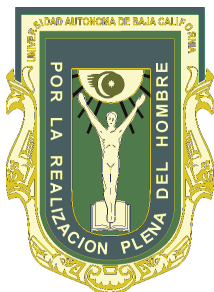


Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



Medidor modular inalámbrico de la tensión hídrica del suelo

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el
grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta

JAVIER VILLAGRANA MANCILLA

Ensenada, Baja California, enero del 2013.

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Medidor modular inalámbrico de la tensión hídrica del suelo

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta

Javier Villagrana Mancilla

Aprobada por:



Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas
Codirector de Tesis



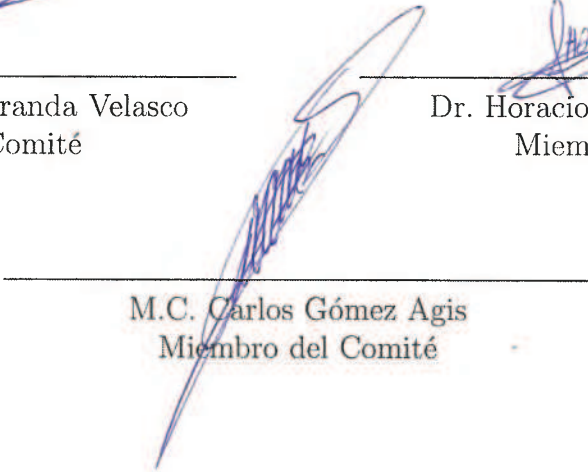
M.C. Ricardo Francisco Núñez Pérez
Codirector de Tesis



Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco
Miembro del Comité



Dr. Horacio Luis Martínez Reyes
Miembro del Comité



M.C. Carlos Gómez Agis
Miembro del Comité

Ensenada, Baja California, enero del 2013.

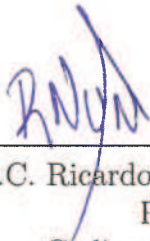
Resumen de la tesis de **Javier Villagrana Mancilla**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México. Enero del 2013.

Medidor modular inalámbrico de la tensión hídrica del suelo

Resumen Aprobado por:



Dr. Miguel Enrique Martínez
Rosas
Codirector de Tesis



M.C. Ricardo Francisco Núñez
Pérez
Codirector de Tesis

En este documento se presenta el diseño e implementación de un instrumento para la monitorización de la tensión hídrica y temperatura del suelo, se incluyen además las rutinas de una interfaz gráfica para la visualización de los datos obtenidos, la cual opera desde un servidor Web montado en un sistema dedicado corriendo bajo el sistema operativo Linux.

Se revisaron los conceptos básicos referentes a las relaciones suelo-planta-agua, así como los de las técnicas de medición de la tensión hídrica del suelo, de tal forma que el instrumento está diseñado para operar en las condiciones reales de los cultivos. La selección tanto del transductor como de los componentes utilizados en la construcción del instrumento fue respaldada por pruebas en laboratorio y campo, en donde se evaluaron los datos obtenidos por el mismo.

El prototipo desarrollado cumple con el objetivo y las metas propuestas al inicio del trabajo y puede ser configurado de acuerdo a las necesidades del usuario final.

Palabras Clave: *Tensión hídrica, monitorización de variables ambientales, redes de sensores*

Dedicatoria

A mis padres Urbano Villagrana Venegas y Genoveva Mancilla Hernández por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo, más aún por todos sus sacrificios para que yo obtuviera una formación profesional.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

A mis abuelos Jose Mancilla, Patricia Hernández, José Villagrana, e Isidra Venegas (QEPD), por quererme y apoyarme siempre, esto también se lo debo a ustedes.

A mi hermano, Carlos Villagrana por creer en mi y apoyarme siempre.

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.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado y a la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño (FIAD) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) por las facilidades otorgadas para la realización de éste trabajo.

Al Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas, por su amistad y respaldo como mi director de tesis.

A mi comité M.C. Carlos Gómez Agis, Dr. Horacio Luis Martínez Reyes, Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco y especialmente al M.C. Ricardo Francisco Núñez Pérez por sus enseñanzas, recomendaciones y consejos durante este proyecto.

A mis amigos y compañeros del posgrado, que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, lo seguimos siendo: Alejandro Chavez, Diego Alberto Bustillos, Jose María Alvarez, Francisco Villalpando, Jesús Ayala, Ismael Capuchin, Viridiana Silva, Raúl Martínez, por compartir los buenos y malos momentos.

A mi amigo casi hermano, Daniel Miranda Salazar por nunca saber decir que no.

Al Ing. Antonio Díaz y al rancho Agrícola Don Juanito S. de R.L. de C.V. por las facilidades prestadas para realizar éste trabajo.

A los ingenieros Manuel Herblay Gasca Santana y Marcos Castillo Peralta por su amistad incondicional.

A mis tía Elvia Mancilla y María de Jesús Venegas junto con su hija Angelica Chairez, por su apoyo y todas esas comidas que tanto disfrute y que mucho les agradezco al encontrarme lejos de mi casa.

A todos aquellos familiares, profesores y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivo general	2
1.3. Objetivos específicos	2
1.4. Secuencia de la tesis	3
2. Antecedentes	4
2.1. Relaciones suelo-planta	7
2.1.1. Textura del suelo	7
2.1.2. Disponibilidad de nutrientes	9
2.1.3. Disponibilidad de agua	9
2.1.4. Compactación	10
2.1.5. Efecto de las plantas sobre el suelo	10
2.1.6. Temperatura del suelo	10
2.2. Relaciones suelo – agua	10
2.2.1. Contenido y tipos de agua en el suelo.	12
2.2.2. Fuerzas de retención del agua en suelos no saturados	14
2.3. Métodos para determinar la humedad del suelo.	15
2.3.1. Método gravimétrico	16
2.3.2. Método de dispersión de neutrones	16
2.3.3. Método por atenuación de rayos gamma	17
2.3.4. Sensor resistivo de yeso	17
2.3.5. Sensor capacitivo	18
2.3.6. Método de reflectometría en dominios magnéticos de tiempo (TDR)	18
2.3.7. Tensiómetro.	19
2.3.8. Técnicas de teledetección o sensado remoto	19
2.3.9. Métodos ópticos	20
3. Desarrollo del instrumento	21
3.1. Sistema de administración de energía	22
3.1.1. Batería de ión de Litio	22
3.1.2. Circuito controlador de energía MCP73833 de Microchip	24
3.1.3. Panel solar 750-00030 de Parallax	25

