaso y valioso. Lo más preocupante es que aún no se acepta que las reservas de agua no son infinitas. No hay duda de que la escasez creciente y el mal aprovechamiento del agua dulce constituyen una grave amenaza para el desarrollo sostenible.

Pese a la escasez de agua, su utilización errónea es un fenómeno generalizado. Las pequeñas comunidades y las grandes urbes, los agricultores y las industrias, los países en desarrollo y las economías industrializadas, están manejando mal los recursos hídricos. La calidad del agua de superficie se está deteriorando en las principales cuencas a causa de los residuos urbanos e industriales. Las aguas freáticas se contaminan desde la superficie y se deterioran irreversiblemente con la intrusión de agua salada. Los acuíferos sobreexplotados están perdiendo su capacidad de contener agua, y las tierras se están hundiendo.

A simple vista, no parece que la mayoría de estos problemas estén directamente relacionados con el sector de la agricultura. Sin embargo, este sector es, con mucho, el que absorbe la mayor cantidad de agua a nivel mundial. Más de las dos terceras partes del agua extraída de los ríos, lagos y acuíferos del mundo se utilizan para el riego. Ante el aumento de la competencia, los conflictos, la escasez, el desperdicio, la utilización excesiva y la degradación de los recursos hídricos, los responsables de las políticas están volviendo cada vez más la vista hacia la agricultura como la válvula de seguridad del sistema.

1.1.1. El Riego y la Agricultura

El riego es un componente esencial del desarrollo agrario sustentado. En muchas áreas mundiales, la competencia creciente por el agua, consecuencia del aumento de la demanda para distintos usos, conlleva un incremento de su coste y una creciente limitación de su disponibilidad para su uso en la Agricultura. Para poder alcanzar estos objetivos, se hace necesario la incorporación y el aprovechamiento de los avances científicos de ingeniería y tecnológicos a los regadíos.

La utilización eficiente del agua por parte del regante, requiere, además de una concienciación previa, el intercambio de conocimientos con los extensionistas, ingenieros y científicos.

Los consumos de agua de un cultivo, o sus necesidades hídricas, se corresponden con su evotranspiración en un determinado ambiente y bajo un manejo concreto del mismo; dicha ET es la suma de dos procesos, fundamentalmente, la transpiración vegetal y la evaporación de agua desde el suelo que la soporta. La evotranspiración puede medirse directamente, con lisímetros, e indirectamente, con métodos micro meteorológicos y además, puede estimarse mediante diferentes modelos, más o menos empíricos, a partir de registros periódicos de distintas variables climáticas. La evotranspiración de los cultivos puede estimarse, en base a registros climáticos periódicos, mediante modelos específicos que existen, generalmente recurriendo al e Penman-Monteith, que utiliza parámetros propios de la cubierta vegetal.

El conocimiento del balance hídrico del suelo es fundamental para una buena gestión del agua en regadío. Para un manejo adecuado del riego, es necesario responder a tres preguntas: cuándo, cuánto y cómo regar.

Principalmente, el cultivo, es el objetivo que interesa, por lo que las diferentes manifestaciones fisiológicas de las plantas que se producen a raíz del déficit hídrico deberán servir como indicadores para determinar cuándo es necesario regar. Para la programación óptima de un riego, se ha de realizar una combinación entre las necesidades hídricas de un cultivo, las características del suelo y la aplicación de agua a la parcela. Por eso, es importante conocer lo que le ocurre al agua en el suelo.

1.2. Objetivos

Como único y principal objetivo del presente proyecto se puede considerar el desarrollo de un sensor FDR. Obviamente, este desarrollo implica una serie de fases o subobjetivos que se detallan a continuación:

- Estudio del diseño realizado por Martin Oates.
- Puesta en marcha de un prototipo basado en el diseño ya realizado. En este punto se considera también el desarrollo de toda la programación necesaria tanto para el funcionamiento del dispositivo como para las comunicaciones.
- Realización de pruebas de funcionamiento de los diferentes bloques que forman el dispositivo FDR.
- Calibración del sensor FDR.
- Realización de pruebas en las comunicaciones.
- Desarrollo de un programa SCADA para la visualización de los datos registrados en el dispositivo FDR.

2. Estado del Arte

Actualmente, nos encontramos en una situación en la que el agua es un recurso cada vez máspreciado. Debido a su mal aprovechamiento, principalmente, por parte de la población, este recurso es cada vez más escaso en determinadas zonas. Esto, unido con la constante necesidad de mejorar los cultivos, han llevado a la comunidad científica a desarrollar y mejorar técnicas para medir la cantidad de agua en el suelo, optimizando los métodos de riego y ofreciendo a los agricultores nuevas prácticas para aumentar la calidad de sus productos, a la vez que se reduce el consumo de agua, lo que conlleva un aumento de beneficios para el agricultor.

En esta línea de desarrollo se pueden encontrar diferentes técnicas, desde métodos que usan el tacto a método de determinación para la humedad del suelo, hasta los métodos más punteros como el método basado en la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR, Frequency Domain Reflectometry) y el basado en la Reflectometría en el Dominio del Tiempo (Time Domain Reflectometry).

A continuación, se da un repaso de los métodos que se consideran más relevantes para la determinación de la cantidad de agua en el suelo, desde los más básicos hasta los más complejos.

2.1. Método del Tacto

Este es uno de los primeros métodos utilizados por los agricultores para determinar la humedad del suelo. Se puede pensar que se trata de un método ya en desuso, pero no es así, todavía se sigue utilizando para determinar cuándo se debe regar un determinado cultivo, aunque si es cierto que su uso va desapareciendo lentamente con la inmersión de las nuevas tecnologías en el campo de la agricultura y el riego.

Este método consiste en la utilización de las propias manos del agricultor como "sondas" de medida de la humedad, más concretamente utilizando el sentido del tacto. Para llevarlo a cabo, simplemente es necesario coger un determinado volumen de tierra con la palma de la mano, y al exprimirlo entre el pulgar y el dedo índice, se puede obtener una estimación bastante aproximada de la humedad del suelo.

Este método requiere mucho tiempo y experiencia, pero es un método que está comprobado científicamente. En la tabla 1, se puede observar cómo debería sentirse la tierra a ciertos niveles de humedad si se realiza un ensayo mediante éste método.

2.1. Método Gravimétrico

El método de la humedad gravimétrica determina el contenido de humedad en el suelo como el peso del agua dentro de la matriz del suelo. Se evalúa la humedad como la diferencia de peso entre una muestra de suelo húmeda y una seca.

Este método implica la recolección de la muestra de suelo, pesándola de ser posible en ese momento para determinar su peso húmedo. Luego se lleva al laboratorio donde se seca en un horno a 105°C durante 24 horas, momento en que es pesada nuevamente. La humedad de la muestra y por ende del suelo se determina como:

$$\theta_g = \frac{m_{sh}}{m_{ss}} * 100 \quad (1)$$

Donde " θ_g " es la humedad del suelo (%); " m_{sh} " es la masa del suelo húmedo (gr) y " m_{ss} " es la masa del suelo seco (gr).

CLASIFICACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO				
Deficiencia de humedad Pulgadas/Pie	Granular/Gruesa (arena francosa)	Moderadamente gruesa (franco arenosa)	Textura media (franco)	Textura fina (franco arcillosa)
0.0	Deja un contorno de humedad en la mano cuando se comprime	Deja un contorno de humedad en la mano. Forma una cinta corta	Deja un contorno de humedad en la mano. Forma una cinta de aprox. 1 pulgada	Deja un contorno de humedad en la mano. Forma una cinta de aprox. 2 pulgadas
0.2	Se ve húmeda	Forma una bola dura		
0.4	Forma una bola débil		Forma una bola maleable. Deja manchas en los dedos cuando se frota	Deja manchas en los dedos y forma una cinta fácilmente
0.6	Se pone ligeramente pegajosa	Forma una buena bola		Forma una cinta gruesa
0.8	Muy seca y suelta. Se desliza entre los dedos	Forma una bola débil	Forma una bola dura	
1.0	Punto de marchitamiento		Forma una buena bola	Forma una buena bola
1.2		Se pone pegajosa pero no forma una bola	Forma una bola débil	Se puede hacer una bola pero no una cinta. Se forman terrones pequeños
1.4		Punto de marchitamiento		Los terrones se desmoronan
1.6				
1.8				Punto de marchitamiento
2.0				
2.2			Punto de marchitamiento	

Tabla 1: Clasificación de la textura del suelo en función de su grado de humedad.

2.2. Método Volumétrico

Otro método que se utiliza para la medida directa de la humedad del suelo es el método volumétrico. Este método está relacionado con el anterior. En este caso, se expresa el contenido de humedad del suelo en función del volumen que el agua ocupa dentro de la matriz del suelo. Para su cálculo se determina el peso del agua evaporada durante el secado y luego su volumen.

$$ma = msh - mss \quad (2)$$

$$Va = \frac{ma}{da} \quad (3)$$

$$\theta v = \frac{ma}{da} * 100 \quad (4)$$

Donde " θ " corresponde a la humedad del suelo (%); " msh " corresponde a la masa de suelo húmedo (gr); " mss " corresponde a la masa de suelo seco (gr); " ma " corresponde a la masa de agua en la muestra (gr); " da " corresponde a la densidad del agua (1gr/cm³); " Va " corresponde al volumen de agua en la muestra (cm³) y " Vs " corresponde al volumen de la muestra (cm³).

Estos métodos que se han expuesto anteriormente, son métodos que necesitan de gran cantidad de recursos o un elevado tiempo para conseguir una medida, pues en el método del tacto es necesaria una experiencia que podría llevar años de adquirir, o en el método gravimétrico es necesario realizar un secado del suelo que suele tardar en torno a un día.

Con el avance de la tecnología, se desarrollan nuevos sensores y nuevas tecnologías para realizar mediciones de la humedad del suelo, entre muchos otros parámetros importantes para la agricultura, de manera que se reducen drásticamente estos tiempos de ensayo. Este avance tecnológico, no solo

contribuye a reducir los tiempos para realizar las medidas si no que abre las puertas de la automatización a los procesos de riego, pudiendo obtener datos en tiempo real y realizar acciones en función de estos datos, que antes era imposible, ya que los datos se tomaban manualmente.

En la actualidad, con cualquiera de los sensores de humedad del suelo que se encuentran desarrollados, ya sean los basados en el efecto Wenner, los TDR o los FDR, es posible realizar una automatización de la toma de datos de estos sensores y un control en tiempo real sobre los cultivos que se monitorizan optimizando en gran medida el uso del agua y mejorando la calidad del producto final.

2.3. El Método Wenner

El método Wenner es un método que se basa en la determinación de la humedad del suelo a partir de la resistividad del mismo. Es conocido que la resistencia a la conducción eléctrica del suelo, aunque depende del tipo de suelo, es considerablemente mayor a la resistencia eléctrica del agua. Gracias a este principio, es posible realizar un cálculo de la humedad en un determinado suelo midiendo su resistividad.

Para realizar medidas con este método se utiliza una matriz con 4 electrodos introducidos en el suelo, como se muestra en la figura 1.

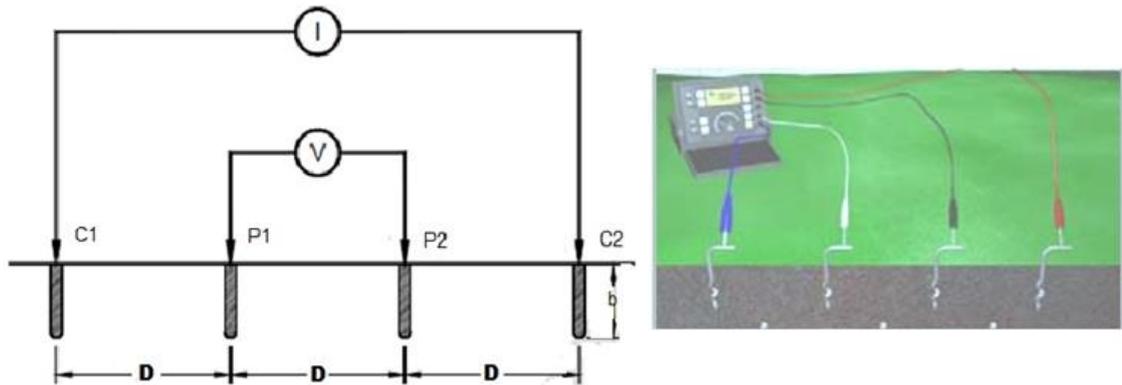


Figura 1: Sonda para medir resistividad por el método Wenner.

Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración. Las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen tanto del tamaño y del material de los electrodos. Este método se basa en la inyección de una corriente directa, o de baja frecuencia, a través de la tierra entre dos electrodos, C1 y C2. La diferencia de potencial que aparece se mide con los electrodos P1 y P2. El cociente V/I (Voltaje/Intensidad) es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y la geometría del electrodo. Esta resistividad aparente viene dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot A \cdot R}{\left[1 + \frac{2 \cdot A}{(A^2 + 4 \cdot B^2)^{0.5}} \right] - \frac{2 \cdot A}{(4 \cdot A^2 + 4 \cdot B^2)^{0.5}}} \quad (5)$$

Como simplificación, si la distancia enterrada es pequeña comparada con la distancia entre los electrodos se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot A \cdot R \quad (6)$$

2.4. La Sonda de Neutrones

La sonda de neutrones, es una técnica basada en la interacción que sufren los neutrones emitidos por una fuente radioactiva al chocar con los átomos de hidrógeno del agua intersticial contenida en el terreno, proceso llamado termalización. Para llevar a cabo medidas de este tipo, se introduce en el suelo mediante un tubo de acceso hasta la profundidad deseada, y los neutrones que se detectan están en relación directa con el contenido de agua del suelo. Un receptor cuenta estos neutrones termalizados y tras el proceso de calibración se transforma la señal en contenido de agua. En la figura 2 se puede ver una sonda basada en esta tecnología.



Figura 2: Sonda de neutrones utilizada para medir la humedad del suelo.

2.5. El método TDR.

El principio de este método se basa en la determinación de la velocidad de propagación de una onda electromagnética en un material. La medida de la

constante dieléctrica del suelo depende de la frecuencia de emisión de la señal electromagnética. La determinación de la constante dieléctrica en el campo se realiza mediante una sonda introducida en el suelo y un dispositivo que emite ondas electromagnéticas y analiza las ondas reflejadas. Existen diferentes tipos de sondas en función del número de varillas de que disponen. Las varillas son la parte del sensor que se introduce en el suelo, son de acero inoxidable y su diámetro, longitud y separación son variables según el tamaño de la sonda.

Como ejemplos de estos sensores, se pueden encontrar en el mercado sensores como los de VAN WALT o el TDR 300 de SEEDMECH, como se observa en la figura 3.



Figura 3: Sensor TDR 300 Seedmech con GPS.

Añadido a estos sensores ya vistos, se encuentran los sensores FDR. Los FDR, son el objeto del presente proyecto y se analizarán con más detalle a continuación.

3. Sensor FDR desarrollado

El interés de realizar un proyecto basado en sensores FDR, radica en la gran capacidad y precisión que se puede lograr con este tipo de sensores, a un precio realmente bajo. Como muestra, un sensor FDR comercial se puede encontrar en el mercado a partir de 300 euros aproximadamente, mientras que el sensor objeto de éste estudio, se puede fabricar por menos de 15 euros.

Como se ha indicado en apartados anteriores, un sensor FDR, es un sensor destinado a medir la humedad y temperatura del suelo y el ambiente. El nombre de éste sensor viene dado por la tecnología que se utiliza para realizar la medición de la humedad del suelo. Además de la medida de estos parámetros, el sensor que se desarrolla en este proyecto, incluye un módulo de comunicaciones vía radio, de manera que puede comunicarse con otros sensores tejiendo una red de sensores, que intercambien datos o que puedan mandar estos datos a un concentrador o unidad central.

