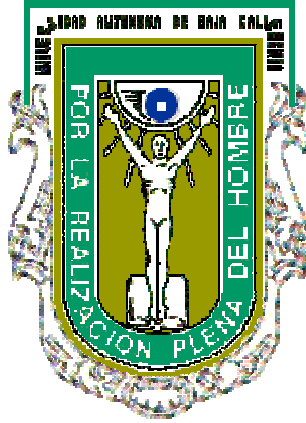


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

INSTRUMENTO DE MEDICION DE LA HUMEDAD
RELATIVA DEL SUELO

TESIS

QUE PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA PRESENTA:

ISMAEL HERNÁNDEZ CAPUCHIN

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, OCTUBRE DEL 2009

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA**

Instrumento de medición de la humedad relativa del suelo

TESIS

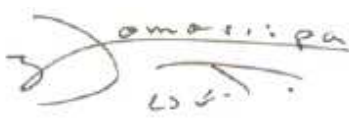
Que para obtener el grado de maestro en ingeniería presenta:

Ismael Hernández Capuchin

Aprobada por:



Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco
Director de tesis



Dr. José de Jesús Zamarripa Topete
Miembro del comité



M.C. Carlos Gómez Agis
Miembro del comité

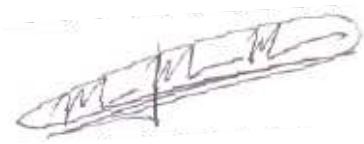
Ensenada Baja California, México, Octubre del 2009

Resumen,

de la tesis de Ismael Hernández Capuchin, presentada como requisito para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERIA.

“INSTRUMENTO DE MEDICION DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL SUELO”

Resumen aprobado por:



Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco

En el presente trabajo se diseño y construyó un instrumento para medir la tensión del suelo, a partir de los datos obtenidos, el usuario puede conocer la humedad relativa del suelo.

Para conocer el entorno de trabajo en el que competirá el instrumento, se realizó una revisión bibliográfica con el propósito de encontrar información de los proyectos o equipos electrónicos ya existentes en el mercado nacional e internacional. Como el instrumento estará en el campo, fue necesario hacer una investigación para seleccionar el transductor y los componentes que se utilizarían en su construcción. Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio y de campo para evaluar, calibrar y comparar los datos obtenidos por el instrumento.

El resultado fue un instrumento, que cumple con el objetivo y las metas propuestas, éste puede ser configurado de acuerdo a las necesidades del usuario final.

Palabras clave: Humedad, Suelo, Instrumento.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) unidad Ensenada, por el apoyo brindado para la realización de ésta tesis.

Al Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco por la confianza mostrada, por el tiempo que invirtió en darme asesoría, consejos y advertencias durante el desarrollo, construcción y revisión del presente trabajo.

Al Dr. José de Jesús Zamarripa Topete por la buena disposición para ayudar, por sus excelentes clases en la maestría, por sus consejos y acertadas sugerencias a lo largo del desarrollo de éste trabajo de tesis.

Al M.C. Carlos Gómez Agis por sus correcciones y eficaces observaciones al participar en el presente trabajo.

Al Ing. Israel Zenteno y a la empresa vitivinícola Monte Xanic S. de RL. por el buen vino y las facilidades prestadas para realizar éste trabajo.

Al M.C. Humberto Cervantes de Ávila por su tiempo, orientación y ayuda.

Al Ing. Octavio Sánchez por su ayuda.

A todas las personas (profesores, amigos y empresas) que me regalaron parte de su tiempo y energías para que el presente trabajo pudiera ser realizado...

Gracias.

Dedicatoria

A mi familia:

Jesús mi padre, Teresa mi madre y Eunice mi hermana

Por todo su amor, consejos y apoyo, más aún porque sacrificaron diversión, espacio y tiempo para que yo obtuviera una formación profesional. Éste trabajo, es de nosotros cuatro, desde el fondo de mi corazón estoy y estaré agradecido con ustedes, siempre.

A mis amigos:

Sin su carrilla, diversión y molestia constante, no podría haber comprobado lo interesante y estimulante que es leer un libro de programación en la madrugada y con un frío que cala horrible. Cuídense locos.

A ti:

Que sin saberlo me has dado toda tu ayuda, por la confianza que depositaste en mí y por el apoyo que me diste, te dedico este trabajo.

Contenido

	Página
Resumen	i
Agradecimientos	ii
Dedicatoria.....	iii
Contenido.....	iv
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	x
 Capítulo I	 1
1.1 Antecedentes.....	1
1.1.1 El agua en el suelo	2
1.1.2 Mediciones en la actualidad	5
1.2 Planteamiento del problema.....	7
1.3 Pregunta de investigación.....	7
1.4 Hipótesis.....	7
1.5 Objetivo.....	8
1.5.1 Objetivos específicos	8
1.6 Limitaciones del proyecto.....	9
1.6.1 Limitaciones geográficas	9
1.6.2 Limitaciones tecnológicas	9

Contenido

	Página
1.6.3 Limitaciones de usuarios	9
1.7 Importancia del proyecto	10
Capítulo II	12
2.1 Introducción.....	12
2.2 Sensor de humedad del suelo de bajo coste para control de regadíos.....	13
2.3 Sistema de control automático de temperatura y ventilación de invernadero.....	14
2.4 Instrucciones para unir bloques resistivos al dispositivo Onset Hobo H-08 de cuatro canales externos para medir la humedad del suelo	16
2.5 Monitor Watermark® (900M).....	16
2.6 Módulo SMX	17
2.7 WatchDog dataloggers.....	17
2.8 Campbell Scientific dataloggers	19
2.9 Principio de medición de la tensión del suelo.....	19
2.10 Sumario	23
Capítulo III	25
3.1 Introducción.....	25
3.2 El sensor de la tensión del suelo Watermark®	27
3.2.1 Generación de la excitación	29
3.2.2 Acondicionamiento de la señal	31
3.2.3 Lectura de los valores del sensor	33

Contenido

	Página
3.2.4 La resistencia del sensor.....	34
3.3 El microcontrolador.....	36
3.3.1 Programa de control principal	38
3.3.2 Subrutina para el calendario	40
3.3.3 Subrutina para medir la tensión del suelo	42
3.3.4 Subrutina para medir la temperatura del suelo	43
3.3.5 Subrutina para medir la resistencia del sensor de tensión	47
3.3.6 Cálculo de la tensión del suelo	49
3.3.7 Subrutina para escribir en la memoria externa	49
3.3.8 Subrutina de configuración y lectura de datos	53
3.3.9 Protección contra bajo voltaje	55
3.4 El circuito de interfase serie a USB	56
3.5 Los dispositivos del instrumento	58
3.6 El programa para la recuperacion de datos y configuracion	61
3.7 La calibración del instrumento	65
3.8 Consideración al hacer una nueva medición	69
3.9 Cuando se debe regar	70
3.9.1 Donde colocar el instrumento de medición	71
3.10 De los errores cometidos	73
Capítulo IV	77
4.1 Resultados en el laboratorio.....	77

Contenido

	Página
4.2 Resultados en el campo	79
4.2.1 Resultados en el campo de manera continua.....	81
 Capítulo V	 86
5.1 Conclusiones	86
5.2 Mejoras Propuestas.....	88
 Capítulo VI	 89
6.1 Bibliografía consultada	89
 Apéndice A	 94
Manual de Funcionamiento del Instrumento de Medición	94

Lista de figuras

	Página
Figura 1. Diagrama general del instrumento	26
Figura 2. Salida del oscilador 555 con un ciclo de trabajo del 50%	29
Figura 3. Configuración para el funcionamiento del oscilador 555	31
Figura 4. Señal de salida del oscilador 555	32
Figura 5. Etapa de acondicionamiento de la señal para el sensor	32
Figura 6. Señal de salida del oscilador 555 despues de los capacitores de bloqueo	33
Figura 7. Etapa de rectificación	34
Figura 8. Divisor de voltaje	35
Figura 9. MC9S08QE en configuración de 20 terminales	37
Figura 10. Diagrama de flujo del programa de control principal	39
Figura 11. Subrutina de control para el calendario	41
Figura 12. Subrutina para obtener la tensión del suelo	42
Figura 13. Aplicación típica del sensor de temperatura	45
Figura 14. Subrutina de control para la tarjeta de temperatura	46
Figura 15. Subrutina de control para la tarjeta de humedad	48
Figura 16. Terminales de la memoria EEPROM	49
Figura 17. Sincronia en el módulo SPI	50
Figura 18. Dirección de la comunicación en el módulo SPI	51
Figura 19. Subrutina para almacenar un dato en la memoria EEPROM	52
Figura 20. Subrutina por interrupción en el puerto SCI	53

Lista de figuras

	Página
Figura 21. Subrutina de configuración	54
Figura 22. Subrutina para leer la memoria EEPROM	55
Figura 23. Conexión típica del circuito de interface FT232R	57
Figura 24. Circuito para filtrar el voltaje de la fuente	58
Figura 25. Diagrama de los dispositivos utilizados en el IMHS	59
Figura 26. Tarjeta de componentes del instrumento.....	60
Figura 27. Programa de control principal en la computadora	62
Figura 28. Subrutina de recuperación	63
Figura 29. Subrutina de configuración.....	65
Figura 30. Gráfica del módulo SMX y del IMHS	66
Figura 31. Gráfica del módulo SMX contra el IMHS	67
Figura 32. Ecuaciones que representan la gráfica del módulo SMX vs. el IMHS	68
Figura 33. Instrumento instalado junto a las raíces	72
Figura 34. Prueba de funcionamiento en el laboratorio	78
Figura 35. Instrumento midiendo en el campo	79
Figura 36. Prueba de funcionamiento en el campo	80
Figura 37. Prueba extensa de funcionamiento en el campo	82
Figura 38. Prueba de funcionamiento en el campo sección 1	83
Figura 39. Prueba de funcionamiento en el campo sección 2	84
Figura 40. Prueba de funcionamiento en el campo sección 3	85

Lista de tablas

	Página
Tabla 1. Interpretación de los valores obtenidos de la fórmula de succión	22

Capítulo I

Introducción

1.1 Antecedentes

El municipio de Ensenada Baja California México, cuenta con una hidrografía y un clima bastante especial. En Ensenada no hay ríos, se cuenta con simples arroyos con escurrimientos de aguas broncas; siempre y cuando, el volumen pluvial en invierno o verano sea considerable. Los climas secos varían un poco de una zona del municipio a otra, encontrándose un clima muy característico en la zona norte del municipio.

La zona donde se cultiva la vid en Ensenada, es conocida como: "franja mundial del vino", comprende los valles de Guadalupe, San Antonio, Santo Tomás y San Vicente. Frente a las costas de esta región baja californiana pasa una corriente marina de aguas muy frías; los vientos de mar hacia tierra que ahí soplan, llevan la brisa refrescante a los viñedos, manteniendo la temperatura y la humedad propias del clima mediterráneo. Esto, aunado a la calidad de la tierra y del agua con que se riegan las plantas, hace del lugar un sitio privilegiado y único en el mundo para dicho cultivo [1].

Conforme se ha ido avanzando en las técnicas de agricultura y fabricación de vino se han introducido nuevas tecnologías para obtener un mejor aprovechamiento de la tierra y sus recursos pero, el tener un clima especial en cuanto a lluvias, hace que sea necesario optimizar el uso de este recurso. El control del riego (frecuencia y volumen) permite

aumentar la eficiencia de uso del agua y reducir o eliminar las pérdidas, lo que da como consecuencia un mejor manejo del recurso.

Para regar, por lo general el vitivinicultor se basa en la experiencia, sin ningún sistema objetivo de medida; incluso en sistemas automatizados, debido al elevado costo de los equipos registradores de humedad, el riego se efectúa normalmente utilizando sistemas de control en lazo abierto. Para optimizar el consumo de agua y conseguir mejores rendimientos sería conveniente que el sistema de riego se controlase en lazo cerrado, a partir de datos sobre la humedad del suelo [2].

De los Factores más importantes en el crecimiento de las plantas, esta lo relacionado con la cantidad y calidad del agua en el suelo. El contenido de agua, también afecta la cantidad de aire e intercambio gaseoso del suelo; además, influye en la respiración de las raíces, la actividad de los microorganismos y en general en el estado químico del suelo.

Entonces, una variable como la humedad del suelo influye demasiado en una plantación, si se mantiene la humedad del suelo a un nivel óptimo se obtendrá como resultado una mejor cosecha, y derivado del control de humedad se obtendrá un ahorro de agua, el riego será utilizado solo cuando sea necesario.

1.1.1 El agua en el suelo

El libro Relación entre Suelo-Planta-Agua, editado por el departamento de agricultura de Estados Unidos de Norteamérica [3], menciona que entre los factores más importantes que se deben de considerar para la vida y el crecimiento de una planta están: el agua y la estructura del suelo. La estructura del suelo influye en el grado en que el aire junto con el agua penetran y se mueven en el suelo, esto afecta en cuanto a la penetración de la raíz y

en la disponibilidad de los elementos nutritivos, en realidad la estructura se refiere a la clase de partículas agrupadas que predominan en el suelo de cultivo.

El encargado del cultivo debe preocuparse por la forma en que el agua se mueve en el terreno, debe tomar en cuenta la cantidad de agua que puede captar el suelo y la cantidad de líquido que la planta puede aprovechar, sin pasar por alto la forma en que debe reabastecerse el líquido en el terreno para mantener un promedio de humedad. Los primeros dos conceptos mencionados en este párrafo se refieren al tamaño y distribución de huecos dentro del suelo (se denomina huecos a la porosidad presentada por el suelo de cultivo, el tamaño de los poros cambia conforme el terreno, por ejemplo para terrenos arenosos tenemos poros más grandes, comparado con un terreno arcilloso donde el tamaño de los poros es mucho más pequeño) y al tamaño de las partículas y su avidez de humedad. La cantidad de agua que el suelo podría captar también se debe en parte al volumen de materia orgánica contenida en el mismo. Se puede establecer como regla general que, entre más finas sean las partículas y mayor la proporción de materia orgánica entonces, mayor será la cantidad de agua captada por el suelo.

Los huecos o espacios, que hay entre las partículas del suelo forman una compleja red de túneles conectados entre sí, presentando formas y tamaños distintos. Si se suministra agua a un suelo seco, esta empieza a distribuirse alrededor de las partículas, siendo retenida únicamente por las fuerzas de adhesión y cohesión, el agua desplaza el aire de los huecos y, por último llena los espacios entre las partículas. Una vez que los huecos están llenos, es cierto decir que el terreno está saturado y a su máxima capacidad de retención.

El agua depositada en los espacios y que se filtra fácilmente por la acción de la fuerza de gravedad se conoce como “agua de gravitación”. Una vez que se ha dejado de suministrar agua, ésta continua filtrándose de la superficie al interior del suelo. Los huecos más

grandes se llenan una vez más de aire y el resto de agua contenida en los huecos más pequeños sigue moviéndose por capilaridad, por lo tanto a este tipo de agua se le conoce como “agua capilar”. Este tipo de agua (capilar) penetra de una forma más lenta que el agua de gravitación. El efecto que produce el sol en el suelo por medio de la evaporación, así como la captación de agua por las raíces de la planta provocan que en algún momento ya no se observe movimiento de agua por capilaridad. De aquí se deriva el tercer tipo de agua contenida en el suelo, es llamada “agua higroscópica”, este tipo de agua ya no puede ser aprovechada por la planta debido a que está aprisionada herméticamente en forma de capas muy delgadas alrededor de las partículas que forman el suelo, el agua está retenida entre las partículas de tal forma que pierde su estado líquido y se desplaza como vapor.

El agua de riego sigue un movimiento descendente, de una capa del suelo saturada a otra más abajo que por supuesto no lo esté. Aunque este tipo de desplazamiento es más bien algo incierto; lo que si se conoce es que el agua se acumula hasta que los huecos grandes se llenan siguiendo su curso hasta los siguientes huecos con suficiente espacio para almacenar líquido. En los suelos que ya están húmedos, el movimiento del agua es más uniforme que en los suelos secos.

El tipo de suelo influye en el movimiento del agua capilar, las fuerzas causantes del movimiento en los huecos pequeños se originan por la diferencia de tensión en la capa de distinto grosor que envuelve a las partículas, el movimiento obtenido es de las de mayor grosor a las de menor grosor. Cuando hay saturación del suelo el movimiento por capilaridad se presenta a una velocidad más rápida en los suelos de tipo arenoso que en los suelos arcillosos, aunque en terrenos más secos, el agua de movimiento capilar se mueve de forma más lenta en los suelos arenosos que en los suelos de tipo arcilloso.

A causa del calor provocado por el impacto de los rayos solares en el suelo, el agua llega a desplazarse como vapor. El vapor se distribuye por medio del aire contenido en el suelo, si

esta cerca de la superficie del suelo el vapor que se condensa puede escapar hacia la atmosfera. Al evaporarse el agua contenida en la superficie, el agua de tipo capilar emerge reemplazando parte del agua evaporada. Así continúa este fenómeno hasta que los centímetros más cercanos a la superficie del suelo se secan y se rompe la acción del agua capilar.

Hasta ahora se ha analizado como se distribuye el agua en el suelo y como llega a perderse en su viaje por el terreno de cultivo pero, ¿Cómo retiene el agua la tierra de cultivo? Para poder extraer el agua del suelo se necesita de energía. La fuerza con que el agua es retenida por el terreno depende de la cantidad contenida en el suelo (mientras menos agua halla, mayor será la fuerza de retención). Las fuerzas que determinan esta retención son la adhesión, esto es: el grado de atracción que ejerce la partícula del suelo sobre la partícula de agua, y la cohesión, o sea la atracción que demuestran entre si las moléculas de agua. El agua se retiene por adhesión en los espacios que la separan del suelo, y por cohesión las moléculas de agua están unidas entre sí. Gracias a estas fuerzas, el agua alcanza a llenar los huecos grandes y pequeños que están en el suelo. Una vez depositada en estos espacios, las moléculas de agua empiezan a aumentar su grosor, si esto continúa, los espacios de aire y líquido formados en los huecos empiezan a retener el agua con menos fuerza. Por lo tanto las moléculas de agua ahora pueden moverse por gravedad o por la atracción de huecos cercanos.

1.1.2 Mediciones en la actualidad

En el afán de controlar y mantener la humedad que se necesita en una plantación se han construido diversos equipos, tanto sensores como registradores (dataloggers) para llevar a cabo la medición de la humedad del suelo.

Con este proyecto se busca desarrollar un instrumento para medir la humedad del suelo, dicho instrumento será colocado a la intemperie, este instrumento registrará las mediciones de la humedad del suelo para que más tarde estas puedan ser utilizadas para optimizar el riego en una plantación.

En cuanto a los equipos registradores para la humedad del suelo el mercado no es tan amplio, en general cada uno de los sensores que hay en el mercado ha sido hecho con un equipo registrador específico el cual presenta diversas variaciones de acuerdo al modelo que se desee utilizar, estas variaciones son para dar más ayuda al equipo, como: estaciones remotas o equipos manuales, almacenaje de información o solo despliegue en pantalla, comunicación inalámbrica o cableada, con alimentación por baterías o con conexión a la electricidad, o incluso existen algunos registradores que pueden trabajar con diferentes sensores, los llamados registradores universales en los cuales con cambiar alguna configuración del mismo pueden leer un sensor resistivo o uno capacitivo, ya sea tecnología propia o de otro fabricante.

En Internet se pueden encontrar algunos proyectos realizados por universidades en cuanto a caracterización de sensores o construcción de algún registrador pero, esto son muy pocos, en realidad la mayoría de la información es acerca de instrumentos comerciales, cabe mencionar que aun siendo comerciales la información y los instrumentos disponibles son escasos.

De la información disponible en libros, no se ha podido encontrar algún tema relacionado específicamente con este proyecto.

1.2 Planteamiento del problema

Para poder medir la humedad del suelo, es necesario desarrollar y construir un dispositivo que sea capaz de obtener el valor de la humedad existente en el suelo. Mantener la humedad en el cultivo implica tener una frecuencia de riego en la plantación, ya sea una frecuencia alta para las temporadas secas del año o una frecuencia más baja cuando se está en las temporadas más húmedas del año.

Al tener un instrumento que permita llevar un registro de la humedad relativa del suelo se podrá saber con qué frecuencia regar, permitiendo incrementar o decrementar la cantidad de agua requerida por la plantación, obteniendo el nivel de humedad que se necesita en el suelo para el buen desarrollo del cultivo.

1.3 Pregunta de investigación

¿Se podrá construir un instrumento que registre la cantidad de humedad que hay en el suelo de un cultivo?

1.4 Hipótesis

Sí se puede construir un instrumento que sea capaz de registrar la humedad presente en un terreno de cultivo, el conocer la absorción que presenta el suelo del cultivo le permite al encargado del riego hacer una estimación del tiempo necesario que debe de pasar entre los periodos de riego y por cuánto tiempo se necesita regar para llegar a la saturación adecuada de agua en el suelo.

1.5 Objetivo

Diseñar y construir un instrumento para medir la humedad del suelo.

1.5.1 Objetivos específicos

- o Instrumentar un transductor para medir la humedad del suelo.
- o Configurar y programar, un microcontrolador.
- o Implementar una etapa con los elementos necesarios para el funcionamiento del instrumento de medida.
- o Evaluar el funcionamiento del instrumento.

1.6 Limitaciones del proyecto

Las limitaciones que se presentan en este proyecto son de tres tipos: geográficas, tecnológicas y de usuario.

1.6.1 Limitaciones geográficas

Este proyecto tiene limitaciones geográficas muy concretas ya que desde su concepción, el objetivo principal es contribuir al desempeño de los viñedos asentados en la localidad. El área comprendida por los valles de Guadalupe y San Antonio en la zona norte del municipio y un poco más hacia el sur las áreas de Santo Tomás y San Vicente en Ensenada, Baja California, México.

1.6.2 Limitaciones tecnológicas

El instrumento de medición de la humedad del suelo ha sido diseñado para funcionar de manera autónoma sin utilizar cableado externo para comunicación o energía. Es portátil para, utilizarlo en diferentes áreas del terreno de cultivo. Utiliza una batería para alimentación de todo el dispositivo. Los componentes internos han sido seleccionados para obtener el mayor ahorro de energía posible. Para descargar los datos del dispositivo se utiliza una conexión con un puerto USB. Es un dispositivo totalmente manejable con una interfaz cómoda y amigable.

1.6.3 Limitaciones de usuarios

Los usuarios directos de este dispositivo recibirán un manual de funcionamiento en el cual se describirá el manejo del dispositivo. Aunque se pretende sea un instrumento amigable, deberá ser para uso exclusivo de la persona o las personas encargadas del riego en el

cultivo, ellos son los que deberán interpretar los datos obtenidos a partir de las mediciones hechas por el instrumento.

1.7 Importancia del proyecto

Realizar un proyecto, en el cual se desarrollara y construirá, un instrumento para medir la humedad del suelo generara tecnología local, éste proyecto se convertirá en un desarrollo que cubriría las necesidades particulares de los productores vinícolas de la región.

Aunque los componentes utilizados para la fabricación de este instrumento son de procedencia extranjera, el software y el diseño del instrumento ha sido hecho en México, con esto se busca el desarrollo de tecnología nacional. En el diseño se han unido cada uno de esos componentes para formar un instrumento real y funcional para una aplicación específica. Si es urgente dar mantenimiento preventivo o correctivo al equipo, no habrá necesidad de contactarse con el distribuidor el que a su vez contactara al fabricante para el envío del producto a su lugar de origen, todo se realizara en el mismo país.

Este es un instrumento capaz de medir la humedad que hay en el campo de cultivo, son mediciones que ayudaran a determinar cuál es el nivel de agua presente en el suelo y así poder aprovecharlo al máximo obteniendo como resultado una mejor calidad en el cultivo al optimizar el riego en el campo.

De los problemas que se presentan en la región y por lo cual es necesario llevar a cabo mediciones de la humedad del suelo es: el tipo de suelo que existe en la región donde se cultiva el vino, se tiene que las diferencias en el material que compone el suelo del cultivo hacen que la absorción de agua cambie considerablemente de una zona a otra por lo tanto no se puede regar de la misma forma en todo el campo de cultivo, esto podría

provocar pérdidas ya que la calidad de la uva para la producción de vino viene de la mano con la cantidad de agua y nutrientes con que se riega al cultivo.

Capítulo II

Marco teórico

2.1 Introducción

Los documentos con información de desarrollos o equipos con un funcionamiento parecido ayudaran a ubicar el proyecto en su contexto real, ver como se encuentra el desarrollo de dispositivos para medir la humedad del suelo en el mercado privado y de investigación. Esto es necesario para comprender qué características se espera que contenga el dispositivo, también ayudara a analizar que mejoras pueden introducirse en este campo, de toda la información recopilada se podrán deducir varios de los retos a los que se enfrentara el instrumento.

Se buscó información de proyectos parecidos donde uno de los principales objetivos fuera medir la humedad del suelo, como resultado se obtuvieron diversos documentos, en su mayoría proyectos de investigación de universidades. También, fue necesario investigar el mercado privado de dispositivos creados para registrar la humedad del suelo, este mercado no es muy amplio a pesar de su importancia, en los apartados siguientes se habla de tres marcas distintas de registradores, las más difundidas y a criterio de varios documentos las más importantes.

2.2 Sensor de humedad del suelo de bajo coste para control de regadíos

En este proyecto [2], se pretende realizar una interface analógica en un circuito de aplicación específica (ASIC) que comunique una sonda capacitiva y un microcontrolador, logrando reducir el tamaño, consumo y costos, de un dispositivo realizado anteriormente por una parte del equipo participante en la construcción de este sensor.

Es un instrumento de prueba para medir la humedad del suelo. En el documento se menciona la utilización de FPGA's para realizar diversas tareas, entre ellas comparar los resultados parciales que se han tenido, en las conclusiones mencionan que con la información que han recopilado posiblemente para el final del proyecto podrán tener un prototipo totalmente integrado como el que describen al inicio del documento.

Se utiliza todo un conjunto de dispositivos a lo cual en el documento se le llama sistema (sensor), integran una sonda capacitiva (varias en medición multisonda), un circuito de interface (varios en medición multisonda) y un microcontrolador encargado del control y comunicación con dispositivos externos, en particular el diseño de la interface analógica y su implementación en un circuito SOIC de 28 terminales es bastante interesante.

De acuerdo a la investigación, no se ha encontrado más información a pesar de que este proyecto se debió de haber terminado hace varios años.

2.3 Sistema de control automático de temperatura y ventilación de un invernadero

Se describe el desarrollo de un sistema con el cual se controla la temperatura y la humedad del suelo, incluso estos rangos, según el documento, pueden ser ajustados por el usuario. Además, se despliega la información de interés para el usuario como los eventos ocurridos durante el día o los cambios de las variables que se ven envueltas en el control del invernadero. Según el documento al tener esta información se pueden hacer ajustes a los instrumentos envueltos en el correcto funcionamiento del invernadero.

El equipo registrador y de control en su conjunto fue construido por los encargados del proyecto [4], utilizando una computadora para interpretar los datos generados por los diversos sensores, los datos son desplegados en una pantalla de cristal líquido para que el usuario tenga un acceso rápido a la información. La interface entre la PC y los demás periféricos se lleva a cabo por el puerto ISA de la computadora por lo tanto hay que implementar una etapa de decodificación de direcciones y buffers, es necesario utilizar convertidores analógico a digital, controladores para entradas y salidas digitales además, si los sensores no son digitales es necesario el uso de circuitos acondicionadores de señal. Toda la alimentación de energía se lleva a cabo por medio de una red eléctrica de 240 VCA, por lo tanto si esta llega a fallar todo el proyecto se detiene hasta que regrese la energía.