3.2. Sistema mínimo	26
3.2.1. Microcontrolador Atmega 328P de Atmel	27
3.2.2. Convertidor analógico digital MCP32008	29
3.2.3. Memoria eeprom 25AA1024	30
3.2.4. Reloj y calendario de tiempo real PCF8563P	31
3.3. Sensores	31
3.3.1. Tensiómetro	32
3.3.2. Sensor de la tensión hídrica del suelo Watermark 200ss-v	34
3.3.3. Sonda de temperatura 6345 de Davis Instruments	37
3.4. Nodos para la transmisión inalámbrica	38
3.5. Interfaz gráfica	41
3.6. Especificaciones del instrumento.	43
4. Experimentos y análisis de resultados	44
4.1. Caracterización y pruebas de los sensores.	44
4.1.1. Sensor Watermark modelo 200ss-v	44
4.1.2. Tensiómetro Irrometer modelo SR.	46
4.1.3. Sonda de temperatura	48
4.2. Implementación del sistema mínimo en tablilla de pruebas	52
4.3. Sistema de administración de energía.	52
4.4. Pruebas preliminares en campo	56
4.5. Integración del instrumento.	57
4.6. Configuración y funcionamiento del medidor.	61
4.7. Visualización de la información.	64
4.8. Validación de los resultados	64
5. Conclusiones	67
5.1. Trabajo a futuro	68
Apéndices	71
A. Rutina para controlar la tarjeta de adquisición de datos	71
B. Programa para resolver la ecuación de Steinhart-Hart del termistor	73
C. Código del microcontrolador	74
C.1. Programa principal	74
C.2. Rutina para el convertidor analógico-digital	78
C.3. Rutina para la memoria eeprom	81

Índice de figuras

2.1.	Diagrama para la determinación de la textura de los suelos.	9
2.2.	Parámetros del contenido de agua en el suelo y tipos de agua en el suelo.	12
2.3.	Enlace por puente de hidrógeno entre moléculas de agua [19].	15
3.1.	Diagrama a bloques del instrumento de medición de la tensión hídrica y temperatura del suelo.	21
3.2.	Diagrama a bloques del sistema de administración de energía.	22
3.3.	Avances en el rendimiento de las baterías para aplicaciones portátiles[15].	23
3.4.	Comparación de la capacidad de almacenamiento de energía de baterías secundarias [15].	23
3.5.	Batería recargable de ión de Litio 18650 de Tenenergy	24
3.6.	Circuito controlador de energía MCP73833 de Microchip	25
3.7.	Panel solar modelo 750-00030 de Parallax.	26
3.8.	Sistema mínimo.	27
3.9.	a)Microcontrolador Atmega328P de Atmel y b)Descripción de las patillas de salida	27
3.10.	Diagrama a bloques del microcontrolador ATmega328P Atmel.	28
3.11.	AVR Studio 5.	29
3.12.	a)Convertidor analógico digital MCP32008 b)Descripción de las patillas de salida	30
3.13.	a)Eeprom 25AA1024 y b)Descripción de las patillas de salida	30
3.14.	a)Reloj y calendario de tiempo real PCF8563P y b)Descripción de las patillas de salida	31
3.15.	Tensiómetro Irrometer modelo SR.	33
3.16.	Sensores Watermark 200ss y 200ss-v.	35
3.17.	Lecturas del contenido de agua en el suelo realizadas en árboles de naranja bajo riego por goteo con sensores Watermark. a) El trazo rojo (superior) muestra la lectura de un sensor enterrado a 75 cm, b) El trazo verde (medio) corresponde a un sensor 45 cm y c)El trazo negro (inferior) muestra la lectura de un sensor a 15 cm.	36
3.18.	Sonda de temperatura (# 6345) de Davis Instruments.	37
3.19.	Xbee serie 1 con sus opciones de antena.	39
3.20.	Conexiones mínimas del módulo Xbee serie 1.	39

3.21. Programa X-ctu para configurar un módulo Xbee.	40
4.1. Alambrado del sensor Watermark 200ss-v.	45
4.2. a)Primer montaje y b)Módulo de adquisición de datos DAQ NI-USB6216	45
4.3. a)Trazo azul lectura sensor1 Watermark 200ss-v y b)Trazo rojo lectura sensor2 Watermark 200ss-v. Enterrados a la misma profundidad y en el mismo contenedor	46
4.4. a)Trazo azul lectura sensor1 Watermark 200ss-v y b)Trazo rojo lectura sensor2 Watermark 200ss-v. Enterrados a la misma profundidad pero en distintos contenedores	46
4.5. Tensiómetro Irrometer modelo SR con medidor opción E.	47
4.6. Caracterización del tensiómetro Irrometer modelo SR.	48
4.7. Curva característica del termistor que provee el fabricante	49
4.8. a) El trazo azul muestra la curva del termistor ideal en el alcance de 5 a 60°C, b) El trazo rojo corresponde a la curva medida y c)El trazo verde muestra la curva obtenida con la ecuación de Steinhart en el alcance de 0 a 60°C.	51
4.9. Interfaz para el termistor y el convertidor analógico-digital.	51
4.10. Sistema mínimo montado en tablilla de pruebas.	53
4.11. Configuración para medir a)corriente y b)voltaje del panel solar	53
4.12. Termopar tipo “J” de Omega para medir la temperatura del panel solar.	54
4.13. Perfil de a)corriente y de b)potencia del panel solar.	54
4.14. Cargador de baterías de ión de Litio MCP73833 de Microchip.	55
4.15. El sistema de administración de energía implementado en tablilla de pruebas; donde el multímetro indica que a la batería se le están suminis- trando 156.3 mA.	55
4.16. Sistema de administración de energía implementado en tarjeta perforada.	56
4.17. a)Sistema mínimo versión 1 y b)Prueba en campo del sistema mínimo.	56
4.18. Montaje para comparar la respuesta del tensiómetro vs sensor Watermark.	57
4.19. Tensiómetro vs sensor Watermark.	58
4.20. Caja para montaje del instrumento Nema 4x.	58
4.21. Esquemático del sistema de administración de energía.	59
4.22. Esquemático del sistema mínimo	60
4.23. Placas pulidas de a)sistema mínimo y de b)sistema de administración de energía	61
4.24. Placas soldadas de a)sistema mínimo y de b)sistema de administración de energía	61
4.25. Caja a)con base y conectores y b)terminada.	62
4.26. Diferentes vistas del medidor instalado en un cultivo de fresa en San Quintín, B.C. México.	62
4.27. Vista del medidor instalado en un cultivo de fresa ya en etapa de cosecha- do en San Quintín, B.C. México.	63
4.28. Menú principal del instrumento.	63