Con este modelo de sensor, se abre un nuevo abanico de posibilidades en lo que a la telemetría se refiere en el campo de la agricultura. Pues con los sensores convencionales, se hacía necesario un operario realizando las medidas en campo mientras que con esta nueva generación de sensores, es posible realizar estas medidas a distancia, automatizando el proceso de toma y almacenamiento de los datos. Adicionalmente a esto, se abre otra puerta en la automatización del regadío, permitiendo realizar un sistema de riego autónomo con realimentación de los parámetros del suelo y el ambiente y no mediante programación horaria como se viene haciendo años atrás.

En este apartado, se van a estudiar todos los elementos de los que está compuesto el sensor FDR objeto del proyecto, así como su principio de funcionamiento, que es la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (Frequency Domain Reflectometry).

La reflectometría en el dominio de la frecuencia, mide la capacitancia eléctrica del suelo, la cual, a su vez, está determinada en gran parte por la constante dieléctrica del material que se encuentra entre las dos placas de la sonda FDR.

El sensor FDR objeto de este proyecto está formado por varios elementos y sensores que le permiten tomar medidas y procesar estos datos. Los elementos que lo forman son una sonda capacitiva FDR, un circuito electrónico donde se realiza la medida del valor de la sonda capacitiva, un sensor de temperatura Dallas DS18B20 preparado para ser insertado en el suelo, un sensor de temperatura Dallas DS18B20 con encapsulado TO-92 y un sensor de humedad y temperatura ambiente DHT11. Además de los sensores, hay un Arduino Uno, como elemento de procesamiento y control, y un módulo de radio NRF24 para realizar las comunicaciones.

Adicionalmente a esto, en el proyecto se utiliza un data logger formado por un Shield fabricado en la UPCT, el cual consta de un RCT (Real Time Clock) y una pantalla TFT de 1.8 pulgadas con lector de tarjetas SD. Con esta ampliación, es posible realizar una monitorización y registro de los datos sin necesidad de tener conectado al PC el sensor FDR.

En la figura 4 se ve la placa base de este sensor FDR, formada por el microcontrolador, el amplificador operacional, la alimentación, el módulo de comunicación vía radio y toda la electrónica pasiva para realizar la adquisición y filtrado de la señal analógica de la sonda.

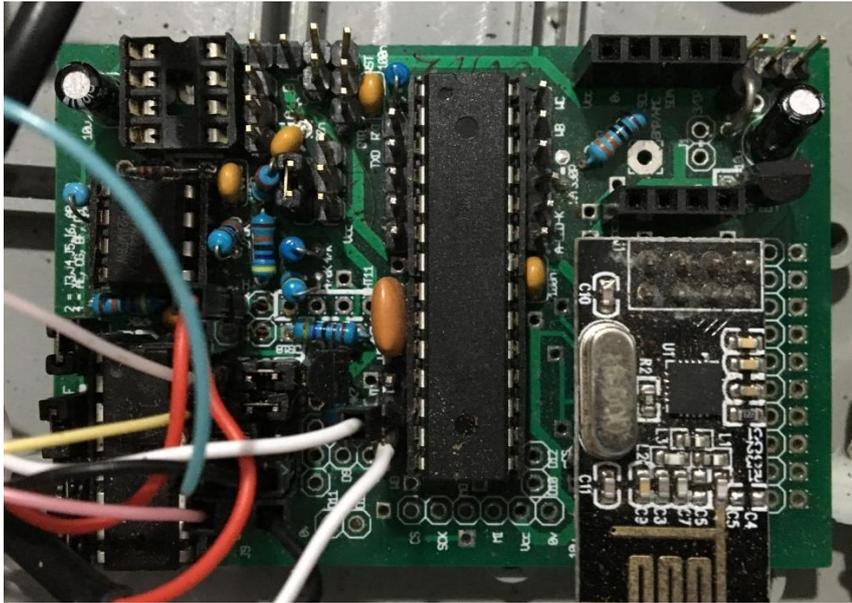


Figura 4: Placa base de sensor FDR desarrollado.

4. Elementos del sensor FDR

4.1. Microprocesador

Como elemento de procesamiento del sistema, se utiliza un Arduino Uno. Arduino es una compañía de hardware libre, que ha desarrollado varias placas de desarrollo basadas en un microcontrolador, generalmente de la marca Atmel modelo AVR, al que le añaden una serie de componentes necesarios para su funcionamiento, así como una cantidad determinada, dependiendo del microprocesador escogido, de entradas y salidas analógicas y digitales para poder interactuar con éste.

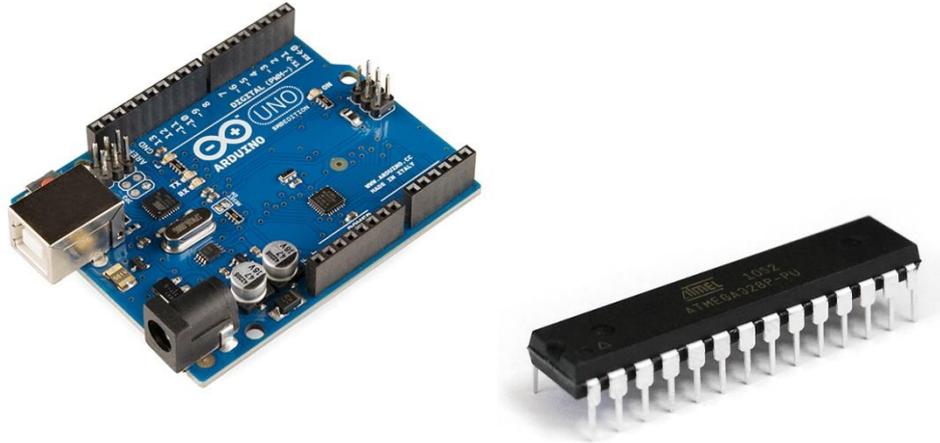


Figura 5: Arduino Uno Revisión 3 y microprocesador AtMega328P-PU.

Como se observa en la figura 5, el Arduino Uno, es una placa compuesta por un microcontrolador Atmel Atmega 328P, un puerto USB tipo B de comunicaciones, un regulador de tensión, un Jack para la alimentación así como diferentes componentes electrónicos pasivos necesarios para su funcionamiento y unos pines de entradas y salidas digitales y analógicas.

Se puede observar a simple vista, que el sensor FDR de la figura 4 no está fabricado con un Arduino Uno. Esto se debe a que este sensor se construye directamente en una PCB, utilizando los componentes que utiliza Arduino y el mismo microprocesador. Para construir un arduino en una protoboard o en una PCB, solamente se necesitan los siguientes elementos: 1 LM7805 o equivalente, 2 condensadores de 10 μF , 2 condensadores cerámicos de 22 pF, 1 cristal de cuarzo de 16 Mhz y unas resistencias, además de el microprocesador con el bootloader de Arduino Uno cargado, obviamente.

Estos son los componentes que se han utilizado para construir el "Arduino" del sensor FDR de la figura 4. A partir de aquí, es necesario realizar una identificación de los pines del microprocesador con su correspondiente entrada o salida de Arduino Uno, de la forma que se observa en la figura 6.

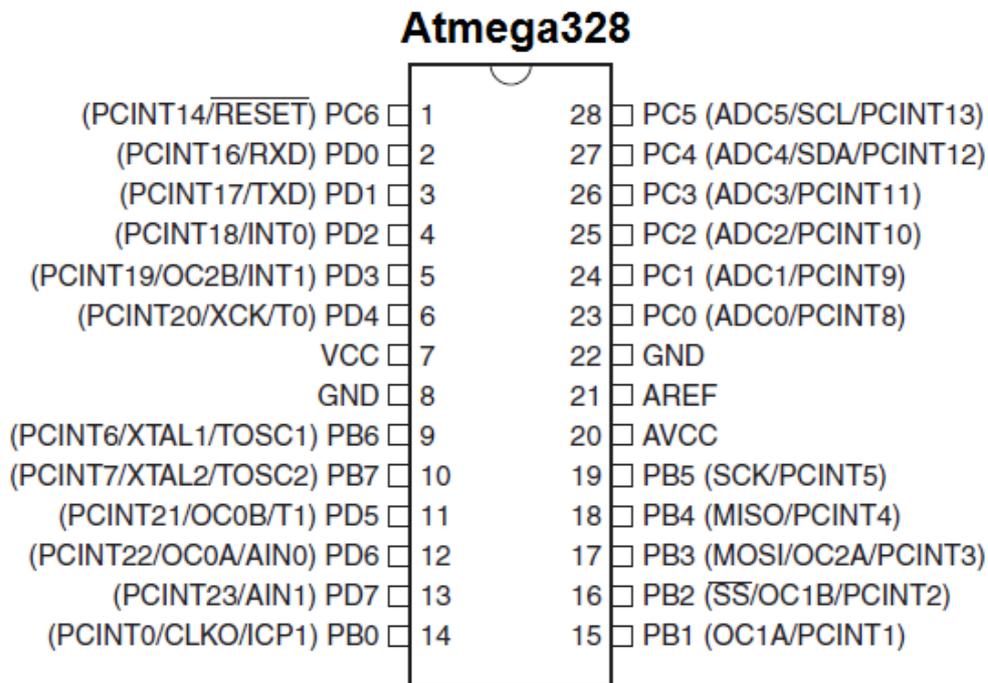


Figura 6: PinOut Atmega 328 P-PU

Adicionalmente, faltan dos elementos para que el montaje funcione correctamente. En primer lugar, es necesario alimentar el microprocesador, a través del regulador de tensión. Para realizar la alimentación hay diferentes opciones, ya sea con una fuente con transformador conectada a la red eléctrica, aunque no es demasiado lógica debido a que el sensor está pensado para trabajar en campo, o con una batería/pilas de la tensión correspondiente. En este caso se alimenta el sensor mediante 4 pilas AA de 1,5 V cada una conectada en serie, lo que hace una alimentación de 6 V a la entrada del regulador de tensión.

Por último, al construir el arduino en protoboard, no se incluye el chip FTDI para realizar la comunicación USB por economía. El arduino realiza una comunicación serie con nuestro puerto USB del ordenador. Para conseguir esta comunicación serie con el microprocesador, hay que utilizar un conversor de TTL a Serie. Esto se consigue mediante un FTDI232 como el que se muestra en la figura 7. Este dispositivo tiene disponibles los pines TX, RX, GND, CTS y VCC

en un extremo y un conector micro USB, aunque podría ser USB en el otro extremo de forma que permite realizar la comunicación con el microprocesador.

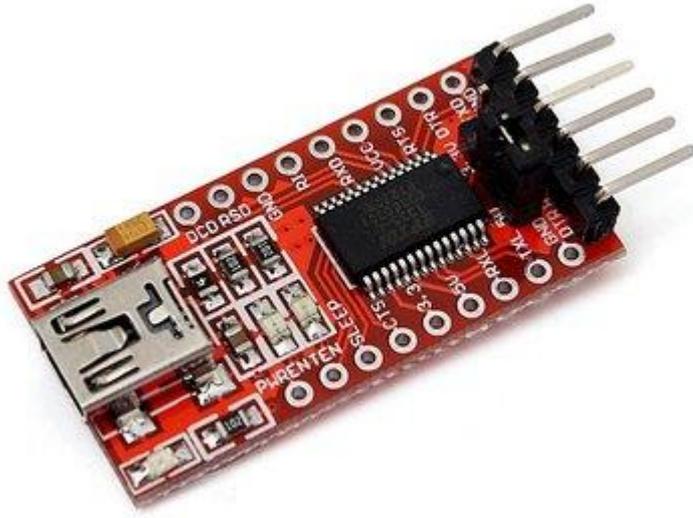


Figura 7: FTDI232

4.2. Circuito de Instrumentación

Para procesar y poder medir la capacitancia del suelo, el sensor FDR consta de un circuito formado por diferentes componentes electrónicos, tanto activos como pasivos, tal y como se muestra en la figura 8.

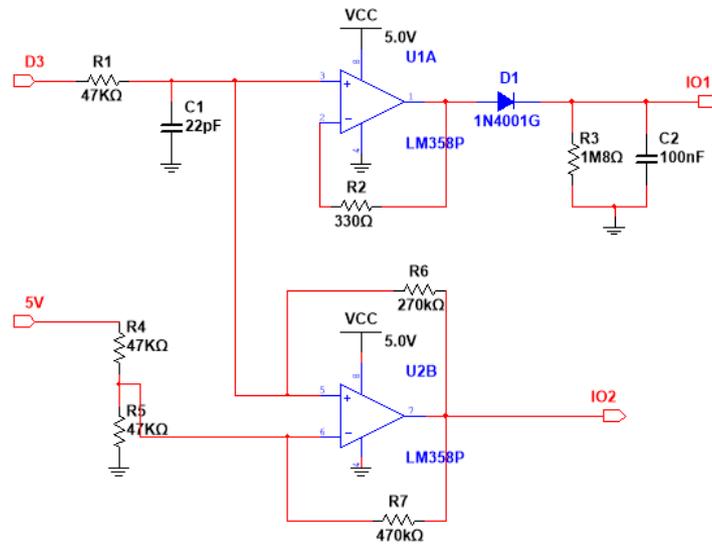


Figura 8: Circuito electrónico para medir con la sonda FDR, preparado para simulación en NI Multisim.

Este circuito se divide en diferentes circuitos más pequeños que cumplen una función determinada. Por un lado se utiliza un filtro paso, para determinar la capacitancia del suelo, unido a un amplificador operacional y un detector de picos o rectificador, de manera que a la salida de éste se pueda medir el voltaje continuo en uno de los conversores analógico digital que incorpora Arduino Uno. En el segundo circuito se realiza un oscilador, que genera una señal cuya frecuencia depende directamente de la capacitancia del suelo de forma que a partir de los tiempos de oscilación se puede calcular la humedad. Estos circuitos se explican en profundidad en apartados posteriores, pero antes es necesario comprender el principio de funcionamiento de cada uno de los elementos que componen el circuito.

4.2.1. Filtro Paso Bajo RC

Para determinar la capacitancia efectiva de la sonda, se han empleado dos métodos. El circuito electrónico correspondiente de ambos métodos se puede observar en la figura 4. Sin embargo, antes de empezar con el análisis del funcionamiento de estos circuitos, resulta especialmente interesante

presentar brevemente los diferentes circuitos y elementos electrónicos de los que este sensor se compone.

El primero consiste en el uso de la sonda como componente capacitivo de un filtro paso bajo. Un microcontrolador, genera una onda cuadrática a una determinada frecuencia. En concreto se realizan ensayos a frecuencias de 250 kHz, 125 kHz, 62,5 kHz y 31 kHz. Estas frecuencias se seleccionaron por ser más altas que las que se usan en la práctica, dado el limitado producto ganancia ancho de banda (GBP) de los amplificadores de bajo coste.

Un filtro paso bajo corresponde a un filtro electrónico caracterizado por permitir el paso de las frecuencias más bajas con respecto a una determinada y atenuar las frecuencias más altas. El filtro requiere dos terminales de entrada y dos de salida, de una caja negra, también denominada cuadripolo o bipuerto, así todas las frecuencias se pueden presentar a la entrada, pero a la salida solo estarán las que permita pasar el filtro. Los filtros están caracterizados por funciones de transferencia, así cualquier configuración de elementos activos o pasivos que consigan cierta función de transferencia se consideran filtros de cierto tipo. En nuestro caso, se construye un filtro paso bajo mediante un circuito llamado RC.

Un circuito RC es un circuito compuesto por resistencias y condensadores alimentados por una fuente eléctrica. Un circuito RC de primer orden está compuesto de una resistencia y un condensador y es la forma más simple de un circuito RC. Estos circuitos pueden usarse para filtrar una señal, al bloquear ciertas frecuencias y dejar pasar otras. Los filtros RC más comunes son el filtro paso alto, filtro paso bajo, filtro pasa banda y filtro elimina banda. Una propiedad importante de los circuitos RC es su linealidad e invariancia en el tiempo. En la configuración de paso bajo la señal de salida del circuito se coge en bornes del condensador, lo que en el caso del FDR, se corresponde con la

sonda, estando ésta conectada en serie con una resistencia, como se observa en la figura 9.