Es un proyecto muy completo en el cual se llevan a cabo el control de varias partes mecánicas del invernadero. Se explica de una manera muy sencilla y con todos los datos técnicos lo que se hizo en el proyecto. Para medir la humedad del suelo se utilizan los sensores Watermark®, los cuales fueron instrumentados de una manera muy ingeniosa, obteniendo de ellos una respuesta aceptable.

2.4 Instrucciones para unir bloques resistivos al dispositivo Onset Hobo H-08 de 4 canales externos para medir la humedad del suelo

En este documento [5], se describe como realizar la conexión e instrumentación de un sensor de humedad del suelo del tipo resistivo a un registrador genérico en este caso el fabricado por la compañía Onset Computer Corporation, específicamente el registrador HOBO®, básicamente este dispositivo excita al sensor, realiza las operaciones necesarias para obtener el valor de la resistencia del sensor y al terminar guarda o envía los datos obtenidos por diversos medios de comunicación. El equipo registrador HOBO® está catalogado dentro de los registradores de bajo costo.

Para excitar al sensor utilizan un voltaje de corriente directa, algo que está totalmente mal aplicado, ya que esto terminara dañando el sensor de humedad del suelo más rápido de lo normal, si bien las lecturas son tomadas en un tiempo de milisegundos y a intervalos de horas algún error en la excitación podría polarizar al sensor por más tiempo del necesario causando electrolisis entre sus terminales.

El registrador HOBO® es de gran versatilidad ya que puede ser utilizado para medir diversas variables externas no solamente la humedad del suelo. Como sensor de humedad del suelo utilizaron el sensor Watermark® en serie con una resistencia por lo cual con una breve formula se obtiene la resistencia del sensor. La información contenida en el documento es útil, esta puede servir de base para el desarrollo del instrumento de medición de la humedad del suelo.

2.5 Monitor Watermark® (900M)

Este es un monitor fabricado por Irrometer Co. [6] con el cual se leen los sensores Watermark® para la humedad del suelo, es un registrador de datos al que pueden ser conectados hasta 8 sensores, guardando los datos en una memoria interna. Funciona con baterías y puede ser programado para tomar lecturas en diferentes tiempos.

Es totalmente portátil por lo tanto se puede dejar instalado en el campo donde se llevan a cabo las mediciones, viene con un software para poder analizar los datos que se recopilen con el monitor.

Para recuperar los datos de este monitor, se conecta a la computadora mediante el puerto serie de la computadora. Si se desea, la compañía fabrica el convertidor Serie a USB para trabajar con el monitor. El costo de este monitor es de aproximadamente \$450.00 dólares. Existe la versión de este monitor con comunicación inalámbrica (950R-T), es parte de las soluciones que presenta la compañía para la lectura de sus sensores, pero el tener un receptor y un transmisor incrementa el costo a un poco más del doble del monitor de medida básico. Tanto los monitores como los sensores son tecnología desarrollada por y para los instrumentos de la compañía por lo tanto manejan algunas de las especificaciones de los dispositivos como información privada. Esta compañía fabrica e implementa soluciones para la medida de la humedad del suelo y el control de riego desde el año de 1951. La mejora que han introducido al mundo del riego de cultivos hace que el uso de sus productos sea una garantía de buen funcionamiento.

2.6 Módulo SMX

Es un módulo fabricado por la compañía EME Systems para acondicionar la señal del sensor de humedad del suelo Watermark®, de acuerdo a tres pequeñas configuraciones se puede obtener la respuesta del sensor en corriente, frecuencia o voltaje [7]. Es muy pequeño y presenta un consumo mínimo de corriente. Puede ser montado a una aplicación específica extendiendo el uso del sensor a una mayor cantidad de equipos de medición.

Este dispositivo es económico en su encapsulado sin protección pero sus salidas son totalmente analógicas por lo tanto si se desea interpretar los datos de forma digital hay que instalarle un convertidor. También, la compañía ofrece un registrador llamado elfOWL, el cual tiene un costo aproximado de \$210.00 dólares en su versión más básica llamada “core”. El microcontrolador central del registrador es fabricado por Parallax Corporation.

El módulo SMX puede ser utilizado con cualquier voltímetro garantizando ver en ese mismo momento la respuesta del sensor. Como un instrumento de referencia es muy fácil de utilizar, así, sin necesidad de hacer un gasto muy grande puede utilizarse el modulo SMX para comparar resultados, tal vez no sea tan exacto como un monitor pero si es bastante confiable con su respuesta a los cambios que se presentan en la resistencia de los sensores Watermark®.

2.7 WatchDog dataloggers

Estos dispositivos son invención de la compañía Spectrum Technologies, Inc [8]. De esta marca existen varias series de dataloggers, los cuales pueden ser utilizados en diversas

aplicaciones de medición, siendo las que se utilizan para el control de la humedad en un cultivo las más comunes, sensores de temperatura ambiente, sensores de temperatura del suelo, sensores de lluvia, sensores de humedad relativa y por supuesto sensores de humedad del suelo pueden ser conectados a los módulos WatchDog®, ofreciendo así una amplia gama de soluciones. Aunque no son lo más barato en el mercado, podría decirse que tienen un costo bastante razonable.

Al ser registradores con una cantidad variable de posibles sensores a utilizar pero, con pocos canales de entrada es necesario utilizar un software para configurar el dispositivo. Sus entradas tipo “plug” hacen necesario el uso de adaptadores para poder conectar sensores al registrador. Los adaptadores para los sensores los venden ellos mismos, la compañía ofrece la mayoría de los sensores que lee el datalogger ya con la interface necesaria para conectarlos a los registradores.

Lo interesante de estos dispositivos es que son pequeños y según su fabricante muy fáciles de configurar y utilizar. Ofrecen un espacio bastante amplio para almacenar datos. Algo peculiar en estos dispositivos es que como son registradores que se dejan instalados en el campo, el fabricante ofrece recopiladores de información, los cuales son dispositivos que copian los datos tomados por el registrador o datalogger, por consiguiente estos datos pueden vaciarse más tarde en la computadora evitando la necesidad de llevar la computadora hasta el dispositivo registrador o viceversa.

2.8 Campbell Scientific dataloggers

La compañía Campbell Scientific ofrece una gran variedad de registradores y controladores de información [9], los cuales tienen una amplia aceptación en la industria de la investigación por su gran versatilidad para medir la mayoría de los sensores, sus

periféricos de comunicación son muy amplios, en general estamos hablando de un registrador genérico de amplia aplicación.

Al ser dispositivos tan generales, que se pueden aplicar en muchas cosas, su valor es bastante elevado. Como se trata de dispositivos genéricos y no de una aplicación específica tal vez contengan canales o funciones de sobra o innecesarias en muchas de las aplicaciones en las que se utilizan.

Parte de lo interesante de estos dispositivos es que pueden utilizarse en infinidad de proyectos por la gran capacidad de lectura en diversos sensores. La compañía Irrrometer Co. fabricante del sensor Watermark® hace mención de este tipo de registradores, en específico de esta marca, como los registradores genéricos más comunes.

2.9 Principio de medición de la tensión del suelo

Absorber el agua contenida por el suelo hasta el interior de las raíces requiere de un trabajo por parte de la planta. La diferencia de potencial energético del agua entre uno y otro punto dentro del suelo, origina la tendencia del agua a fluir dentro del mismo. En el caso del agua en el suelo, se trata de un gradiente negativo, en el cual, existe un cambio de energía potencial con una variación de distancia [3].

La fuerza de unión que existe entre el suelo y el líquido se le conoce como “potencial matricial” o “tensión del suelo”. Al ser una fuerza por unidad de superficie, es expresada en unidades de presión (se le otorga un signo negativo, ya que se opone al movimiento de las moléculas de agua. Anteriormente se expresaba en atmósferas, hoy se hace en kilopascales (kPa). Existe una cierta proporcionalidad entre el valor del potencial matricial y el contenido de humedad del suelo.

Una vez que el suelo está a su máxima capacidad, la mayor parte del agua se encuentra muy retirada de la fase sólida y por tanto su potencial matricial es nulo (0 kPa). A medida que el agua va desapareciendo, el potencial matricial va creciendo, de modo que a menor distancia entre el suelo y el agua, mayor es la fuerza con que el agua está retenida. Cuando el potencial matricial es igual a la presión atmosférica, las fuerzas de empuje y de sujeción de las moléculas de agua se anulan por tener el mismo valor y signo opuesto, de modo que esa agua permanecería retenida de modo indefinido. En este punto se dice que el suelo se encuentra a su "capacidad de retención", el potencial matricial sería de 100 kPa o 100 centibars.

La situación anterior se consigue sólo cuando ha desaparecido toda el agua retenida con una fuerza menor a la citada, pero existe una primera fase con un flujo constante de agua el cual va disminuyendo rápidamente hasta un cierto momento en que casi se estabiliza, esto hace que haya una parte del agua que tarda un tiempo en abandonar el suelo, este valor puede ser estimado entre diez y quince días. Esta agua, de circulación lenta, es utilizable por las plantas pues existe suficiente oxígeno para que puedan respirar y obtener la energía suficiente para la succión, la fuerza con que el agua es retenida es pequeña lo que facilita la labor de las raíces. El cambio de velocidad se produce cuando el potencial matricial está alrededor de 33 kPa equivalentes a un tercio de atmósfera o a 33 centibars. Aquí se dice que el suelo se encuentra a su "capacidad de campo".

Una vez que el suelo está en su capacidad de retención, solamente la evaporación del agua o la succión hecha por las raíces de las plantas puede conseguir eliminarla, esto nunca sucede por completo, solo en los primeros centímetros del suelo que es donde se produce un fácil intercambio con la atmósfera libre. A este punto va llegando el agua más profunda mediante ascenso capilar por las diferencias de potencial matricial que se van creando, pero la velocidad de suministro se va haciendo cada vez más pequeña a medida que se

van reduciendo las diferencias. Por lo tanto, el lazo capilar se rompe en un determinado momento y cesa el aporte de agua a la superficie, esto se conoce como "punto de ruptura del lazo capilar". La pérdida de agua continua mientras las raíces sean capaces de absorberla, cuando se alcanza un potencial matricial de 1500 kPa (1500 centibars) aproximadamente, las plantas ya no pueden absorber más agua, en este momento se produce el "punto de marchitamiento".

El "agua útil", se refiere a la capacidad de campo menos el agua que mantiene en el punto de marchitamiento, esta es aprovechable por las plantas. La cantidad total de esta agua útil en la zona de enraizamiento y la que se estima que puede llegar a esa zona por ascenso capilar a unos 50 cm más de profundidad, constituyen la "reserva de agua" del suelo. Entre más alta sea mayor será la posibilidad de resistencia de las plantas a un periodo seco. La reserva anterior determina la máxima duración del periodo entre lluvias para el cultivo, y está en función de la textura y la estructura del suelo, aunque la duración final depende de la temperatura y de la cubierta vegetal, estas controlan la evaporación y las pérdidas por transpiración respectivamente [10].

Para determinar en qué punto de succión o tensión se encuentra el suelo se utilizara el sensor de humedad Watermark®, para convertir el valor entregado por el sensor a kilo pascuales se hará uso de la ecuación 1 desarrollada por el Dr. Clint Shock [11], de la Universidad Estatal de Oregón:

$$kPa = \frac{4.093 + (3.213 \times R_{sensor})}{1 - (0.009733 \times R_{sensor}) - (0.01205 \times Ta)} \quad kPa. \quad (1)$$

Donde:

kPa = Succión del suelo en *kilo Pascales*,

Ta = Temperatura del suelo en $^{\circ}C$,

R_{sensor} = Valor de la resistencia entregado por el sensor de humedad en $k\Omega$.

Un kilo pascal es equivale a un centibar. El centibar es la unidad de medida que se utiliza en los gráficos y en la información acerca del sensor Watermark®, el centibar es una unidad de presión equivalente a 0.01 atmosferas. Por lo tanto no es necesaria una conversión entre kilo pascales y centibars.

Según la textura y tipo del suelo las lecturas aproximadas que se obtendrán aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Interpretación de los valores obtenidos de la formula de succión [12].

00 – 10	centibares:	Suelo saturado.
10 – 30	centibares:	Suelo con suficiente humedad. Excepto suelos de arena gruesa que empiezan a secarse.
30 – 60	centibares:	Margen normal para iniciar el riego. Excepto en los suelos muy arcillosos.
60 – 80	centibares:	Margen normal para iniciar el riego en los suelos muy arcillosos.
80 +	centibares:	El suelo se está secando peligrosamente.

Aún con esta información y tomando en cuenta que cada caso será distinto, la clave para un buen riego estará en el usuario, si el usuario le dedica la suficiente atención a las lecturas obtenidas podrá saber con certeza que es lo que está pasando en la zona de cultivo.

2.10 Sumario

Los documentos consultados anteriormente dan una idea básica del funcionamiento y características básicas que se necesitan para la construcción del instrumento de medida a realizar. El primer documento (apartado 2.2) fue la idea central por la cual surgió este proyecto, es parecido a lo que se realizara, es semejante en la idea general del proyecto pero, contiene sustanciales diferencias. Aunque en lo general en el apartado 2.3 se habla de un proyecto integral de control de las variables de un invernadero, en la documentación de dicho proyecto, en el apartado de la medida de la humedad del suelo hay información muy interesante relacionada con el sensor del tipo granular matricial Watermark®. Por lo que respecta al cuarto apartado (2.4), este documento ha resultado muy interesante, de una forma muy sencilla y clara explica cómo llevar a cabo la instrumentación de un sensor Watermark®, queda claro que con algunas modificaciones este artículo puede servir para las metas que se necesitan cumplir en la construcción y desarrollo del instrumento para medir la humedad del suelo.

Los documentos de los apartados 2.5, 2.7 y 2.8 son más generales, si bien se trata de información de instrumentos comerciales, estos son parecidos al instrumento que se diseño, estos dispositivos no son económicos aunque su desempeño según sus fabricantes es excelente. El análisis de estos instrumentos se realiza para ubicar al proyecto en un ambiente comercial comparándolo con los instrumentos comúnmente utilizados. En las hojas de funcionamiento de los instrumentos comerciales mencionados en este párrafo no se puede encontrar mayor información acerca de su funcionamiento o de cómo son contruidos, solo hay información de su desempeño y de las prestaciones que ofrecen.

Los primeros documentos (2.2, 2.3, 2.4) incluido el modulo SMX mencionado en el apartado 2.6 presentan en su contenido y hojas de datos, nutrida información que es de gran ayuda en la investigación para el desarrollo del instrumento que medirá la humedad

del suelo. Algo muy interesante sucede con el modulo SMX, si bien es un instrumento comercial, en sus hojas de datos podemos encontrar el circuito completo que se utiliza, además, una detallada explicación de su funcionamiento. Algo que llama mucho la atención es que el sensor más utilizado por la mayoría de los fabricantes e investigadores es el dispositivo Watermark®.

El apartado 2.9 está dedicado a la medida de tensión del suelo, ahí se puede encontrar una explicación detallada de la interacción que hay entre el agua, el suelo y las raíces de una planta. Además, incluye la relación entre la resistencia del sensor y la tensión del suelo, lo que a su vez está relacionado con la humedad presente en el suelo.

Con la información recabada de estos documentos se cuenta ya con una base para iniciar el diseño y construcción del instrumento para medir la tensión del suelo, con esta información se determinará la humedad relativa del suelo.

Capítulo III

Metodología

3.1 Introducción

Se utilizó un microcontrolador como procesador central de las operaciones que ocurren en el IMHS (en este capítulo se utilizara la abreviatura IMHS para referirse al instrumento de medición de la humedad del suelo), éste microcontrolador es capaz de activar o desactivar los sensores que se utilizan en el IMHS además, interpreta y almacena, la información recopilada. Cuando le es solicitado, establece comunicación con un dispositivo externo para el despliegue de los datos así, la persona encargada del riego puede hacer un análisis de los datos recopilados.

Después de analizar las posibilidades y los distintos escenarios a los que se enfrentaría el instrumento se tomo la decisión de utilizar la comunicación del tipo USB para enviar los datos obtenidos a una computadora, tratando de garantizar portabilidad y una comunicación con cualquier tipo de sistema operativo.

El microcontrolador habilita el sensor de la tensión del suelo mediante el encendido y apagado de la energía, una vez en funcionamiento y después de un tiempo de estabilización el microcontrolador tomará los valores del sensor. Como la temperatura del suelo proporciona una variación en el sensor de tensión, es necesario utilizar una compensación por temperatura para una lectura más exacta, por esto se usara un sensor de temperatura, una vez encendido el sensor y después de un tiempo de estabilización se

leerá la temperatura proporcionada por el sensor, ambas lecturas serán utilizada en la fórmula para calcular la tensión del suelo.

La etapa de comunicación serie-USB funciona de forma accesible. Se reciben los datos enviados desde el puerto serie del microcontrolador en un convertidor serie-USB, el cual proporciona la interface de conexión y comunicación con una computadora por medio del puerto USB.

Para poder interpretar y utilizar los datos obtenidos por el IMHS, se desarrolló un programa que maneja y grafica los datos obtenidos por el dispositivo, con un ambiente sencillo, muestra al usuario el registro de la tensión en el suelo.

La figura 1 muestra el diagrama general a bloques del instrumento.

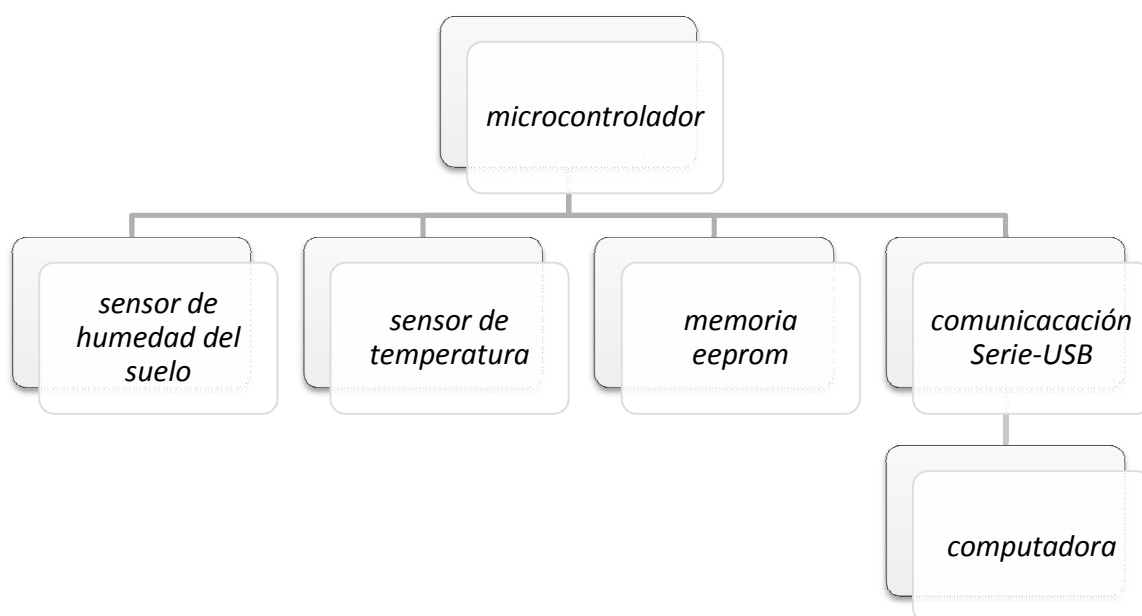


Figura 1. Diagrama general del instrumento.

En este capítulo se presentan los circuitos y sensores que se utilizaron en el desarrollo y construcción del IMHS, su configuración y las funciones que realiza cada dispositivo.

3.2 El sensor de la tensión del suelo Watermark®

Es un sensor desarrollado por la compañía Irrometer Co. consiste de dos electrodos concéntricos contenidos en una matriz de referencia especial, recubierta por un protector de acero inoxidable. En su interior hay instalados bloques de yeso para prevenir efectos provocados por la sal que está contenida en los campos de cultivo. Aunque este sensor es del tipo resistivo esto no significa que sea una resistencia cualquiera, ya que en su interior se ve envuelto un sistema químico con reacciones y movilidad de iones [13].

La compañía fabricante del sensor considera las hojas de datos como información confidencial. Aun así, manejan hojas con información específica del sensor, en estos documentos explican cual es el significado de las mediciones, el momento de regar, la cantidad a regar, como instalar el sensor, el mantenimiento del sensor, entre otras.

La fabricación del sensor es hecha con materiales no corrosivos lo cual da la posibilidad de conservarlo por años en el suelo. Una vez que el sensor es instalado no necesita mantenimiento. Con raíces permanentes como es el caso de los viñedos, el sensor puede dejarse en el lugar todo el invierno solo cuidando que las labores propias del campo no lo dañen. Cuando se utiliza con raíces anuales (plantación-cosecha-plantación), donde las labores del campo requieren el movimiento de la tierra, tal vez, lo más prudente sería remover el sensor, si el sensor es removido simplemente se limpia con agua y se guarda en un área seca para la siguiente temporada en la que se utilizara.

En los periodos de humedad y secado del suelo el sensor actúa de forma muy similar, absorbiendo la humedad que hay en el suelo o dejándose drenar por el suelo cuando este se está secando. Así, cuando el suelo empieza a secarse la humedad en el sensor comienza a disminuir y la resistencia entre los electrodos entra en una etapa de incremento, este proceso se repite en forma inversa cuando el suelo se empieza a humedecer. La variación que se presenta entre los electrodos es utilizada para obtener el valor de succión de agua del suelo.

Si el sensor es utilizado con un lector universal, la corriente de excitación para el sensor debe de ser pequeña, un valor razonable sería: 5.0 *Volts (VCA)* a 100-120 *Hertz* (onda cuadrada) esto, para evitar el calentamiento del sensor, aun con estas precauciones no debe de mantenerse excitado al sensor durante mucho tiempo. El enlace del sensor debe de ser a través de una interface de relé. Como medida de precaución adicional se han de utilizar capacitores de bloqueo en ambos cables del sensor. Siguiendo estas recomendaciones, se debe de obtener a la salida del sensor una gama de valores de resistencia que varía entre 500 y 30 000 *Ohms*.

No es recomendable aplicar al sensor una tensión continua, ya que los electrodos se pueden dañar por efecto electrolítico. No debe de dejarse al sensor continuamente excitado, además, la corriente que circula a través de este no debe de superar 1 *mA*, estas recomendaciones son para una mayor vida útil. De acuerdo a los ingenieros de Irrrometer Co., cualquier tiempo en el que el flujo de corriente de *DC* que pasa por el sensor sea mayor a 2 *milisegundos*, un tipo característico de electrólisis inicia, ésta forma micro burbujas de gas. Estas burbujas provocan un cambio en la resistencia eléctrica local del medio acuático cerca de los electrodos, por lo tanto la resistencia que se lee del sensor tiende a elevarse. Entre más tiempo dure la excitación de *DC*, mayor será el problema, de aquí parte la recomendación de excitar al sensor con corriente alterna.

3.2.1 Generación de la excitación

Para generar la onda cuadrada a la frecuencia y amplitud requerida por el sensor Watermark®, se utilizó el circuito LM555, fabricado por National Semiconductor's, este circuito ofrece una mejor disipación de los picos de corriente y de la energía en su funcionamiento a bajo voltaje [14].

En configuración astable (ver figura 19) el circuito integrado oscilador 555 produce una onda cuadrada, esta es una forma de onda digital con transiciones entre bajo (0 V) y alto ($+V_s$), la frecuencia se determina a partir de un capacitor y dos resistencias, esto también determinará el ciclo de trabajo.

La frecuencia que se busca establecer es de 110 Hertz con un ciclo de trabajo del 50% por lo tanto, se propone un capacitor (C_1) de $0.1\text{ }\mu\text{F}$, para obtener el valor de las resistencias se trabajará con las formulas descritas más abajo. La frecuencia (F) es el inverso del periodo (T) y a su vez el periodo es la suma del tiempo de marca (T_m) y del tiempo de espacio (T_s).

Se conoce que $T = T_m + T_s$, por lo tanto T_m debe de ser igual a $\frac{T}{2}$ para tener un ciclo de trabajo al 50 % (ver figura 2), escrito de otra forma sería:

T_m debe de ser igual a T_s ($T_m = T_s$).

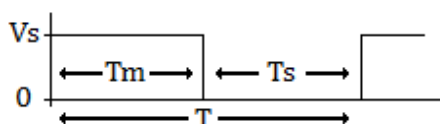


Figura 2. Salida del oscilador 555 con un ciclo de trabajo del 50 %.

Las formulas a utilizar son las siguientes:

$$F = \frac{1}{T} = \left(\frac{1}{T_m + T_s} \right) \text{ Hz.} \quad (2)$$

Donde:

F es la Frecuencia en Hertz,

T es el periodo en segundos,

T_s es el tiempo de espacio en segundos y

T_m es el tiempo de marca en segundos.

$$T_m = 0.7 \times (R1 + R2) \times C1 \text{ s.} \quad (3)$$

Donde:

$R1$ y $R2$ son resistencias de configuración,

$C1$ es un capacitor para configuración (ver figura 3).

$$R2 = \frac{0.7}{F \times C1} \Omega. \quad (4)$$

De la ecuación (2)

$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{110 \text{ Hz}} = 0.0091 \text{ s} \quad \therefore \quad \frac{T}{2} = 0.0046 \text{ s.} \quad (5)$$

Sustituyendo en la ecuación (3)

$$0.0046 \text{ s} = (0.7 \times 0.1 \mu F)(R1 + R2) \quad \therefore \quad R1 + R2 = \frac{0.0046}{7 \times 10^8} \Omega, \quad (6)$$

$$R1 + R2 = 65 \, 714.28 \Omega. \quad (7)$$

Sustituyendo en la ecuación (4)

$$R2 = \frac{0.7}{110 \text{ Hz} \times 0.1 \mu\text{F}} \quad \therefore \quad R2 = 63\,636.36 \, \Omega.$$

De la ecuación (7)

$$R1 = 65\,714.28 \, \Omega - R2 \quad \therefore \quad R1 = 65\,714.28 \, \Omega - 63\,636.36 \, \Omega,$$

$$R1 = 2\,077.92 \, \Omega.$$

A partir de estos valores se tendrá un circuito que producirá una señal cuadrada con una frecuencia de 110 *Hertz* y con un ciclo de trabajo del 50 %, el cual es presentado en la figura 3.

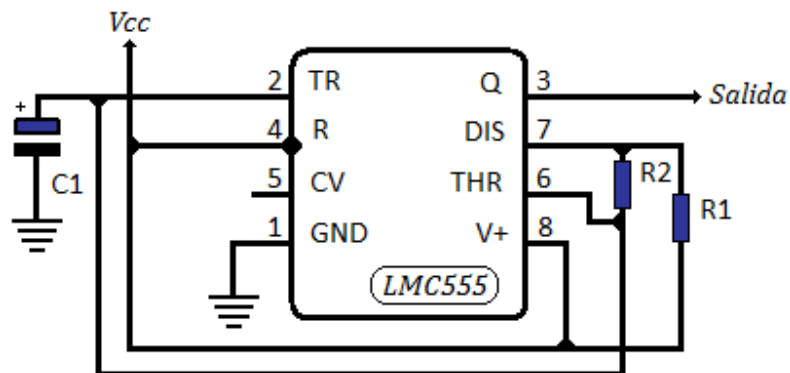


Figura 3. Configuración para el funcionamiento del oscilador 555.

3.2.2 Acondicionamiento de la señal

A la salida del oscilador tenemos una señal totalmente positiva ya que sus valores se alternan entre 0 y 3.3 volts, en la figura 4 se observa la señal producida por la configuración mostrada en la figura 3.