4.29. Página principal para el usuario de medidor inalámbrico de la tensión hídrica del suelo.	65
4.30. Despliegue de los datos de tensión hídrica y de la temperatura del suelo.	66
4.31. Datos de validación de tensión hídrica del suelo. El trazo en color violeta representa los datos tomados en forma manual y el trazo en azul los que fueron obtenidos con el instrumento.	66

Índice de tablas

2.1. Condición de los acuíferos de la Zona Costa Norte [9].	6
2.2. Principales sistemas de clasificación físico-mecánicos del suelo.	8
2.3. Ventajas y desventajas del método gravimétrico.	16
2.4. Ventajas y desventajas del método de dispersión de neutrones.	17
2.5. Ventajas y desventajas del método por atenuación de rayos gamma . . .	17
2.6. Ventajas y desventajas de usar sensores resistivos de yeso	18
2.7. Ventajas y desventajas de usar sensores capacitivos	18
2.8. Ventajas y desventajas de usar reflectometría en dominios magnéticos de tiempo.	19
2.9. Ventajas y desventajas de usar tensiómetros	19
2.10. Ventajas y desventajas de usar técnicas de teledetección o sensado remoto [22]	20
3.1. Estados del proceso de cargado de la batería	25
3.2. Fuentes de cosechado de energía [6]	26
3.3. Interpretación de las lecturas del sensor Watermark 200ss-v	37
3.4. Especificaciones del instrumento.	43
4.1. Equivalencia de resistencia vs temperatura obtenida de la hoja de datos y medida.	50

Capítulo 1

Introducción

El objetivo del riego es suministrar a los cultivos, de forma eficiente y sin alterar la fertilidad del suelo, el agua adicional a la precipitación que necesitan para su crecimiento óptimo y cubrir las necesidades de lavado de sales, asegurando la sostenibilidad del regadío [17]. El agua evaporada del suelo o absorbida por las plantas debe reponerse periódicamente mediante el riego. El cual es importante porque tanto la falta como el exceso de agua en el suelo durante un tiempo prolongado, limitan el crecimiento de las plantas.

En general los expertos sobre este tema están de acuerdo en que el factor que limitará la producción de los alimentos en el mundo no será la tierra o la tecnología sino el agua. Por lo tanto, el monitorear el contenido de agua en el suelo es esencial para ayudar a los agricultores a: optimizar la producción, conservar agua, reducir los impactos ambientales y ahorrar dinero. Cuando la irrigación se maneja correctamente, la humedad del suelo se mantiene en condiciones óptimas para la creación de la mejor cosecha, la producción se incrementa y la calidad se mejora, las plagas y enfermedades se mitigan, los nutrientes se utilizan eficientemente y no se desperdician, la energía se conserva y usualmente el consumo de agua disminuye. La eliminación de irrigación excesiva también protege la calidad del agua.

El problema en el municipio de Ensenada y en general en el país radica en que, en la mayoría de estos, el riego se realiza de forma empírica y manual, la calendarización y la observación son los métodos más utilizados. Con este proyecto se busca desarrollar un sistema de monitorización para mejorar la utilización del agua y de la energía, utilizar el agua racionalmente de modo que se garantice su propia existencia y la del medio ambiente. Tecnificar su uso mejora el aprovechamiento del recurso hídrico.

La falta de instrumentación necesaria para medir la humedad del suelo, así como de una metodología o asesoramiento sobre la programación de riegos, que indique cuando regar un cultivo y cuanta agua utilizar, es uno de los principales factores que afectan el uso eficiente del agua.

1.1. Justificación

Los equipos para medir la humedad del suelo han sido un tema de interés del Cuerpo Académico “Comunicaciones e Instrumentación Electrónica” en la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño (FIAD) desde hace varios años. El sistema autónomo más completo fue desarrollado en el año 2009 [14], la evaluación en campo del prototipo mencionado dio como resultado la oportunidad de mejorar su desempeño en aspectos tales como: energía, comunicación y visualización de datos.

El presente trabajo aborda precisamente la metodología para el diseño e implementación de un instrumento que mida la humedad del suelo y que incluya las mejoras en los puntos mencionados anteriormente. Además de ser competitivo con los comerciales y que incluya una interfaz amigable con el usuario para la presentación de datos.

En general, se pretende que el equipo desarrollado contribuya en la tecnificación de los cultivos, de tal manera que a mediano plazo se pueda lograr la automatización del riego en los campos agrícolas de la región, sirviendo de ayuda al agricultor para hacer un uso eficiente del agua disponible, con la ventaja adicional de que tanto los programas como la circuitería del instrumento serían diseñados y construidos en México.

Por otro lado, los datos adquiridos a lo largo de varias cosechas se podrían utilizar para hacer programas de riego en función de la evolución de las variables ambientales, de manera que al controlar las condiciones de humedad y temperatura del suelo (v.g., tratando de igualar las condiciones en que se logran las mejores cosechas) se impactaría positivamente en la productividad de los campos de cultivo.

1.2. Objetivo general

Desarrollar un instrumento para medir la tensión hídrica y temperatura del suelo, con un suministro de energía que le permita funcionar de forma continua e independiente durante una temporada de cultivo y que cuente con transmisión de datos en forma inalámbrica hacia una computadora.

1.3. Objetivos específicos

- Realizar la caracterización de sensores utilizados para medir la humedad y la temperatura del suelo.
- Diseñar y construir un instrumento para la medición de la humedad y temperatura del suelo con acabado profesional.
- Caracterizar el desempeño del instrumento, tanto en el laboratorio como en el campo.
- Desarrollar programas para interpretar y graficar los datos medidos en forma amigable para el usuario.

- Documentar completamente el proyecto.