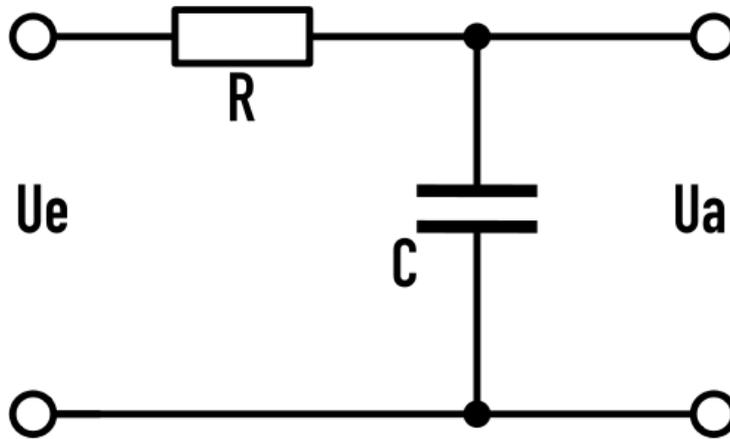


Figura 9: Filtro paso bajo pasivo compuesto por un circuito RC serie.

Este mismo circuito tiene además una utilidad de regulación de tensión, y en tal caso se encuentran configuraciones en paralelo de ambos, la resistencia y el condensador o alternativamente, como limitador de subidas y bajadas bruscas de tensión, aunque esto no es lo que interesa en este estudio.

Comportamiento en el dominio del tiempo

El sistema reaccionará de manera distinta en función de las excitaciones que se produzcan en su entrada. Como ejemplo, se puede representar la respuesta a la función escalón o a la función salto. La tensión originalmente desde el tiempo 0 subirá hasta que tenga la misma que la fuente, es decir. La corriente entrará en el condensador hasta que entre las placas ya no se pueda almacenar más carga por estar en equilibrio electrostático, teniendo la misma tensión que la fuente. En este momento una placa quedará con carga positiva y la otra con carga negativa, pues esta última tendrá un exceso de electrones.

El tiempo de carga del circuito es proporcional a la magnitud de la resistencia eléctrica R y la capacidad C del condensador. El producto de la resistencia por la capacidad se llama constante de tiempo del circuito y tiene un papel muy importante en el comportamiento de este.

$$\tau = R \cdot C \quad (8)$$

Teóricamente este proceso es infinitamente largo, hasta que $U(t) = U(\text{max})$ aunque en la práctica se considera que el tiempo de carga se mide cuando el condensador se encuentra aproximadamente en la tensión a cargar, es decir, aproximadamente cinco veces su constante de tiempo. La constante de tiempo, marca el tiempo en el que la curva tangente en el inicio de la carga marca en intersección con la línea de máxima tensión de la constante de tiempo. Este tiempo sería el tiempo en el que el condensador alcanzaría su máxima tensión si es que la corriente entrante fuera constante. En los circuitos físicos, la corriente con una fuente de tensión constante, tendrá un carácter exponencial, igual que la tensión en el condensador.

La máxima corriente fluye en el instante inicial, es decir $t = 0$. Esto es debido a que el condensador está descargado, y la corriente que fluye se puede calcular fácilmente con la ley de Ohm, como:

$$I_{MÁX} = \frac{U_{MÁX}}{R} \quad (9)$$

Respuesta natural

El circuito RC más simple que existe consiste en un condensador y una resistencia en serie. Cuando un circuito consiste solo de un condensador cargado y una resistencia, el condensador descargará su energía almacenada a través de la resistencia. La tensión o diferencia de potencial eléctrico a través del condensador, que depende del tiempo, puede hallarse utilizando la ley de

Kirchhoff de la corriente, donde la corriente a través del condensador debe ser igual a la corriente a través de la resistencia. Esto da como resultado la ecuación diferencial lineal:

$$C \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R} = 0 \quad (10)$$

Resolviendo esta ecuación para V se obtiene la fórmula del decaimiento exponencial:

$$V(t) = V_0 e^{\frac{-t}{RC}} \quad (11)$$

Funciones de Transferencia

En primer lugar, es necesario definir la impedancia compleja de un condensador. La impedancia compleja de un condensador con capacidad C (en faradios) es

$$Z_c = \frac{1}{sC} \quad (12)$$

Por tanto, viendo el circuito como divisor de tensión, el voltaje a través del condensador es:

$$V_c(s) = \frac{\frac{1}{Cs}}{R + \frac{1}{Cs}} V_{in}(s) = \frac{1}{1+RCs} V_{in}(s) \quad (13)$$

y el voltaje a través de la resistencia es:

$$V_R(s) = \frac{R}{R + \frac{1}{Cs}} V_{in}(s) = \frac{RCs}{1+RCs} V_{in}(s) \quad (14)$$

De esta forma, la función de transferencia desde el voltaje de entrada al voltaje a través del condensador es

$$H_C(s) = \frac{V_C(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{1+RCs} \quad (15)$$

De forma similar, la función de transferencia desde el voltaje de entrada al voltaje de la resistencia es:

$$H_R(s) = \frac{V_R(s)}{V_{in}(s)} = \frac{RCs}{1+RCs} \quad (16)$$

Ambas funciones tienen un único polo y éste es común, localizado en

$$s = \frac{-1}{RC} \quad (17)$$

La magnitud de las ganancias a través de los dos componentes son:

$$G_C = \frac{1}{\sqrt{1+(wRC)^2}} \quad (18)$$

$$G_R = \frac{wRC}{\sqrt{1+(wRC)^2}} \quad (19)$$

La corriente del circuito, es la misma en todos los puntos del circuito ya que el circuito está en serie:

$$I(s) = \frac{V_{in}(s)}{R + \frac{1}{Cs}} = \frac{Cs}{1+RCs} V_{in}(s) \quad (20)$$

Análisis en Frecuencia

Un análisis de frecuencia del montaje permite determinar cuáles son las frecuencias que el filtro rechaza y cuáles acepta. Para bajas frecuencias,

H_c tiene un módulo cercano a 1 y una fase próxima a 0. Cuando la frecuencia aumenta, su módulo disminuye para tender a 0 mientras que la fase tiene a $-\pi/2$. Por el contrario, H_R posee un módulo cercano a 0 a bajas frecuencias y una fase próxima a $\pi/2$ y cuando la frecuencia aumenta, el módulo tiende a 1 y su fase tiende a 0.

La frecuencia de corte del circuito que define el límite tiene 3 dB entre las frecuencias atenuadas y aquellas que no lo son. Es igual a:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (21)$$

Cálculo de filtros RC del prototipo

A continuación se exponen los resultados del cálculo de la frecuencia de corte de diferentes filtros RC, considerando las más importantes que se usarán también con el prototipo desarrollado. Se realizan los cálculos con los siguientes valores de condensadores: 22 pF, 47 pF, 100 pF, 220 pF, 470 pF y 100 nF, obteniendo un barrido de valores de capacidad bastante amplio.

A continuación se calculan las frecuencias de corte para cada filtro en base a la ecuación 21.

$$f_c(22 \text{ pF}) = 153,92 \text{ kHz}$$

$$f_c(47 \text{ pF}) = 72,048 \text{ kHz}$$

$$f_c(100 \text{ pF}) = 33,863 \text{ kHz}$$

$$f_c(220 \text{ pF}) = 15,352 \text{ kHz}$$

$$f_c(470 \text{ pF}) = 7,205 \text{ kHz}$$

$$f_c(10 \text{ nF}) = 33,863 \text{ Hz}$$

4.2.2. Amplificador operacional y rectificador

Como se observa en la figura 8, el circuito electrónico de instrumentación mediante el cual se filtra la señal para poder obtener datos de la misma utiliza dos amplificadores operacionales. En la figura 10 se puede ver el primer amplificador aislado del resto del circuito.

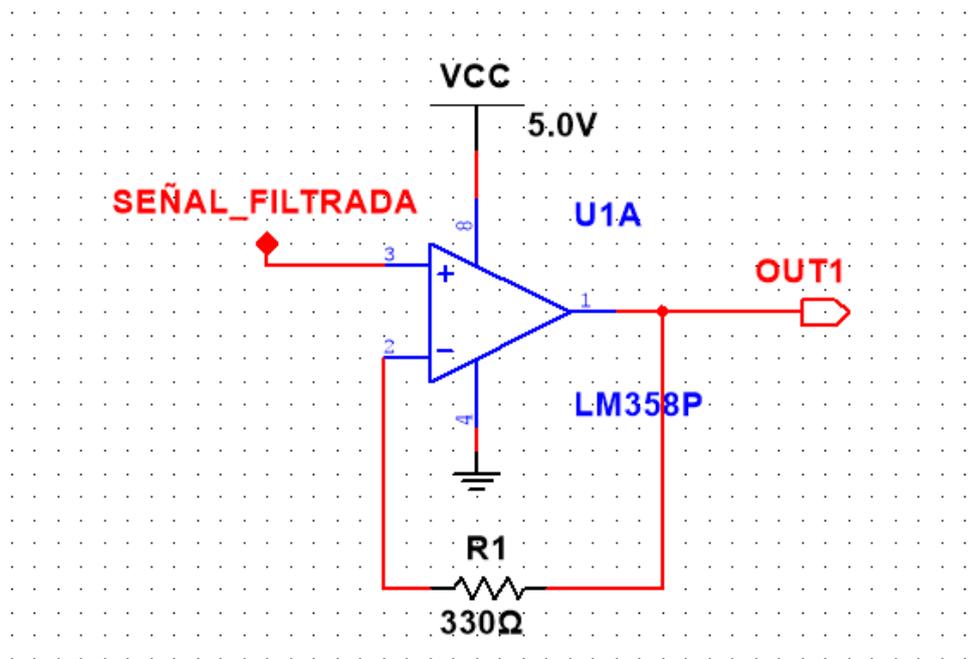


Figura 10: Circuito no inversor con amplificador operacional.

Este circuito realiza una función similar a un adaptador de impedancias con una cierta ganancia. El valor de esta ganancia no es de interés a la hora del resultado, ya que permanece constante en todo momento por lo que influye igual en todas las medidas independientemente del cambio de capacidad de la sonda.

Tras este circuito, se conecta un diodo con una resistencia y un condensador en paralelo, tal y como se muestra en la figura 11.

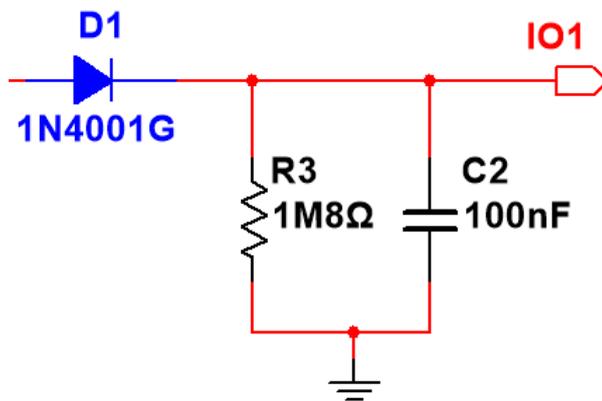


Figura 11: Circuito rectificador de tensión.

Este circuito es el encargado de que en la entrada analógica de arduino donde se pretende realizar la medida haya una tensión continua y no la señal cuadrada alterna que se introduce al principio del circuito. Su funcionamiento es bastante básico, cuando el amplificador operacional tiene a su salida un voltaje alto, este voltaje carga el condensador, de manera que el voltaje en el condensador es igual al voltaje de salida del amplificador. Mediante el diodo se impide que circule corriente en sentido a la entrada, de manera que la única forma de descarga del condensador es la resistencia de 1,8 MOhms. Al tener un valor de resistencia elevado, se consigue mantener ese voltaje constante hasta el siguiente ciclo donde el condensador volverá a cargarse con el nuevo voltaje que haya en la salida del amplificador operacional.

4.2.3. Circuito oscilador

En la figura 12 se muestra el último circuito que constituye toda la parte de filtrado y medida de la señal. Este circuito es un oscilador, mediante el cual se puede medir la capacidad de la sonda colocada en el suelo, en función de la frecuencia de la onda generada por el. Si se realiza un análisis únicamente de la parte del amplificador operacional, solamente se trata de un circuito comparador de tensión. Los circuitos comparadores de tensión cambian su

salida entre valor alto y nulo o negativo dependiendo del resultado de la comparación a la entrada.

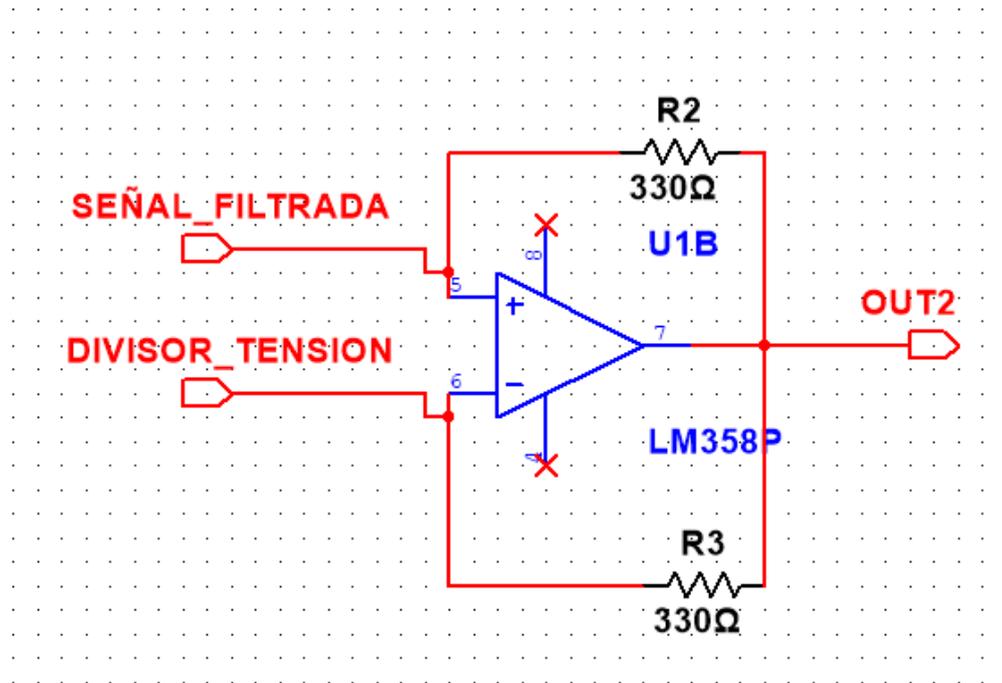


Figura 12: Circuito comparador mediante amplificador operacional.

4.3. La Sonda FDR Capacitiva

La sonda, es uno de los elementos más importantes del sensor, pues si la sonda presenta algún defecto, todas las medidas que se tomen van a resultar erróneas.

La sonda de un sensor FDR consiste en unos electrodos, aislados eléctricamente entre sí, que se introducen en el suelo. El motivo por el que los electrodos están aislados eléctricamente, es para evitar que fluya la corriente eléctrica entre ellos dos, de manera que se consigue el efecto de un condensador, como se muestra en la figura 13.