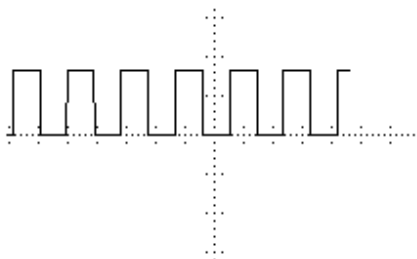


Figura 4. Señal de salida del oscilador 555. (Tiempo base 0.05 s/Div, 2 V/Div, Voltaje DC).

Para poder tener una señal alterna, que presente valores entre un voltaje positivo y otro negativo se añadieron un par de capacitores de bloqueo (ver figura 5). La acción que efectúan estos capacitores sobre la señal generada por el oscilador es mover la referencia de tierra para que a la vista del sensor de tensión, la señal que lo está excitando sea totalmente alterna y esta vaya desde +1.65 volts hasta -1.65 volts.

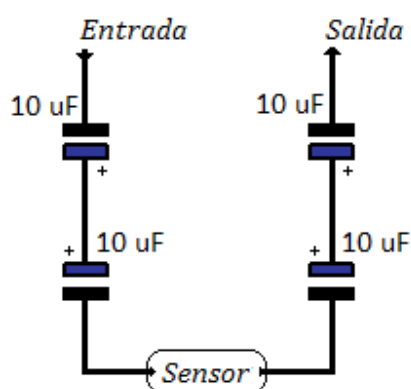


Figura 5. Etapa de acondicionamiento de la señal para el sensor.

Una vez que la señal de la figura 4, pase a través de los capacitores descritos en la figura 5, se obtiene como resultado la imagen que se muestra en la figura 6. Como ya se explico con anterioridad a la vista del sensor la señal que lo estará excitando será alterna.

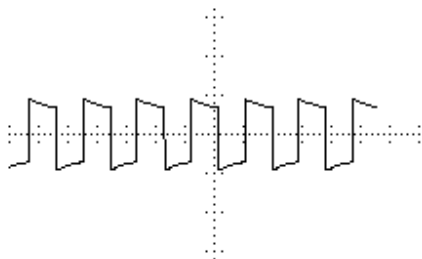


Figura 6. Señal de salida del oscilador 555 después de los capacitores de bloqueo. (Tiempo base 0.05 s/Div, 2 V/Div, Voltaje DC).

3.2.3 Lectura de los valores del sensor

Los datos generados por el sensor serán analizados por un microcontrolador, para poder leer estos datos es necesario utilizar un convertidor analógico a digital, por lo tanto se necesita tener una señal de voltaje directo, como se está utilizando una forma alterna para excitar al sensor, se tendrá que rectificar esta señal para poder introducirla al microcontrolador.

La rectificación la efectúa un diodo en serie con un capacitor, la operación que lleva a cabo el diodo es conocida como rectificación de media onda. Por su parte el capacitor realiza el suavizado de la señal, el capacitor se conecta entre la fuente de *DC* para que actúe como embalse (como contenedor), esto suministra corriente a la salida cuando el voltaje variante de *DC* del rectificador este cayendo.

En la figura 7 se puede observar que el capacitor se cargara rápidamente cerca del pico de voltaje variante de *DC* y se descargara al suministrar corriente a la salida. En este caso la salida que se dirige a la entrada del microcontrolador (μc) en una de las terminales del convertidor analógico a digital (ADC) pero, ya como una señal de *DC*.

De la figura 7 es necesario mencionar la colocación del circuito para un mejor entendimiento. La salida de la figura 3 va dirigida hacia la entrada de la figura 7, la salida de la figura 7 se dirige hacia la entrada de la figura 5. Este circuito no tiene un efecto en la señal del oscilador la cual se dirige al circuito acondicionador de señal. El circuito descrito en la figura 7 solo se utiliza para acondicionar las señales que se dirigen hacia el microcontrolador.

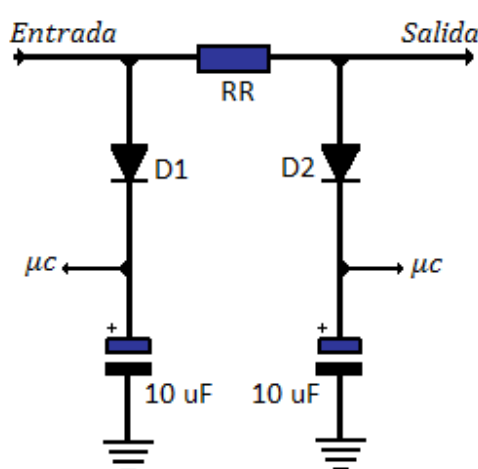


Figura 7. Etapa de rectificación

3.2.4 La resistencia del sensor

Para poder determinar el valor de la resistencia del sensor se utiliza un divisor de tensión.

Este circuito básico es comúnmente llamado divisor de tensión o divisor de voltaje [15], en el se mantiene un voltaje de alimentación continuo llamado “voltaje total” además, cuenta con una resistencia de un valor fijo y conocido (RR), a partir de estos datos solo nos queda determinar el valor de la resistencia del sensor, esto se efectúa midiendo la caída de voltaje que hay en el sensor.

Se propone que el circuito de excitación para el sensor se comporta como el que se muestra en la figura 8.

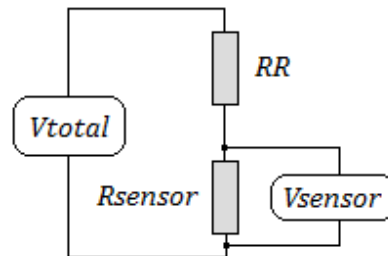


Figura 8. Divisor de voltaje.

Es conocido que la fórmula para determinar el valor del voltaje en el sensor es:

$$V_{sensor} = \frac{V_{total}}{RR + R_{sensor}} R_{sensor} \quad V. \quad (8)$$

Donde:

V_{sensor} es el voltaje en la resistencia del sensor,

V_{total} es el voltaje suministrado por la fuente,

R_{sensor} es la resistencia del sensor y

RR es una resistencia de configuración conocida.

Pero, como lo que interesa es el valor de la resistencia del sensor y lo que se está midiendo para determinar este valor es el voltaje en el sensor entonces, sólo resta despejar de la fórmula anterior la resistencia del sensor y así se obtendrá su valor.

$$R_{sensor} = \frac{V_{sensor}}{V_{total} - V_{sensor}} RR \quad \Omega. \quad (9)$$

El valor de la resistencia R_R es de 1 *kilo Ohm*, este número simplifica el manejo y operaciones con los valores dentro del microcontrolador, ya que se puede asumir que es una multiplicación por 1, por lo tanto el valor obtenido en la división justo antes de efectuar la multiplicación por R_R se mantiene igual, esto es:

$$R_{\text{sensor}} = \frac{V_{\text{sensor}}}{V_{\text{total}} - V_{\text{sensor}}} \quad k\Omega. \quad (10)$$

Sólo que ahora el valor de la Resistencia del sensor estará expresado en *kilo Ohm*. De esta forma se obtiene el valor de la resistencia del sensor la cual ayudará a determinar el valor de succión existente en el suelo y así determinar la tensión del suelo.

3.3 El microcontrolador

El microcontrolador MC9S08QE8 es un miembro de bajo consumo y alto desempeño de la familia de microcontroladores de 8 bits desarrollados por Freescale. Este circuito cuenta con 10 canales de conversión analógica a digital, basados en un convertidor analógico-digital (ADC) de hasta 12 bits de resolución con una velocidad de conversión elevada (2.5 μ s), brindando un consumo mínimo de potencia. La serie QE según su fabricante, ha demostrado una eficiencia de energía extrema para aplicaciones de larga duración alimentadas con batería [16]. Cuenta con un modulo contador de tiempo real, comunicación SCI y SPI además de muchas otras características internas las cuales lo hacen un microcontrolador ideal para este proyecto.

El microcontrolador presenta una fuente de reloj interna (ICS) modular, esta fuente es un generador de reloj interno de gran exactitud el cual puede ser configurado para un bajo consumo de potencia. En el circuito viene incluido un contador de tiempo real (RTC) el

cual es un modulo contador de 8 bits, este puede ser configurado para que funcione como un reloj incremental de tiempo real.

Este dispositivo brinda una gran variedad de modos de operación para el ahorro de energía, así de acuerdo a las necesidades del proyecto se puede contar con el máximo desempeño del microcontrolador a un costo muy pequeño de energía. La figura 9, muestra el encapsulado y el nombre de las terminales del microcontrolador.

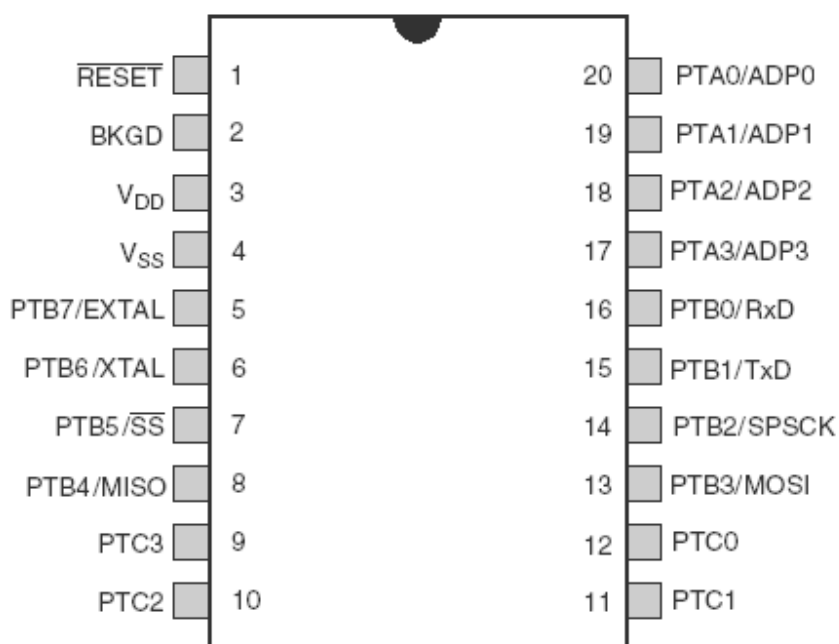


Figura 9. MC9S08QE en configuración de 20 terminales.

Las terminales de los microcontroladores usualmente tienen asociadas más de una función, una sola patilla del microcontrolador puede ser usada como entrada o salida de propósito general, como entrada analógica o como bus de comunicación etc. La función de un puerto de entrada es ser el medio por el cual se pueden leer estímulos externos digitales (valores altos o bajos), cuando es un puerto de entrada analógico se leen variaciones de voltaje las cuales se representan por una resolución en bits al interior del

microcontrolador. El puerto de salida de un microcontrolador es capaz de proporcionar un voltaje de salida alto o bajo, solamente estará limitado en el suministro de corriente. Cuando se trata de un puerto de comunicación las terminales se rigen por las reglas ya fijadas para ese tipo de comunicación.

En cuanto a los módulos utilizados y sus configuraciones queda por demás mencionar que no son los únicos contenidos en este dispositivo, aquí solo se mencionaran los módulos que fueron utilizados para este proyecto.

3.3.1 Programa de control principal

El programa principal o “main”, ejecuta cada una de las subrutinas que controlan el correcto funcionamiento de todo el IMHS. Este programa inicia configurando los módulos que serán utilizados (RTC, SCI, SPI, ADC) por el microcontrolador en las diferentes etapas de funcionamiento del instrumento. Después, una secuencia de inicio, la cual se encarga de encender un led bicolor durante 7 segundos indicara que el microcontrolador ha iniciado con la rutina principal.

Una vez ejecutada la secuencia de inicio, el programa principal entra en una rutina de espera, aquí el microcontrolador estará atento a alguna de las 2 interrupciones activas en ese momento. En la figura 10 se puede observar el diagrama de flujo del programa principal.

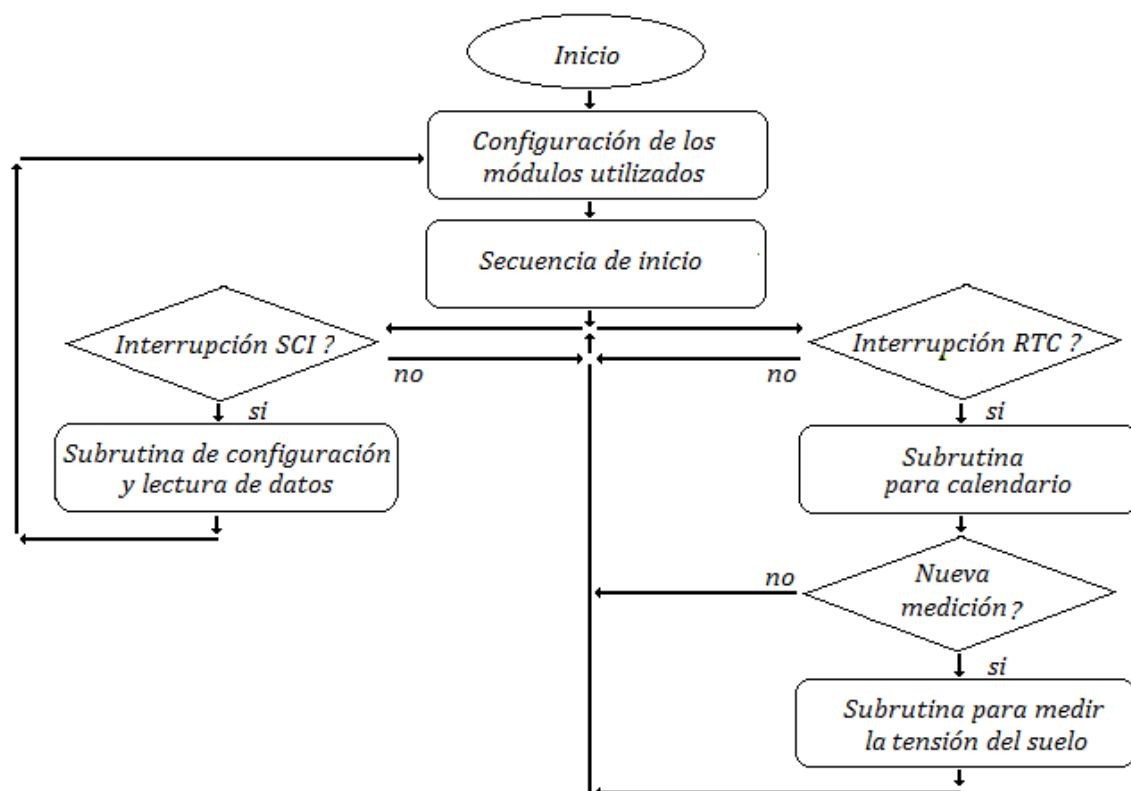


Figura 10. Diagrama de flujo del programa de control principal.

La interrupción RTC es parte del contador de tiempo real, este módulo se utiliza para contar el tiempo gracias a su exactitud. Aunque maneja tres registros distintos, solo es necesario configurar dos de estos para poder operarlo de una manera eficaz. Con este modulo es posible obtener una interrupción cada segundo, al ser tan exacto, se puede utilizar como un contador diario.

Si se activa la interrupción RTC entonces, se inicia una subrutina de conteo la cual genera un calendario interno, en la sección 3.3.2 se explica su funcionamiento. Si al momento de incrementar el calendario se verifica que es el tiempo para tomar una nueva medición, el programa entrara en la subrutina para medir la tensión del suelo (ver sección 3.3.3), una vez terminada esta subrutina o si no es el momento de efectuarla, el microcontrolador regresará al modo de espera, atento a una nueva interrupción.

La interrupción SCI es parte del módulo de comunicación serie, al programar las rutinas para utilizar este puerto de comunicación se utilizaron dos formas distintas de control, espera activa e interrupciones. La espera activa se utilizó para determinar cuándo se encontraba vacío el buffer de envío de datos en el microcontrolador y las interrupciones se utilizaron para conocer el momento en que se solicitaba al puerto serie comunicarse con la computadora. Para garantizar el entendimiento y la comunicación entre la computadora y el microcontrolador se asignaron algunos comandos específicos, con los cuales se determinaron las reglas entre estos dos dispositivos.

Si se activa la interrupción SCI entonces el microcontrolador entra en la subrutina de configuración y lectura de datos (ver sección 3.3.8). De acuerdo a la operación solicitada por la computadora, se da una nueva configuración al IMHS para que comience nuevas mediciones o, se solicita al microcontrolador que envíe la información almacenada para generar un reporte y graficar los datos. Una vez terminada cualquiera de las dos operaciones incluidas en esta subrutina, el microcontrolador regresa a la configuración inicial de los módulos internos.

En total se utilizaron 23 programas independientes controlados por una secuencia de eventos dirigidos por el programa principal. Fue necesaria la creación de dos programas “header” o encabezados para manejar las 31 variables globales que se utilizaron en el proyecto.

3.3.2 Subrutina para el calendario

La subrutina para calendario es activada por una interrupción provocada por el módulo RTC, un calendario generado por medio de software se va incrementando cada segundo. En la figura 11 se muestra el diagrama de flujo para el calendario.

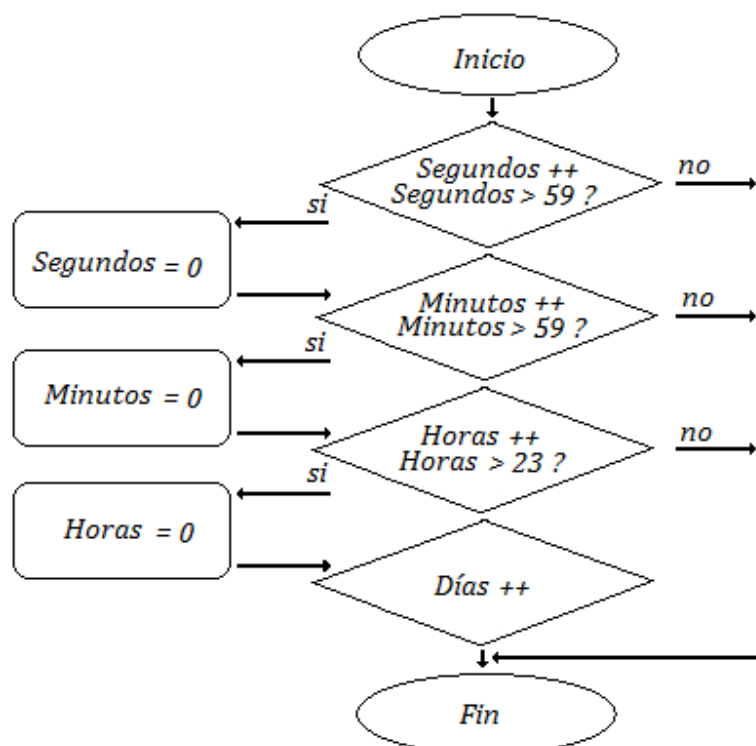


Figura 11. Subrutina de control para el calendario.

Cada vez que se active la interrupción RTC el microcontrolador entrara en esta subrutina entonces, se incrementará el contador para los segundos, al llegar estos a un valor mayor a 59, se incrementa el valor de los minutos en uno y se limpia el contador de segundos para iniciar con un nuevo conteo. Si los minutos llegan a un valor mayor de 59 entonces, el contador de horas se incrementa en uno y el contador de minutos se reinicia en un valor de cero. Si las horas llegan a un valor mayor a 23, esto se considera como un día, por lo tanto se incrementara el contador de días y el de horas se reinicia. Los valores de minutos, horas y días son almacenados en la memoria EEPROM, justo antes de guardar el valor de cada sensor de tensión del suelo.

Una vez ejecutada la subrutina para el calendario el programa principal verifica que tiempo es, si es momento de tomar una medida o ¿no? El instrumento ha sido

programado para efectuar una medición cada 15 minutos, en los minutos 5, 20, 35 y 50 de cada hora.

3.3.3 Subrutina para medir la tensión del suelo

La subrutina para medir la tensión del suelo está compuesta por tres subrutinas más pequeñas: subrutina para medir la temperatura del suelo, subrutina para medir la resistencia del sensor de tensión y la subrutina de escritura. La figura 12 muestra el diagrama de flujo que sigue la subrutina para obtener la tensión del suelo, debido a que la subrutina de escritura no toma parte esencial en el cálculo de la tensión pero, es importante para almacenar los datos, ésta se explicará a detalle en la sección 3.3.7.

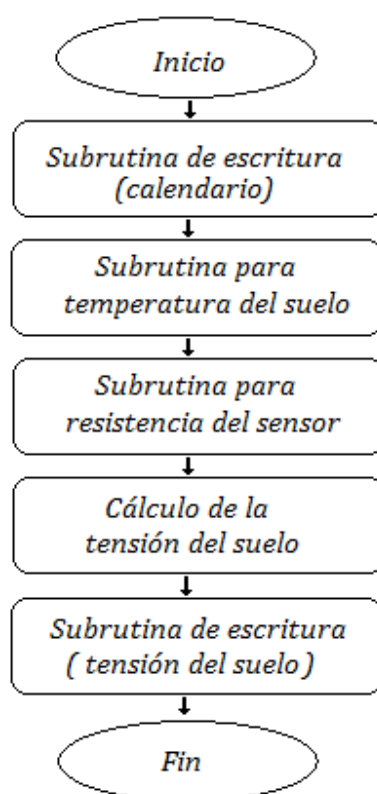


Figura 12. Subrutina para obtener la tensión del suelo.

Para determinar la temperatura del suelo y la resistencia del sensor de tensión fue necesario utilizar el convertidor analógico-digital (CAD), este fue configurado para trabajar a una resolución de 12 bits, con el método de aproximaciones sucesivas se obtiene la representación más cercana del valor analógico.

Como se describe, en la sección 3.2.3, el ADC se utiliza para determinar la resistencia que está presente en el circuito sensor de tensión Watermark®, de acuerdo a los valores obtenidos en el divisor de voltaje utilizado por este circuito. En cuanto al sensor de temperatura, el CAD toma el valor directo de voltaje entregado por el sensor de temperatura y lo convierte al valor aproximado en forma digital (sección 3.3.4).

3.3.4 Subrutina para medir la temperatura del suelo

Es necesario medir la temperatura del suelo ya que esta puede afectar el desempeño del sensor de tensión del suelo, por lo tanto es práctico utilizar una compensación por temperatura para una mejor precisión. En la fórmula para determinar la succión del suelo la temperatura se incluye como una variable. La temperatura del suelo afecta la lectura del sensor en aproximadamente 2% por cada grado centígrado, aunque esta variación no es suficientemente crítica como para que la lectura sea errónea, si puede ser aplicada como variación “estacional” por ejemplo, la temperatura del suelo en primavera esta alrededor de los 16 °C y en verano sobre los 23 °C, de ahí que se utilice un sensor de temperatura.

Se utilizó el sensor MCP9700 fabricado por Microchip Technology Inc., es un circuito integrado lineal con tecnología activa Thermistor™, básicamente convierte la temperatura en un voltaje analógico, por lo cual no es necesario algún componente externo para su funcionamiento. Es de bajo costo y bajo consumo (consumo típico = 6 µA), con una exactitud de $\pm 0.5^\circ$ centígrados de desviación como máximo [17].

Este sensor es inmune a los efectos causados por capacitancias parasitas. En su interior usa un diodo para medir la temperatura. Debido a las características eléctricas del diodo este presenta un coeficiente de temperatura el cual cambia basado en el voltaje generado por la temperatura ambiente, el cambio del voltaje esta escalado con respecto al coeficiente de temperatura, esto es: por cada grado centígrado cambia a razón de 10 mV . La salida de voltaje del sensor a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ esta escalada a 500 mV (típicamente).

En la ecuación 11 se muestra la función de transferencia básica del sensor de temperatura.

$$out = Tc \times Ta + V_{0^{\circ}\text{C}} \quad \text{V.} \quad (11)$$

Donde:

Tc es el coeficiente de temperatura,

Ta es la temperatura ambiente o del suelo,

$V_{0^{\circ}\text{C}}$ es el voltaje de salida del sensor a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y

V_{out} es el voltaje de salida del sensor.

La salida del sensor de temperatura es totalmente analógica, variable de acuerdo al valor de la temperatura, los valores de salida van desde 0.1 Volts hasta 1.75 Volts aproximadamente, por lo tanto solo es necesario conectar esta salida a una entrada con convertidor analógico-digital del microcontrolador para poder leer el valor de la temperatura.

De la ecuación 11 se obtiene el valor de Ta , en este caso la temperatura ambiente o la temperatura del suelo.

$$Ta = \frac{V_{out} - V_{0^{\circ}\text{C}}}{Tc} \quad ^{\circ}\text{C.} \quad (12)$$

Al sustituir los valores de acuerdo al valor proporcionado por la función de transferencia lineal del sensor:

$$T_a = \frac{V_{out} - 0.5}{0.010} \quad ^\circ\text{C}. \quad (13)$$

Esta fórmula es la que se utiliza para determinar la temperatura del suelo. En la figura 13 se muestra la conexión típica del sensor de temperatura.

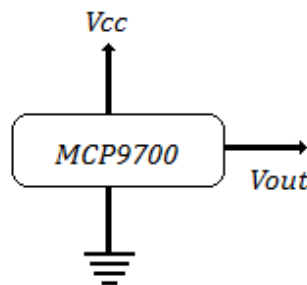


Figura 13. Aplicación típica del sensor de temperatura.

Al utilizar la formula anterior (ecuación 13) se obtiene una respuesta lineal pero, para optimizar el resultado se ha añadido una compensación por software, la cual disminuye el error desde $\pm 4 \text{ } ^\circ\text{C}$ hasta $\pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$. En la ecuación (14) se muestra la fórmula para obtener la temperatura compensada, el que sea una compensación por software, implica que será una operación del microcontrolador usando la temperatura obtenida con la ecuación 13.

$$T_{compensada} = T_{sensor} - Error_{T2}|_{T_a = T_{sensor}} \quad ^\circ\text{C}. \quad (14)$$

Donde:

$T_{compensada}$ es la temperatura obtenida al aplicar la compensación por software,
 T_{sensor} es la temperatura obtenida por la ecuación lineal del sensor (ec. 13),
 $Error_{T2}$ es el error de compensación.

$$Error_{T_2} = E_{C2} (125\text{ }^{\circ}\text{C} - T_a)(T_a - -40^{\circ}\text{C}) + E_{C1}(T_a - 40^{\circ}\text{C}) + Error_{-40}\text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (15)$$

Donde:

E_{C2} es igual a $244 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}^2$,

E_{C1} es igual a $2 \times 10^{-12}\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ y

el $Error_{-40}$ es igual a $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la figura 14 se describe el proceso que sigue el programa para obtener el valor del sensor de temperatura.

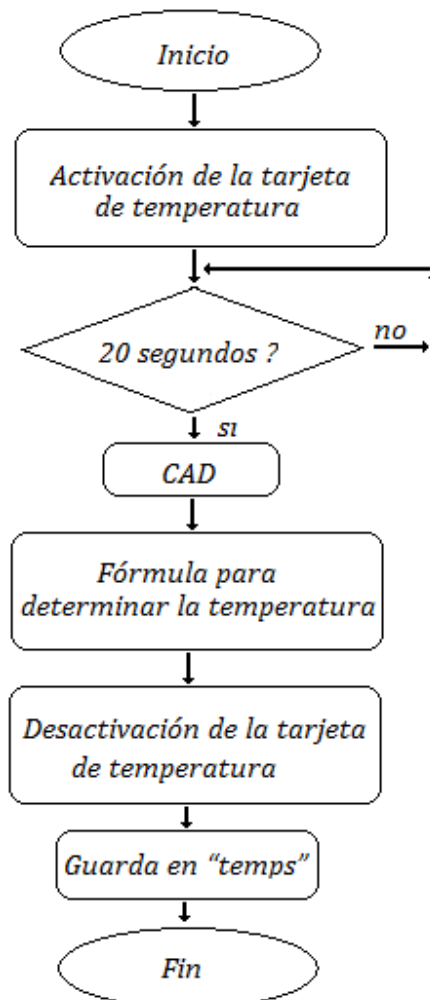


Figura 14. Subrutina de control para la tarjeta de temperatura.