1.4. Secuencia de la tesis

Este trabajo está dividido en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1.** Se realiza una breve introducción del trabajo, se indica la justificación para el desarrollo del proyecto y los objetivos tanto en general como los específicos y también se incorpora la secuencia del trabajo.
- Capítulo 2.** Se presenta el marco teórico referente a las relaciones agua-suelo-planta y los principales métodos para determinar la humedad del suelo.
- Capítulo 3.** Se describe el desarrollo completo del instrumento, se incluyen todos los aspectos de sus principales componentes, destacando las características por las que fueron elegidos.
- Capítulo 4.** Se muestra la experimentación, con sus respectivos resultados de laboratorio y de campo, así como también la integración y una breve descripción del funcionamiento del instrumento.
- Capítulo 5.** Finalmente, se dan las conclusiones del trabajo realizado y se proponen las posibles mejoras. Se incluyen los apéndices más relevantes.

Capítulo 2

Antecedentes

Existen dos grandes regiones agrícolas en el municipio de Ensenada que en la actualidad sufren escasez de agua para riego. La primera conocida como la región del vino comprende cuatro delegaciones municipales de Ensenada: San Antonio de las Minas, El Porvenir, Francisco Zarco y La Misión.

La región del vino se ubica al norte de la ciudad y del Municipio de Ensenada, donde colinda al norte con los municipios de Playas de Rosarito, Tijuana y Tecate; al este y sureste con la delegación de Real del Castillo; al sur con la delegación de El Sauzal, y al oeste con el Océano Pacífico.

El norte de Baja California se encuentra en el margen meridional de la zona de clima mediterráneo de Norteamérica. De ahí que el tipo de clima en la Región del Vino es BSKs, (seco mediterráneo con lluvias de invierno). Los veranos son secos, con excepción de las tormentas vespertinas que ocurren en las montañas. La precipitación media anual va de 200 a 350 mm en la zona de la costa, con 400 mm en las cimas de los cerros costeros [11].

Este sitio tiene una historia agrícola basada en cultivos de origen mediterráneo europeo, ya que es el único enclave del país con clima mediterráneo, propicio para el cultivo de vid, olivo, hierbas de olor y hortalizas adaptadas al ambiente de lluvias invernales y veranos secos, que ha permitido el desarrollo de un sector agroindustrial de importancia económica en la región y de imagen internacional para el estado de Baja California y el país, ya que se produce el 90 por ciento del vino nacional [10].

La Región del Vino comprende una superficie agrícola de 12,114 hectáreas, de las cuales 7,977 son de temporal y 4,137 son de modalidad de riego. En el periodo 2003-2004 en cuanto a superficie sembrada y cosechada, la vid tuvo preponderancia con 2,028 y 1,178 ha respectivamente, seguida por el olivo con 980 y 143 ha, le sigue el jitomate con 265.5 y 258.5 ha y luego la alfalfa con 268 y 160 ha, siendo los cultivos más importantes de esta región, tanto por los ingresos económicos que representan, como por la generación de empleo [11].

Los suelos presentes en la Región del Vino son de tipo regosol, es decir, arenosos y no presentan capas distintas; son claros y se parecen a la roca que los subyace cuando no son profundos, como en este caso. También en esta región, sobre todo al este, hay

suelos litosol, los cuales son rocosos, someros, de textura gruesa y su capacidad para uso agrícola está condicionada a su profundidad y pedregosidad. En el caso de los cultivos mediterráneos, éstos son un excelente suelo para su producción [11].

Por otra parte la región de San Quintín comprende el área de tres delegaciones municipales de Ensenada: Camalú, Colonia Vicente Guerrero y San Quintín.

Se ubica a 170 km al sur de la ciudad de Ensenada, y sus límites son: al norte con la delegación municipal de Colonet, al este con el Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, de la delegación de Colonet, y con la delegación de Puertecitos, y al sur y sureste, con la delegación de El Rosario [7].

En la zona costera, hasta los 100 msnm, el tipo de clima es Bwks, (sub-tipo muy seco templado con lluvias en invierno, precipitación invernal mayor de 36 por ciento y verano cálido); de los 100 a 300 msnm, el clima es Bwhs (es un subtipo muy seco semicálido con lluvias de invierno, precipitación invernal mayor de 36 por ciento y con invierno fresco). Los vientos predominantes son de Noroeste a Sureste, con una velocidad promedio de 12 metros por segundo [8].

Se puede decir que el Valle de San Quintín funciona como un centro regional de influencia agrícola que abarca desde San Vicente hasta El Rosario, fundamentado en dos factores relevantes: la existencia de tierras aptas para la agricultura y las grandes inversiones económicas que, además de la aplicación de altas tecnologías que han hecho más productivo el campo, han provocado un auge económico y demográfico sin precedente.

Los suelos de la Región de acuerdo con la clasificación de la FAO-UNESCO (1988), son principalmente de los tipos regosol, litosol, planosol, xerosol, yermosol, solonchak y fluvisol. Los regosoles son los más abundantes, se encuentran distribuidos en las sierras y lomeríos, en algunas mesetas, bajadas y valles, así como en el área de los volcanes y en Cabo San Quintín. Son blanquecinos o amarillentos y poco profundos; poseen contenidos bajos o moderados en nutrientes y materia orgánica, y son muy susceptibles a la erosión. Están formados de materiales no consolidados como arenas, y se utilizan en la agricultura de riego con restricciones bajas a moderadas por su contenido de sales y sodio [7].

El uso agrícola es el que más predomina en el valle, esto es debido a las grandes extensiones de hectáreas cultivadas para la producción hortícola, cuya superficie es de 25,564 ha (cultivo actual, temporal y áreas agrícolas sin sembrar) que representan el 37.15 por ciento del total de la extensión del valle. La producción agrícola se basa en cultivos que son de exportación principalmente: tomate, fresa, calabacita, pepino, apio, y cebollín, entre otros, dirigidos al mercado de los Estados Unidos. Por lo anterior, los propietarios de la áreas agrícolas, cuidan en todo momento la calidad, presentación y normas sanitarias que rigen en los Estados Unidos, para colocar los productos en dicho mercado [8].