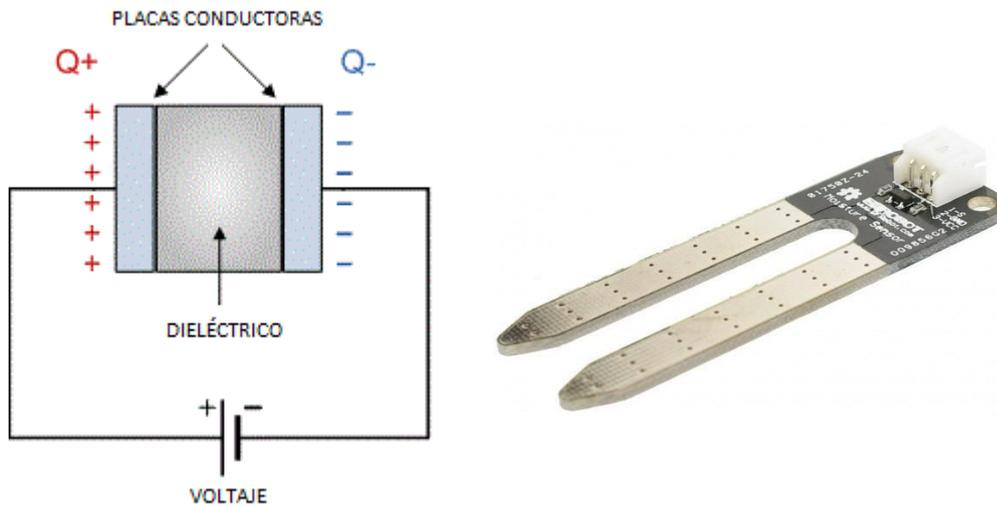


Figura 13: Estructura de un condensador y similitud con la sonda capacitiva FDR.

Un aspecto muy importante en la sonda, es el material aislante que se utiliza para recubrir los electrodos. Si se utiliza un material inadecuado, es probable que se deteriore antes de tiempo o que obtengamos medidas erróneas así como variación en las medidas con el paso del tiempo. En estudios anteriores se realizaron ensayos con laca de uñas y con barniz, materiales que resultaron ser adecuados para este uso.

Otro aspecto importante en la sonda, es la forma de la sonda que se utiliza por lo que también se probaron dos modelos de sondas FDR de capacitancia. En estudio anteriores, (A. Ruiz Canales, J.M. Molina, M. Oates and A. Vázquez de León, 2015) se realizó un experimento con diferentes tipos de sondas y aislamientos. El primer modelo consistió en una tarjeta de circuito impreso de doble cara rectangular de 54 mm por 39 mm con doble huella en forma de dedos entrelazados. La tarjeta de circuito impreso se construyó a partir de una placa FR4 de 1,6 mm y se aisló mediante inmersión en barniz, el cual se reservó 24 horas para secar antes de una segunda inmersión. El área de medida es aproximadamente el 40 % de la superficie de las tarjetas. Por tanto, se tiene un tamaño aproximado de 840 mm² por placa. Esta sonda está

referida como la sonda "barniz plana". Por otra parte, se empleó el mismo modelo de sonda con tarjeta de circuito impresa pero esta vez pintada con dos manos de esmalte de uñas. Ello permitió conseguir una capa delgada de aislamiento, pero menos uniforme que el caso anterior. Esta se ha referido como la sonda "esmalte plana". El segundo modelo de sonda consiste en una placa de circuito impresa de 20 mm x 60 mm con dos dientes afilados de doble cara de 7 mm de ancho de placas aisladas, con tarjeta de circuito impreso. En este caso las placas no están unidas en la parte superior y los dientes están separados 6 mm. El circuito impreso se aísla usando la misma técnica que en el primer modelo de sonda. El área efectiva de la placa es de 500 mm². Igualmente se realizaron dos sondas, la primera con una capa de barniz y la segunda con dos capas de esmalte de uñas para tener respectivamente los modelos "barniz diente" y "esmalte diente".

Para determinar la capacitancia efectiva de la sonda se emplean los dos métodos del circuito mostrado en la figura 8. Como ya se conoce el funcionamiento aislado de cada uno de los subcircuitos que lo componen, se puede realizar un análisis más detallado de cómo funciona en general la determinación de la capacidad de la sonda en función y con ellos la humedad del suelo.

En el primer circuito un microcontrolador genera una onda cuadrática a una determinada frecuencia que se hace pasar por el filtro paso bajo. En concreto se realizan ensayos a frecuencias de 250 kHz, 125 kHz, 62,5 kHz y 31 kHz. Estas frecuencias se seleccionaron por ser más altas que las que se usan en la práctica, dado el limitado producto ganancia ancho de banda (GBP) de los amplificadores de bajo coste.

Adicionalmente se pretende que las frecuencias estuvieran sincronizados con la frecuencia de corte resultante de los filtros paso bajo. Una vez la señal ha pasado por el filtro paso bajo es posible que tenga una cierta atenuación

dependiendo del valor de capacidad del condensador y entonces se pasa por el amplificador operacional y el rectificador de manera que pueda medirse con un pin del conversor digital-analógico del microprocesador. El voltaje en este pin se mide después de un período de estabilización de 20 ms después de que se aplique una señal de onda cuadrática. Una vez se ha tomado el valor, la señal de onda cuadrática se para y el microcontrolador vuelve a estado de alta impedancia.

Así, cuando la sonda capacitiva FDR está al aire o en un suelo muy seco, su capacitancia es baja, del orden de 30 pF. Por tanto, la frecuencia de corte del filtro paso bajo es de unos 113 kHz y se debería esperar una señal de atenuación sobre 3dB, de una señal cercana a este valor, como son por ejemplo 125 kHz. Esta atenuación es más alta para la señal de 250 kHz y más baja para las señales de 62,5 kHz y 31 kHz. Cuando la sonda capacitiva está en un suelo muy húmedo, su capacitancia aumenta entre 200 a 400 pF, dando una frecuencia de corte entre 17 y 8,5 kHz. Para estos valores de frecuencias de corte, la atenuación de las cuatro señales de prueba es mucho más alta y se da una lectura mucho más baja que en el caso anterior.

Aunque se ha dicho que el valor del cambio teórico en capacitancia perfecta puede ser tan alto como 80, en la práctica no se obtiene ese valor debido a la contribución de la constante dieléctrica del barniz de aislamiento del sensor y la geometría longitudinal de éste. Además, las frecuencias críticas y el comportamiento del filtro paso bajo se ven más influenciados por la resistencia de 270 k Ω que se usa en el amplificador del segundo circuito.

Por otro lado, la atenuación teórica de la frecuencia de corte de 3 dB solamente se aplica a señales de onda sinusoidales mientras que en el experimento se emplean ondas cuadráticas. Esto significa que hay importantes componentes armónicos, con amplitud decreciente, en la frecuencia base de múltiplos impares. Como se tiene solamente un valor pico de una señal y esos

armónicos están normalmente sobre la frecuencia crítica del filtro de paso bajo, ello no influye significativamente en el comportamiento del sensor.

El segundo método usa la sonda como el elemento capacitivo en un circuito oscilador, cargando y descargando repetidamente el condensador cuando la diferencia de potencial pasa entre dos entradas de control. El tiempo empleado por la diferencia de potencial para subir y bajar entre esas entradas se mide en una entrada digital del microcontrolador, sobre cuatro ciclos de media onda para suministrar un indicador del valor de la capacitancia. Para este método, la resistencia de 47 k Ω y el primero amplificador no juegan un papel fundamental como lo hacían en los métodos de alta frecuencia. La sonda capacitiva FDR se conecta entre tierra y la segunda entrada inversores del segundo amplificador. Éste se conecta girado mediante una resistencia de retroalimentación de 270 k Ω hasta la salida del segundo amplificador. La salida también se retroalimenta con la entrada no inversora del amplificador para determinar cuál es el estado de cambios de salida del amplificador. Esta salida también se determina por el punto medio del divisor de tensión desde el control de microcontrolador, que se realiza mediante dos resistencias de 470 k Ω adicionales.

El oscilador se enciende poniendo en valor alto la salida D4 del microcontrolador. La entrada no inversora del segundo amplificador aumenta a unos 2,5 V aproximadamente, mediante la resistencia de retroalimentación conectada a la salida del amplificador. Si esta salida es también alta, se alcanzan sobre 3,2 V en la entrada no inversora del amplificador operacional y la sonda FDR capacitiva empieza a cargar mediante la resistencia de 270 k Ω en la entrada inversora del amplificador. Cuando esta carga alcanza los 3,2 V, la salida del segundo amplificador oscilará por debajo. Esto provoca que la sonda FDR capacitiva empiece a descargarse mediante la resistencia de 270 k Ω . Entonces la resistencia de retroalimentación de 470 k Ω en el lado de la entrada no inversora cambia a la entrada alrededor de 1,8 V y la carga de la sonda FDR

capacitiva alcanzaría valores por debajo de 1,8 V. En este momento, la salida del amplificador vuelve a cambiar a alta y el ciclo se repite. La salida del segundo amplificador se monitoriza con una patilla de entrada del microcontrolador. El tiempo requerido para cargar y descargar la sonda FDR capacitiva entre esos umbrales se determina por su valor de capacitancia, que a la vez depende de la cantidad de agua en el área inmediatamente alrededor de la sonda. En la figura 14 se ven los modelos de sondas mencionados anteriormente.

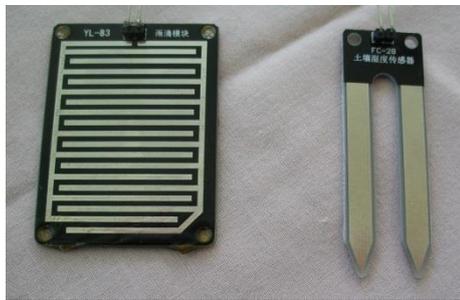


Figura 14 : Modelos de sonda FDR empleados: tipo plana (izquierda) y tipo diente (derecha).

En este estudio, se utiliza la sonda “barniz diente” exclusivamente, centrando el estudio en los resultados obtenidos con esta sonda.

4.4. Sensor de Temperatura Dallas DS18B20

El sensor de temperatura Dallas DS18B20 se utiliza en el sensor FDR para determinar tanto la temperatura del suelo como la temperatura a la que se encuentra la placa. Este sensor está disponible en dos encapsulados diferentes. Un encapsulado TO-92, con tres pines similar a un transistor y otro encapsulado en forma de sonda que se puede introducir en el terreno para medir su temperatura. En la figura 15 se pueden ver los dos encapsulados disponibles de este sensor.

En el sensor FDR, se encuentran dos sensores de este tipo. Hay uno de cada encapsulado, de manera que se controla en todo momento la temperatura de la placa así como la temperatura del terreno.

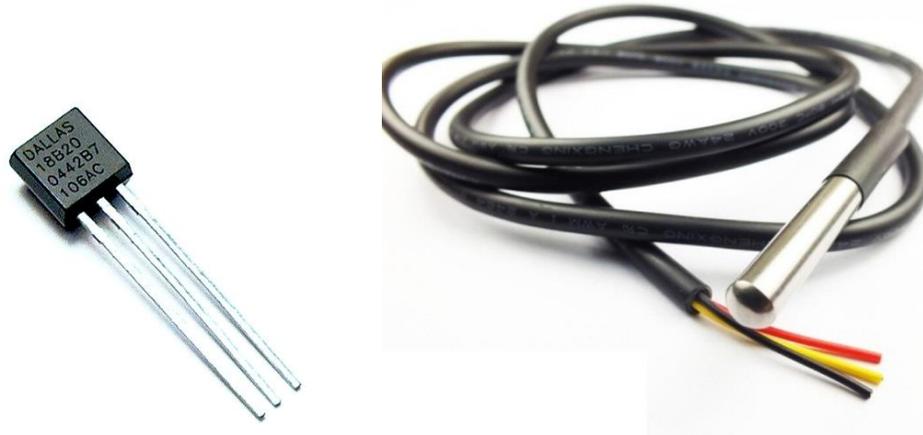


Figura 15: Sensor DS18B20 en sus dos encapsulados disponibles.

Este sensor se considera un termómetro digital de alta precisión, entre 9 y 12 bits de temperatura en grados Celsius, pudiendo escoger el usuario la precisión deseada. Su temperatura operativa se encuentra entre -50 y 125 grados Celsius, teniendo una precisión en el rango comprendido entre -10 y 85 grados de 0,5 grados.

Además de estas razones, se escogió este sensor para realizar el sensor FDR, por tener un precio bastante económico, en torno a 2 euros la unidad y porque cuenta con una interfaz de funcionamiento muy sencilla.

Su esquema de conexiones es muy simple, pues solo cuenta con 3 pines. Uno de ellos es para alimentación, el otro es para tierra y el último es para realizar la comunicación. Una característica peculiar, es que solo utiliza un cable para comunicar con el microprocesador, gracias al protocolo OneWire, que es el que utiliza para comunicarse. La asignación de pines de este sensor se puede consultar en la figura 16.

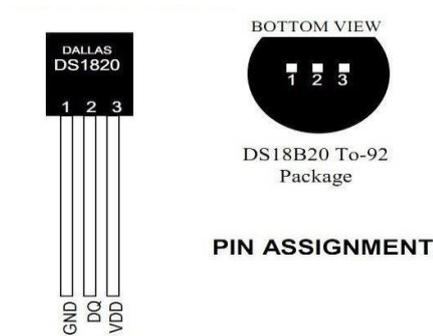


Figura 16: Asignación de pines del sensor DS18B20.

El voltaje de alimentación es entre 3 y 5,5 V, lo que resulta ideal para trabajar con Arduino, que nos da una alimentación de 5V. A la hora de realizar la conexión, los pines de alimentación y masa se conectan entre si y la alimentación se introduce en el pin de datos mediante una resistencia que debe ser mayor o igual a 4,7 kOhm.

Como se puede comprobar en la figura 17, se obtiene una buena relación calidad-precio según los valores suministrados por el fabricante.

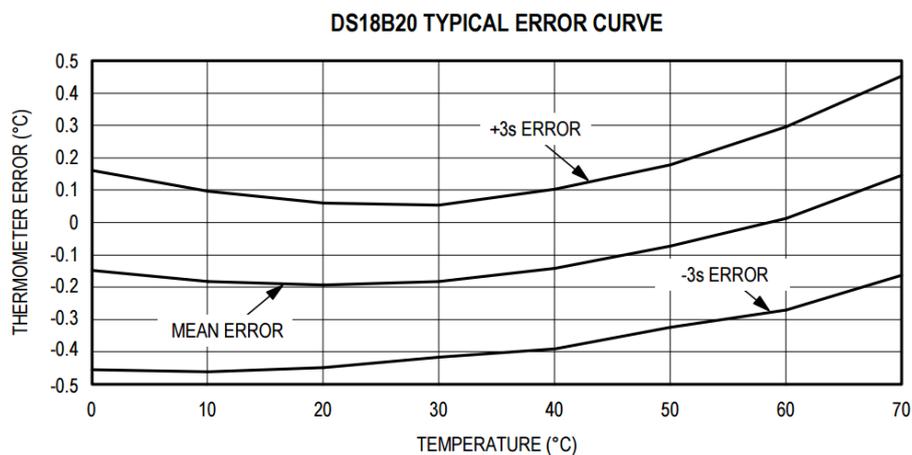


Figura 17: Error típico del sensor DS18B20 (Valores suministrados por el fabricante).

4.5. Sensor de Humedad y Temperatura Ambiental DHT11

En la figura 18 se puede observar un sensor DHT11. Es un sensor que proporciona una salida de datos digital. Entre sus ventajas podemos mencionar el bajo coste y el despliegue de datos digitales, lo que supone una gran ventaja frente a los sensores del tipo analógico, como el LM335 por ejemplo, en los cuales las variaciones de voltaje alteran la lectura de datos.

Mide entre un 20 y un 90% de humedad relativa del aire con una precisión de un 5%. Para la temperatura, mide entre 0 y 50 °C con una resolución de 1 °C.

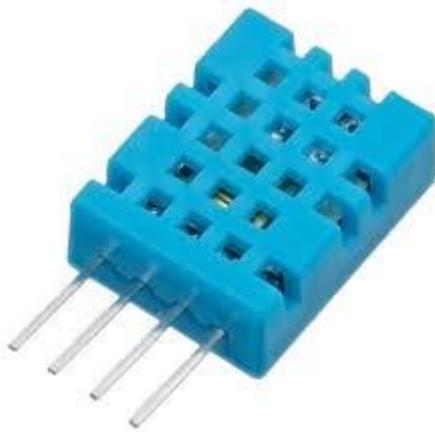


Figura 18: Sensor DHT11.