Una vez encendido el sensor, se le dan 20 segundos para que se estabilice, con esto se obtiene una medida más real de la temperatura en el suelo, justo al cumplirse el tiempo asignado, el CAD toma una lectura del voltaje presente en la terminal asignada. Después de esto el cálculo de la temperatura es realizado por la fórmula matemática (ecuación 18) dentro del microcontrolador. Una vez finalizado el proceso, el dato es guardado en una variable global para ser utilizado en el cálculo de la tensión del suelo.

3.3.5 Subrutina para medir la resistencia del sensor de tensión

La parte encargada de medir la tensión del suelo en el IMHS hace uso de dos sensores, como solo se excita un sensor a la vez, es necesario utilizar un circuito para cambiar las señales entre los sensores. Una vez seleccionado el sensor a utilizar se espera un tiempo determinado para que el sensor se estabilice, asegurando una medida más exacta. Terminado el tiempo de estabilización, entra en funciones el CAD, en primer lugar éste obtiene el valor del voltaje en la resistencia RR (resistencia de carga, ver figura 7) también recibe el nombre de “*voltaje total*” después, obtiene el valor del voltaje en la resistencia denominada R_{sensor} a este voltaje se le llama: “*voltaje del sensor*”, con esta información se calcula el valor de la resistencia del sensor de tensión mediante la ecuación 10, este dato se almacena en una variable global para ser utilizado en el cálculo de la tensión del suelo. En la sección 3.2 se describe de una manera más amplia el funcionamiento del sensor de tensión del suelo. La figura 15 muestra el diagrama de flujo que sigue el programa encargado de obtener el valor de la resistencia del sensor de tensión.

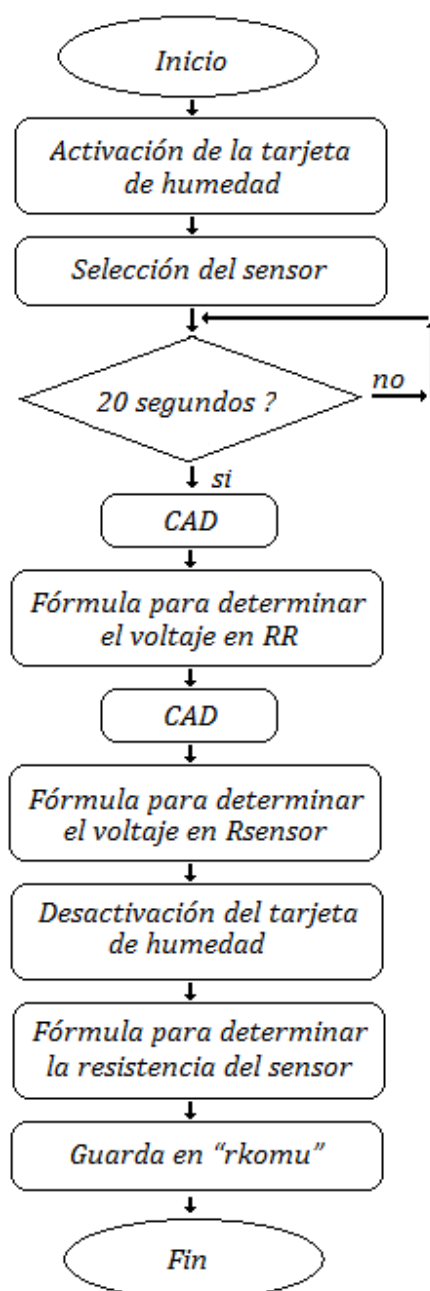


Figura 15. Subrutina de control para la tarjeta de humedad.

(RR es la resistencia de carga, Rsensor es la resistencia del sensor de humedad).

3.3.6 Cálculo de la tensión del suelo

De la figura 12 el bloque titulado: “Cálculo de la tensión del suelo”, no es una subrutina como tal, es la aplicación de la ecuación 1, descrita en la sección 2.9. Ésta ecuación hace uso de la variable “*temps*”, obtenida por la subrutina para medir la temperatura del suelo (3.3.4) y de la variable “*rkomu*”, que se obtuvo a partir de la subrutina para medir la resistencia del sensor de tensión (3.3.5), el resultado es: la tensión del suelo, en kilo pascles, éste valor es almacenado en la memoria para generar el reporte y la grafica de datos.

3.3.7 Subrutina para escribir en la memoria externa

Para almacenar los datos que se utilizan para generar el reporte y la grafica de las mediciones hechas, se utilizo el circuito 25AA1024. Es una memoria del tipo EEPROM fabricada por Microchip Technology Inc., con una capacidad de 1024 Kbit, la cual maneja escritura a nivel de bytes. La memoria se comunica a través de una interface de periférico serie (SPI), esta interface requiere de una señal de reloj (SCK), una señal de entrada de datos (MOSI) y otra de salida de datos (MISO), el control del circuito es por medio de una entrada de selección (SS), al enviarle un “1” lógico el circuito se activa, con un “0” este se desactiva. La figura 16 muestra las terminales de la memoria EEPROM [18].

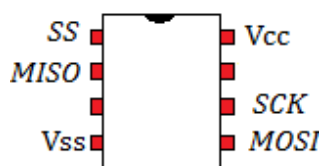


Figura 16. Terminales de la memoria EEPROM.

Como el microcontrolador es de uso general, contiene una serie de configuraciones para sincronizarse con la mayoría de los dispositivos que utilizan el protocolo SPI. Por lo tanto la selección del modo del reloj a utilizar depende del dispositivo esclavo, en este caso la memoria EEPROM utiliza la polaridad del reloj (CPOL) en activo alto (flanco descendente), la fase del reloj (CPHA) trabaja de forma tal que el primer flanco de reloj ocurre en la mitad del primer ciclo de una transferencia de datos de 8 bits. Esto se ilustra en la figura 17.

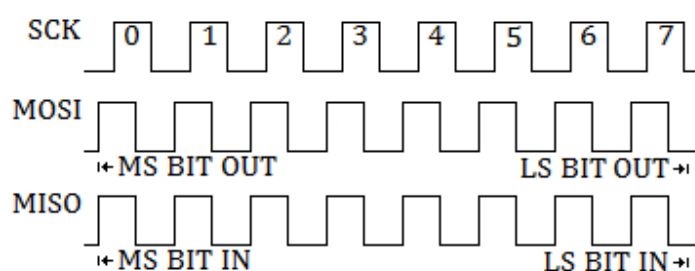


Figura 17. Sincronía en el módulo SPI.

El microcontrolador inicia un intercambio de datos con la memoria EEPROM tomando como punto de partida el bit más significativo, de esta forma comienza la transferencia de datos a través de la patilla MOSI, a su vez el esclavo (memoria EEPROM) a medida que va recibiendo los bits, los va desplazando, este desplazamiento trabaja en conjunto con el sincronismo establecido entre los dos dispositivos utilizando una señal de reloj a través de la patilla SCK. De igual forma sucede cuando la memoria EEPROM envía datos hacia el dispositivo maestro (microcontrolador), como se puede ver en la figura 18, un registro de desplazamiento comienza a enviar uno a uno los bits por la patilla MISO, iniciando con el bit más significativo.

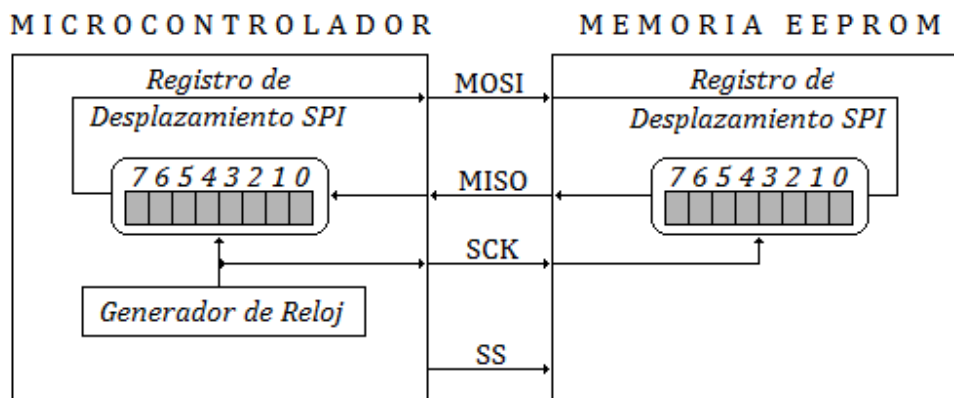


Figura 18. Dirección de la comunicación en el módulo SPI.

Para poder enviar y recibir información por medio del microcontrolador existe el registro de datos (SPID), al escribir a este registro del dispositivo maestro se iniciara una transferencia de un byte. De la misma forma el dispositivo esclavo podrá leer los datos en sus respectivos registros.

En la figura 12 aparecen dos bloques con la descripción: subrutina de escritura. Esta subrutina es la misma en ambos bloques. El primero de ellos se encarga de almacenar los datos correspondientes al calendario, o sea el momento en el cual se tomaron los datos y en el segundo bloque se escribe la información obtenida por la ecuación 1 al realizarse el cálculo de la tensión del suelo. Los datos almacenados ocupan una extensión de 5 bytes, cada vez que se realiza una medición se almacena el minuto, la hora, el día, la tensión en el sensor 1 y por último la tensión en el sensor 2.

Los pasos que se describen en la figura 19 se implementaron para almacenar la información en la memoria EEPROM, algún error en su ejecución resultara en pérdida de datos o almacenamiento de forma incompleta.

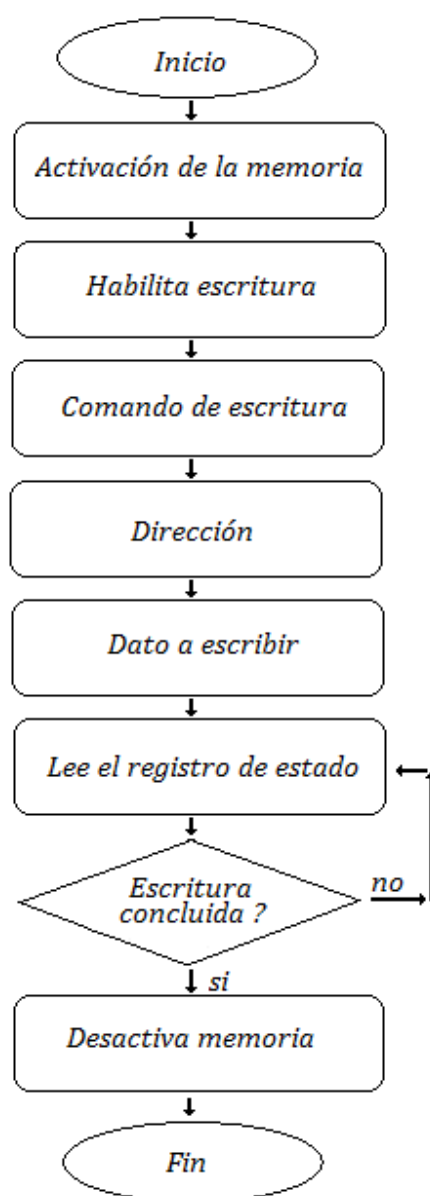


Figura 19. Subrutina para almacenar un dato en la memoria EEPROM.

3.3.8 Subrutina de configuración y lectura de datos

Esta subrutina se activa por medio de una interrupción generada en el puerto SCI, una vez recibido el dato se verifica que sea una solicitud valida. De acuerdo al tipo de interrupción se determina si se enviaran los datos almacenados en la memoria o si se realizara la configuración para una nueva medición del instrumento (consultar sección 3.6). En la figura 20 se describe el diagrama de flujo de esta subrutina.

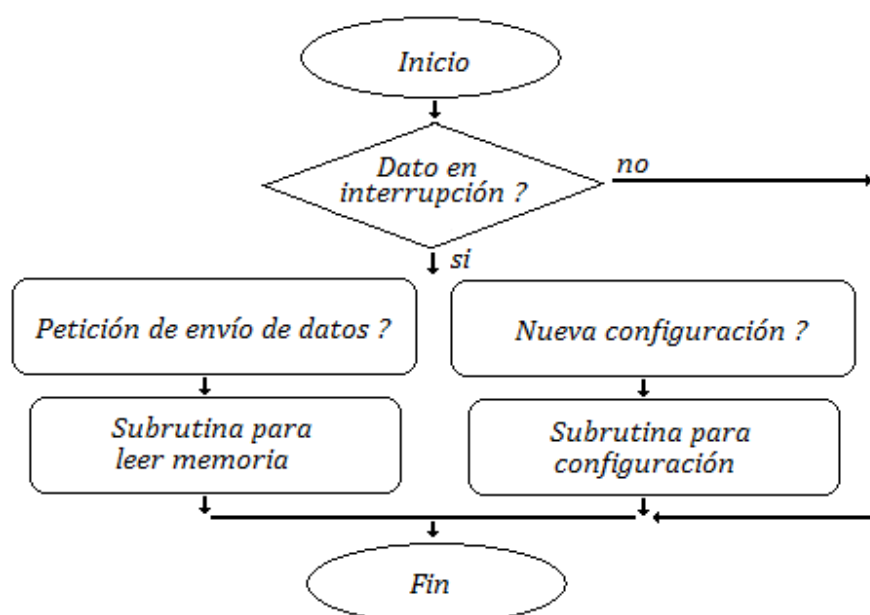


Figura 20. Subrutina por interrupción en el puerto SCI.

La subrutina para configuración, es la encargada de almacenar la fecha en la que se iniciara la primera medición, este dato es muy importante ya que a partir de esta información se construirá el reporte de datos y la grafica de tensión del suelo. En la figura 21 se describe esta subrutina.

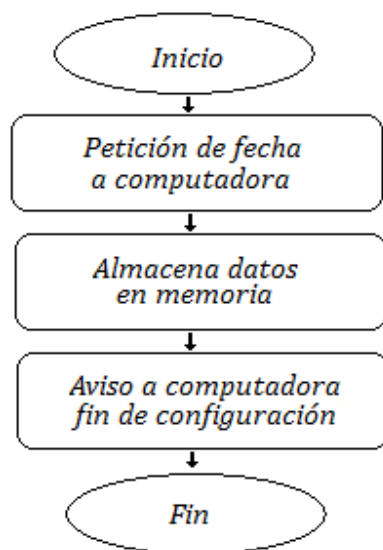


Figura 21. Subrutina de configuración.

La subrutina de configuración inicia solicitando desde el microcontrolador a la computadora la fecha actual (mes, día y hora) estos datos son almacenados en una sección reservada especialmente en la memoria, la operación de escritura en la memoria se describe en la sección 3.3.7. Una vez terminada esta comunicación el IMHS se reinicia configurando los módulos necesarios para su funcionamiento.

La subrutina para leer la memoria, llama los valores almacenados en la memoria EEPROM y uno a uno son enviados por medio del puerto serie de transmisión hacia el circuito integrado FT232 para que sean leídos por la computadora. Para leer los datos que son enviados por la memoria EEPROM, se ha configurado el microcontrolador de tal manera que al llenarse el buffer de recepción del registro SPID se genera una interrupción, esto significa que la respuesta de la memoria está esperando para ser leída de dicho registro. Si el registro no es leído y se inicia una nueva transmisión, entonces el dato anterior se pierde. En la figura 22 se muestra la subrutina para poder obtener los valores almacenados en la memoria.

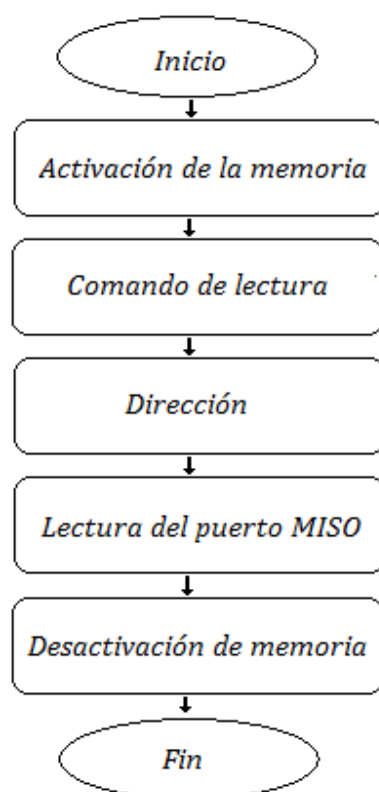


Figura 22. Subrutina para leer la memoria EEPROM.

3.3.9 Protección contra bajo voltaje

El microcontrolador HCS08QE8 maneja un modulo de protección por bajo voltaje, al ser un dispositivo de consumo mínimo, los límites establecidos para activar la bandera de advertencia y poner el circuito en un estado de inactividad son más de lo que se necesita en este proyecto.

Por lo tanto, se monitorea el voltaje de la fuente de manera constante con una terminal del CAD, si el voltaje es más bajo del que se necesita, el microcontrolador enciende una alarma (en este caso, un led encendido de manera permanente en color rojo) para

notificar que es necesario un cambio de batería, por protección se apagan todos los dispositivos y no se vuelven a tomar medidas hasta que se efectué el cambio de batería.

3.4 El circuito de interface serie a USB

La simplificación en las computadoras, su portabilidad y la compatibilidad de los dispositivos externos que se conectan a esta han hecho del puerto USB un estándar de conexión y comunicación. Implementar una conexión directa desde un microcontrolador hacia una computadora significa en la mayoría de los casos que hay que desarrollar el driver de comunicación para el manejo de la información que intercambiaran estos dos dispositivos, el desarrollar y probar los protocolos de comunicación bien puede consumir demasiado tiempo. Para solucionar este problema la compañía FTDI ha desarrollado el circuito de interface serie-USB llamado FT232R [19].

El circuito FT232R es solo una de varias soluciones que ofrece el fabricante en lo que respecta a dispositivos de interface. Este circuito maneja una conexión directa hacia el puerto USB de la computadora y por otro lado una conexión directa hacia el microcontrolador.

En el proyecto se utilizaran los drivers de soporte ofrecidos por el fabricante de forma gratuita para que el dispositivo trabaje como puerto serie virtual o VCP (Virtual Com Port), este tipo de configuración hace posible que en la computadora se maneje la comunicación con un puerto serie virtual aunque los datos estarán ingresando por el puerto USB de la computadora. El protocolo de manejo de información contenido en el chip se encargara de distribuir la información de tal forma que no es necesaria programación extra de firmware.

La conexión utilizada en el proyecto se muestra en la figura 23, en esta aplicación el circuito utilizara las terminales RXD y TXD para recibir y transmitir información desde y hacia un microcontrolador respectivamente. Las terminales CBUS0 Y CBUS1 se utilizan en su valor de configuración de fabrica TXLED# y RXLED#, ya sea cuando se transmite o cuando se recibe información estas encenderán un par de led's para indicar que están efectuando una operación.

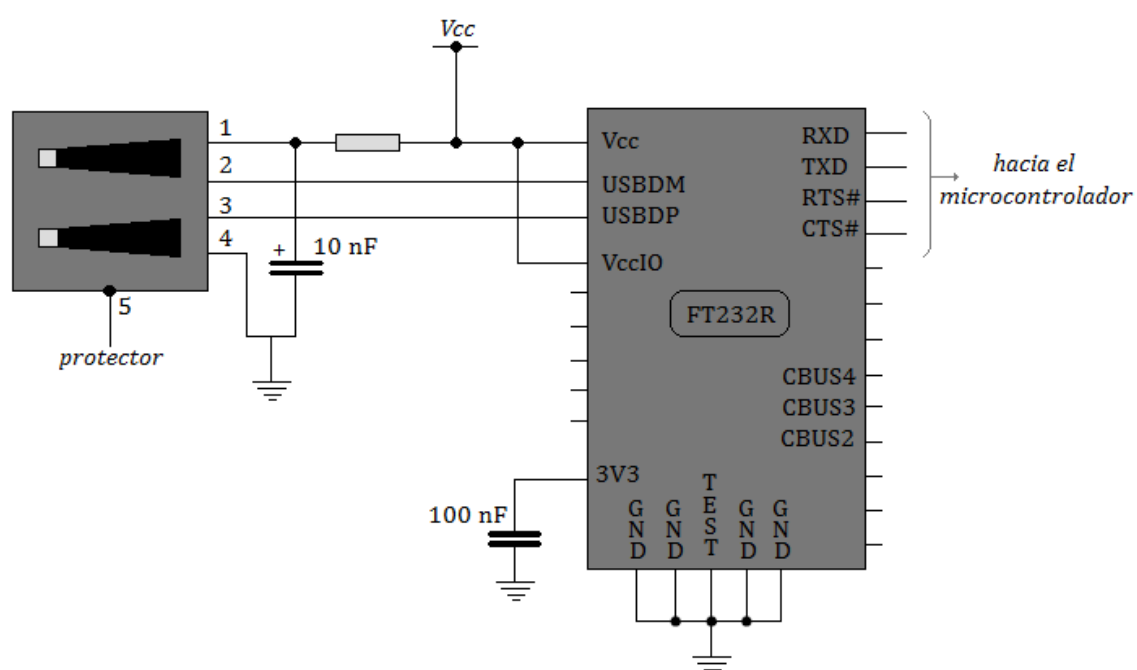


Figura 23. Conexión típica del circuito de interface FT232R.

Debido a que la alimentación para este circuito se tomara directamente del puerto USB de la computadora, es necesario aplicar algunos capacitores para filtrar el voltaje y proteger al circuito FT232R de posibles daños o de mal funcionamiento causado por la fuente de voltaje, se utiliza un arreglo como el de la figura 24.

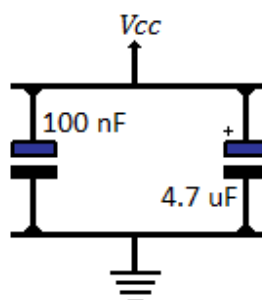


Figura 24. Circuito para filtrar el voltaje de la fuente.

Las características que se están utilizando de este dispositivo son las mínimas ya que la capacidad de este circuito es mucho mayor. Esto no demerita su uso en el proyecto, al contrario, deja la puerta abierta para implementar mejoras en el instrumento de medición de la humedad del suelo en un futuro.

3.5 Los dispositivos del instrumento

En la figura 25 se muestra el diagrama del instrumento de medición de la humedad del suelo. Después de seleccionar cada uno de los circuitos y de mostrar en la secciones anteriores como funcionan, en el diagrama se marca la dirección de la comunicación entre cada uno de dispositivos, al ser un diagrama explicativo, no se muestran algunos componentes electrónicos que ayudan o son necesarios en el funcionamiento y configuración de los circuitos integrados como resistencias o capacitores.

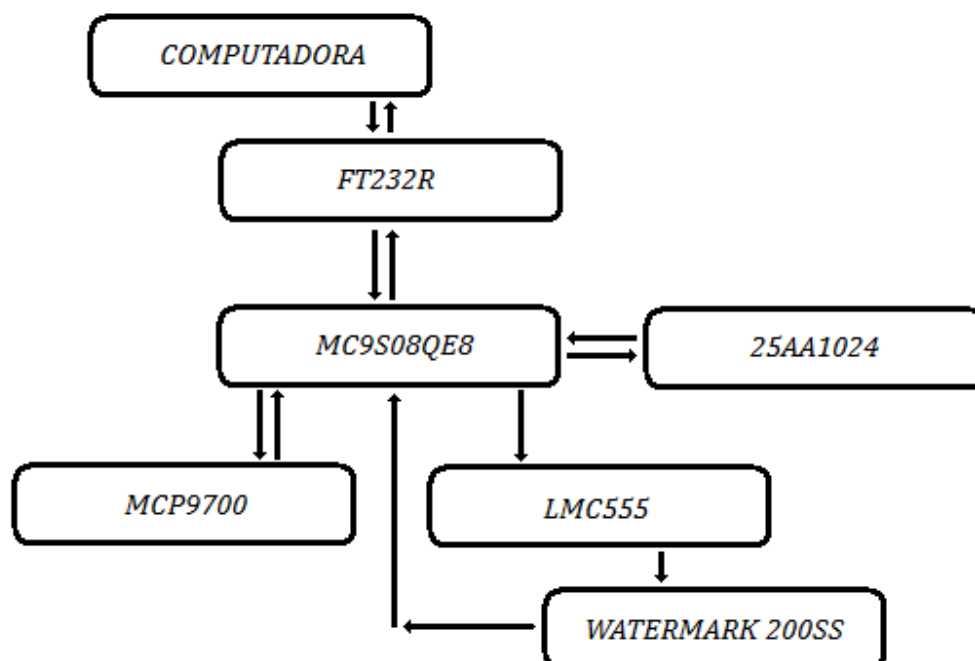


Figura 25. Diagrama de los dispositivos utilizados en el instrumento de medida de la humedad del suelo.

Una vez que fueron seleccionados los componentes a utilizar, que se describió su funcionamiento y su configuración así como la dirección de la comunicación interna, se procedió a probar cada uno de estos componentes en tarjetas independientes mediante uniones en una tabla de prueba, después se procedió a diseñar y elaborar la tarjeta impresa del instrumento. En la figura 26 se observa la tarjeta final del IMHS.

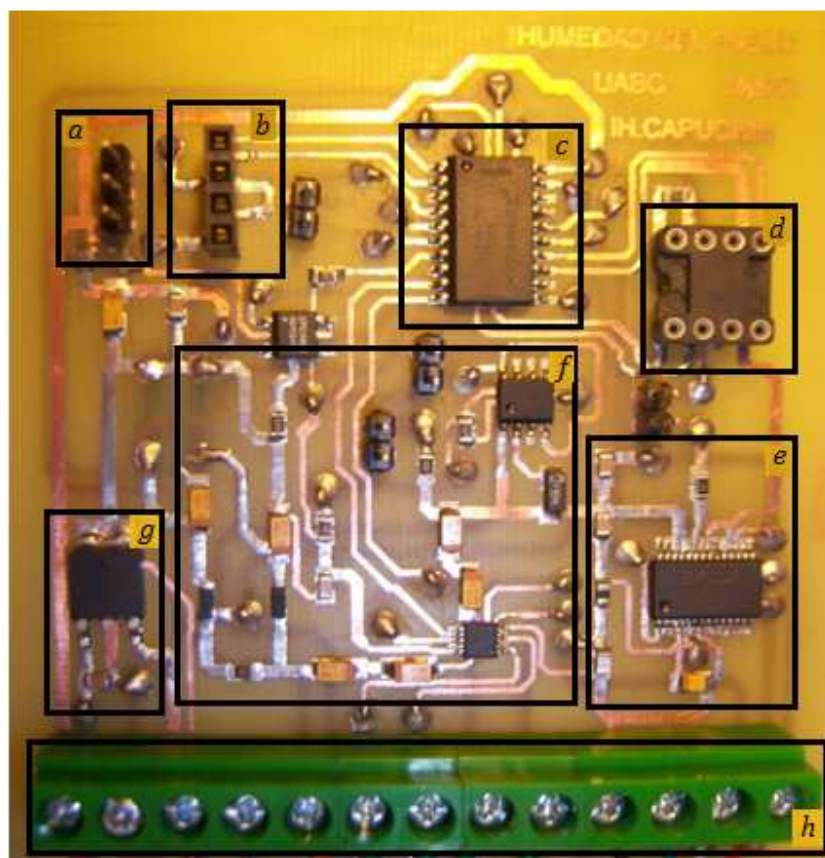


Figura 26. Tarjeta de componentes del instrumento.