Estas dos regiones tienen en común como actividad predominante la agricultura y algunas problemáticas, siendo una de las más críticas la disponibilidad de agua. Ya que la producción agrícola depende de la cantidad de agua disponible, es necesario hacer un uso racional de este preciado recurso, debido a que en el municipio de Ensenada no

hay ríos, y sólo se cuenta con simples arroyos con escurrimientos de aguas, cuando el volumen pluvial en invierno o verano es considerable. Más aún, la precipitación pluvial de Baja California es 3.8 veces menor que la media nacional (773.5 mm) y 11.8 veces menor que Tabasco, estado que registra la mayor precipitación en el país. Los niveles bajos de precipitación pluvial del estado son especialmente graves a la luz de la recarga de los acuíferos, cuyo caudal depende de las filtraciones de las lluvias [12].

Por lo anterior es pertinente hacer notar que se distinguen cuatro problemas centrales de estas regiones con respecto al tema: (1) Sobre explotación de acuíferos, (2) Calidad del agua, (3) Deficiente tratamiento de aguas residuales y (4) Baja eficiencia en el riego.

La gravedad de estos niveles bajos de disponibilidad se hace más apremiante si consideramos que la población crece día a día y la disponibilidad de agua, en el mejor de los casos, permanece invariable.

Según datos de la CONAGUA el 82,6 por ciento del agua que se extrae en la Zona Costa del estado proviene de acuíferos en equilibrio y sobreexplotados. Un acuífero sobreexplotado es aquel cuyo volumen de recarga es menor que el volumen de extracción, consecuentemente está en vías de extinción, de intrusión salina grave, como ya ocurre en los casos de Camalú, Vicente Guerrero y San Quintín, o de encarecimiento del bombeo a mayor profundidad, en el mejor de los casos.

Se requiere preservar los acuíferos de estas zonas para garantizar la subsistencia de sus productores agrícolas, cuyas manifestaciones de inconformidad por la sobreexplotación de sus acuíferos para atender las demandas de uso urbano y por ende el riesgo adicional de precipitar la intrusión marina, van acrecentándose.

En la tabla 2.1 se muestra la actual situación de las regiones ya mencionadas.

Tabla 2.1: Condición de los acuíferos de la Zona Costa Norte [9].

Acuífero:	Extracción ($Mm^3/año$):	Recarga media ($Mm^3/año$):	Disponibilidad ($Mm^3/año$)	Condición:	Intrusión marina:
Valle de Guadalupe	19.90	30.63	10.73	En equilibrio	-
La Misión	6.10	6.48	0.38	En equilibrio	-
Camalú	2.70	3.88	1.18	Sobreexplotado	Si
Vicente Guerrero	21	19.52	-1.48	Sobreexplotado	Si
San Quintín	24.40	19	-5.4	Sobreexplotado	Si
San Simón	19	13.5	-5.5	Sobreexplotado	-

En resumen, la crítica situación con respecto a la disponibilidad de agua, hace imperativo el control de extracción y la utilización óptima de éste recurso, en particular en las actividades agrícolas ya que como se puede observar en la tabla 2.1 en lo referente a la región de San Quintín los mantos acuíferos están sobre explotados o contaminados por la intrusión salina y por el mal manejo de fosas sépticas y letrinas.

El agua es el factor vital en la producción de alimentos, en todos los tiempos y muy especialmente en los actuales, el mal uso, la contaminación y el desperdicio del agua, no es sólo irresponsable sino un atentado contra la vida misma.

Estas dos regiones del estado cuentan con una vocación natural para la producción agrícola, sin embargo, su producción se ve severamente afectada por limitantes como: poca disponibilidad de agua en las mismas, precipitaciones pluviales reducidas, creciente demanda de la población urbana tanto de agua como de suelo y sobreexplotación de los mantos acuíferos. En general, la falta de agua es una de las principales limitantes para el futuro de la actividad agrícola regional.

2.1. Relaciones suelo-planta

La función más conocida del suelo es la de dar soporte o sustentación a la vegetación. El término “sustentación” puede interpretarse como el de dar apoyo a la vegetación o como dar alimento o ambas cosas. En realidad ocurren ambas cosas y de esa manera el suelo proporciona estabilidad a las plantas, le ofrece nutrientes y agua. Por otro lado, el suelo puede contener sales y sustancias tóxicas que perjudican el crecimiento de las plantas y estratos compactados que limitan el desarrollo de los mismos. Como contrapartida, la vegetación mejora los suelos incorporando materia orgánica y dándole protección contra la erosión.

2.1.1. Textura del suelo

Con el fin de lograr una mejor comprensión de las relaciones agua-suelo, se debe entender una de las propiedades físicas más importantes del suelo, la textura, la cual se refiere a su apariencia superficial, que es influenciada por el tamaño de los granos presentes en él. La clasificación por texturas permite dividir el suelo en categorías básicas dependiendo del tamaño presente: grava, arena, limo y arcilla, pero en la naturaleza la presentación habitual de los suelos es una mezcla de ellos, en este caso el nombre del suelo depende de los componentes principales o según el tamaño de grano que predomina en cantidad, según el caso el suelo se puede clasificar como arcillo limoso, areno arcilloso, franco arenoso [3].

La textura difiere según la cantidad de arena, limo y arcilla que contenga la muestra. Las partículas de arena son las más grandes, con tamaños de hasta 2 mm, mientras que las partículas de arcilla son menores de 0,002 mm. Las partículas mayores a 2 mm se llaman piedras o grava y no son consideradas como tierra. Se han propuesto varias y diferentes clasificaciones, las más importantes corresponden a las establecidas por el Departamento de Agricultura de los EE.UU., la propuesta por la sociedad Internacional de la Ciencia y el Suelo y la adoptada por la Unión Europea, las cuales se observan en la tabla 2.2

El primer paso, para una clasificación de la textura es agruparlos tomando en cuenta los porcentajes de las distintas fracciones que constituyen el suelo.

De acuerdo a [21] sobre la base de la textura (tamaño de las partículas), se consideran cuatro grandes grupos fundamentales y generales de suelos.

1. Líticos o pedregosos: son los que están integrados por las fracciones de mayor

Tabla 2.2: Principales sistemas de clasificación físico-mecánicos del suelo.