Colocando el sensor en la orientación en que se encuentra en la figura 18, los pines se numeran del 1 al 4 de izquierda a derecha. En la tabla 2 se observa la función de cada uno de estos pines.

PIN	FUNCIÓN
1	VCC
2	DATOS
3	NO SE CONECTA
4	TIERRA

Tabla 2: Asignación de pines del DHT11.

4.6. Módulo de comunicaciones NRF24L01

El NRF24L01 es un transceptor RF (radiofrecuencia), que integra en un único chip toda la electrónica y bloques funcionales precisos para establecer comunicaciones RF entre dos o más puntos a diferentes velocidades con corrección de errores y protocolo de reenvío cuando es necesario, sin intervención del control externo, lo que nos permite aislarnos de todo el trabajo sucio y complicado relacionado con la transmisión física. En la figura 19 se puede observar este módulo de comunicaciones.

Las principales características de estos dispositivos son:

- Se pueden encontrar muy baratos en el mercado, en torno a 3 euros.
- Operan en la banda de 2.4 Ghz, que es de libre uso a nivel mundial. Esto significa que opera en banda libre y su uso no implica ningún tipo de permiso para usarse en cualquier parte del mundo. Sin embargo, esto es un arma de doble filo, ya que tampoco se puede garantizar que no haya nadie utilizando algún aparato electrónico que use esta banda de frecuencias y pueda producir interferencias en la comunicación.
- Velocidad configurable de 250 kb, 1 Mb o 2Mb por segundo.
- Muy bajo consumo en Stand By.
- El alcance varía con el modelo utilizado. Se pueden conseguir distancias de un mínimo de 20 m hasta unos 80 m usando el modelo básico con la antena integrada. Si se utiliza un modelo con una antena más eficaz, se puede aumentar de forma importante la distancia de transmisión, llegando casi a 1 Km.

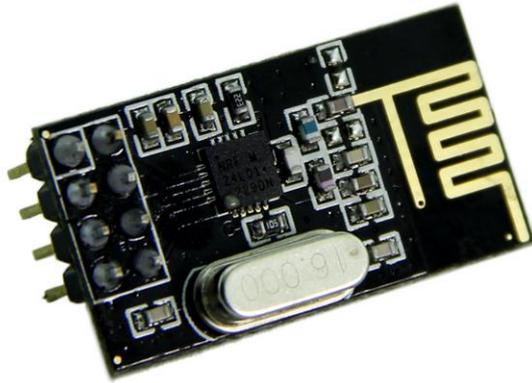


Figura 19: Módulo de comunicaciones RF NRF24L01.

En la tabla 3 se muestra su esquema de conexiones para Arduino Uno. Para seguir este esquema, se considera que el pin número 1 es el pin de la esquina superior izquierda, en la figura 19. El pin número 2 es el que está junto a él y se puede seguir esta metodología para determinar el número correspondiente a cada pin.

FUNCIÓN	PIN NRF24L01	PIN ARDUINO UNO
GND	1	GND
VCC	2	3,3 V
CE	3	D9
CSN	4	D10
SCK	5	D13
MOSI	6	D11
MISO	7	D12
IRQ	8	D2

Tabla 3: Configuración conexión de pines NRF24L01 para Arduino Uno.

En la figura 20 se muestra la conexión de éste módulo con un arduino uno.

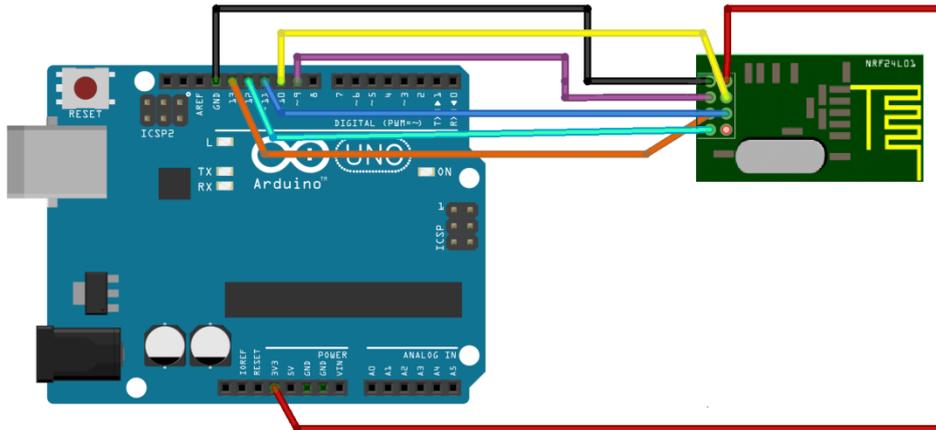


Figura 20: Esquema de conexión entre NRF24L01 y Arduino Uno.

4.7. Desarrollo del Data Logger

Para complementar el prototipo del sensor FDR se desarrolla un data logger para realizar el almacenamiento de todos los datos enviados por el sensor FDR y a la vez una visualización de los mismos en caso de que sea necesario. Es el dispositivo que se muestra en la figura 21.

La parte hardware de este data logger, se desarrolló anteriormente por la UPCT, no es un desarrollo propio. Pese a esto, se realiza una descripción de cómo está desarrollada y los elementos de los que consta, ya que el desarrollo y programación de todo el proceso de almacenamiento así como la visualización de datos si es objeto de este proyecto.

A grandes rasgos, el data logger se compone de 4 módulos; lector de tarjetas SD, pantalla TFT de 1.8", reloj en tiempo real RTC y módulo de radio NRF24L01 similar al que se utiliza en el sensor FDR, que realizan las siguientes funciones: almacenamiento de datos, visualización de datos, indicación horaria y comunicación. Además de estas funciones, el data logger cuenta con un Arduino Uno que es el que gobierna todos estos componentes. La figura 22 muestra el esquemático del data logger, incluyendo las conexiones con el arduino.

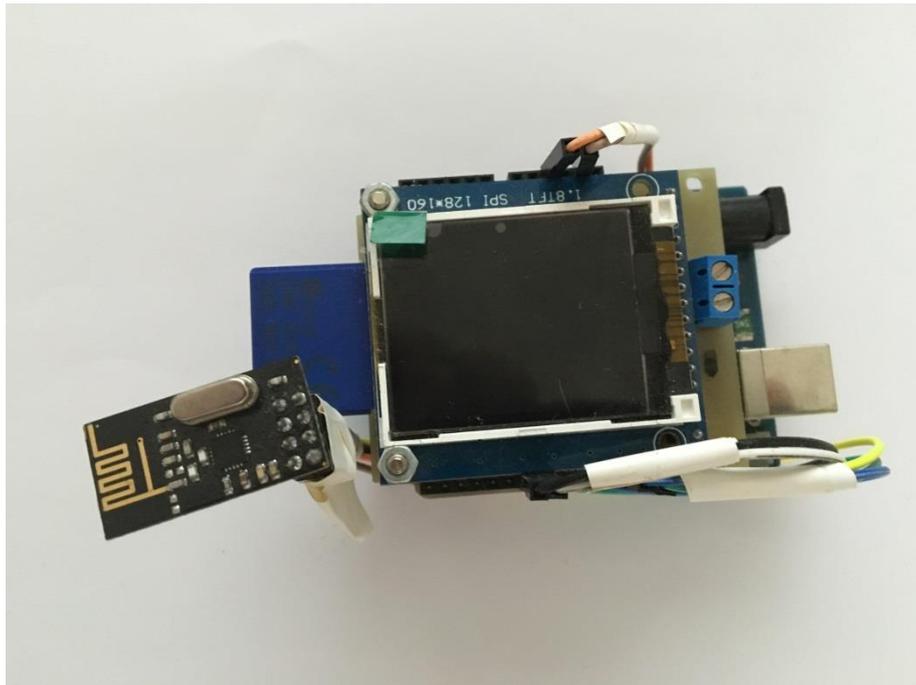


Figura 21: Data Logger formado por Arduino Uno, Shield con RTC y TFT y módulo de comunicación radio.

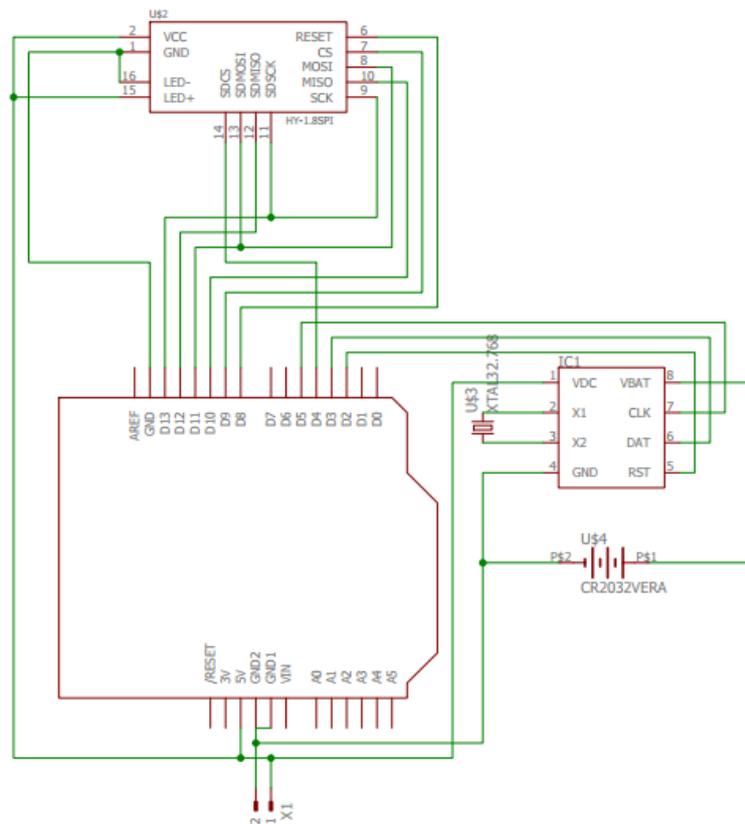


Figura 22: Esquemático completo del data logger.

4.7.1. Almacenamiento de datos

Para el almacenamiento de datos se utiliza el lector de tarjetas SD que viene integrado en la pantalla TFT 1.8". En la figura 23 se puede apreciar este módulo lector de tarjetas SD.

Este módulo se usa para almacenar en la tarjeta SD todos los datos que el sensor FDR va enviando, conjuntamente con su fecha y hora de recepción. Esta funcionalidad es muy útil, ya que se evita la necesidad de tener un ordenador encendido las 24 horas que almacene los datos o de tener que ir a conectar con el sensor FDR para comprobar repetitivamente los valores que está midiendo.



Figura 23: Vista inferior del módulo TFT 1.8 + Lector SD

Para almacenar los datos en la tarjeta SD se crea un fichero de texto .txt que en este caso en particular se llamará "datos.txt". En este fichero se van almacenando los datos con el formato que tienen los de la figura 24. Los datos se almacenan en un archivo de texto ".txt" separados por comas, de forma que puedan ser importados a Excel directamente.