En la parte superior izquierda de la figura 26 aparece el selector de voltaje para el microcontrolador (a), estas terminales permiten seleccionar entre dos fuentes de energía para el microcontrolador, ya sea la suministrada por la batería o la que viene del programador por medio del puerto de programación (b). En la parte central superior se encuentra el microcontrolador Freescale (c), al lado derecho de este, está el zócalo para colocar la memoria EEPROM (d). Justo debajo del lugar donde se coloca la memoria EEPROM se encuentra el circuito FTDI (e), encargado de hacer la interface entre el puerto serie del microcontrolador y el puerto USB de la computadora. En la parte central de la tarjeta, así como en la parte central inferior se encuentran los dispositivos necesarios para la excitación del sensor Watermark® (f). En la parte inferior izquierda está colocado el regulador de voltaje (g), por último en toda la parte inferior de la figura están colocadas

las terminales (*h*) para la unión de los cables para el voltaje de alimentación, de los sensores y del conector USB.

El funcionamiento de la tarjeta es al 100 %, aun así las posibilidades de mejorarla son reales. El tamaño de los componentes, el acomodo de los mismos, la forma de realizar los procesos, todas estas son variables totalmente modificables sin que se afecte la idea general del instrumento o que sea necesaria mayor investigación para su funcionamiento.

3.6 El programa para la recuperación de datos y de configuración

El programa para comunicarse con el instrumento de medición de la humedad del suelo fue generado en Matlab, con ayuda de la herramienta de desarrollo grafico “guide” se pudieron generar las diversas ventanas y cada una de sus características. En total son 8 programas encargados de solicitar, convertir, almacenar, generar y graficar los datos obtenidos del instrumento, todo esto controlado desde un programa principal llamado “IMHS.m”. En el apartado 3.3.8 se hace mención de la interrupción por recepción en el puerto SCI utilizada para la comunicación entre estos programas y el IMHS, en las figuras 20, 21 y 22 se describen las dos subrutinas ligadas a esa interrupción.

En la figura 27 aparece el diagrama de flujo para el programa principal instalado en la computadora, una vez iniciado el programa aparece una ventana principal, llamada instrumento de medición de la humedad del suelo, esta ventana tiene tres opciones a escoger, la más pequeña es “Acerca de”, en esta opción se podrá encontrar la información relacionada al instrumento, su creador y el director del proyecto. Existen otras dos opciones, en ellas el usuario podrá seleccionar “Obtener datos”, para recuperar los datos

almacenados por las últimas mediciones, o podrá presionar “Nueva medición”, para reiniciar el microcontrolador con una nueva fecha de medición.

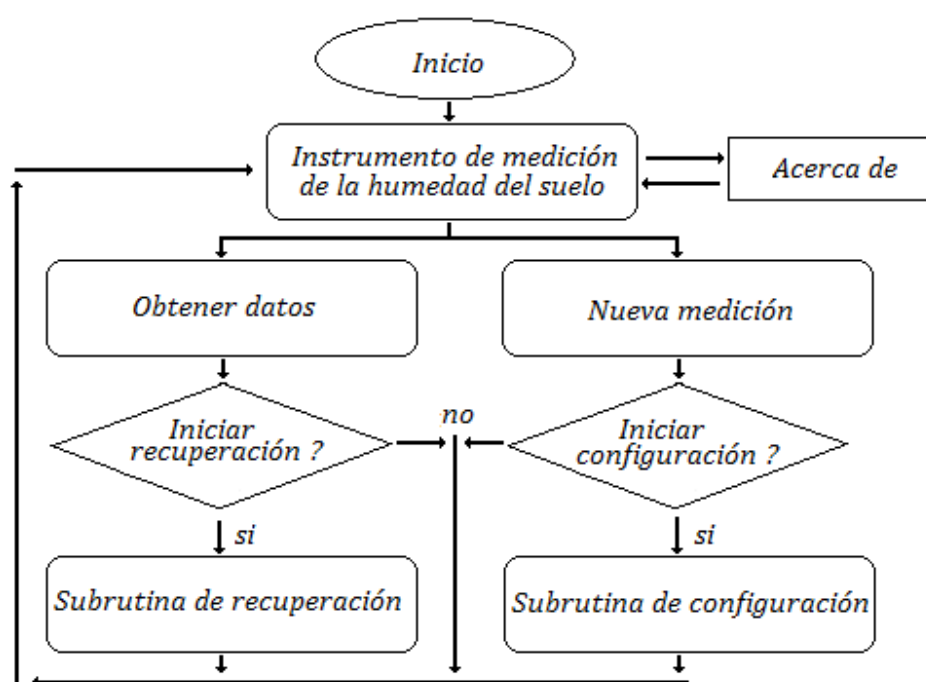


Figura 27. Programa de control principal en la computadora.

La figura 28 muestra que sucede al entrar en la subrutina Recuperación. La Subrutina de Recuperación está diseñada para comunicarse desde un puerto USB (virtual COM) en la computadora, hasta el puerto serie del microcontrolador mediante el circuito de interface FT232 (ver sección 3.4), por lo tanto la comunicación desde los programas será entre puertos serie. Una vez establecida la comunicación entre la computadora y el instrumento, la primera envía la petición para que el μC le envíe los datos almacenados, esta petición genera una interrupción dentro del microcontrolador, la cual activa la subrutina de lectura de datos (ver sección 3.3.1). Cuando el μC termina de leer los datos almacenados en su memoria, envía un código de “final de tarea”, cada vez que la computadora recibe un dato, lo revisa para comprobar que no sea el código de final, si no lo es, toma el dato y lo acomoda en un arreglo de matriz (1 x n) para después generar el

reporte de humedad. Si la computadora recibe el código de terminación de tarea entonces, termina el acomodo de datos y solicita al μC la fecha en la que se realizó la primer medición (Subrutina Configuración), con esta información y con los datos obtenidos del μC se generara el vector de fecha: año, mes, día, hora, minuto y segundo de cada medición, a este vector se le unirá el valor de cada uno de los sensores monitoreados.

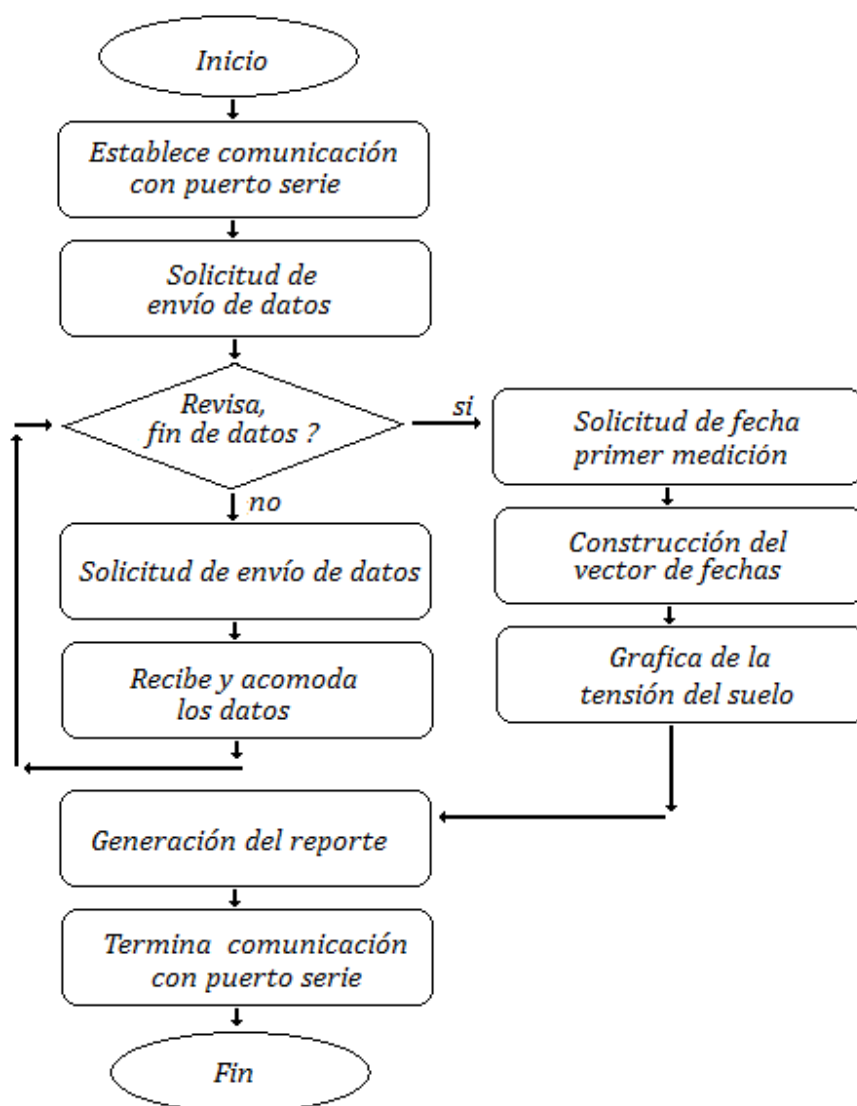


Figura 28. Subrutina recuperación.

Con la información colocada en su lugar, se procede a graficar los datos, la gráfica generada muestra el valor de la tensión del suelo contra la fecha en que fueron medidos los datos además, generara un archivo de registro con la extensión “.doc”, titulado: “IMHS [fecha de generación]”, en este archivo aparecen las fechas de la medición junto a los valores de los sensores de la tensión del suelo. El fin de la comunicación se presenta cuando el programa cierra el puerto serie virtual y borra cualquier rastro de este.

Una vez establecida la comunicación con el μ C (en cuanto a la comunicación, la subrutina de configuración funciona de la misma forma que la subrutina de recuperación), esta subrutina (figura 29) obtiene la fecha de la computadora que es utilizada, la fecha se envía al microcontrolador para ser almacenada, a partir de esta fecha el μ C se configurará para realizar las nuevas mediciones. Cuando termine de grabar la fecha el μ C le avisará a la computadora por medio de un código indicando el fin de esta tarea, a lo cual la computadora le ordenara que se reinicie para comenzar con las mediciones. Al final se termina cerrando y borrando el puerto serie (virtual COM).

Tanto en la opción “Obtener Datos” como en la sección “Nueva Medición”, el funcionamiento es transparente para el usuario, el que lo utilice solo se limitara a seguir las instrucciones generadas por los botones, únicamente tendrá que confirmar al solicitar alguna tarea al instrumento, una vez confirmado que es lo que desea hacer, sólo es necesario esperar para que el microcontrolador y la computadora se comuniquen y realicen la tarea que se les ha pedido.

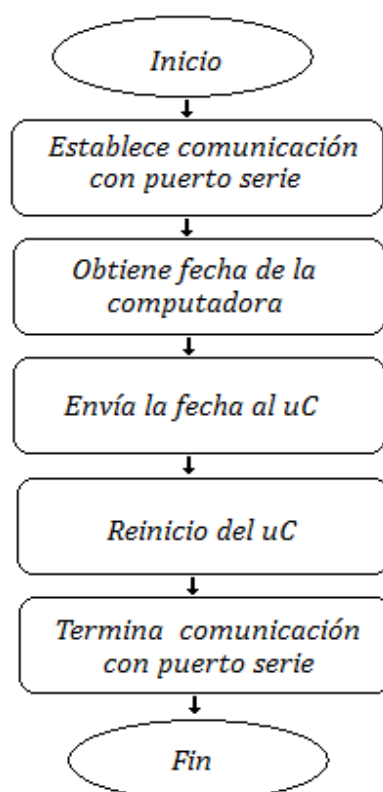


Figura 29. Subrutina de configuración.

3.7 La calibración del instrumento

Para realizar la calibración del instrumento se utilizó el módulo SMX, como ya se ha descrito en la sección 2.6, éste ha sido fabricado para utilizarse con bloques de yeso resistivos y está calibrado para ser utilizado como interface para el sensor Watermark®. De acuerdo a una tabla de valores presentada en sus hojas de datos, se puede relacionar la salida del módulo (voltaje, frecuencia o corriente) con la resistencia del sensor y a su vez por la ecuación 1 (ver sección 2.9) se pueden determinar la tensión del suelo.

Para determinar la ecuación de ajuste del instrumento de medición de la humedad del suelo, se realizaron una serie de mediciones, se compararon los valores obtenidos por el

instrumento contra los obtenidos por el modulo SMX. En la figura 30 se muestra el resultado de estas comparaciones. La gráfica describe la relación datos contra centibars (kPa). Las muestras (datos) fueron tomadas cada 15 minutos durante un periodo de 41 horas. Un grupo de 20 datos equivalen a: 300 minutos o 5 horas continuas de medicion.

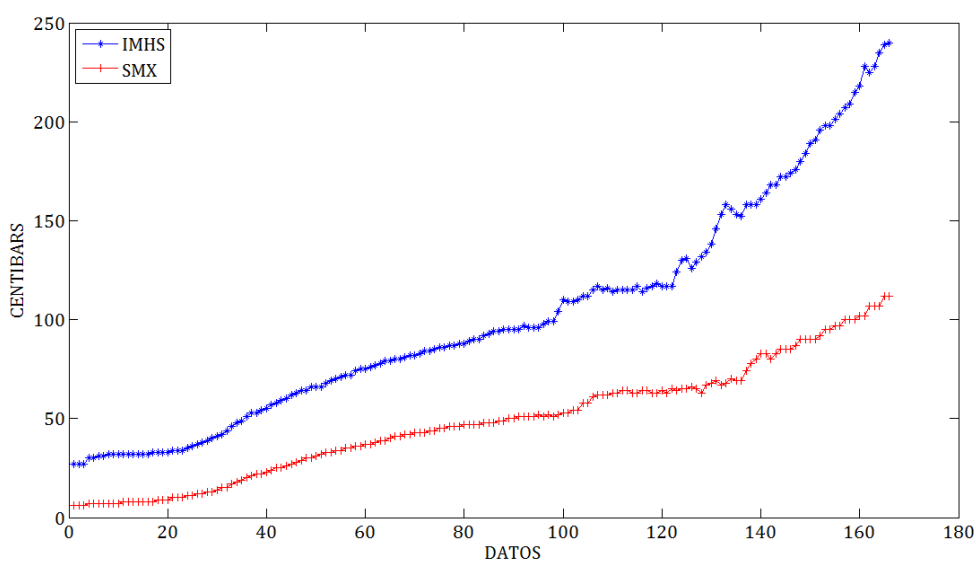


Figura 30. Gráficas del módulo SMX y del IMHS.

Al contar con la gráfica del sistema de referencia y del sistema a referenciar, se puede obtener la gráfica de relación entre los dos dispositivos. La figura 31 muestra la gráfica de relación. En el eje “X” están los valores del instrumento de medición mientras que en eje “Y”, están los valores del modulo SMX, esto significa que a un valor del instrumento de medición corresponde un valor del modulo SMX.

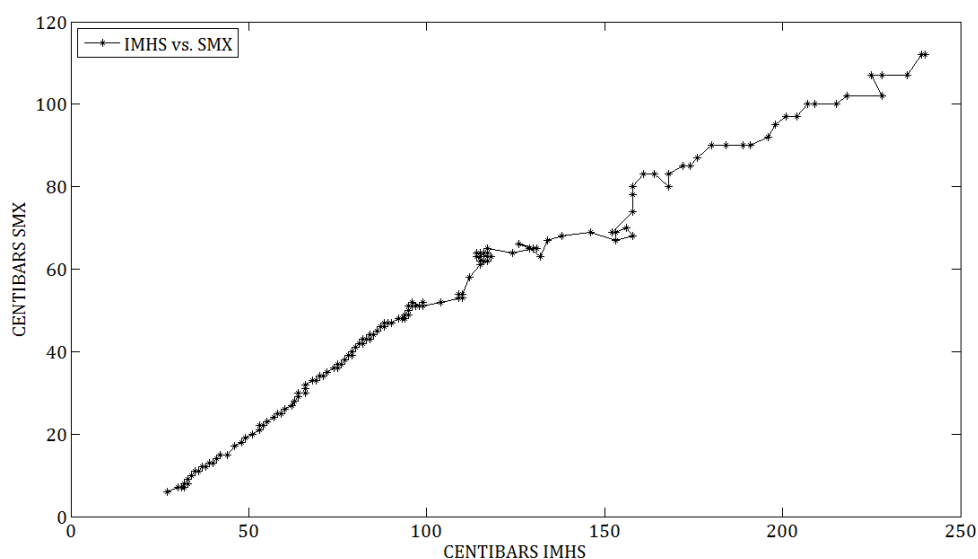


Figura 31. Gráfica del módulo SMX contra el IMHS.

El método matemático de mínimos cuadrados es una herramienta utilizada para determinar la función que representa de mejor forma una curva. Con este método se ajustan los puntos sobre la curva deseada y así se obtiene la ecuación que la representa. Utilizando este método se obtuvieron dos ecuaciones para representar la curva de relación entre el instrumento y el modulo SMX. La ecuación 16 es una ecuación de tercer orden. La ecuación 17, es una ecuación de quinto orden. Obviamente entre más grande sea el orden de la ecuación, más exacta será la ecuación a la curva original.

$$\begin{aligned}
 C_3 &= (0.000005955727622x^3 - 0.003302882609817x^2 + 1.002677463795364x \\
 &- 21.394406846808216) \quad \text{centibars.}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 C_5 &= (-0.000000001949407x^5 + 0.000001310253216x^4 - 0.000320393423885x^3 \\
 &+ 0.033620432605992x^2 - 0.844932930152678x \\
 &+ 9.978241327411519) \quad \text{centibars.}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

En la figura 32 se muestran las curvas generadas por las ecuaciones 16 (Tercer Orden) y 17 (Quinto Orden).

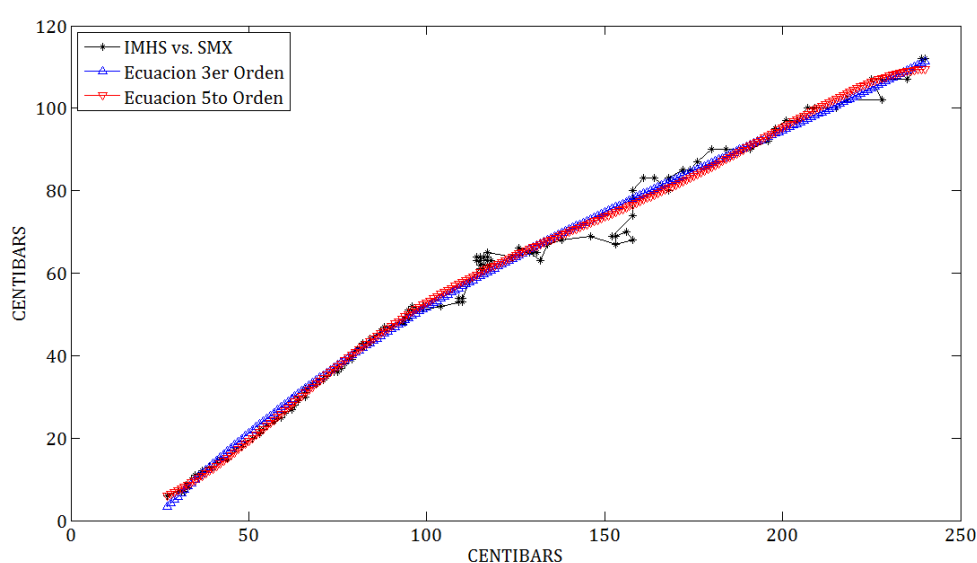


Figura 32. Ecuaciones que representan la gráfica del modulo SMX contra el instrumento de medición.

Como se puede apreciar en la figura 32, la ecuación de tercer orden tiene un inicio diferente a la ecuación original, en el cuerpo de la curva, sigue la figura que esta dibuja, al final termina casi al mismo nivel que la original, en cambio, la curva generada por la ecuación de quinto orden tiene un inicio muy parecido a la curva original, incluso dentro de la primera mitad, está casi en los mismos valores, esto es de gran importancia ya que los valores comprendidos entre los 10 y los 75 centibars son los más importantes para la agricultura, al final tiene un buen termino comparado con la curva original. El hecho de

escoger una ecuación de mayor orden significa una mejor exactitud pero, agrega más operaciones que efectuar, lo cual dificulta su cálculo.

Con una ecuación de quinto orden, se obtiene una grafica satisfactoria, el error es mínimo dentro del rango crítico utilizado en el riego y se ahorra bastante espacio y tiempo el cual sería necesario si se eligiera una ecuación mayor, por lo tanto la ecuación de quinto orden fue escogida para realizar el ajuste de los valores obtenidos por el instrumento.

Es momento de colocar el instrumento en un entorno real, todos los procesos realizados muestran que el prototipo está listo para ser sometido a las pruebas de campo, ahí se podrá comprobar si las decisiones tomadas para el instrumento fueron las adecuadas y si es necesario introducirle mejoras en un futuro.

3.8 Consideración al hacer una nueva medición

La compañía fabricante del sensor Watermark®, hace uso de la relación existente entre la resistencia del sensor (ohms) y la tensión del suelo (kilo Pascales), para determinar la humedad del suelo. Para un suelo saturado se tiene una resistencia de 550Ω y para un suelo extremadamente seco hay un valor de resistencia de 27950Ω .

Es importante conocer como se llego a la relación entre la resistencia y los kilo Pascales. La relación está basada en un cuidadoso estudio de los sensores Watermark®. Se utilizó un ambiente con un suelo y una temperatura controlada en donde se compararon los valores obtenidos de los sensores contra los obtenidos de tensiómetros normales. Finalmente, esta relación queda expresada por la ecuación 1, descrita en el apartado 3.1, esa ecuación es la que se utiliza en este instrumento para determinar la tensión del suelo.

Los tensiómetros normales, sólo registran valores que van desde los 10 kPa hasta los 75 kPa, por lo tanto solo en este rango es cuando la ecuación 1 es más exacta. Se debe recordar que estos valores también son los más críticos para el riego en la agricultura, ya que sobre los 75 kPa se está teniendo un suelo seco y si sigue aumentando significa que el suelo se seca con mayor prontitud, en cambio si el valor es menor a los 10 kPa significa que el suelo está saturado y si continua bajando es que el suelo se está saturando mas.

Como la calibración del sensor Watermark® fue hecha en un tipo específico de suelo, es necesario que el usuario final haga una re-calibración del sensor, en el suelo donde será colocado, esta práctica dará la mejor exactitud al instrumento. Es necesario comparar los valores obtenidos del instrumento contra los valores generados por un tensiómetro normal en el sitio de medición, con el tiempo se podrá obtener la relación aplicable para el tipo de suelo en el cual fue instalado el instrumento.

3.9 Cuando se debe regar

Frecuencia de riego significa: cantidad de tiempo que debe de transcurrir para volver a regar el terreno de cultivo. La frecuencia de riego depende de la cantidad de líquido que es consumido por el cultivo y de la cantidad de humedad disponible en el suelo para la raíz, esto significa que hay una comunión entre el suelo y el producto cultivado. No importa de qué tipo de cultivo se trate, los suelos con pocas capas de tierra cultivable deben de ser regados con mayor frecuencia que los suelos que presentan una mayor densidad de tierra cultivable y son de textura más fina. El consumo de humedad por parte del suelo varía según el tipo de plantación aunque factores como el crecimiento de la planta y los días calurosos, son variables que estarán presentes todo el tiempo.

Durante el periodo de desarrollo de la planta, la frecuencia con que se riega depende en la mayoría de los casos, del grado de crecimiento. El agua debe de ser abundante durante las etapas de germinación y brote, dando como resultado plantas sanas y fuertes. Debe de continuarse con una frecuencia de riego constante, cada vez menos tiempo entre los intervalos, hasta que se llegue a la época en la que la planta florece. Una vez en la etapa de maduración no se requiere que el riego sea aplicado en tiempos tan cortos, estos pueden ser constantes pero con más espacio entre ellos. Una vez que el fruto haya madurado puede que no sea necesario continuar con el riego claro, dependiendo del tipo de plantación que se está monitoreando.

El personal encargado del riego podrá determinar un plan, en el cual se proponga una frecuencia de riego con los datos obtenidos por el instrumento de medición de la humedad del suelo, en este plan se podrán determinar los intervalos de riego para los periodos que demuestren mayor consumo de agua en el cultivo. Como la frecuencia de riego del suelo depende del liquido proporcionado al cultivo y de la retención del suelo cuando el cultivo transpira al máximo, es necesario obtener un promedio de consumo durante este periodo, por lo general, este es el lapso mas critico en el crecimiento del cultivo y en el que por un poco de agua que llegara a faltar se obtendrían serios problemas de rendimiento en el cultivo. Si no se puede suministrar el agua necesaria para un desarrollo optimo de la planta, no se podrá cosechar un buen producto, lo que se logre recuperar del cultivo no será un producto de calidad.

3.9.1 Donde colocar el instrumento de medición

Localizar el sitio apropiado para llevar a cabo la medición de humedad es muy importante. Seleccionar un punto adecuado ayudara a obtener un buen cálculo del nivel de humedad del suelo de cultivo, esto se logra teniendo conocimiento del terreno, combinando el sentido común con algunas experiencias adquiridas a lo largo del tiempo. Una de las

complicaciones que podrían surgir al momento de hacer la elección del sitio donde se colocara el instrumento es que el campo de cultivo no tenga la misma clase de suelo en toda su extensión.

Las mediciones deben de hacerse en el sistema activo de las raíces, colocando el sensor a una distancia igual al borde del pabellón del árbol o bien en el área mojada donde es regado el árbol (ver figura 33). Uno de los sensores de medición debe de estar localizado en la parte superior de la zona donde está la raíz, el otro debe de colocarse a un nivel mucho más bajo (si es posible puede colocarse un segundo sensor a la mitad de la raíz y un tercer sensor al finalizar la raíz aunque, dos sensores son más que suficientes para obtener una medición razonable y aceptable). La profundidad con que son colocados los sensores es determinada por el tipo de huerta, hortaliza o plantación que se está monitoreando (distancias D1 y D2).

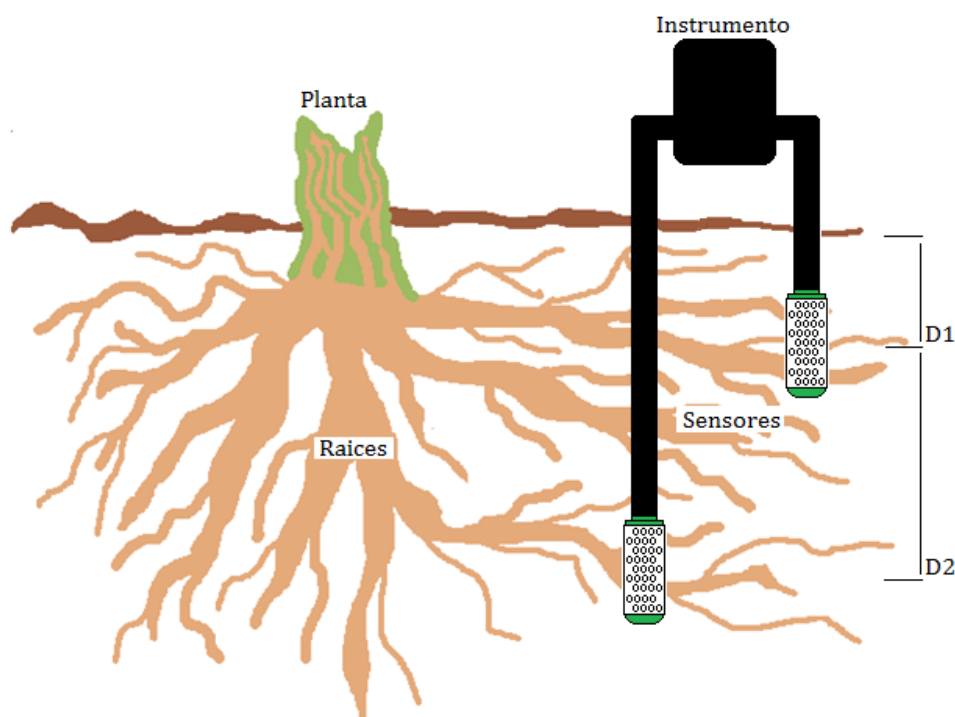


Figura 33. Instrumento instalado junto a las raíces.