GRANULOMETRIA Denominación	FRACCIONES Denominación	FRACCIONES Diámetros (μm)
Departamento Agricultura EE.UU. (USDA)	Arena muy gruesa	2000 ϕ 1000
	Arena gruesa	1000 ϕ 500
	Arena media	500 ϕ 250
	Arena fina	250 ϕ 100
	Arena muy fina	100 ϕ 50
	Limo	50 ϕ 2
	Arcilla	2 ϕ
Sistema Internacional	Arena gruesa	2000 ϕ 200
	Arena fina	200 ϕ 20
	Limo	20 ϕ 2
	Arcilla	2 ϕ
Sistema Europeo	Arena gruesa	2000 ϕ 600
	Arena media	600 ϕ 200
	Arena fina	200 ϕ 60
	Limo grueso	60 ϕ 20
	Limo medio	20 ϕ 6
	Limo fino	6 ϕ 2
	Arcilla gruesa	2 ϕ 0.6
	Arcilla media	0.6 ϕ 0.2
	Arcilla fina	0.2 ϕ

tamaño. Se caracterizan porque la suma de las fracciones de limo y arcilla no superan el 18 % del total de la muestra.

2. Arenosos: Incluyen todos los suelos en los que el porcentaje de arenas alcanza un 70 % o más de todo el material en peso.
3. Francos: Contienen numerosas subdivisiones, pero el ideal puede ser definido como una mezcla de arena, limo y arcilla en iguales proporciones. Son los más importantes desde el punto de vista agrícola, ya que se trata de suelos fácilmente laborables se les conoce también como tierras francas.
4. Limosos y arcillosos: contienen en líneas generales más del 60 % y 45 % de limo y arcilla, respectivamente, y admiten también diversas subdivisiones.

El Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA) ha establecido para lograr una correcta diferenciación, un método de identificación que se muestra en la figura 2.1.

Para concretar la textura del suelo analizado, se localizan primeramente los porcentajes de limo y arcilla obtenidos en las líneas respectivas. Desde ellos se proyectan hacia el interior líneas paralelas, en el primer caso al lado del triángulo en que está la arcilla, y en el segundo al lado de la arena. La textura del suelo será la correspondiente a la zona donde se cruzan las dos líneas. Conocer el nombre de la textura es uno de los primeros datos que debe conocer el agricultor. La importancia de su estudio radica en la influencia que tiene en la cantidad de agua que puede almacenar un suelo, la facilidad

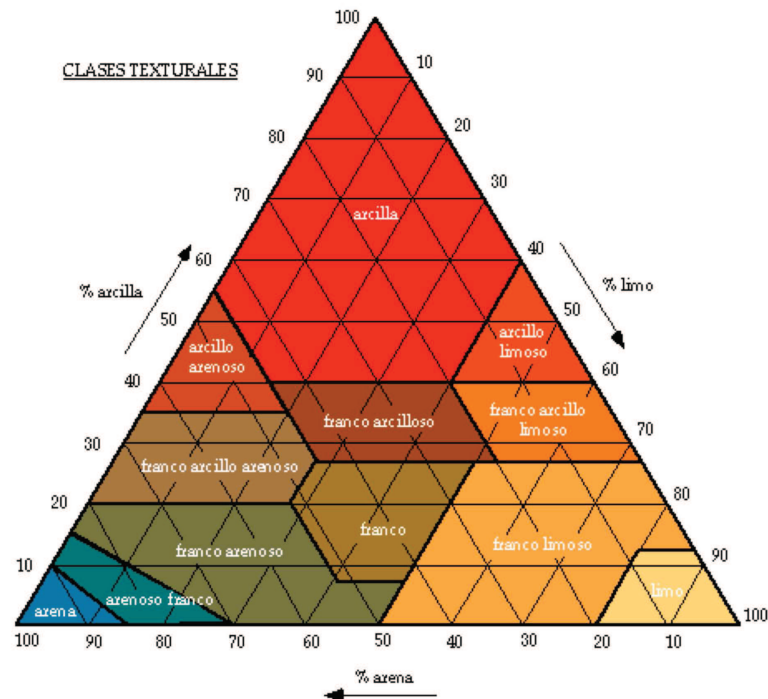


Figura 2.1: Diagrama para la determinación de la textura de los suelos.

de abastecimiento de nutrientes de agua y de aire, los cuales son de gran importancia para la vida de las plantas.

2.1.2. Disponibilidad de nutrientes

El suelo es el principal suministrador de nutrientes para las plantas, sin embargo, el mismo suelo puede ofrecer limitaciones para el uso de los mismos, tales como el pH. La disponibilidad de nutrientes para el uso de las plantas dependerá de las formas como están los nutrientes en el suelo y de la capacidad de intercambio de cationes. Además de lo anterior, la disponibilidad de nutrientes en el suelo dependerá del contenido de humedad de los mismos, por otro lado, la absorción de nutrientes por las plantas dependerá de aquellos nutrientes que estén en menor cantidad, en respuesta a la famosa “ley del mínimo”. Este es un tema muy complejo que no puede ser tratado en detalle en este tipo de documento.

2.1.3. Disponibilidad de agua

La disponibilidad de agua es una de las más importantes relaciones suelo-planta. El suelo almacena agua y la pone a disposición de las plantas dependiendo del contenido de humedad y potenciales de agua. Cada planta requiere de condiciones ideales de

abastecimiento de agua y cuando éstas no son cumplidas, la planta comienza a sufrir de “estrés hídrico”. El umbral de riego representa el mínimo contenido de humedad para no limitar el crecimiento y generalmente se expresa como una tensión o succión lo cual implica conocer la curva característica de humedad. Otra forma de expresar la humedad óptima para un cultivo es mediante el uso de porcentaje de agua útil.

2.1.4. Compactación

La compactación de los suelos afecta la densidad aparente de los mismos, disminuyendo el agua disponible, limitando la penetración de las raíces y reduciendo la aireación. La compactación puede ser provocada por un mal manejo de los suelos. El pie de arado, es uno de los efectos más conocidos.

2.1.5. Efecto de las plantas sobre el suelo

En los temas anteriores se ha mencionado el efecto de los suelos sobre las plantas; en esta sección se mencionarán algunos aspectos positivos de las plantas sobre los suelos. Entre los efectos más importantes son: a) incorporación de materia orgánica, b) protección contra la erosión, c) mejoramiento de la infiltración, d) fijación de nitrógeno y e) formación del suelo. Uno de los efectos más importantes es la incorporación de materia orgánica al suelo, la cual, a su vez, además de mejorar la fertilidad del suelo, tiene influencia sobre la infiltración, retención de humedad y erosión.