DATOS_19-09-2016: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
15:19,25,22,28,30,201,26,35,50,0,0,1
15:24,25,22,28,30,201,27,34,50,0,0,1
15:30,24,22,27,29,200,27,35,49,0,0,1
15:36,24,22,27,29,200,27,35,49,0,0,1
15:41,25,22,27,29,200,26,36,49,0,0,1
15:47,24,22,27,29,199,26,35,49,0,0,1
```

Figura 24: Formato de los datos almacenados en la tarjeta SD mediante el Data Logger desarrollado.

El lector de tarjetas SD, se comunica con el arduino mediante el protocolo SPI siguiendo la disposición de pines de la figura 20. Para poder trabajar sobre la tarjeta SD es importante que ésta esté formateada en FAT16 o FAT32, no reconociéndola si se encuentra en otro formato aunque siempre que sea posible es recomendable formatearla en FAT16.

A la hora de realizar la grabación de datos en la tarjeta SD, hay una metodología que debe seguirse. Si no se toman ciertas precauciones, es posible que se pierdan los datos, incluso que se dañe la tarjeta perdiendo todo lo que ésta contenga. El aspecto más importante a la hora de guardar los datos, es abrir y cerrar el archivo siempre que se termine de guardar, de forma que no se quede continuamente abierto.

4.7.2. Visualización de datos

Otro elemento con el que cuenta el data logger es la pantalla TFT de 1.8" de 128x160 píxeles. En esta pantalla se muestran todos los valores medidos por el sensor FDR que han sido recibidos por el data logger tal y como se observa en la figura 25.

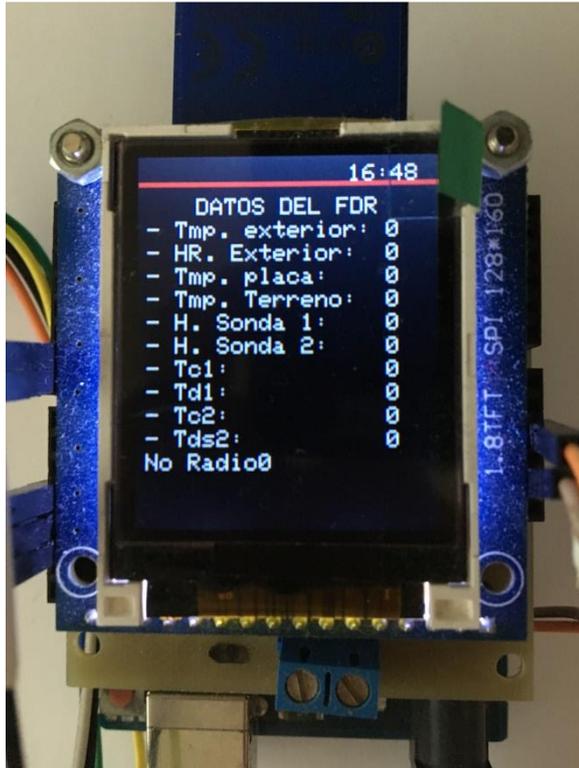


Figura 25: Visualización de los datos a través de la pantalla TFT con la que cuenta el Data Logger.

Para realizar la comunicación con la pantalla se utiliza el protocolo SPI. Al utilizar el mismo protocolo que el módulo de la SD, se pueden aprovechar ciertos pines que son comunes. Para su programación se utiliza la librería "Adafruit_GFX.h" y la "Adafruit_ST7735.h".

La pantalla presenta una resolución de 128x160 píxeles. Para realizar la visualización de los datos, hay varios métodos gráficos interesantes, tal y como se muestra en la tabla 4:

MÉTODO	DESCRIPCIÓN
tft.fillScreen(Color)	Borra la pantalla con el color indicado
tft.fillRect(x0,y0,x1,y1, Color)	Rellena un recuadro de color entre x0,y0 a x1,y1
tft.drawPixel(x0,y0, Color)	Pinta el pixel
tft.drawLine(x0,y0,x1,y1, Color)	Dibuja una línea
tft.draw.FastHline(x0,y0,L, Color)	Dibuja una línea horizontal de la longitud L
tft.drawFastVline(x0,y0,H, Color)	Dibuja una línea vertical de la longitud H
tft.fillCircle(x,y,radius, Color)	Dibuja un círculo relleno
tft.drawCircle(x,y,radius, Color)	Dibuja el contorno de un círculo
tft.drawTriangle(x0,y0,x1,y1,x2,y2, Color)	Dibuja un triángulo entre los dos puntos indicados
tft.drawRoundRect(x0,y0,x1,y1,R, Color)	Rectángulo redondeado entre P0 y P1 con redondeo de radio R

Tabla 4: Funciones para utilizar la pantalla TFT 1.8 con las librerías Adafruit GFX.zip y Adafruit_QDTech.zip.

4.7.3. Reloj en Tiempo Real (RTC)

A la hora de almacenar los datos en la tarjeta SD es necesario implementar algún sistema para conocer la fecha y la hora a la que corresponde cada dato. Para este desempeño es necesario dotar el dispositivo con un Reloj en Tiempo Real (RTC). Los RTC son circuitos integrados que proporcionan la fecha y hora al microprocesador, de manera que liberan tiempo y recursos (contadores y/o temporizadores) al microprocesador.

El circuito utilizado en el módulo data logger es el circuito DS1302. Este circuito integrado tiene un contador de tiempo real, además tiene 31 bytes de memoria RAM para cualquier dato que se necesite guardar. En la figura se observa la disposición de pines de este RTC. Este circuito integrado utiliza una interfaz comúnmente llama "Interfaz de 3 hilos". No se entrará en detalle de esta interfaz, ya que para realizar las comunicaciones se ha utilizado la librería "DS1302.h" evitando la necesidad de conocer en detalle el funcionamiento interno del protocolo de comunicaciones. La figura 26 muestra el esquema de conexiones de éste circuito integrado.

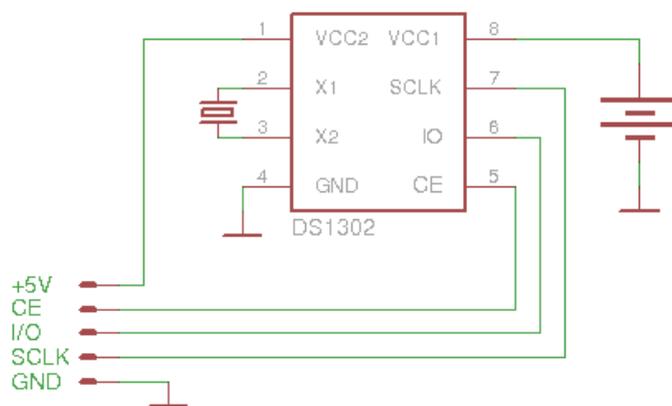


Figura 26: Pines del circuito integrado RTC DS 1302.

4.7.4. Módulo de comunicaciones

Este módulo realiza la comunicación vía radio con el sensor FDR. No merece la pena prestar especial atención, ya que se ha explicado anteriormente el funcionamiento del mismo.

5. Funcionamiento y programación

Hasta este apartado, se ha introducido el sensor FDR y se ha explicado todo lo referente a su hardware, sin embargo, el sensor no solo se compone de elementos de hardware si no que conlleva una parte de programación que lo hace funcionar. En este apartado se pretende mostrar cuál es el funcionamiento del sensor, así de las técnicas y herramientas de software que se han utilizado para su programación.

Además del sensor FDR, en este proyecto se abarca el desarrollo de software para un módulo data logger así como para un programa SCADA de supervisión de datos.

Ya es conocido que el elemento de procesamiento central de todo el sensor FDR así como del data logger es el microprocesador AtMega328P-PU, que es el que incorpora la placa de desarrollo Arduino Uno. Este microprocesador se puede encontrar en la propia placa, pero también es posible comprarlo independientemente con el bootloader de Arduino ya cargado. Como aclaración, el bootloader es el gestor de arranque del microprocesador que nos permite programarlo con el IDE de Arduino.

5.1. Gestión del consumo

Para los sensores que funcionan con baterías es crítico conocer que el Arduino, microprocesador en este caso, tiene suficiente voltaje del que dependen las lecturas del conversor analógico-digital. Es posible hacer que el microprocesador compruebe su propio suministro de energía (relativo a su referencia interna fija) sin la necesidad de componentes externos. Cuando el microprocesador AtMega238P-PU trabaja a 16 MHz, el arduino Uno puede consumir un exceso de 25 mA, lo que es insostenible para las fuentes de alimentación convencionales. Cuando se ponen en modo sleep y se activan

mediante un interruptor contador interno, esto puede reducir al menos a la mitad el consumo del sensor. Cuando el modo sleep, con su led de energía quitado, una placa Arduino Pro Mini consume sobre 300 uA, por ejemplo. Por tanto, realizar una gestión eficiente de la energía durmiendo el sistema durante un determinado periodo de tiempo puede alargar notablemente la autonomía del sensor.

En el prototipo desarrollado, se alimenta el microprocesador mediante 4 pilas en serie de 1,5 V, con lo cual no se cuenta con una alimentación de gran capacidad lo que acentúa si cabe, esta necesidad de realizar una gestión eficiente de la energía consumida. Este es el motivo por el cual el sensor FDR toma medidas cada 7 minutos, tiempo que se considera más que suficiente para tener una relación de datos representativa del medio, considerando la gran inercia al cambio de la humedad del suelo, aire y las temperaturas.

En el siguiente ejemplo, el interruptor centinela se configura para despertar al dispositivo cada ocho segundos, sobre el que un contador comprueba si han pasado suficientes múltiplos de 8 segundos. Si no, inmediatamente vuelve al modo sleep. Si se pasa del intervalo designado, el procesador ejecuta su bucle de código antes de volver a sleep.

```
#include<avr/sleep.h>
#include<avr/power.h>
typedef enum{
    wdt_16ms=0,wdt_32ms,wdt_64ms,wdt_128ms,wdt_250ms,wdt_500ms,wdt_1,wdt_2s,wdt_4s,wdt_8s}wdt_prescalar_e;
void setup_watchdog(uint8_t prescalar);
void do_sleep(void);

const short sleep_cycles_per_tx = 2;
volatile short sleep_cycles_left = sleep_cycles_per_tx;

void setup(void){
    setup_watchdog(wdt_8s);
}
```

```
Void loop(void){
While(sleep_cycles_left)
    do_sleep();
sleep_cycles_left=sleep_cycles_per_tx;
delay(200);
}

Void setup_watchdog(uint8_t prescalar){
prescalar = min(9,prescalar);
uint8_t= wdtcsr=prescalar & 7;
if(prescalar&8)
    wdtcsr |=_BV(WDP3);
MCUSR &=~_BV(WDRF);
WDTCR=_BV(WDCE) |_BV(WDE);
WDTCR=_BV(WDCE)|wdtcsr|_BV(WDIE);
}

ISR(WDT_vect){
--sleep_cycles_left;}

void do_sleep(void){

set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN);
sleep_enable();
sleep_mode();
sleep_disable();
}
}
```

5.2. Protocolos de comunicación

5.2.1. SPI (Serial Peripheral Interface)

El bus SPI es un protocolo de comunicación síncrona de 4 hilos, entre dispositivos electrónicos presentado por Motorola en 1992, que ha ganado bastante aceptación en la industria como sistema de comunicación de muy corta distancia, normalmente dentro de la placa de circuito impreso.

Es un protocolo que permite alcanzar velocidades muy altas y que se diseñó pensando en comunicar un micro controlador con distintos periféricos y que funciona a full dúplex, es decir, que se pueden enviar y recibir datos al mismo tiempo.

SPI utiliza una solución síncrona, por lo que necesita utilizar líneas diferentes para los datos y el reloj (Clock). El reloj es una señal que indica al que escucha exactamente cuándo leer las líneas de datos, con lo que el problema de la pérdida de sincronía se elimina de raíz. La figura 27 muestra cómo se realizan las conexiones en un bus SPI y cómo funciona la comunicación entre dos dispositivos que utilizan este protocolo.

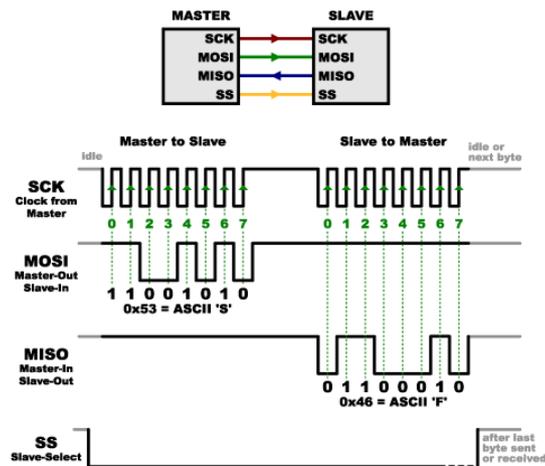


Figura 27: Resumen conexiones y comunicación en un bus SPI.

La ventaja de trabajar con un protocolo síncrono, es que la velocidad de transmisión la fija el reloj, de manera que no hay que fijarla en los dispositivos que se conectan al bus y puede ser variable en todo momento, teniendo en cuenta los límites físicos del bus. El master es quien genera la señal de reloj, de manera que necesita saber de antemano si un esclavo va a devolver una respuesta y la longitud de la misma para poder mantener esta señal hasta que la transferencia de datos esté completa. Para utilizar este protocolo en Arduino, se desarrolló la librería SPI.h.

Como muestra la figura 26, para utilizar un bus SPI se necesitan 4 pines:

- SCK: En este pin debe estar conectada la señal del reloj en ambos dispositivos.
- MOSI (Master Out Slave In): como su propio nombre indica, es la salida de datos del maestro hacia el esclavo.

- MISO (Master In Slave Out): es la salida de datos desde el esclavo al maestro.
- SS (Slave Select): es el pin que se utiliza para seleccionar el esclavo con el que se quiere realizar la comunicación. Esta línea suele estar en nivel alto, de manera que cuando el maestro quiere comunicar con un esclavo determinado, pone su línea correspondiente a nivel bajo indicándole que es quien tiene que recibir o enviar la información.

En la tabla 5 se muestran los pines típicos que se usan para el bus SPI en Arduino Uno.

PIN	FUNCIÓN
11	MOSI
12	MOSI
13	SCK
10	SS

Tabla 5: Pines para Arduino 1 del bus SPI.

5.2.2. One Wire

Dallas Semiconductor (ahora Maxim) produce una familia de dispositivos que son controlados a través de un protocolo 1-wire propietario, aunque no hay cuotas para los programadores que utilizan los controladores Dallas 1-Wire.

En una red 1- Wire, que Dallas ha denominado "MicroLan", un único dispositivo maestro se comunica con uno o más dispositivos 1-Wire esclavos a través de una sola línea de datos, que a la vez puede ser utilizada para dar alimentación a los esclavos. Cuando los dispositivos se conectan de manera que son alimentados directamente desde el bus 1-Wire se dice que están trabajando en modo de potencia parásita.

Los sensores de temperatura 1-Wire se han convertido muy populares, porque son baratos y fáciles de usar, además de proporcionar lecturas digitales que ya están calibradas sin necesidad de realizar una calibración previa del dispositivo y tener una mayor tolerancia a la distancia del bus.

Maxim y un gran número de compañías fabrican dispositivos maestros de bus dedicados para la lectura/escritura y gestión de los buses 1-Wire. Estos dispositivos están diseñados y optimizados específicamente para leer y escribir de manera eficiente a los dispositivos y redes 1-Wire.

Muchos de los chips proporcionan un control de errores que se ocupa directamente de la pérdida de la integridad de la señal, la variación de nivel, reflexiones y otros demás que pueden causar problemas sobre todo en grandes redes. Otra ventaja clave es el apoyo de owfs, un sistema de archivos de lectura/escritura con gran compatibilidad con dispositivos para maestros 1-Wire que expone muchas funciones nativas para una amplia variedad de tipos de dispositivos 1-Wire.

Alimentación de red 1-Wire

El chip puede ser alimentado de dos maneras. Una es en modo parásito, de manera que el chip solo necesita dos cables. El otro modo es utilizando tres cables y puede dar un funcionamiento más fiable cuando la distancia del bus es elevada. Generalmente, si la distancia entre el maestro y esclavo es de menos de 6 metros, la conexión en modo de alimentación parásita debería dar buenos resultados.

En el modo de alimentación parásito solo se necesitan dos cables, la señal y tierra. En este modo hay que colocar una resistencia de pull-up de 4,7 K en el bus 1-Wire tal y como se muestra en la figura 28.

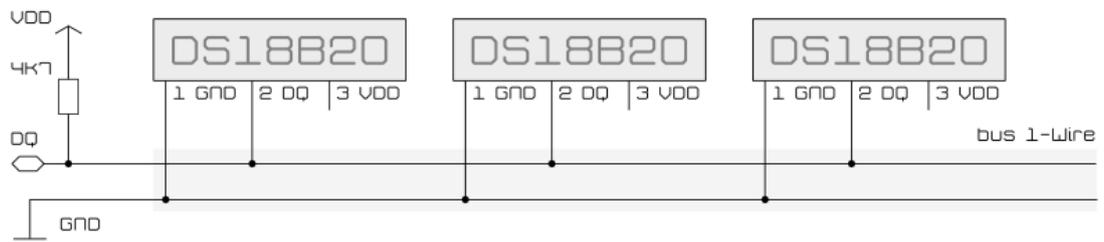


Figura 28: Bus 1-Wire con alimentación en modo parásito.

En el modo normal de alimentación, se requieren tres cables: el cable de bus, el de tierra y la alimentación. La resistencia de 4,7K sigue siendo necesaria en el cable de bus. En la figura 29 se observa la conexión de los dispositivos conectados con el modo de alimentación convencional.

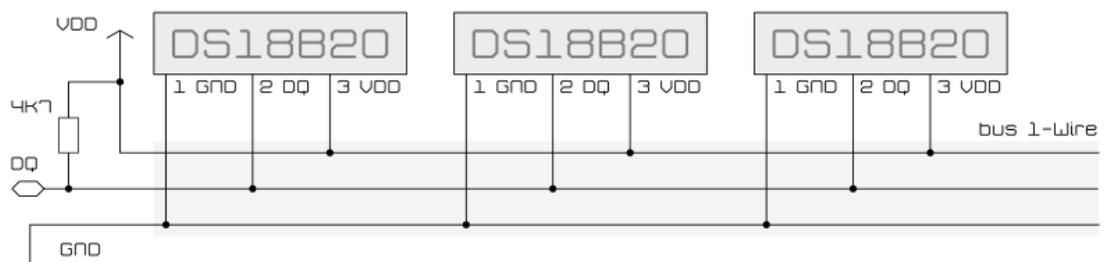


Figura 29: Bus 1-Wire con alimentación en modo completo o normal.

Comunicaciones con el bus 1-Wire

El protocolo de comunicaciones del bus 1-Wire es bastante simple, consisten en iniciar la comunicación enviando una señal de reset durante 480 micro segundos o más a nivel bajo, pulsos largos (60 micro segundos) para enviar bits de valor cero, y pulsos cortos (menos de 15 micro segundos) para enviar bits con valor uno, formando paquetes de ocho bits. La velocidad estándar resultante está entorno a los 15 Kb/s pero se pueden llegar a conseguir velocidades superiores a los 100 Kb/s.

Para identificar cada dispositivo conectado al bus se utilizan direcciones únicas de 8 bytes que incluyen uno como identificador del hardware, el más significativo, y otro para la verificación CRC, el menos significativo.

Como ocurre en otros protocolos similares, en el inicio de la comunicación se incluye la identificación del dispositivo y la operación que se desea realizar, como por ejemplo escribir o leer en la memoria.

En el sensor FDR, se encuentran dos sensores de temperatura que utilizan este protocolo de comunicaciones. Son los sensores que miden la temperatura de la tierra y la temperatura de la placa, cada uno en un encapsulado diferente. Para realizar la programación de ambos, se ha utilizado la librería "OneWire.h", de tal forma que se realiza una lectura del número de identificación de cada dispositivo para determinar a qué medida corresponde cada dirección.

5.3. Comunicaciones

El sensor FDR comunica vía radio con otros dispositivos, ya sean otros sensores o sea un nodo receptor de información. Para realizar estas comunicación, es de gran importancia realizar un envío eficiente de la información, de forma que se pierda la menor posible.

Para llevar a cabo la comunicación del FDR, se define una estructura de 20 datos de tipo byte, tal y como se muestra en la figura 30.