Se recomienda colocar uno de los puntos de medición cerca de la zona donde se piensa iniciar el riego [20]. Por lo menos uno de los sitios de localización debe estar al extremo opuesto del terreno para poder determinar que el terreno a sido cubierto por completo y a su vez aseguramos un nivel adecuado de humedad en todo el terreno. Si existe alguna zona critica en el terreno (como: suelo que retiene humedad más tiempo que el resto del terreno o al contrario, suelo que se seca demasiado rápido) entonces, hay que colocar un instrumento en ese lugar. Una práctica apropiada conlleva hacer varias mediciones en cada zona crítica del terreno, y muchas más en las zonas de comportamiento normal en el terreno de cultivo. El tener un sistema de medición eficiente proporcionara al equipo encargado del riego del terreno los datos necesarios para poner en práctica el método más eficiente para mantener el nivel de humedad de todo el terreno lo mejor controlado posible. La información recopilada sirve de guía para variar el volumen y la frecuencia de riego en cada sitio específico del terreno durante los distintos tiempos de crecimiento de la planta.

3.10 De los errores cometidos

Es muy importante mencionar que el sensor de la tensión del suelo se selecciono de acuerdo a sus características de costo, aguante y rango de medición. Sin embargo presento un reto muy amplio el excitarlo de la manera correcta, debido a la falta de información por ser el desarrollo de una compañía privada. Se necesitaron varios meses de investigación para determinar la forma en la que el sensor funcionaba. Al inicio se hicieron algunos experimentos como el de una columna de agua para determinar si así media la presión, también se probó con diversos tipos de excitación. Finalmente se determinó que el sensor funcionaba por un principio de succión y drenado, el sensor absorbe el agua de una manera casi instantánea sin embargo cuando nada lo drena se seca en un tiempo más largo (72 horas aprox.) toda esta información se fue recopilando,

en ocasiones de párrafos pequeños pero que contenían información muy útil y de los diversos experimentos que se hicieron en el laboratorio.

La parte encargada de la de excitación para el sensor Watermark® presento errores que fueron corregidos en el diseño. Como en la tarjeta se utilizan dos sensores de tensión del suelo, fue necesario utilizar un switch analógico para conmutar la excitación entre los sensores. En el primer diseño cada sensor contaba con dos pares de capacitores de bloqueo como protección, sin embargo cuando se hacia el cambio entre un sensor y otro, el sensor que había sido excitado primero, mantenía un voltaje, el voltaje de los capacitores, los cuales no se descargaban ya que quedaban sin conexión que los descargara, sin embargo el voltaje que estaba en estos afectaba la conexión al microcontrolador, de tal forma que el voltaje leído en el convertidor analógico-digital era mucho mayor al que debería de ser, esta medición se mantenía mientras los capacitores se descargaban. Para solucionar este problema se genero un nuevo diseño, en el cual solo se modifico la posición del switch removiendo así capacitores sobrantes además, para asegurar que no había influencia entre sensores se adjunto un tiempo de tolerancia con lo cual se elimino por completo la influencia entre sensores en el mismo circuito.

El programa CodeWarrior es el compilador utilizado para programar el microcontrolador, cuando se genera un nuevo proyecto, de manera automática se cargan las librerías a utilizar. En este proyecto se utilizo la versión 5.9.0 (build 2404) donde la librería que se carga por defecto no soporta las variables del tipo flotante, este error se marca en el compilador pero la explicación no era lo suficientemente clara. Se envió un correo a Freescale con la duda, respondieron con una liga electrónica hacia un problema similar, ahí se encontraba una explicación más detallada. La solución era cargar una nueva librería que soportara variables flotantes, solo era necesario ver las propiedades de las diversas librerías contenidas en la carpeta de ejemplos y seleccionar la más adecuada.

Es de conocimiento para el programador que debe de ser cuidadoso con el uso y combinación de variables por ejemplo, enteros y flotantes. El compilador no cuenta con algún sistema de detección de errores de este tipo, al efectuar algunas operaciones entre entero y flotantes, el microcontrolador reiniciaba diferentes variables, las variables eran globales y tomaban valores aleatorios al efectuarse las operaciones para calcular la tensión del suelo. Lo que sucedía es que el micro en su interior utilizaba demasiada memoria para realizar las operaciones, por lo que tomaba parte de la memoria en donde estaban localizadas las variables globales, estas variables deberían de estar protegidas, sin embargo el microcontrolador las ignoraba, por lo tanto al salir de la operación, las variables globales adquirirían un valor aleatorio diferente. Para solucionar este problema se utilizaron dos programas de encabezado, de esta forma se evitaba declarar cada variable global además, se separaron operaciones, las funciones que involucraban diversas operaciones se descompusieron en operaciones más sencillas que después fueron unidas. Cada operación se efectuaba entre miembros de una sola familia (flotantes con flotantes, enteros con enteros, etc.) y si era necesario que el resultado fuera un entero entonces una vez terminada la operación, el resultado era convertido, no dentro de la operación si no una vez terminada y fuera de esta, o viceversa si era el caso de un flotante u otro tipo de variable. De esta forma la memoria utilizada es menor y el tiempo de cálculo en las operaciones es más rápido.

Un error que se presentó y se desconocía su origen fue el relacionado con el COP Watchdog, de acuerdo a la fuente de reloj que lo alimenta es la cantidad de ciclos que soporta antes de reiniciar al microcontrolador, esto es una protección por si el micro se queda en un ciclo infinito del cual no pueda salir pero, para realizar algunos conteos de tiempo para el instrumento era necesario entrar en ciclos mucho más grandes que la cantidad soportada por este guardián. El compilador no muestra esto como un error ya que es normal el reinicio por decisión del Watchdog pero, si es desconcertante que el

programa en funcionamiento se reinicie sin algún error aparente. Después de algunas pruebas se decidió que la mejor forma de resolverlo era deshabilitando el Watchdog.

Por último, otro error que se presentó fue la anidación de interrupciones, este tipo de microcontroladores no permiten hacer uso de la anidación para funcionar, esto es: no se puede ejecutar dos interrupciones al mismo tiempo o una interrupción dentro de otra interrupción. Como parte del programa se requería efectuar algunas operaciones mientras se efectuaba más de una interrupción, se necesitó hacer uso de un poco de ingenio para resolverlo. Lo más sencillo fue utilizar algunas variables que eran modificadas cuando se entraba a una interrupción, después, al entrar en la segunda interrupción se cambiaba otra variable, así que una vez afuera de las interrupciones se comprobaban los valores de las variables, si eran los esperados entonces se efectuaban las tareas indicadas y todo esto sucedía ya fuera de las interrupciones lo cual no generaba conflicto alguno.

Capítulo IV

Resultados

4.1 Resultados en el laboratorio

A lo largo de este capítulo se hará referencia al instrumento de medición de la humedad del suelo con la abreviatura IMHS. Para comprobar que la calibración y el funcionamiento del IMHS son los correctos, se le puso a prueba en el laboratorio, tratando de controlar las variables envueltas en el funcionamiento del sensor de tensión del suelo.

Se comparó la grafica de referencia generada por el módulo SMX y la gráfica de tensión generada por el IMHS.

Si el sensor de tensión estuviera enterrado, sin importar que fuera un pequeño espacio de prueba, sería difícil controlar como absorbe o como drena el agua en su interior, para tener mayor control sobre éste proceso se humedeció el sensor durante 12 horas y después se dejo secar en un cuarto con ventilación constante y muy poca humedad.

Como no era posible intercambiar un sensor entre los dos equipos que se utilizaron en la prueba, fue necesario utilizar dos sensores nuevos. Debido a la composición de los sensores, su reacción ante la humedad no es exactamente igual, presentan ligeras variaciones.

La ecuación seleccionada para que fuera utilizada por el IMHS es la de quinto orden (ecuación 17). Las primeras pruebas en laboratorio fueron hechas para calibrar el instrumento, ésta última prueba fue hecha para comparar su funcionamiento en condiciones controladas.

En la figura 34 se muestran la gráfica obtenida al comparar los resultados del IMHS contra los del módulo SMX. La duración de esta prueba de laboratorio fue de 60 horas, tomando muestras cada 22 minutos. Los “datos” que aparecen en la parte inferior de la grafica son las muestras obtenidas, un dato es una medición hecha, cada 20 datos (o muestras) equivalen a: 440 minutos o 7.3 horas de medición.

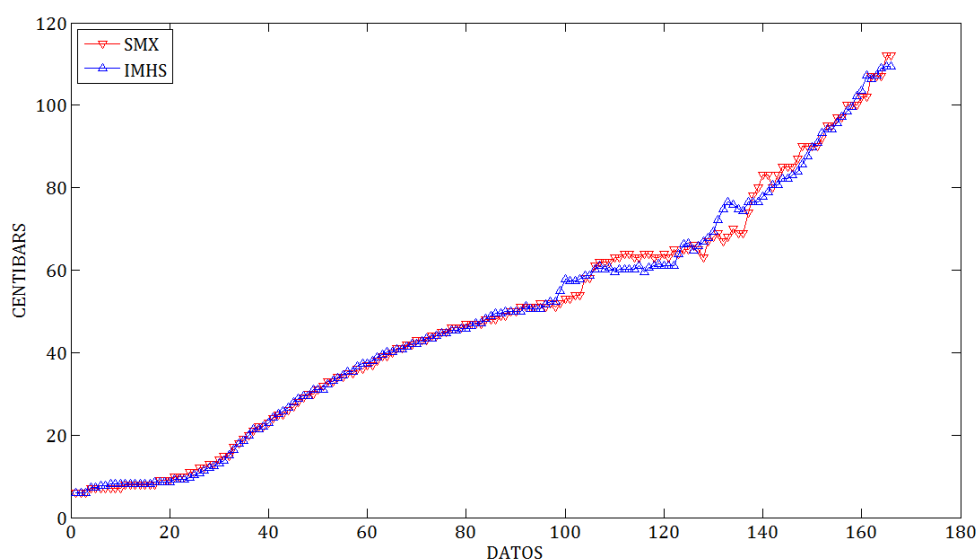


Figura 34. Prueba de funcionamiento en el laboratorio.

De acuerdo a la gráfica, la curva del instrumento y la curva del módulo son muy parecidas, el error mayor se aprecia en la parte final de las curvas, con un valor aproximado del 8 %, aun así, la variación está fuera del rango crítico para el riego en la agricultura.

4.2 Resultados en el campo

Para comprobar el funcionamiento del instrumento de medición en un entorno real se procedió a colocarlo en el campo. Fue instalado en el Valle de Guadalupe en Ensenada B.C. México, en los viñedos propiedad de la empresa Monte Xanic S. de RL.

El IMHS fue colocado en la sección B del lote 8, justo bajo un gotero de riego. La separación entre los sensores de tensión instalados en el suelo es de 30 cm. y la profundidad es de 60 cm. aproximadamente, en la figura 35 se puede apreciar el IMHS instalado.



Figura 35. Instrumento midiendo en el campo.

Para que los sensores estuvieran completamente inmersos en el entorno del suelo, se humedecieron por un espacio de 4 horas después, se procedió a instalarlos en el suelo y se les dejó aproximadamente nueve días, hasta que se iniciaron las mediciones de prueba.

Las primeras mediciones fueron hechas para comparar los valores obtenidos por el IMHS y por el módulo SMX en el campo. Los resultados se muestran en la gráfica de la figura 36, aquí aparecen los datos de la medición efectuada en 60 horas continuas. Las muestras se tomaron cada 15 minutos.

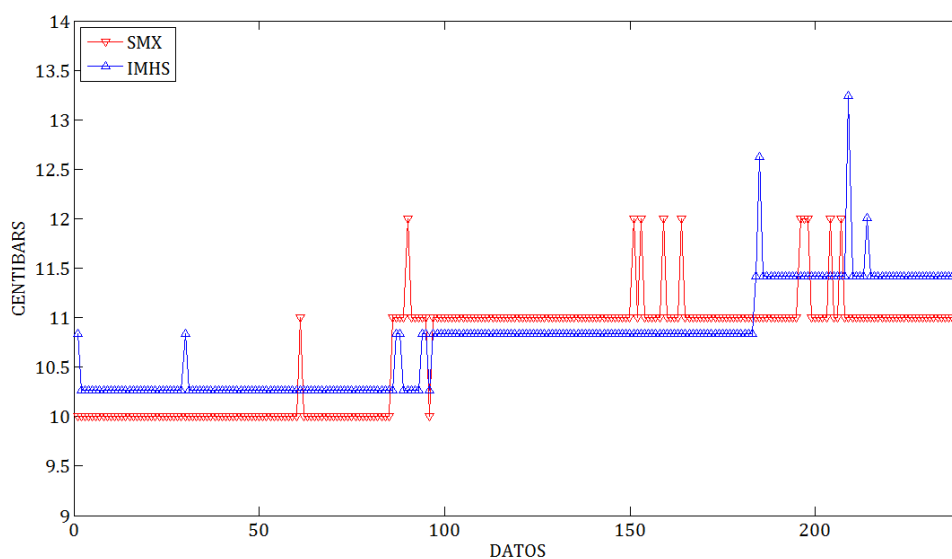


Figura 36. Prueba de funcionamiento en el campo.

Los datos que aparecen en la parte inferior de la grafica son las mediciones hechas por cada uno de los dispositivos, esto es: un dato es equivalente a una muestra que fue tomada o a una medición que fue hecha. Cada 50 datos equivalen a: 750 minutos o a 12.5 horas de medición continua.

Se observa en la figura 36 que el módulo y el instrumento presentan una variación pequeña entre ellos a pesar, de ser amplio el tiempo de comparación, la diferencia más notable es de 2.3 centibars, la más pequeña es de 0.2, por lo tanto para este intervalo de prueba el error más grande fue del 1.9 % . De acuerdo a la figura 32 el margen de error para los valores comprendidos entre 10 y 14 centibars es de 1% aproximadamente. Es importante mencionar que el error de medición va acompañado de un error por redondeo

debido a que solo se utilizan cantidades enteras para ser almacenadas en la memoria del instrumento.

Si se compara la grafica de la figura 34 con la mostrada en la figura 36 tal vez cause controversia el hecho de que, aunque es el mismo tiempo de medición, hay diferencia entre los datos mostrados en las graficas. Ésta marcada diferencia es debido a que en el suelo, los sensores reaccionan de forma distinta al entorno que es controlado en el laboratorio. 60 horas de medición en el suelo no son suficientes para que el sensor se drene por completo además, si el suelo ya se encuentra húmedo obviamente el sensor entrara en un equilibrio con éste, por lo tanto se secara a la velocidad que el mismo suelo lo hace.

4.2.1 En el campo de manera continua

Una vez hechas las mediciones de prueba y comparación se le dio mantenimiento al IMHS, los sensores de tensión se dejaron instalados en el campo y solo se retiro la parte superior del instrumento, con esto no se perdió la interacción que ya se había formado entre los sensores y el suelo a su alrededor. Diez días después se reinstalo el IMHS, esta vez para que utilizara los dos sensores de tensión y fueran comparados entre sí, ésta fue una prueba de continuidad.

En la figura 37 se muestran los datos obtenidos por los dos sensores instalados en el campo, el periodo de medición duró aproximadamente 45 días, tomando muestras cada 15 minutos. Debido a lo accidentado del terreno uno de los sensores recibe más agua que otro, aunque el gotero se encuentra en medio de los dos. Otro factor que influyó en la recepción de agua de los sensores es el tipo de suelo, la separación entre los sensores es de 30 cm. sin embargo, la composición del suelo que rodea al sensor 1 es más arenosa mientras, que el suelo que rodea al sensor 2 es más duro o compacto.

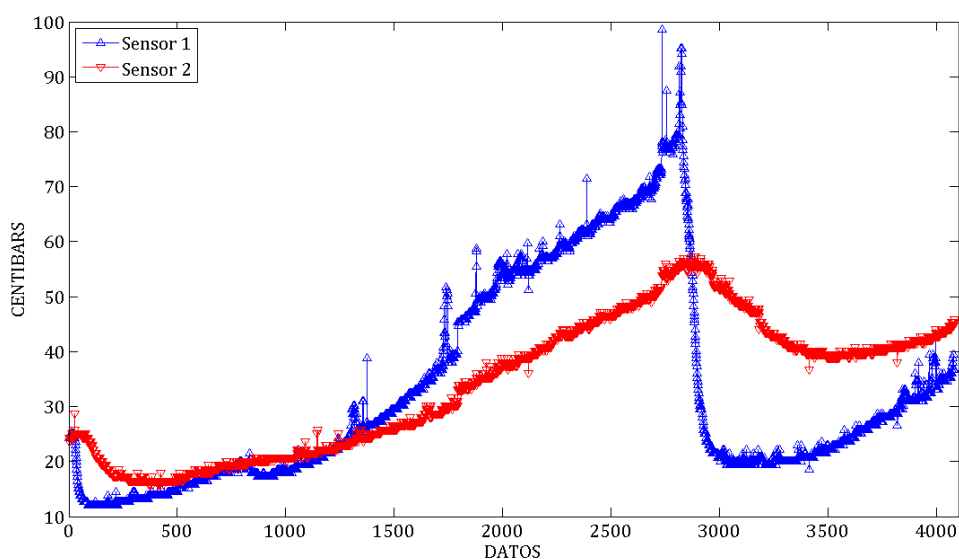


Figura 37. Prueba extensa de funcionamiento en el campo.

En la parte inferior de la gráfica, aparecen los datos tomados por el IMHS, estos datos son las muestras tomadas por el instrumento, cada dato es igual a una muestra. Un grupo de 500 datos es equivalente a: 7500 minutos, 125 horas o 5.2 días de medición continua aproximadamente. Los datos mostrados en la figura 43 son, reales tomados un mes después de que los sensores fueron instalados, cubriendo un periodo desde el 29 de agosto hasta el 16 de octubre del 2009. Los resultados obtenidos en la figura 37 se explicaran en las siguientes figuras, se dividirán en tres secciones, utilizando grupos de 15 días aproximadamente, para un mejor entendimiento.

Aunque el IMHS funcionó de manera correcta, el tiempo de vida de una batería en él, es de aproximadamente 120 horas continuas. Por lo tanto, cada cinco días era necesario realizar el cambio de la batería. Cuando la batería empieza a agotarse aparecen picos en la grafica de tensión del suelo con valores de centibares superiores al promedio que mantenía la grafica hasta antes de que estos valores aparecieran, esto sucede justo antes de que el instrumento se apague y deje de registrar más mediciones.

En la figura 38 se aprecian los primeros datos de comparación entre los dos sensores de tensión, analizando las primeras 200 muestras (datos) se puede apreciar el riego hecho en el campo, el sensor 1, como ya se ha explicado es mas susceptible al agua de riego, en la figura se nota este hecho, incluso entre las muestras numero 800 y 1000 se nota un pequeño descenso en el valor de los centibars del sensor 1, esto fue debido a que por un par de horas se abrió el riego en el lote, después de esto continua secándose el suelo. El sensor 2 muestra una mayor constancia en sus mediciones, refleja el riego efectuado pero en un lapso mayor, esto significa que se humedece más lentamente y se seca a una velocidad constante, el suelo en el cual está contenido el sensor 2 es menos poroso que el suelo del sensor 1, por esta razón el sensor 1 tiene cambios mas rápidos.

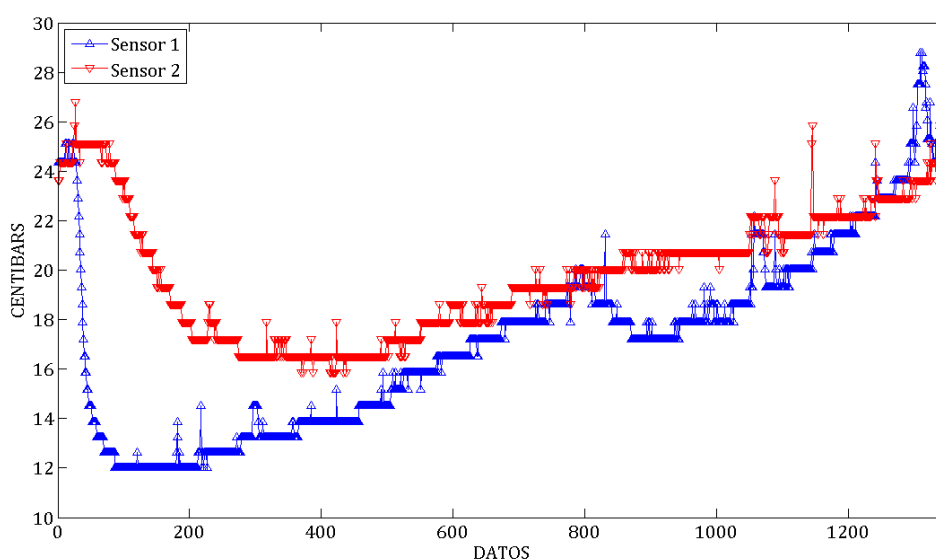


Figura 38. Prueba de funcionamiento en el campo sección 1.

La figura 39 muestra los datos obtenidos en los días de medición 15 al 30 aproximadamente. Aquí se puede apreciar como aumentan los centibars conforme van aumentando las muestras tomadas. El sensor 1 presenta un grupo de variaciones en las muestras 1700, posiblemente estas se deban a que la batería estaba cumpliendo con su ciclo de vida, lo mismo sucede justo antes de las muestras 2200. Es interesante notar que

aunque estos valores están fuera del rango promedio (en especial en las muestras 1700), justo antes y justo después de esta variación, las muestras se mantienen en un valor creciente constante, por lo tanto aunque estas perturbaciones aparecen, el usuario puede tener una idea real y razonable de la tensión en el suelo. Tanto en el sensor 1 como en el sensor 2 aparece un salto de datos alrededor de la muestra 1800, el instrumento se quedo sin energía, se perdieron alrededor de 30 horas de información, sin embargo en la grafica se puede apreciar como los valores continúan creciendo, el suelo siguió secándose.

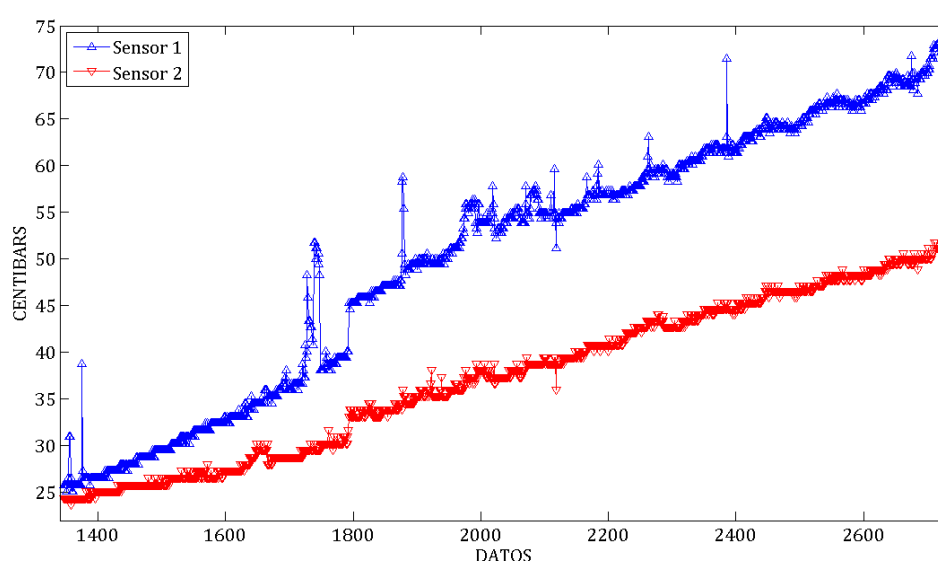


Figura 39. Prueba de funcionamiento en el campo sección 2.

En la figura 40 se aprecia la última etapa de las muestras tomadas por el instrumento, en las primeras 200 (2800-3000) muestras se ve claramente que hubo un riego, como en las graficas anteriores, el primero en reaccionar es el sensor 1, a partir de la muestra 3000 y hasta la 3400 el sensor 1 se mantienen con una humedad constante mientras que el sensor 2 se sigue humedeciendo. A partir de la muestra 3400, ambos sensores empiezan a secarse, si se compara con la figura 38 lo más probable es que se repita el proceso de secado. Así se mantendrá la curva de tensión (con altas y bajas provocando estrés en la planta) hasta el tiempo en el cual se incrementa el riego en la vid.

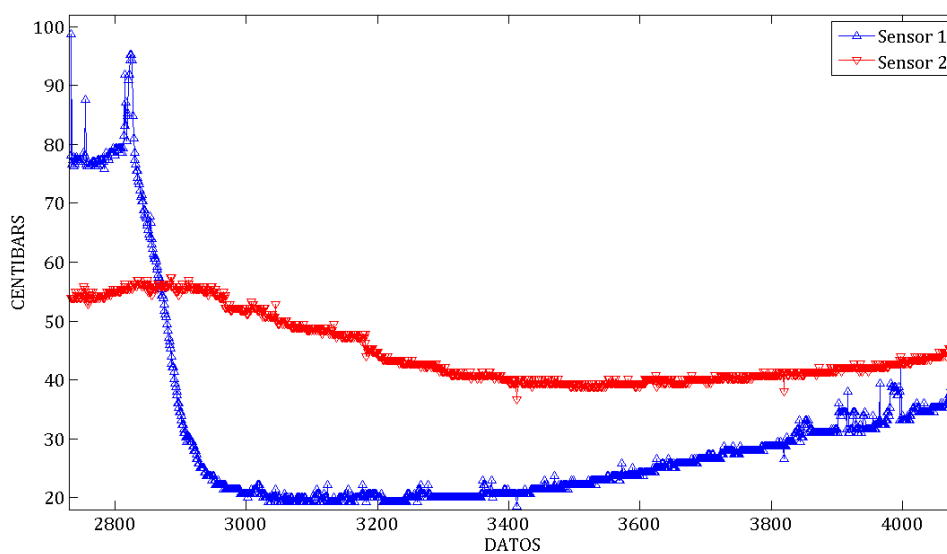


Figura 40. Prueba de funcionamiento en el campo sección 3.

En la parte inferior de cada una de las figuras anteriores (38, 39 y 40) aparecen los datos, éstos son las muestras tomadas por el instrumento, una muestra equivale a un dato. Cada 200 muestras (datos) equivalen a 50 horas de medición.

Capítulo V

Conclusiones

5.1 Conclusiones

Para diseñar y construir el instrumento de medición de la humedad del suelo, se instrumentó un transductor que mide la tensión del suelo, se configuró y programó un microcontrolador capaz de efectuar cada uno de los procesos del instrumento, también, se implementaron algunos elementos externos para darle al instrumento un funcionamiento adecuado tales como: una batería como fuente de alimentación, una interface para conexión USB con la computadora, un programa de manejo y configuración en la computadora, y una memoria EEPROM para un almacenamiento mayor de datos.

Hecho lo anterior, se concluye que: se cumplió el objetivo del instrumento. También, después de varias pruebas de laboratorio y campo, en donde se comprobó y comparó el funcionamiento del instrumento, se pudo demostrar el cumplimiento de la hipótesis generada al inicio de este trabajo, sí es posible construir un instrumento capaz de registrar la tensión del suelo, con esta información se puede determinar de manera indirecta la humedad presente en el suelo.