2.1.6. Temperatura del suelo

Procesos tales como la asimilación, la respiración, la transpiración, la fotosíntesis y el crecimiento dependen de la temperatura. La mayoría de las reacciones químicas que tienen lugar en la planta y en el suelo ocurren con mayor velocidad a temperaturas altas que a bajas. Los procesos físicos de difusión y flujo viscoso dependen de la temperatura.

Las plantas disponen de más agua en un suelo caliente que en uno frío, porque el caliente retiene menos agua, cualquiera que sea su potencial. En sistemas equilibrados, la dependencia de la temperatura del potencial de agua indica de entropía o inaprovechabilidad de energía.

2.2. Relaciones suelo – agua

El estudio y análisis de estas relaciones requiere de un conocimiento profundo de física de suelos, en especial de los “potenciales de agua en el suelo”. Como el objetivo de esta proyecto no es el estudio de los principios teóricos, se tratará de explicar la importancia de esas relaciones de una manera sencilla, así que a continuación se presenta una breve descripción de las relaciones más importantes.

Capacidad de retención de humedad.- Se refiere a la capacidad que tienen los suelos de retener humedad. Esta propiedad de los suelos depende de varios factores

entre los cuales se destacan: la textura, la densidad aparente, los coloides del suelo y la materia orgánica. Durante periodos relativamente cortos, esa característica es constante, sin embargo, el manejo de los suelos puede cambiarla en sentido positivo o negativo. Por ejemplo, la adición de materia orgánica mejora la retención; por el contrario, la compactación de los suelos la disminuye.

Infiltración.- Se refiere al paso del agua desde la superficie del terreno hacia el perfil del suelo. La tasa de infiltración depende de varios factores fijos tales como: a) textura del suelo, b) estratificación del suelo, c) materia orgánica, d) cobertura y de factores circunstanciales tales como contenido de humedad del suelo y forma de aplicación del agua. Hay otros factores modificadores como: compactación, salinidad, encostramiento, etc., que limitan la entrada de agua. Normalmente se mide en mm/h, y limita el ritmo de aplicación del agua al terreno para que no existan escurrimientos.

Según [17], la infiltración puede implicar:

- Un movimiento de agua unidimensional (vertical) tal como ocurre en riego por aspersión o por inundación.
- Un movimiento de agua bidimensional, como ocurre en el riego por surcos.
- Un movimiento de agua tridimensional, como ocurre en riego por goteo.

La infiltración es un proceso complejo que depende principalmente:

- Del tiempo de infiltración.
- Del contenido de agua en el suelo y de la historia del humedecimiento previo.

Redistribución.- Es el proceso mediante el cual el agua se mueve en el suelo de acuerdo a los “potenciales del agua” del mismo. De esa manera, ésta se mueve desde sitios de mayor contenido de humedad (potencial) hacia otros de menor potencial.

Ascenso capilar.- Es el movimiento del agua desde el nivel freático por efecto de la capilaridad de los suelos. El ascenso capilar depende de la textura y composición de los suelos y de los gradientes de humedad existentes. El ascenso capilar puede alcanzar alturas mayores de un metro.

Conductividad hidráulica.- Puede definirse como la capacidad de transmisión de agua de los suelos, esta puede ser saturada o no saturada. En la práctica sólo se usa la conductividad hidráulica saturada, comúnmente llamada permeabilidad. Esta propiedad de los suelos depende en gran parte de la textura de los suelos.

Curvas de drenaje de los suelos.- Indica la forma mediante la cual el suelo pierde agua por efecto de la gravedad.

2.2.1. Contenido y tipos de agua en el suelo.

Con el fin de facilitar el manejo eficiente del riego, se han definido unos parámetros que describen el contenido de agua en el suelo y tipos de agua en el suelo entre otros. Estos parámetros se definen a continuación.

Agua en el suelo.- Puede agruparse en tres grados de unión con las partículas del suelo según se representa en la figura 2.2.

- Agua higroscópica. No está disponible para las plantas y esta fuertemente fijada por las partículas del suelo.
- Agua capilar. Está retenida en los poros del suelo, es decir, logra vencer la acción de la gravedad; por lo que una parte es más móvil y por lo tanto se encuentra disponible para la planta y la restante está unida con más fuerza a las partículas del suelo.
- Agua libre o gravitacional. Llena momentáneamente los grandes poros del suelo, ya que es arrastrada por la acción de la gravedad en los suelos correctamente drenados.

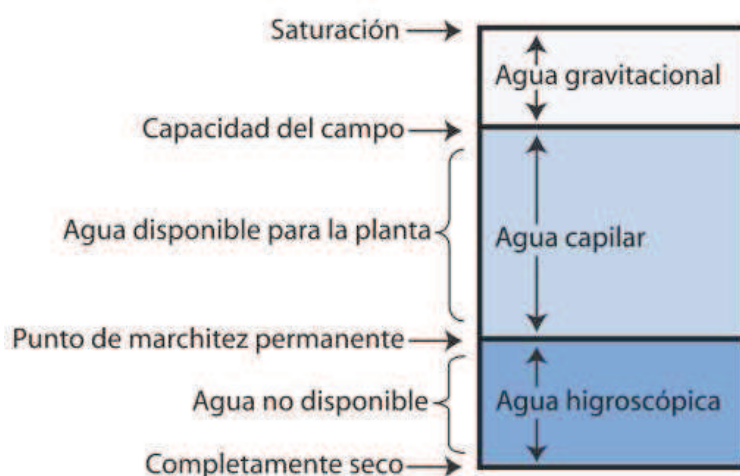


Figura 2.2: Parámetros del contenido de agua en el suelo y tipos de agua en el suelo.

Capacidad de campo o de retención.- La capacidad de campo es el contenido de agua en el suelo después de aplicar un riego pesado y cuando la velocidad del drenaje cambia de rápida a lenta. Este punto se logra cuando toda el agua gravitacional se ha drenado (figura 2.2.) La capacidad de campo se logra normalmente dos o tres días después del riego y se alcanza cuando la tensión del agua en el suelo es de aproximadamente 0.3 bars (30 centibars ó 3 m de columna de agua), en suelos arcillosos, o de 0.1 bars, en suelos de textura media [20].