```
Struct payload_t{  
    byte data[20];  
};
```



Figura 30: Formato de empaquetado de datos para su envío.

La identificación de los datos dentro del paquete es la siguiente:

Byte 00: número de la secuencia (necesario cuando se utilizan más de dos sondas ya que hay que mandar varios paquetes de datos).

Byte 01: este byte no se utiliza por el momento.

Byte 02: tensión interna de referencia del microcontrolador.

Byte 03: temperatura interna de los diodos.

Byte 04: temperatura de referencia de microcontrolador.

Byte 05: byte reservado para medidas mediante método wenner.

Byte 06: byte reservado para medidas mediante método wenner.

Byte 07: byte reservado para medidas mediante método wenner.

Byte 08: temperatura medida mediante sensor DHT11.

Byte 09: humedad del aire medida mediante sensor DHT11.

Byte 10: temperatura de la placa medida con sensor DS18B20.

Byte 11: temperatura del terreno medida con sensor DS18B10.

Byte 12: reservado para datos adicionales.

Byte 13: reservado para datos adicionales.

Byte 14: lectura de entrada analógica correspondiente a la medida de la sonda FDR 1.

Byte 15: lectura de tiempo de carga para la sonda FDR1.

Byte 16: lectura de tiempo de descarga para la sonda FDR1.

Byte 17: lectura de entrada analógica correspondiente a la medida de la sonda FDR 2.

Byte 18: lectura de tiempo de carga para la sonda FDR 2.

Byte 19: lectura de tiempo de carga para la sonda FDR 2.

Para realizar el envío se utiliza la librería "RF24.h" y "nRF24L01.h" las cuales están desarrolladas específicamente para éste módulo de comunicaciones. La programación correspondiente al envío es la siguiente:

```
radio.stopListening();  
ok = radio.write(&payload, sizeof(payload_t));  
if(ok) Serial.println("Ok...");  
else Serial.println("fallo");
```

5.4. Sistema de adquisición SCADA

Para desarrollar el sistema de adquisición y visualización de datos se ha utilizado el software NI LabVIEW. LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Este programa fue creado por National Instruments en 1976 aunque salió al mercado en 1986 por primera vez.

Como se ha indicado, es una herramienta de programación gráfica, por lo que los programas no se escriben, sino que se dibujan, facilitando su comprensión. Una de su gran variedad de ventajas, es que tiene ya pre-diseñados una gran cantidad de bloques, por lo que facilita de forma importante la creación de un proyecto al programador. Cada VI (Virtual Instrument) se compone de dos partes:

- Panel frontal: el Panel Frontal es la interfaz con el usuario, la utilizamos para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando. De esta manera, el usuario puede visualizar los datos del

programa en tiempo real. En esta interfaz se definen los controles e indicadores.

- Diagrama de bloques: es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan iconos que realizan una determinada función y se interconectan.

Para comunicar el arduino que compone el módulo data logger con LabVIEW, se utiliza el puerto serie. Por tanto, lo primero que se debe hacer en el programa de LabVIEW es realizar la configuración del puerto que se va a utilizar y sus parámetros (velocidad, bytes, tiempo...) tal y como se observa en la figura 31.

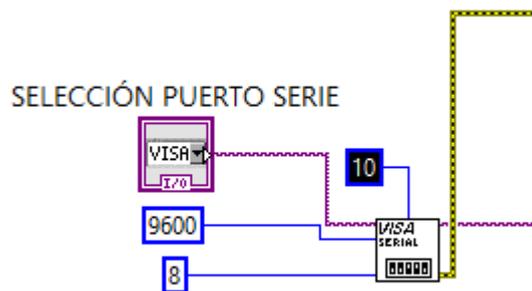


Figura 31: Configuración del puerto serie en LabVIEW.

Para mandar los datos desde arduino, se genera un string de datos, separados por letras, de manera que cuando se reciben en LabVIEW se realiza una descomposición de los mismos y se clasifican según la letra que llevan delante y detrás garantizando siempre que el dato leído es el que se requiere y no se corresponde con otra variable. En la figura 32 se puede ver cómo se envían los datos desde el data logger al puerto serie mediante la instrucción `Serial.println();`

```
String A = String(dato1.datos[3], DEC); //Temperatura interna ANALOG7
String B = String(dato1.datos[4], DEC); //Temperatura leída en ANALOGO
String C = String(dato1.datos[6], DEC); // TEMPERATURA DEL DHT11
String D = String(dato1.datos[9], DEC); // HUMEDAD DEL DHT11
String E = String(dato1.datos[10], DEC); // TEMPERATURA SENSOR INTERIOR DS18B20 DALLAS
String F = String(dato1.datos[11], DEC); // TEMPERATURA Sonda EXTERIOR DS18B20
String G = String(dato1.datos[14], DEC); // FSS SONDA 2
String H = String(dato1.datos[15], DEC); // TC SONDA 2
String I = String(dato1.datos[16], DEC); // TD SONDA 2
String J = String(dato1.datos[17], DEC); // FSS SONDA 3
String K = String(dato1.datos[18], DEC); // TC SONDA 3
String L = String(dato1.datos[19], DEC); // TD SONDA 3

String Datol = String("A" + A + "B" + B + "C" + C + "D" + D + "E" + E + "F" + F + "G" + G + "H" + H + "I" + I + "J" + J + "K" + K + "L" + L + "M" );