El instrumento de medición de la humedad del suelo es totalmente configurable a las necesidades del agricultor y puede ser utilizado casi en cualquier cultivo. El software del instrumento es manejable y el instrumento es adaptable a las necesidades específicas del usuario final.

El trabajo desarrollado en la presente tesis sienta las bases para utilizar otro tipo de sensores resistivos, el circuito excitador aquí descrito es completamente utilizable en casos donde es necesaria una fuente de corriente alterna para no dañar los sensores, por lo tanto puede ser utilizado en: bloques de yeso, puntas de prueba por inserción, etc.

Debido a la privacidad que maneja el fabricante del sensor de tensión del suelo, la información acerca del sensor Watermark® contenida en esta tesis fue recopilada de diversos informes, reportes, tesis, libros y sitios web. Esta información específica y actual, puede ser utilizada como referencia en futuros trabajos relacionados con el funcionamiento de dicho sensor.

La selección especialmente hecha de los componentes finales del instrumento, de los circuitos internos, se vio demostrada con el funcionamiento en el campo del instrumento, después de estar expuesto en la intemperie por más de 70 días soportando temperaturas superiores a los 40° centígrados e inferiores a los 7° centígrados, al paso de tractores y personas en la época de cosecha, al riego y el polvo del campo, el instrumento continua trabajando.

Analizando el funcionamiento del instrumento que se diseñó y construyó, se puede concluir que se produjo un dispositivo capaz de competir con equipos que están actualmente en el mercado y que tienen un costo más elevado que el desarrollado en éste trabajo.

El instrumento funciona de manera correcta, sin embargo debido a que la fuente de alimentación es una batería, ésta se agota rápidamente. Tomando muestras cada 15 minutos, el aparato funciona por aproximadamente 120 horas continuas. Por lo tanto es necesario implementar una etapa auxiliar de energía.

5.2 Mejoras propuestas

Para solucionar el problema de energía, lo ideal sería colocar en el instrumento una batería del tipo recargable, con una celda solar para recargar la batería en el campo, obviamente esto implica la introducción de programación adicional para controlar los tiempos de carga y de trabajo del sistema, al implementar esta solución se tendría un instrumento muestreando datos 24 horas por 7 días a la semana.

El instrumento utiliza una conexión de cable USB para enviar y recibir información de una computadora, este cable puede ser eliminado utilizando un módulo de comunicación inalámbrica, esta mejora ayudaría al usuario, no sería necesario abrir el instrumento o estar cerca de él para obtener los datos y configurar una nueva medición en el instrumento.

Encontrar el empaque correcto para evitar los daños por el clima, una caja que aisle los componentes internos para que no sufran daño al estar expuestos durante los 365 días del año a los cambios de temperatura y humedad.

Como se utiliza un microcontrolador para la funciones internas del instrumento, este puede ser reconfigurado para desarrollar un instrumento más complejo, acondicionando mas sensores (de: radiación solar, temperatura ambiente, humedad ambiente, lluvia, velocidad del viento, etc.) se desarrollaría un instrumento multifuncional que obtendría información útil para conocer el estado y momento ideal para el riego de una plantación.

Utilizar una red de sensores, nodos de comunicación que obtengan y envíen los datos que recopilen en tiempo real a una central de procesamiento, para que la información sea presentada en una pantalla justo en el momento que es muestreada.

Capítulo VI

Bibliografía

6.1 Bibliografía consultada

[1] SILVA, Guadalupe. “La vendimia. La alegría de la cosecha (Baja California)”. *mexicodesconocido.com.mx* [En Línea]. [Fecha de Consulta: Noviembre 2007]. Disponible en: <http://www.mexicodesconocido.com/espanol/cultura_y_sociedad/actividades_economicas/detalle.cfm?idpag=2822&idsub=81&idsec=17>.

[2] MAGAN, Héctor, et al. “Sensor de Humedad del Suelo de Bajo Coste para Control de Regadíos”. *iberchip.org* [En Línea]. [Fecha de Consulta: Agosto 2007]. Disponible en: <<http://www.iberchip.org/VII/cdnav/pdf/21.pdf>>.

[3] Servicio de Conservación de Suelos (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América). RELACION ENTRE SUELO-PLANTA-AGUA. México D.F. Editorial Diana S.A. 1972. 99 páginas. ISBN 968-13-1033-0.

[4] SCIUTTO, Eduardo, Mascareña, Juan. “Sistema automático de control de invernaderos – Proyecto Calafate –”. Octubre 2000. [Fecha de Consulta: Diciembre 2007]. Disponible en: < <http://www.invernadero.8m.net/index.html>>.

[5] ALLEN, Richard. "Instructions for attaching soil water resistance blocks to the Onset Hobo H-08 4-Channel External Soil Moisture Logger". *New Mexico Hydrologic Information NMSU* [En Línea]. Diciembre 1999. [Fecha de Consulta: Julio 2008].

Disponible en: <<http://hydrology1.nmsu.edu/hydrology/watermark-soil%20sensors/Instructions%20for%20attaching%20soil%20water%20resistance%20blocks%20to%20the%20Onset%20Hobo%20H-08%204-Channel%20External%20Soil%20Moisture%20Logger.htm>>.

[6] Watermark Monitor Data Loggers. Irrometer Co. [Fecha de Consulta: Enero 2008].

Disponible en: <<http://www.irrometer.com/loggers.html>>.

[7] SMX: soil moisture transmitter. EME Systems. [Fecha de Consulta: Junio 2008].

Disponible en: <<http://www.emesystems.com/smx.htm>>.

[8] Data Loggers from Spectrum Technologies, Inc. Spectrum Technologies, Inc. 2009.

[Fecha de Consulta: Febrero 2009]. Disponible en:

<http://www.specmeters.com/datalogger_index.html>.

[9] Dataloggers & Data Acquisition Systems: Also known as Data loggers, Data

Recorders, Data Acquis. Campbell Scientific, Inc. 2009. [Fecha de Consulta: Febrero 2009].

Disponible en: <<http://www.campbellsci.com/dataloggers>>.

[10] "ECA Lección 4 Fase líquida del suelo. Retención de agua". [En Línea]. *Área de Edafología y Química, Facultad de ciencias*. UNEX. [Fecha de Consulta: Septiembre 2009].

Disponible en: <<http://www.unex.es/edafo/ECAP/ECAL4FLRetAgua.htm>>.

[11] "WATERMARK SOIL MOISTURE SENSORS: Characteristics and Operating Instructions". [En Línea]. *Chard, Julie*. [Fecha de Consulta: Abril 2008]. Disponible en: <<http://www.usu.edu/cpl/PDF/WatermarkOperatingInstructions2.pdf>>.

[12] IRROMETER COMPANY, INC. IRROMETER WATERMARK. Instrucciones para el servicio y la utilización del medidor y sensores Watermark®. Riverside, CA. USA. 8 páginas.

[13] Irrrometer Soil Moisture Sensors. Irrrometer Company. [Fecha de Consulta: Febrero 2008]. Disponible en: <<http://www.irrometer.com/sensors.html#wm>>.

[14] LMC555 – CMOS Timer. National Semiconductor Corporation. Disponible en: <<http://www.national.com/mpf/LM/LMC555.html>>.

[15] PALLAS A. Ramón. SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SENAL. 4rta ed. México D.F. Alfaomega Grupo Editor S.A. 2007. 480 páginas. ISBN 978-970-15-1231-9.

[16] S08QE Product Summary Page. Freescale Semiconductor, Inc. [Fecha de Consulta: Enero 2008]. Disponible en: <http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=S08QE&nodeId=01624684491437>.

[17] MCP9700. Microchip Technology Inc. 2009. [Fecha de Consulta: Marzo 2008]. Disponible en: <<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en022289>>.

[18] 25AA1024. Microchip Technology Inc. 2009. [Fecha de Consulta: Enero 2009]. Disponible en: <<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en531415>>.

[19] FTDI Products. Future Technology Devices International Ltd. 2009. [Fecha de Consulta: Marzo 2008]. Disponible en:
<<http://www.ftdichip.com/FTProducts.htm#FT232R>>.

[20] "IRROMETER Herramientas simples para el optimo regadío en el mundo. Manual del Diseño para los Sensores de la humedad de la Irrigación Agrícola". [En Línea]. Riverside CA. *Irrometer Company, Inc.* Marzo 2002. [Fecha de Consulta: Abril 2008]. Disponible en:
<<http://www.irrometer.com/pdf/Ag%20Design%20Guide-Espanol.pdf>>.

[21] GOTTFRIED, Byron. PROGRAMACION EN C. 2da ed. Madrid, España. McGraw-Hill. 2005. 659 páginas. ISBN 84-4819846-80-1.

[22] PÄRT-ENADER, Eva, Sjöberg, Anders. THE MATLAB 5 HANDBOOK. Harlow, United Kingdom. Pearson Education. 1999. 559 páginas. ISBN 0-201-39845-1.

[23] FERREIRA V. Juan. MICROCONTROLADORES MOTOROLA - FREESCALE: Programación, familias y sus distintas aplicaciones en la industria. México D.F. Alfaomega Grupo Editor S.A. 2008. 368 páginas. ISBN 978-970-15-1329-3.

[24] ANGULO U. José, et al. MICROCONTROLADORES <<PIC>>. Diseño práctico de aplicaciones. SEGUNDA PARTE: PIC 16F87X. Madrid, España. McGraw-Hill. 2000. 232 páginas. ISBN 84-841-2858-3.

[25] ESPINOSA M. Rafael. DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION DE UN TENSIOMETRO. Tesis (Ingeniero Agrónomo Especialista en Irrigación). Chapingo, México. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación. 1992. 111 páginas.

[26] Welcome to the Electronics Club. Hewes, John. 2009. [Fecha de Consulta: Enero 2009]. Disponible en: <<http://www.kpsec.freeuk.com/index.htm>>.

[27] “Miscellaneous Methods for Measuring Matric or Water Potential”. [En Línea]. Scanlon, Bridget. [Fecha de Consulta: Junio 2008]. Disponible en: <http://www.beg.utexas.edu/enviroqlty/vadose/pdfs/Scanlon_Andraski02.pdf>.

[28] Using granular matrix soil moisture sensors. Mancuso, Chuck. 2005. [Fecha de Consulta: Noviembre 2008]. Disponible en: <<http://aecdatalog.com/irrigation/gms/>>.

[29] 257-L Watermark® Soil Matric Potential Block. Campbell Scientific. 2009. [Fecha de Consulta: Enero 2009]. Disponible en: <<http://www.campbellsci.com/257-l>>.

[30] Freescale Forums. Freescale Semiconductors, Inc. 2004 – 2009. [Fecha de Consulta: Marzo 2008]. Disponible en: <<http://forums.freescale.com/freescale/>>.

[31] MATLAB – Documentation –. The MathWorks, Inc. 1984 – 2009. [Fecha de Consulta: Marzo 2009]. Disponible en: <[http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/index.html?/access/helpdesk/help/techdoc/&http://www.google.com.mx/search?hl=es&q=matlab+help+online&meta=&aq=2&oq=matlab+help+](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/index.html?/access/helpdesk/help/techdoc/&http://www.google.com.mx/search?hl=es&q=matlab+help+online&meta=&aq=2&oq=matlab+help+>)>.

Apéndice A

Manual de Funcionamiento del Instrumento de Medición

En este Apéndice se muestra el manual de funcionamiento para el instrumento de medición de la humedad del suelo. Aquí se describe en forma general como instalar el equipo y se dan algunas recomendaciones de uso. Se explica el significado de las medidas obtenidas y se describe el contenido en el interior del instrumento.

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO



“IMHS”

MANUAL DE USUARIO

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

JULIO, 2009

Contenido

	Página
Introducción.....	98
Descripción del instrumento	100
Especificaciones.....	103
Instalación del Software	104
Controlador USB.....	104
Ubicación del Programa.....	106
Terminales de Conexión Externas	107
Conexión a la Computadora	109
Utilización del Software de Configuración	110
Como Obtener los Datos Almacenados	113
Como Instalar el instrumento en el suelo.....	116
Indicadores de Funcionamiento.....	118
Donde Instalar el instrumento	120
Acerca de	123
Terminales de Conexión Internas.....	124
Referencias	126

Lista de figuras

	Página
Figura 1 Sensor de Temperatura.	101
Figura 2 Sensor de humedad del suelo.	101
Figura 3 Interior del Instrumento de Medición.	102
Figura 4 Instrumento de Medición.	102
Figura 5 Conexión para un Sensor de humedad.	107
Figura 6 Conexión para el Sensor de Temperatura.	108
Figura 7 Conexión a la Computadora.	109
Figura 8 Ventana principal del programa IMHS.	110
Figura 9 Ventana de confirmación para nueva configuración.	111
Figura 10 Ventana de alerta para no desconectar el equipo.	111
Figura 11 Ventana de aviso del fin de la nueva configuración.	112
Figura 12 Ventana de confirmación en la recuperación de datos.	113
Figura 13 Ventana de alerta para no desconectar el equipo.	114
Figura 14 Ventana de aviso del fin de la recuperación de datos.	114
Figura 15 Ejemplo de reporte de datos.	115
Figura 16 Indicadores Externos.	118
Figura 17 Instrumento instalado junto a hortalizas.	120
Figura 18 Instrumento instalado junto a las raíces, riego por goteo.	121
Figura 19 Instrumento instalado junto a las raíces, riego por micro-aspersor.	122
Figura 20 Ventana de información.	123
Figura 21 Nombre de las Terminales de Conexión.	124

Introducción

El mejor y más eficaz método para iniciar el riego en un cultivo es: medir o calcular el nivel de humedad en el suelo. Al conocer la cantidad de humedad contenida en el terreno el personal encargado de la plantación puede calcular y determinar con mucha certeza cuando es necesario iniciar el riego.

La frecuencia con que se efectúa el riego depende de la cantidad de líquido que es consumido por el cultivo y de la cantidad de humedad disponible en el suelo para la raíz, esto significa que hay una unión entre el suelo y el producto cultivado. Cuando se trata de suelos con pocas capas de tierra cultivable estos deben de ser regados con mayor frecuencia, más que los suelos que presentan una mayor densidad de tierra cultivable y son de textura más fina. El consumo de humedad por parte del suelo varía según el tipo de plantación aunque factores como el crecimiento de la planta y los días calurosos, son variables que estarán presentes todo el tiempo.

También, la frecuencia con que se riega una plantación depende en la mayoría de los casos, del grado de crecimiento de su producto. El agua debe de ser abundante durante las etapas de germinación y brote, dando como resultado plantas sanas y fuertes. Debe de continuarse con una frecuencia de riego constante, dejando cada vez menos tiempo entre los intervalos, hasta que se llegue a la época en la que la planta florece. Una vez en la etapa de maduración no se requiere que el riego sea aplicado en tiempos tan cortos, estos pueden ser constantes pero con más espacio entre ellos. Una vez que el fruto haya madurado puede que no sea necesario continuar con el riego claro, dependiendo del tipo de plantación que se está monitoreando.

Muchas veces el agricultor o el encargado del riego no ven necesario adquirir un instrumento para Medir la humedad del suelo. Por ejemplo, ellos pueden decidir guiarse

por la apariencia de la planta o del cultivo en general, ya que el cultivo puede llegar a mostrar hasta cierto punto en que momento necesita de el riego. Sin embargo este tipo de técnica puede ser algo riesgoso y muchas veces engañosa, hay plantas que presentan marchitamiento ya cuando su daño está muy avanzado, o por alguna otra razón ajena a la cantidad de agua. Por lo tanto es posible tomar en cuenta que si el agricultor se espera hasta ver un síntoma de marchitamiento en la planta, muy probablemente para cuando inicie el riego será demasiado tarde para recuperar la plantación.

Aunque existen diversas formas para determinar la humedad del suelo tales como: el muestreo del suelo, el método del tacto y la apariencia, el método contable de la humedad y el método de la cuba de evaporación entre otros, este equipo hace uso de instrumentos de medición, en particular de los basados en la resistencia eléctrica, concretamente: el sensor Watermark®.

Descripción del instrumento

El instrumento de medición de la humedad del suelo “IMHS”, ha sido desarrollado para facilitar las mediciones de la humedad del suelo en el campo. Cualquier cultivo susceptible a ser controlado mediante la irrigación puede ser monitoreado con este instrumento. La instalación del equipo es fácil. La interface para obtener los valores que fueron tomados por el instrumento es de un manejo práctico además, los datos obtenidos son almacenados en un reporte y mostrados en una grafica de tensión, presentándolos de una manera sencilla de interpretar.

Para realizar las mediciones, el instrumento utiliza tres sensores, uno de temperatura y dos de humedad del suelo. El sensor de Temperatura el del tipo Thermistor, es un sensor analógico que convierte la temperatura en un voltaje, este es utilizado para compensar las mediciones de los sensores de Tensión. Los sensores Watermark® se utilizan para medir la humedad del suelo a distintas profundidades, funcionan como un sensor resistivo, aunque realmente en su interior se ve envuelto un proceso más complicado, siendo una resistencia su representación más cercana. Estos sensores son muy comunes en el mercado, gracias a su bajo costo y durabilidad en el campo de trabajo. En las siguientes figuras (1,2,3 y 4) se muestra cada sensor y el instrumento.



Figura 1. Sensor de Temperatura.



Figura 2. Sensor de humedad del suelo.



Figura 3. Interior del instrumento de medición.

El instrumento de medición controla cada uno de los sensores, les suministra voltaje para su funcionamiento cuando es necesario y procesa la información entregada por cada uno. Con esta información obtiene el valor de la tensión del suelo, este dato junto con la fecha de la medición se guardan dentro de una memoria en el instrumento. Cuando es solicitado por el usuario, bastara con realizar la conexión del instrumento con la computadora, mediante el puerto USB, se pueden obtener estos valores almacenados.

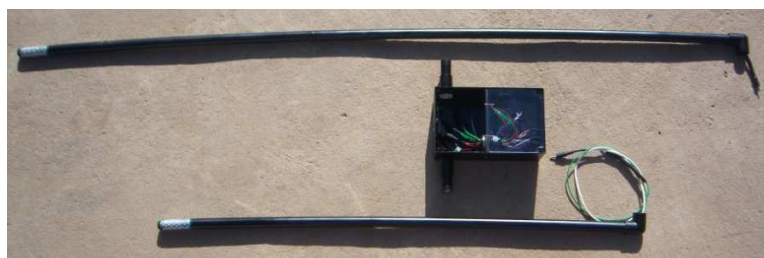


Figura 4. Instrumento de medición.

Especificaciones

Tabla 1. Especificaciones del instrumento.

<i>Tipo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
Rango de medición	0 - 200	Centibares (kPa)
Dimensiones	22.3 x 14 x 9.2	Centímetros
Voltaje de Alimentación	3.5 - 13	Volts
Voltaje de Funcionamiento	3.3	Volts
Corriente de Consumo (espera)	4	miliAmpers
Corriente de Consumo (midiendo)	6	miliAmpers
Velocidad de Comunicación USB	0.3 - 3	Mbaud
Sistema Operativo	Windows	Vista

Instalación del Software

Para poder configurar y obtener los datos de las mediciones del instrumento es necesario instalar un par de programas. En la primera sección, se mostrara el procedimiento para instalar el controlador para utilizar el instrumento con el puerto USB, mientras que en la segunda sección, se explicara donde está ubicado el programa para utilizar el instrumento. Ambos programas viene dentro de una carpeta titulada “*softwareIMHS*”.

Controlador USB

El software que contiene el controlador para utilizar el puerto USB con el instrumento está contenido en un archivo comprimido llamado “CDM 2.04.06 WHQL Certified”. Descomprima este archivo y siga los pasos que se dan a continuación para la instalación por primera vez del instrumento.

- 1) Conecte el instrumento a la computadora mediante el cable USB. Si las actualizaciones automáticas están activadas y disponibles, Windows buscara en internet el controlador más adecuado. Si esto no ocurre aparecerá la ventana “Nuevo Hardware Encontrado – FT232R” con la leyenda: “Windows necesita instalar el controlador para su FT232R”.
- 2) Seleccione la opción recomendada (Buscar e instalar controlador).
- 3) Aparecerá una nueva pantalla con la leyenda “Inserte el disco que viene con su FT232R”. Seleccione la opción “No tengo disco, muestra más opciones”.

- 4) Se mostrara una nueva pantalla (Windows no puede encontrar el controlador para su dispositivo), seleccione la opción avanzada “Buscar en mi computadora un controlador”.
- 5) Busque el folder que descomprimió al inicio de la instalación, selecciónelo y presione “Siguiente”.
- 6) Una nueva pantalla mostrara el progreso de la instalación, una vez completada la instalación aparecerá la ventana con el texto: “El software para este dispositivo ha sido instalado exitosamente”, dentro de los resultados mostrados en la ventana aparecerá la leyenda: “USB serial converter” a un lado de una imagen de un conector USB. La capa de comunicación para el controlador ha sido instalada.
- 7) Ahora es momento de instalar la capa para manejar el puerto serie, justo en este momento Windows detectará un nuevo Hardware, un dispositivo serie. Por lo tanto es necesario repetir los pasos 3 al 6 de nueva cuenta, nada cambiara, hay que seleccionar las mismas opciones, a partir del paso 4 el nombre de las ventanas cambiara por: “Nuevo Hardware Encontrado – USB Serial Port”.
- 8) Una vez terminada la instalación aparecerá una nueva leyenda en la ventana “El software para este dispositivo ha sido instalado exitosamente”, debajo de este aparece una imagen de un puerto serie junto al texto: “USB Serial Port”. Esto significa que el dispositivo ya está instalado.

Nota: Una vez hecho este procedimiento, ya no será necesario repetirlo más, de aquí en adelante la computadora reconocerá el dispositivo cada vez que sea conectado. Para mayor información visite www.ftdichip.com, nota de aplicación numero AN-103.

Ubicación del Programa

Dentro de la carpeta “softwareIMHS” vienen 2 carpetas y un archivo comprimido, las carpetas internas pertenecen al programa para controlar el instrumento de medición, es importante no alterar el contenido de estas carpetas ya que pondría en riesgo el buen funcionamiento de su programa.

- 1) Abra la carpeta titulada: “distrib”.
- 2) Busque el archivo ejecutable llamado: “*softwareIMHS*”.
- 3) Presione el botón derecho del mouse y seleccione: ‘Enviar a’ >> ‘Escritorio’.
Esto creará un acceso directo en el escritorio sin necesidad de que esté navegando por las carpetas del programa cada vez que desee utilizar el programa.

Ya que se hayan completado los pasos anteriores, el usuario podrá hacer uso del instrumento, conectarlo a la computadora, configurarlo y obtener los datos de las mediciones hechas por los sensores.

Terminales de Conexión Externas

Aunque se les menciona como terminales de conexión externas, no están por fuera del instrumento, como se puede ver en la Imagen 3, el interior del instrumento de medición está dividido, la parte que esta sin protección de policarbonato contiene cinco conectores, tres son para los sensores, uno para la comunicación USB y otro para la batería.

La figura 5 muestra el conector del instrumento utilizado para conectar los sensores de humedad del suelo, estos sensores no tienen una polaridad definida, así que ambos cables de conexión a la tarjeta controladora son de color verde, utilizan un “plug mono” hembra de 3.5 mm, de estos conectores hay dos dentro del instrumento, para diferenciar entre el conector para el sensor 1 y para el sensor 2, existen unas pequeñas marcas en los conectores, una pequeña raya de color blanco indica sensor 1, dos rayas de color blanco indican sensor 2.

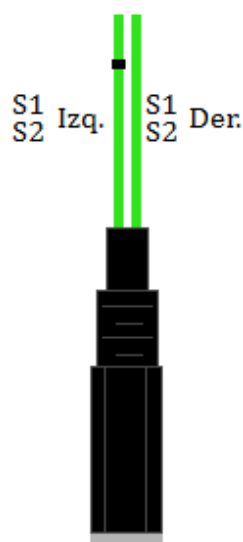


Figura 5. Conexión para un Sensor de humedad.

Como se puede ver en la figura numero 2, los sensores de humedad utilizan un “plug mono” macho, de 3.5 mm, para conectarse al instrumento.

En la figura 6 se muestra el conector para el sensor de temperatura, es fácil diferenciarlo de los conectores de humedad debido a los colores de los cables además, este conector utiliza tres cables, el cable de color rojo es el de alimentación de voltaje para el sensor, el de color café es el voltaje negativo y el cable de color hueso es el voltaje de respuesta del sensor. El conector es un “plug estéreo” hembra, de 3.5 mm. El sensor de temperatura utiliza un conector “plug estéreo” macho, de 3.5 mm.



Figura 6. Conexión para el Sensor de Temperatura.

En cuanto a los otros dos conectores no debe de existir ningún problema mayor. El conector de comunicación USB es un conector hembra tipo “A”, para conectarse a la computadora solo es necesario conectar un cable adaptador USB a USB. En cuanto a la batería, la conexión es muy sencilla, utiliza una batería de tipo “9 Volts”, estas baterías manejan una conexión específica para el polo positivo y para el negativo. Verifique bien que su conexión sea la correcta.

Conexión a la Computadora

Para realizar la conexión a la computadora es necesario retirar la tapa del instrumento, una vez hecho esto, se verá el interior (ver figura 3), tal como se aprecia en la figura 7, en la parte inferior del instrumento se encuentra el conector USB, no es un conector muy largo (15 cm. Aprox.) por lo tanto para conectar el instrumento a la computadora es necesario utilizar un cable adaptador USB a USB (macho por ambos lados) tipo “A”. Una vez conectado el cable la computadora detectara de manera automática la conexión. Al término de la comunicación entre los dispositivos no es necesario efectuar un procedimiento de desconexión, simplemente retire el cable de la computadora y guarde el cable del instrumento en su interior.

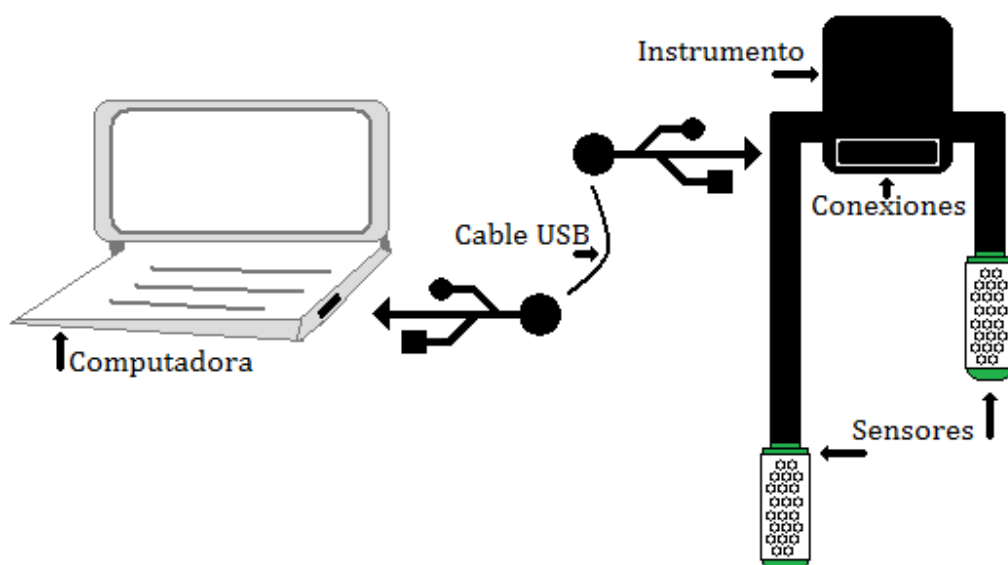


Figura 7. Conexión a la Computadora.

Utilización del Software de Configuración

En la figura 8 se muestra la ventana principal del programa, se puede apreciar en la parte superior izquierda que, el nombre del programa es “IMHS” (instrumento de medición de la humedad del suelo), al ejecutar el programa ***softwareIMHS.exe***, ésta será la primera ventana en aparecer. Si se presiona el botón “Obtener Datos” o el botón “Nueva medición”, la ventana principal se mantiene en el fondo mientras se realizan las tareas solicitadas, únicamente se cierra al presionar el botón “Acerca de” o al cerrar la ventana.

Cada vez que se vaya a iniciar una nueva medición o cuando el instrumento sea desconectado por un periodo prolongado de tiempo, será necesario reconfigurar el instrumento, esto significa presionar el botón “Nueva Medición”, este es el encargado de reiniciar el dispositivo, realizando esta operación, se contara con la información más actualizada al iniciar cualquier medición.

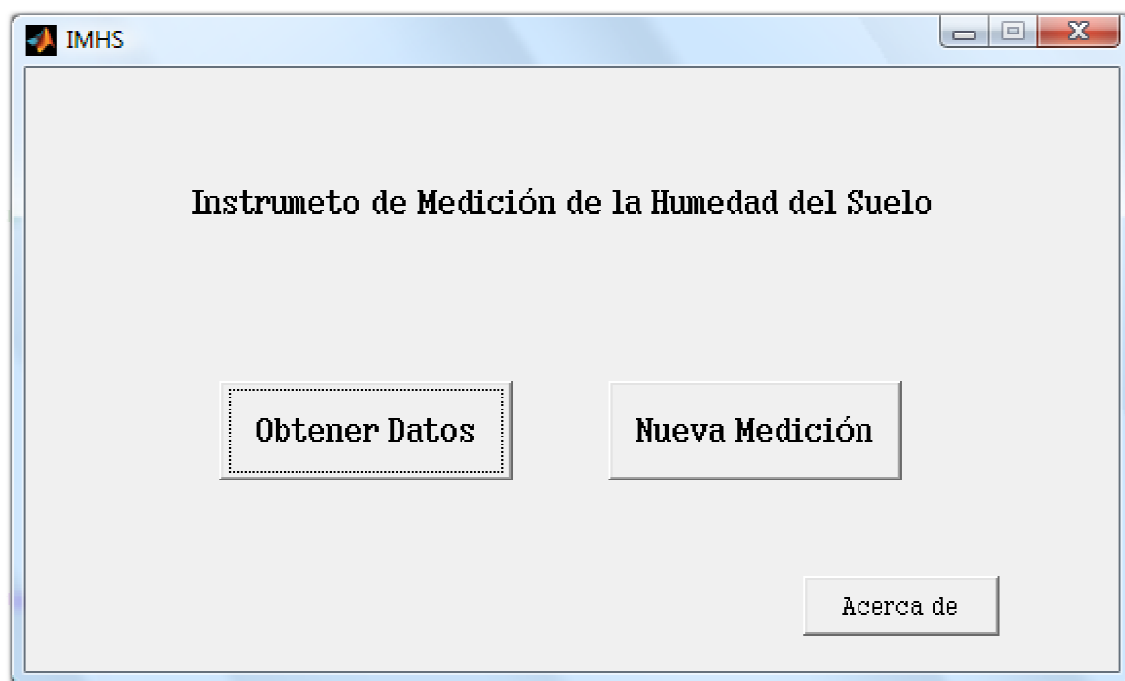


Figura 8. Ventana principal del programa IMHS.

Iniciando con la ventana Principal (figura 8), si se selecciona el botón con el nombre de “Nueva Medición”, significa que se realizara una nueva configuración interna en el microcontrolador, específicamente se guardará la fecha de la computadora al momento de presionar el botón. Esta información será utilizada cuando se solicite al microcontrolador los datos guardados, es la base para construir el reporte y la grafica con la información de los sensores de tensión del suelo.

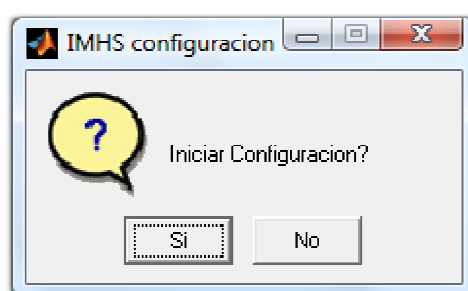


Figura 9. Ventana de confirmación para nueva configuración.

Al presionar el botón “Nueva Medición”, automáticamente aparecerá en pantalla una ventana de confirmación (“IMHS configuración”, figura 9). Si se presiona la opción “No”, la ventana se cierra y regresa a la pantalla principal. En cambio, si se presiona la opción “Si”, de manera casi instantánea aparecerá una nueva ventana (“IMHS precaución”, figura 10), cerrando la ventana anterior.

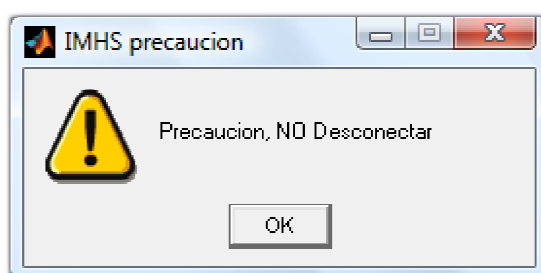


Figura 10. Ventana de alerta para no desconectar el equipo.

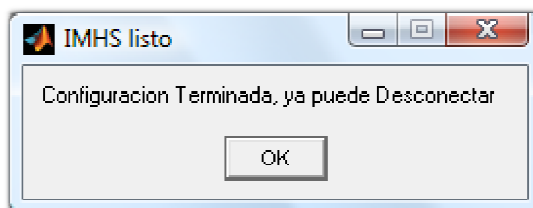


Figura 11. Ventana de aviso del fin de la nueva configuración.

Una vez que los datos de configuración han sido almacenados en el microcontrolador, este manda un aviso a la computadora para terminar con la comunicación. La figura 11 ("IMHS listo") muestra la ventana que despliega la computadora, el aviso de que la configuración fue efectuada, instantes después se cerrara junto con la ventana de precaución, por lo tanto no es necesario presionar el botón "OK" para cerrarlas. Esto significa que ya podemos desconectarnos del instrumento y cerrar la ventana "IMHS".

Como Obtener los Datos Almacenados

Por defecto se ha puesto al botón “Obtener Datos” como el primero a escoger, esto no implica que se tenga que seleccionar primero. Al presionar el botón “Obtener Datos” aparece la ventana de la figura 12. La ventana titulada “IMHS recuperación” presenta dos opciones, “Si” y “No”, es una ventana de confirmación. Si presiona el botón con la leyenda “No”, la ventana se cierra automáticamente y regresa a la ventana principal.

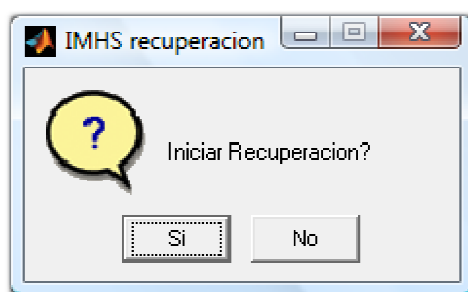


Figura 12. Ventana de confirmación en la recuperación de datos.

Al presionar el botón rotulado con: “Si”, automáticamente desaparece la ventana, y ahora aparece una ventana de advertencia titulada “IMHS precaución” (ver figura 13), este aviso es para que no se desconecte el instrumento de la computadora, ya que unos instantes después de aparecer esta ventana, iniciara la comunicación entre los dos dispositivos. La etapa de comunicación en la que se obtienen los datos, donde se les da el formato de presentación y se unen fecha con valores de los sensores, es completamente transparente para el usuario. El usuario solo tiene que esperar la confirmación de que la recuperación de datos ha finalizado.

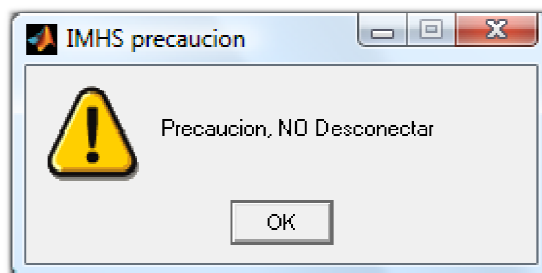


Figura 13. Ventana de alerta para no desconectar el equipo.

La figura 14 muestra la ventana “IMHS listo”, este es el aviso de que la recuperación se ha efectuado completamente (justo antes de que aparezca esta ventana deberá de aparecer una nueva figura con la grafica de medidas y sus valores correspondientes en centibars). Unos segundos después de que aparezca esta ventana, se cerrara automáticamente junto con la ventana de precaución, por lo tanto no es necesario presionar el botón “OK” para cerrarlas (en la carpeta del programa se generara un documento de Word en el cual estarán los datos del instrumento). Al cerrarse las dos ventanas, la ventana principal se mantendrá abierta, ahora ya puede desconectar el instrumento o configurarlo para una nueva medición.

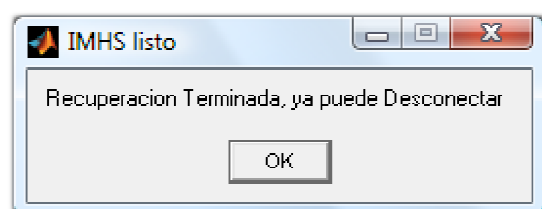


Figura 14. Ventana de aviso del fin de la recuperación de datos.

La grafica que sea generada contendrá la información necesaria para darse una idea de cómo ha variado la tensión del suelo respecto a los días de riego que han pasado. En la figura 15 se muestra el reporte generado por el instrumento, está en formato .doc, en la figura se puede ver la descripción de cada una de las partes que conforman el reporte de medición.

c =	Centibars		
09-Jul-2009 01:35:00	s1=200	s2=200	

↑ Fecha ↑ Sensor 1 ↓ Sensor 2

Figura 15. Ejemplo de reporte de datos.

Como Instalar el instrumento en el suelo

1. Para instalar el instrumento de medición de la humedad del suelo, deben de ser separados, la caja con el controlador del instrumento y los tubos laterales que contienen los tres sensores. Primero se instalaran los dos tubos con los sensores en su interior para posteriormente ensamblar la caja a los tubos previamente instalados en el suelo. La distancia de colocación entre cada tubo debe de ser de entre 30 y 32 cm.
2. Se debe dejar a los sensores en agua una noche antes de introducirlos en el suelo. Si es posible, hay que dejarlos dentro de un recipiente con agua toda la noche y después dejarlos secar por dos días, repitiendo este procedimiento unas dos veces más. Como requisito principal no hay que olvidar que el sensor debe de estar húmedo al momento de ser introducido en el suelo.
3. Para no dañar la cobertura exterior del sensor al ser introducido en el suelo, es conveniente que el suelo este húmedo para realizar este procedimiento. Se utiliza una barra de fierro para hacer un orificio en el suelo hasta la profundidad deseada. Es vital que el sensor quede perfectamente ajustado al ser introducido en orificio, específicamente en la parte final, esto asegura un correcto funcionamiento del sensor.

Nota: Tal vez se utilice el instrumento en suelos donde la textura del terreno es muy gruesa para utilizar una barra de fierro, en estos casos es mejor hacer un orificio algo mayor al tamaño del sensor, antes de introducir el sensor hay que cubrirlo con una mezcla de agua y tierra (lodo, arcilla) para asegurar que el espacio extra del orificio será cubierto y que una vez que esté instalado el sensor, este mantendrá un buen contacto con la tierra.

4. Llene el orificio con agua e introduzca el sensor. Utilice el tubo de CPVC para empujar el sensor hasta el fondo del orificio.
5. Rellene el orificio, si es que quedo algún hueco alrededor del tubo. Utilice una mezcla de agua con tierra (Lodo) para rellenar y eliminar cualquier bolsa de aire en el agujero.
6. Al momento de retirar el sensor del suelo, primero, desarmara el instrumento, retirando la parte del controlador del instrumento y después se sacaran del suelo los tubos con los sensores, para realizar este procedimiento asegúrese de que el suelo este húmedo para no dañar el sensor. Nunca tire de los cables del sensor. Si es necesario excave.

Nota: Una vez fuera del suelo, es necesario lavar los sensores con cuidado (ponerlos bajo un chorro constante de agua puede ser suficiente para remover la suciedad) y dejarlos secar en el ambiente. Una vez secos puede introducirlos en una bolsa de plástico para una mejor conservación.

Indicadores de Funcionamiento

En la parte superior externa del instrumento, se encuentran tres indicadores. Estos encienden cada vez que se realiza una actividad dentro del instrumento de medición, a continuación se mencionan las tareas efectuadas al encenderse cada uno de los indicadores.

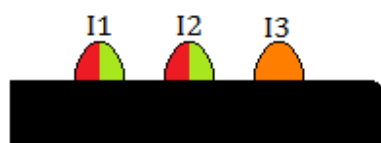


Figura 16. Indicadores externos.

Indicador 1: Este señala el momento de inicio del instrumento, muestra una secuencia de parpadeo entre el color verde y el rojo durante 7 segundos, el fin de esta secuencia indica que el instrumento ha sido configurado internamente y que iniciara a tomar mediciones.

Cada minuto este indicador se encenderá de color verde por aproximadamente un segundo, esto indica que el equipo está en funcionamiento normal.

Si el indicador se mantiene en color rojo sin parpadear, significa que la batería no cuenta con la suficiente carga para seguir trabajando.

Indicador 2: Este indicador monitorea la medición y el almacenamiento de los datos en el instrumento. La secuencia de este indicador se repite cada 15 minutos, primero enciende de color rojo, luego verde y finalmente rojo, la duración total es de aproximadamente 50 segundos.

Si enciende de color verde, se está realizando una medición de la tensión del suelo.

Si enciende color rojo, se están grabando datos en la memoria interna del instrumento.

Indicador 3: Enciende en color naranja, indica que se está llevando a cabo la comunicación entre el instrumento y la computadora, solo en el intercambio de información este indicador parpadea.

Donde Instalar el instrumento

Cuando los cultivos son en huertas, las mediciones deben de hacerse en el sistema activo de las raíces, colocando el sensor a una distancia igual al borde del pabellón del árbol o bien en el área mojada donde es regado el árbol. Uno de los sensores de medición debe de estar localizado en la parte superior de la zona donde está la raíz, el otro debe de colocarse a un nivel mucho más bajo (si es posible puede colocarse un segundo sensor a la mitad de la raíz y un tercer sensor al finalizar la raíz aunque, dos sensores son más que suficientes para obtener una medición razonable y aceptable). La profundidad con que son colocados los sensores es determinada por el tipo de huerta, hortaliza o plantación que se está monitoreando.

Cuando el monitoreo está relacionado con hortalizas es recomendable instalar el equipo a una distancia razonable del camino, tal vez tres o cuatro plantas alejado para evitar algún daño por movimiento. Se deben de colocar los sensores sobre el surco de la planta, en el área donde se mantienen activas las raíces (ver figura 17). Una recomendación al medir humedad en hortalizas es ir variando la profundidad de los sensores conforme la planta se va desarrollando para obtener un mejor perfil de la humedad en el suelo (la profundidad en la que son colocados los sensores es dictada por el tipo de hortaliza que es cosechado).

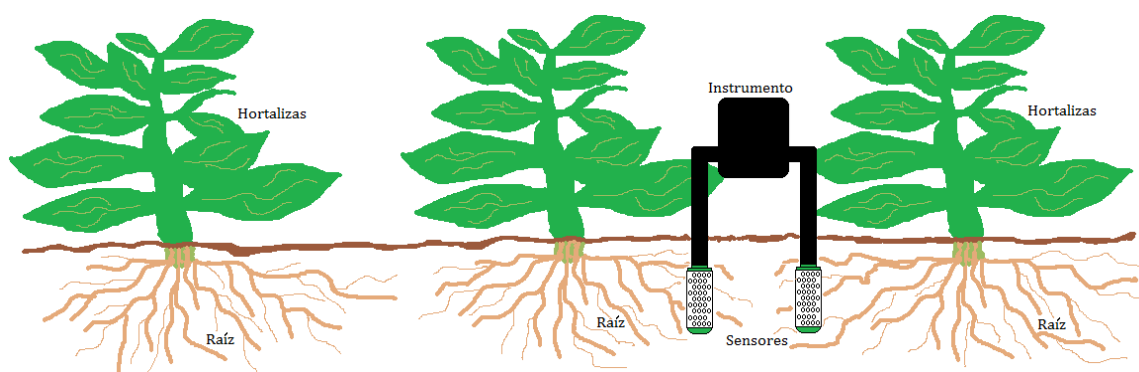


Figura 17. Instrumento instalado junto a hortalizas.

La colocación de los sensores también depende del tipo de riego que se le suministra a la planta, un buen ejemplo puede ser una Vid, cuando el riego se efectúa por medio de goteo, como en la figura 18, es recomendable instalar el instrumento alejado del área de tráfico para evitar daños. Es de suponerse que debajo del gotero tenemos el área más húmeda y de esta área hacia los lados y hacia abajo es a donde se distribuye la humedad, por lo tanto se recomienda instalar el instrumento a una distancia “D”, la cual varía desde 30 hasta 45 centímetros alejado del punto inicial de riego. La profundidad recomendada para el sensor superficial en un cultivo de uva es de 60 centímetros, mientras que la profundidad recomendada para el segundo sensor es de 120 centímetros.

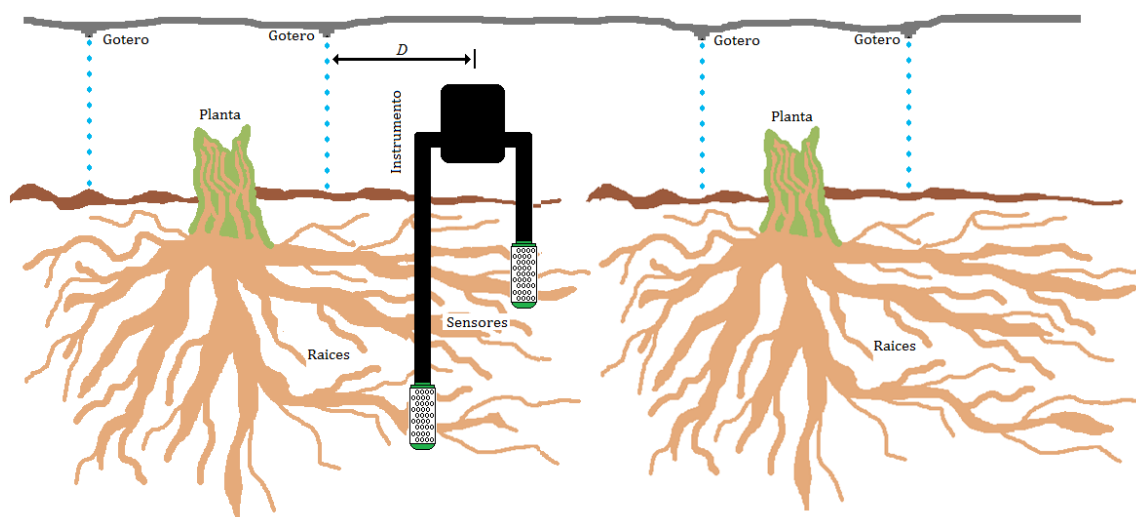


Figura 18. Instrumento instalado junto a las raíces, riego por goteo.

Cuando el riego se efectúa por medio de micro-aspersor, los puntos de medición deben de estar localizados en el diámetro exterior mojado del rociador y en la misma fila de la vid. Las medidas deben de tomarse en la parte del suelo en que la planta extrae la humedad y siguiendo el camino de extracción de la raíz. La distancia “D” para la colocación del instrumento varía desde los 60 centímetros hasta los 90 centímetros o más (ver figura 19). Si no se tratara del cultivo de un viñedo entonces, la profundidad a la cual se colocaran los sensores será determinada por el tipo de plantación que se esté monitoreando.

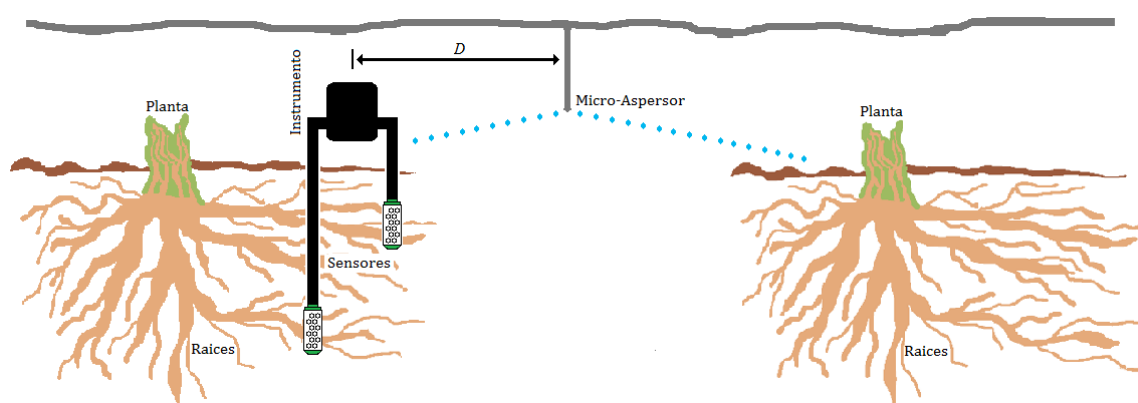


Figura 19. Instrumento instalado junto a las raíces, riego por micro-aspersor.

Acerca de

La ventana titulada “Autor” (figura 20), aparece al presionar en la ventana principal (“IMHS”, figura 8) el botón “Acerca de”. Esta ventana muestra los datos generales del proyecto: nombre de la institución, nombre del programa de educación, nombre del proyecto, nombre del estudiante, y el nombre del director del proyecto.

Al presionar el botón “Regresar” en la ventana titulada “Autor” automáticamente se cierra esta ventana y reaparece la ventana “IMHS”, la cual es la ventana con el menú principal.

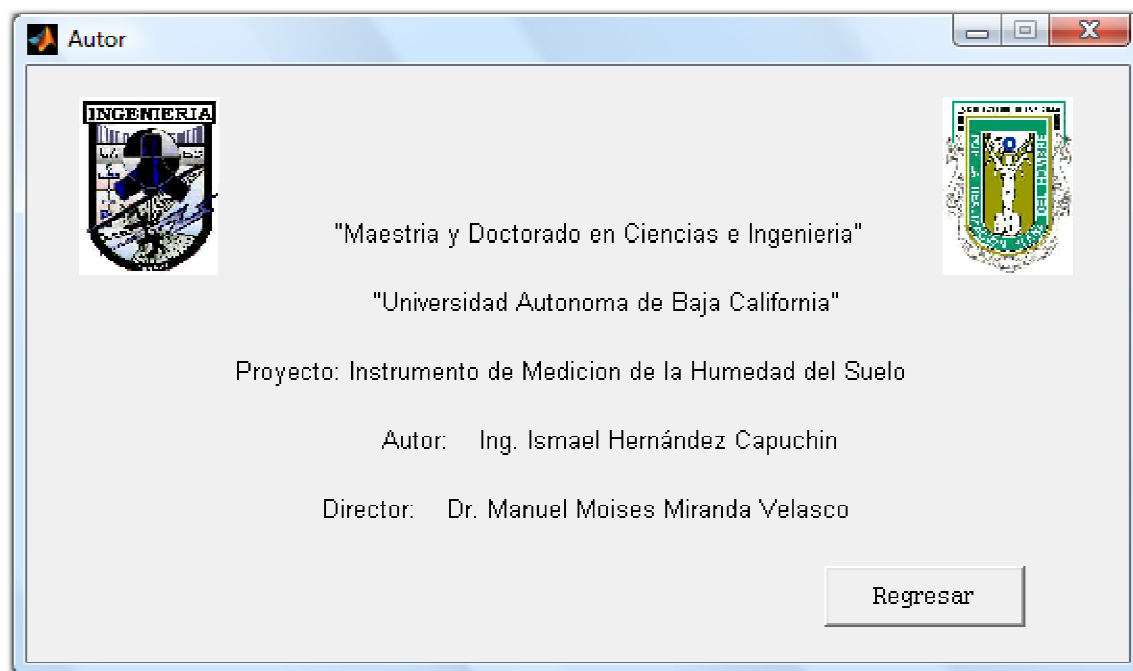


Figura 20. Ventana de información.

Terminales de Conexión Internas

Dentro del área protegida del instrumento, en la parte más baja de la tarjeta controladora están las terminales de conexión para cada uno de los sensores, así como la del conector USB y la del voltaje de alimentación. En la figura 21 aparecen los nombres y ubicación de cada uno de los componentes que van conectados a estas terminales.

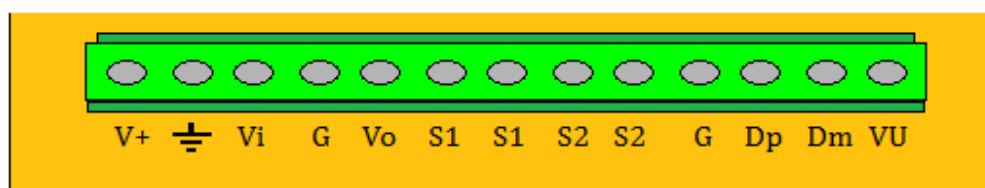


Figura 21. Nombre de las Terminales de Conexión.

Aunque el usuario no tendrá que conectar directamente estas terminales, son presentadas como referencia de conexión, probablemente sea necesario hacer el cambio de algún conector externo debido al uso y en ese caso si es necesario conocer la descripción de cada terminal. Por lo tanto en la Tabla 2, se puede ver la descripción y pertenencia de cada una de estas terminales.

Tabla 2. Descripción de cada una de las Terminales de Conexión.

TERMINAL	DESCRIPCIÓN
V+	VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN, VOLTAJE POSITIVO.
GND	VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN, VOLTAJE NEGATIVO.
Vi	SENSOR DE TEMPERATURA, VOLTAJE POSITIVO.
G	SENSOR DE TEMPERATURA, VOLTAJE NEGATIVO.
Vo	SENSOR DE TEMPERATURA, VOLTAJE DE SALIDA DEL SENSOR.
S1	SENSOR DE HUMEDAD 1, CONEXIÓN IZQUIERDA.
S1	SENSOR DE HUMEDAD 1, CONEXIÓN DERECHA.
S2	SENSOR DE HUMEDAD 2, CONEXIÓN IZQUIERDA.
S2	SENSOR DE HUMEDAD 2, CONEXIÓN DERECHA.
G	USB, VOLTAJE NEGATIVO.
DP	USB, TERMINAL DE DATOS POSITIVO (DATA PLUS).
DM	USB, CONEXIÓN DE DATOS NEGATIVA (DATA MINUS).
VU	USB, VOLTAJE POSITIVO.

Referencias

Servicio de Conservación de suelos (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América). RELACION ENTRE SUELO-PLANTA-AGUA. México D.F. Editorial Diana S.A. 1972. 99 páginas. ISBN 968-13-1033-0.

“IRROMETER Herramientas simples para el optimo regadío en el mundo. Manual del Diseño para los Sensores de la Humedad de la Irrigación Agrícola”. [En Línea]. Riverside CA. *Irrrometer Company, Inc.* Marzo 2002. [Fecha de Consulta: Abril 2008]. Disponible en: <<http://www.irrometer.com/pdf/Ag%20Design%20Guide-Espanol.pdf>>.

IRROMETER COMPANY, INC. IRROMETER WATERMARK. Instrucciones para el servicio y la utilización del medidor y sensores Watermark®. Riverside, CA. USA. 8 páginas.