Serial.println(Datol);
```

Figura 32: Envío de datos por puerto serie desde Arduino.

En la figura 33 se observa el método para separar los datos en función de las letras que envuelven a cada uno.

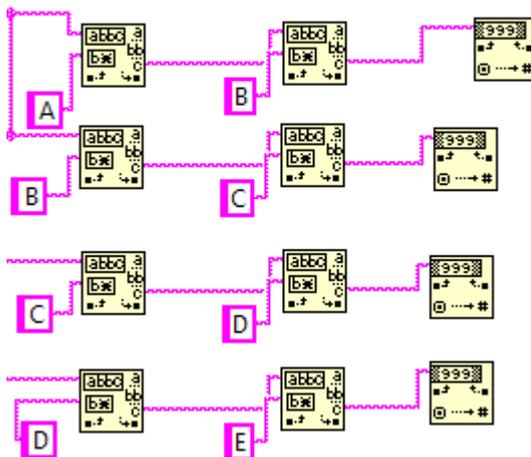


Figura 33: Separación de los datos en función de las letras que los envuelven.

El panel frontal desarrollado para la visualización de datos del FDR consta de dos pestañas o ventanas gráficas. La primera ventana, da una visión rápida en tiempo real de todos los datos que está enviando el sensor FDR. Consta de gráficas y visualizadores tal y como se ve en la figura 34.

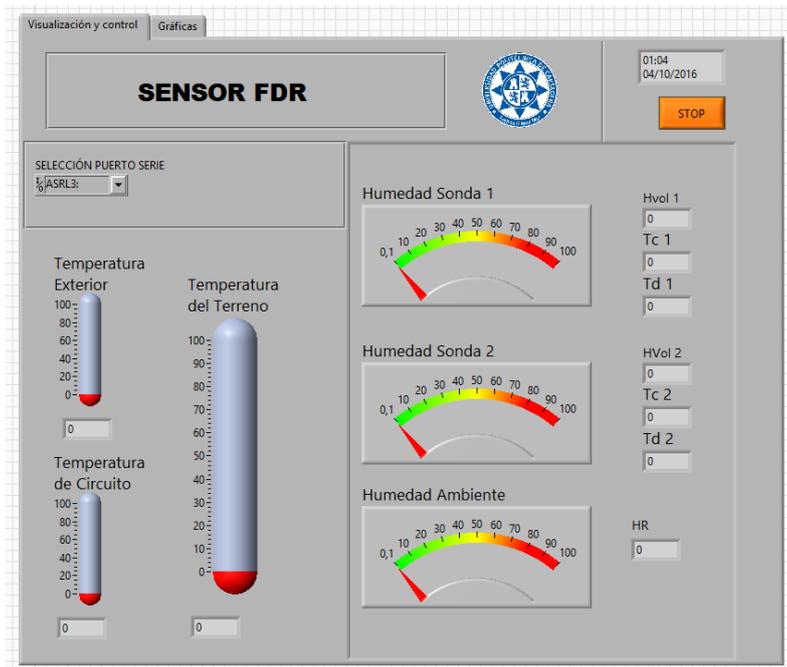


Figura 34: Ventana de visualización general del panel frontal.

Adicionalmente a la ventana de visualización general del panel frontal, se desarrolla una ventana dedicada a la visualización de gráficos. En esta ventana se coloca un gráfico donde se pueden visualizar no solo las medidas actuales de una determinada variables del sensor FDR, si no que se puede visualizar todo el progreso de la misma. En la figura 35 se muestra la ventana de gráficas.

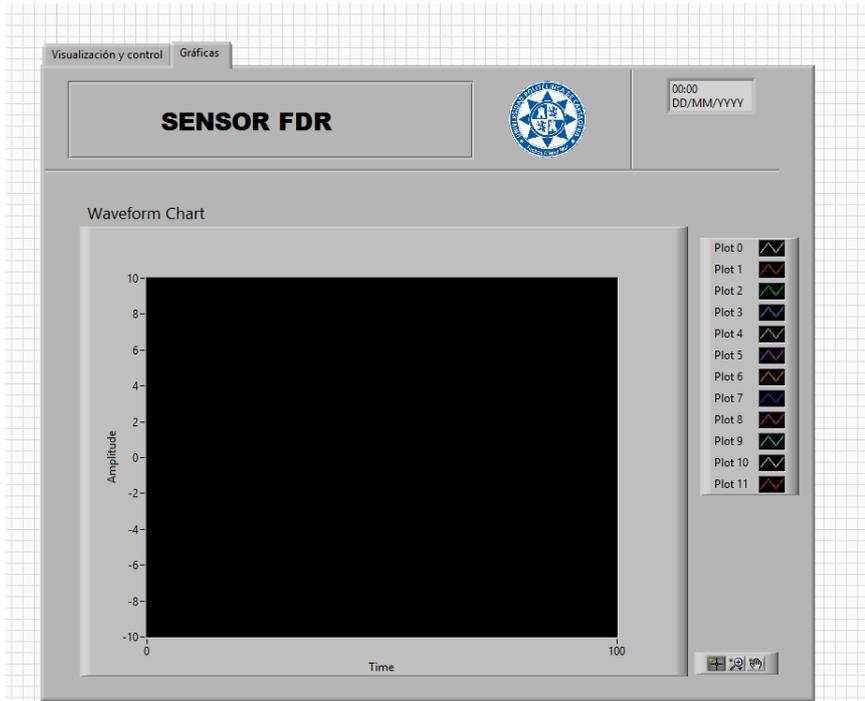


Figura 35: Ventana de gráficas de SCADA desarrollado en LabView.

6. Pruebas y resultados

En este resultado se presentan todas las pruebas que se han realizado con el sensor FDR y los resultados obtenidos de las mismas.

6.1. Calibración

El primer paso antes de llevar el sensor FDR a tomar medidas, es realizar una calibración de éste. Para realizar la calibración se han combinado dos métodos, que consisten en un método de calibración basado en volumen y pesos mediante una balanza de precisión y otro método basado en una sonda comercial de medida de humedad del suelo Hydra Probe II de Stevens.

6.1.1. Materiales

Para realizar la calibración del sensor FDR desarrollado se ha utilizado como sonda de referencia la Sonda Hydra Probe II de Stevens (figura 36) y una balanza de precisión KERN FKB16K0.05.



Figura 36: Sonda Hydra Probe II de Stevens a la izquierda y Balanza KERN FKB a la derecha.

Las especificaciones de la sonda son las que se muestran en la tabla 6, siendo consideradas más que suficientes para realizar la calibración del prototipo FDR.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
Medida	Precisión	Rango
Permitividad dieléctrica	$\pm 1,5 \%$	Entre 1 y 80; 1 es aire y 80 es agua destilada
Humedad del suelo	$\pm 0,01$ WFV para la mayoría de suelos	Desde completamente seco hasta totalmente saturado
Conductividad eléctrica	$\pm 2,0\%$	Entre 0.01 y 1,5 S/m
Temperatura	$\pm 0,3$ °C	Entre -10 ° y 55° C

Tabla 6: Especificaciones del sensor Hydra Probe II de Steven.

6.1.2. Calibración mediante balanza

Para comprobar la precisión de la sonda comercial, se utiliza un método basado en determinar la humedad real del suelo mediante una balanza de precisión. En la figura 37 se pueden observar las muestras que se han utilizado para dicha calibración.

Estas muestras consisten en vasos de un litro, donde se han colocado 0,5 litros de arena fina. Como es conocido, la densidad del agua es de 1000 Kg/m³, por lo que 1 litro de agua pesa 1 Kg. Mediante esta relación, y conociendo el volumen de arena que tiene la muestra, es posible determinar el volumen de agua que se aporta a través de la balanza. Por ejemplo, si queremos aportar un 10% de agua a la muestra, como el volumen es de 0,5 litros se deberían aportar 50 ml de agua, que se corresponden con 50 gramos

que pueden medirse con la balanza de una forma precisa, pues la balanza tiene una precisión de 0.05 gramos.



Figura 37: Muestras utilizadas para la calibración del sensor. A la izquierda con humedad 0% y a la derecha con humedad 60%.

Con este método, se elaboran muestras desde un 0% de humedad hasta un 60 %. Para aumentar la humedad del suelo, se coloca la muestra en la balanza, se tara y a partir de aquí se va añadiendo agua mediante un pulverizador hasta alcanzar el valor deseado. Una vez se ha añadido toda el agua necesaria, es importante dejar que la mezcla repose durante al menos 10 min (dependiendo del tipo de muestra puede ser mayor) para que el agua se distribuya uniformemente por toda la arena.

No se considera mayor humedad debido a que por el tipo de tierra utilizada, la sonda empieza a saturar a partir de estos valores haciéndose

imposible diferenciar entre 60 % y valores superiores. En la tabla 7 se exponen los resultados obtenidos mediante éste método.

MASA AGUA (g)	Humedad Real (%)	Humedad Hydra Stevens (%)
0	0	0
100	20	19,9
200	40	39,1
300	60	59,4

Tabla 7: Datos de humedad real frente a humedad de sonda comercial para arena fina.

Analizando los datos obtenidos, se puede asumir que el sensor de humedad Hydra Probe II ofrece datos muy precisos. Las pequeñas variaciones que se producen, suelen ser debidas a la heterogeneidad en la distribución del agua sobre la arena.

Además de la prueba con arena fina, se realizó una prueba con sustrato orgánico a fin de corroborar que la medida ofrecida por la sonda comercial es válida para diferentes tipos de suelo.

MASA AGUA (g)	Humedad Real (%)	Humedad Hydra Stevens (%)
0	0	0
100	20	19,5
200	40	42,3
300	60	55,8

Tabla 8: Datos de humedad real frente a humedad de sonda comercial para sustrato ecológico.

En vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que la sonda Hydra Probe II es una buena opción para tomar como referencia a la hora de calibrar el sensor FDR.

6.1.3. Calibración del sensor FDR

Una vez se ha comprobado que las medidas de la sonda comercial son correctas, se pasa a realizar la calibración como tal del sensor FDR. Para ello, se aprovechan las muestras utilizadas para la prueba anterior y además se añaden algunas adicionales para obtener una mayor precisión. Estos resultados están plasmados en la tabla 9.

Masa Agua (g)	Humedad Real(%)	Medida Hydra(%)	Medida FDR*
0	0	0	230
25	5	5	148
50	10	9,5	132
100	20	19,9	90
150	30	32,3	78
200	40	39,1	76
250	50	51,2	74
300	60	54,6	72

Tabla 9: Resultados de la calibración.

**La medida ofrecida por el FDR es el valor medido en su conversor analógico digital. Este valor se relaciona con una humedad determinada del suelo según la curva de calibración que se muestra a continuación. No se utiliza el valor de Tc y Td en este caso, aunque pueden ser interesantes para determinar otros valores además del contenido de humedad, para lo que es suficiente con el método del filtro paso bajo.*

Con estos datos, se genera una gráfica de dispersión donde se puede determinar la curva de calibración del sensor FDR tal y como se muestra en la figura 38.

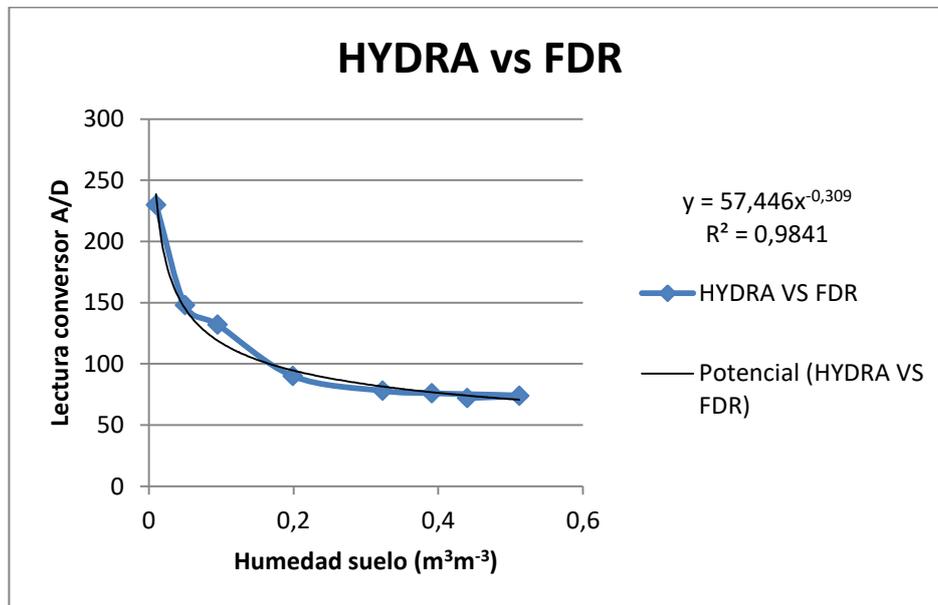


Figura 38: Gráfico de dispersión de medidas de la sonda comercial frente a medidas del FDR.

Tal y como se muestra en la figura 35, la línea de tendencia nos da una calibración muy aceptable, pues tiene un coeficiente de determinación de 0,9841. Por este motivo, se acepta como curva de calibración una curva potencial, concretamente la representada por la siguiente expresión:

$$y = 57,446 \cdot x^{-0,309}$$

Una vez se ha obtenido la curva de calibración, se debe despejar de la misma el valor de "x", que se corresponde con el valor de humedad del suelo dado en tanto por uno, que se multiplicará por 100 para expresarlo en tanto por ciento. La relación de humedad con el valor medido en el conversor analógico digital del microcontrolador será la siguiente:

$$x = \left(\frac{y}{57,446}\right)^{1/-0,309}$$

Siendo y el valor leído en el conversor analógico digital del microcontrolador y x el valor aproximado de humedad en el suelo expresado en tanto por uno.

Tras sacar la curva de calibración y obtener la expresión correspondiente para calcular la humedad del suelo a través de la lectura en el conversor analógico/digital se realizan pruebas comprobando la lectura de la sonda comercial Hydra Probe de Stevens y el sensor FDR desarrollado obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 10.

Humedad Hydra(%)	Lectura FDR	Humedad Calculada	Diferencia(%)
9,5	125	8,07	0.76
15,4	106	13,77	1,65
22,1	92	21,78	0,32
29,5	83	30,39	1,19
37,8	76	40,42	2,62
48	73	48,15	1,95

Tabla 10: Determinación de errores en la medida de la sonda FDR en comparación con la Hydra Probe de Stevens.

6.2. Influencia de la temperatura

La temperatura es un factor que juega en contra de cualquier circuito electrónico en mayor o menor medida. En ocasiones es debido a temperaturas extremas que pueden hacer que un circuito no funcione correctamente o en otras ocasiones puede ser un problema por producir variaciones en las medidas como ocurre en este caso.

Los cambios de temperatura que se dan en el amplificador operacional LM358, influyen en las medidas que ofrece el sensor principalmente cuando se utiliza el primer método con el filtro paso bajo para medir la humedad del suelo. Este error producido en la medida por el operacional se debe a que por características físicas, es sensible a la temperatura de manera que su ganancia aumenta cuando aumenta la temperatura.

Para comprobar esta influencia de la temperatura en la medida, se ha monitorizado durante varios días la temperatura interior del sensor FDR frente a la medida obtenida en el conversor analógico digital correspondiente con la humedad para una sonda que se encuentra en un terreno sin cambios significativos de humedad. En la figura 39 se puede ver claramente la influencia de la temperatura en la medida.

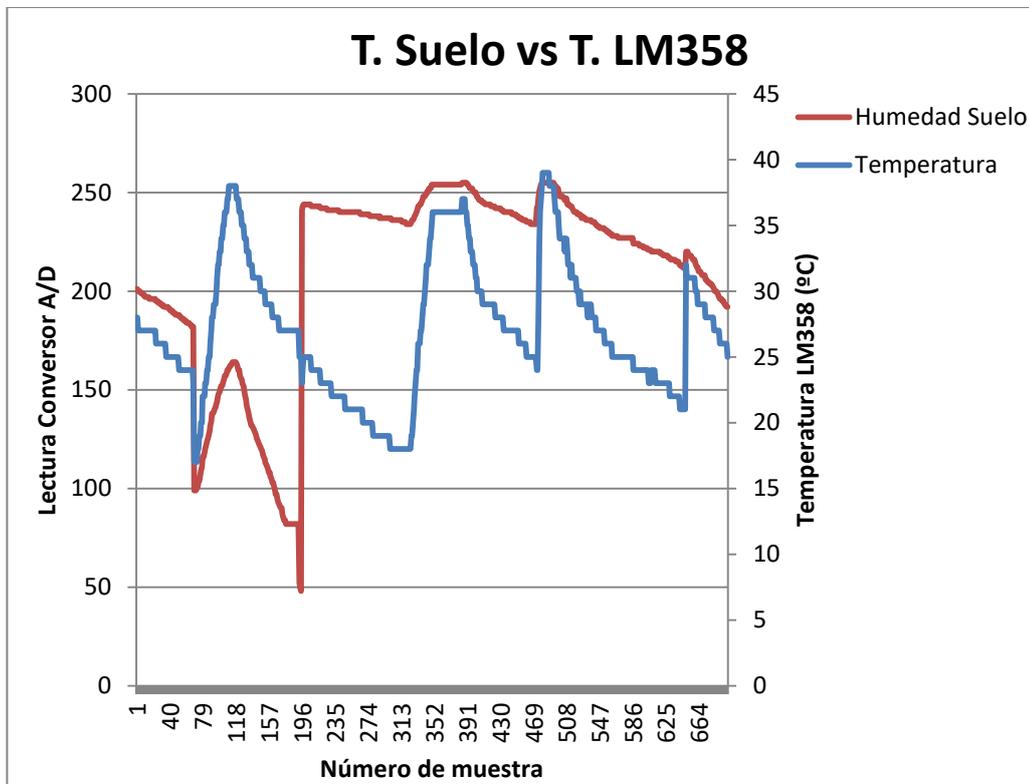


Figura 39: Representación de la temperatura del AO frente a la humedad del suelo.

Para solucionar este problema, se ha buscado un amplificador operacional cuya ganancia tenga menor sensibilidad a la temperatura. Esto se consigue con el amplificador operacional OPA2277P, que reduce la sensibilidad a la temperatura con respecto al LM358p en más de un 80 %. Concretamente, la variación con la temperatura en el amplificador operacional LM358P es de $7\mu V$ frente a $0,1\mu V$ del OPA2277P.

Para comprobar que este parámetro es importante, se realiza también una prueba con el OPA2277P enfrentando las mismas variables que en la prueba anterior y se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 40.

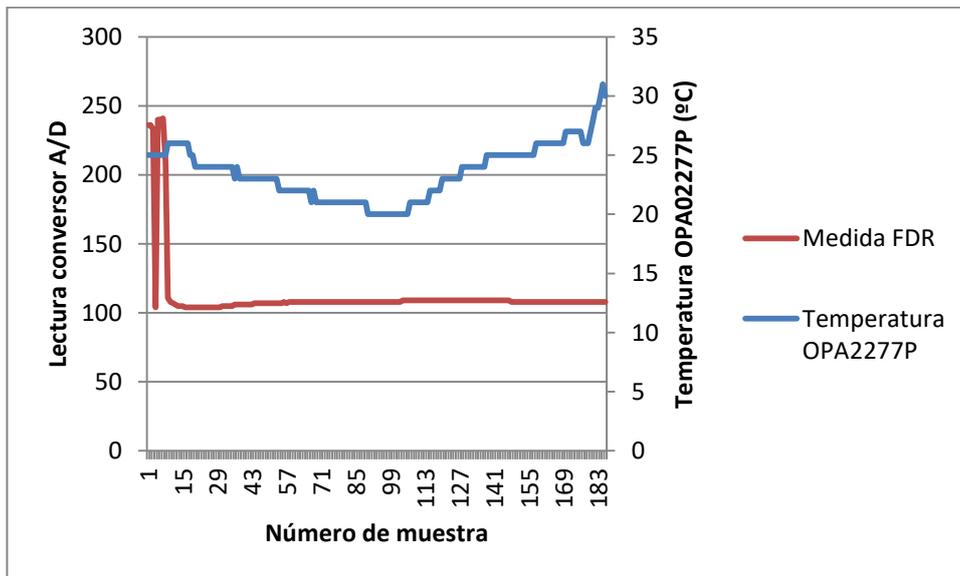


Figura 40: Medida en el convertidor analógico/digital del microcontrolador frente a la temperatura del amplificador OPA2277P.

Tal y como se observa en la figura 40, el amplificador OPA2277P, es menos sensible a variaciones de temperatura que el LM358, ya que podemos ver una variación de temperatura de más de $10^{\circ}C$, sin implicar ningún cambio considerable en la medida del convertidor analógico/digital del FDR.

7. Presupuesto

Nombre de producto	Nº de producto	Descripción	Precio Unitario
FDR			
IMPRESIÓN PCB	P01	Placa PCB	1,70 €
ATMEGA328P	P02	Microcontrolador	2,49 €
LM7805	P03	Regulador 5V	0,90 €
LM317	P04	Regulador 3,3V	0,90 €
LM358P	P05	Amplificador Operacional	1,09 €
CD4052	P06	Multiplexor	0,80 €
ELEMENTOS PASIVOS	P07	Resistencias y condensadores	1,00 €
PINES	P08	Pines para solar en placa	1,50 €
TOTAL...:			10,38 €
DATA LOGGER			
SHIELD PCB	P09	Placa PCB	1,70 €
PANTALLA TFT	P10	Pantalla TFT 1,8" para Arduino	4,39 €
RTC	P11	Circuito integrado reloj en tiempo real	0,30 €
PINES	P12	Pines para soldar en PCB	1,50 €

TARJETA SD	P13	Tarjeta SD de 1GB	4,57 €
TOTAL...:			12,46 €
SENSORES Y COMUNICACIÓN			
NRF24L01	P14	Módulo comunicaciones vía radio	1,95 €
FTDI	P15	Convertor USB-SERIE FTDI	2,95 €
SONDA FDR	P16	Sonda para sensor FDR	1,80 €
DS18B20	P17	Sensor temperatura digital	2,20 €
DHT11	P18	Sensor temperatura y humedad del aire	2,23 €
TOTAL...:			11,13 €
TOTAL PRESUPUESTO.:			
			33,97 €

Uno de los objetivos del presente proyecto, es desarrollar un sensor de humedad del suelo basado en tecnología FDR de bajo coste. Este objetivo queda por tanto cumplido ya que, como se observa en el presupuesto, es posible realizar uno de esos sensores por un precio de 33,97€ si se incluyen un data logger y todos los elementos necesarios para comunicaciones y programación.

Si solo se tiene en cuenta el precio del propio sensor FDR como tal, el coste de fabricación de una unidad asciende a 10,38€. Este precio es llamativo en comparación con los sensores similares que se encuentran en el mercado los cuales alcanzan valores superiores a 100€.

8. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que se ha conseguido poner en marcha un sensor FDR completo con todas las partes de las que se compone obteniendo resultados aceptables en comparación con un sensor comercial del mismo tipo.

El sistema se comunica vía radio en tiempo real, mandando todas las medidas que son necesarias para determinar el estado de un cultivo permitiendo tomar decisiones en base a estas medidas.

A partir de este punto, se considera interesante continuar realizando pruebas con este dispositivo, eliminando posibles fallos o problemas de calibración que pueda presentar en diversos tipos de arena y condiciones de funcionamiento con el fin de conseguir el desarrollo de un dispositivo FDR de elevada precisión y a bajo coste de fabricación.

Otra línea de futuro trabajo está enfocada en el riego inteligente pudiendo fabricar sistemas de riego inteligente a partir de este sensor FDR o alguna variación que incorpore funciones adicionales, como programaciones horarias, módulos de relés etc.

9. Referencias

- Roberto Ruelas. 2016. “RESISTIVIDAD... TEORIA Y DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.” Accessed September 15. <http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html>.
- José Martínez, Jose Miguel Sánchez Pérez, L.H. Cammeraat. “LA MEDIDA DE LA HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE EL MÉTODO TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY): ESTADODEL ARTE Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN”.
- Oates, M. J., A. L. Vázquez de León, D. S. Intrigliolo, J. M. Molina Martínez, and A. Ruiz-Canales. 2015. “Evaluation of an Experimental System of Soil Moisture Registration for Irrigation Management in Potted Vineyard (*Vitis Vinifera* L. CV Bobal) of Multi-Depth Temperature Compensation Based in Resistivity Measurements.” *Agricultural Water Management*, New proposals in the automation and remote control of water management in agriculture: agromotic systems, 151 (March): 126–35. doi:10.1016/j.agwat.2014.10.029.
- Canales, J.M. Molina Martínez A. Ruiz A. Ruiz, and A. Vázquez de León M. Oates. 2015. “Compromiso Entre Coste Y Frecuencia de Trabajo En Sensores FDR de Bajo Coste Para La Gestión Del Riego,” June.
- Thompson, Marc T. 2014. “Chapter 14 - Analog Low-Pass Filters.” In *Intuitive Analog Circuit Design*, 531–83. Boston: Newnes. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124058668000140>.
- Casaleiro, João, Luís B. Oliveira, and Igor M. Filanovsky. 2016. “A Quadrature RC-Oscillator with Capacitive Coupling.” *Integration, the VLSI Journal* 52 (January): 260–71. doi:10.1016/j.vlsi.2015.06.006.
- Linmao, Ye, Xue longqin, Zhang guangzhou, Chen haibo, Shi likuai, Wu zhang, Yu gouhe, et al. 2012. “FDR Soil Moisture Sensor for Environmental Testing and Evaluation.” *Physics Procedia*, International Conference on Solid State Devices and Materials Science, April 1-2, 2012, Macao, 25 (January): 1523–27. doi:10.1016/j.phpro.2012.03.271.
- “Práctica 1. Circuitos RL Y RC. Filtros Pasivos de 1er Orden - Circuitos Electrónicos Analógicos.” 2016.

<https://sites.google.com/a/goumh.umh.es/circuitos-electronicos-analogicos/practicas/practica-1>.

- “Arduino - Home.” 2016. <https://www.arduino.cc/>.
- “Arduino Playground - OneWire.” 2016. <http://playground.arduino.cc/Learning/OneWire>.
- “Arduino - SPI.” 2016. <https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>.
- “Arduino Playground - Nrf24L01.” 2016. <http://playground.arduino.cc/InterfacingWithHardware/Nrf24L01>.
- “SDI-12 Support Group.” 2016. <http://www.sdi-12.org/>.