Punto de marchitez permanente.- El punto de marchitez permanente es el contenido de agua en el suelo al cual las plantas pueden acceder y se marchitan aún

cuando se les adiciona suficiente humedad. Este parámetro puede variar de acuerdo a las especies de las plantas y al tipo de suelo, y ha sido determinado por experimentos en invernaderos. Este punto se logra cuando la tensión del agua en el suelo alcanza entre 10 y 20 bars (de 102 a 204 m de tensión). Generalmente se utiliza un valor medio de 15 bars (153 m). El nivel de agua higroscópica se alcanza cuando el agua está retenida fuertemente por las partículas del suelo (por debajo del punto de marchitez permanente) y no puede ser extraída por las raíces de la planta. (Ver figura 2.2)[20].

De acuerdo a estos dos conceptos el agua que esta disponible para la planta es la que se encuentra entre la capacidad de campo y el punto de marchitez, aumentando la dificultad de la misma a medida que el contenido de agua se aproxima al punto de marchitez como se observa en la figura 2.2. El agua disponible para la planta es un parámetro que se expresa en pulgadas de agua por pie de profundidad del suelo. Éste depende de factores tales como la textura del suelo, densidad aparente y estructura del suelo.

Agua disponible para la planta.- El agua disponible para la planta es el contenido de agua retenido entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente.

Contenido gravimétrico de agua.- Es una medida directa de la humedad del suelo y es el método estándar para calibrar otras técnicas de determinación del agua en el suelo. La técnica de secado del suelo en el horno es probablemente la más utilizada de todos los métodos gravimétricos para medir su contenido de agua. Esta técnica consiste en tomar una muestra del suelo con una barrena. La muestra se coloca en un recipiente y se pesa; posteriormente se seca en un horno a 105°C hasta que se obtiene un peso constante (normalmente después de 24 horas), después se vuelve a pesar. El contenido gravimétrico de agua es la cantidad de agua en la muestra por porcentaje de peso seco del suelo y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Contenido gravimétrico de agua (\%)} = \frac{PSH - PSS}{PSS} \times 100$$

donde:

PSH: Peso del suelo húmedo.

PSS: Peso del suelo seco (secado durante 24 hrs. a 105 °C).

Densidad aparente.- La densidad aparente es el peso del suelo seco por unidad de volumen de suelo. Esta propiedad está relacionada con la porosidad (espacio poroso) y la compactación; se utiliza para calcular el contenido volumétrico de agua del contenido gravimétrico de agua. Generalmente este parámetro se expresa en gramos por centímetro cúbico de suelo, de acuerdo a:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{PSS}{VS}$$

donde:

PSS: Peso de suelo seco.

VS: Volumen de suelo.

Contenido volumétrico de agua en el suelo.- El contenido volumétrico de agua del suelo se utiliza comúnmente para expresar el contenido de agua en el suelo. Éste se obtiene al multiplicar la densidad aparente del suelo por el contenido gravimétrico de agua.

2.2.2. Fuerzas de retención del agua en suelos no saturados

En el momento que se alcanza la capacidad de campo, el agua que se mantiene en el suelo rellenando los poros pequeños queda sometida a fuerzas que tienden a retenerla. Una es la atracción de las superficies sólidas para las moléculas de agua, que se conoce como fuerza de adherencia y la otra es la atracción de las moléculas de agua entre sí, que se llama fuerza de cohesión [21].

Fuerza de adherencia.- Es la fuerza de atracción del suelo para partículas de agua (adhesión), la cual provoca una acumulación de ésta sobre la superficie de las partículas del suelo, formando una película cuando el agua líquida se pone en su contacto, lo que da lugar a una reducción en el movimiento de las partículas de agua, ya que éstas quedan fuertemente absorbidas. Esta agua se conoce como “agua de adhesión“, no es aprovechable por las plantas, está siempre presente en todo suelo normal y solo puede eliminarse por desecación.

Fuerza de cohesión.- Más separadas de la esfera de fuerte atracción de las partículas del suelo, las moléculas de agua se mantienen unidas por cohesión y originan una segunda película líquida. Esta agua se llama agua de cohesión y esta sometida a un cierto movimiento por acción de la gravedad. El mecanismo de esta unión está fundamentado en las cargas negativas y positivas que poseen las moléculas de agua. Estas moléculas son dipolares, ya que la compartición de electrones entre el oxígeno y el hidrógeno produce moléculas cargadas negativamente en el lado del primero y cargadas positivamente en el lado donde sale el protón de hidrógeno. Por ello, tienden a atraerse entre sí por el enlace de hidrógeno como se muestra en la figura 2.3.

Los términos “succión“, “tensión hídrica“ y “potencial mátrico“, se usan para designar la fuerza con la que el agua es retenida en el suelo por estas fuerzas. Se mide en centibares (cB), es decir la centésima parte de un Bar. 760mm de Hg son equivalentes a 1 Atmósfera (Atm) y a 1.013 Bares (B). 1 cB es equivalente a 7.5002 mm de Hg.

Una definición mas formal del potencial matricial o tensión hídrica del suelo es la siguiente: A la fuerza de unión entre la fase sólida del suelo y la líquida se le conoce

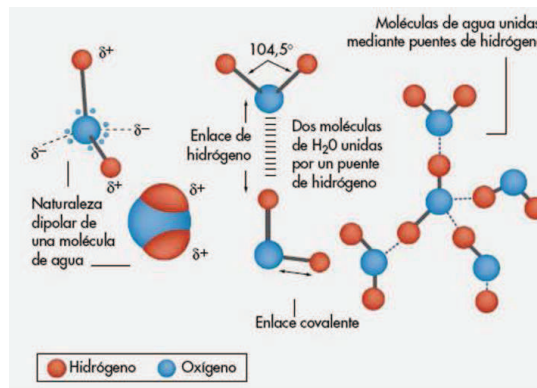


Figura 2.3: Enlace por puente de hidrógeno entre moléculas de agua [19].

como “potencial matricial” y se le representa por Ψ . Como es una fuerza por unidad de superficie, se expresa en unidades de presión y se le otorga un signo negativo, pues es una fuerza que se opone al movimiento de las moléculas de agua. Tradicionalmente se le ha expresado en atmósferas y ahora se hace kilopascales (kPa) y al logaritmo de su opuesto, cuando se expresa en milibares, se le representa por “pF”. Existe una cierta proporcionalidad entre el valor del potencial matricial y el contenido de humedad. [18].

Un kilopascal (kPa) es equivalente a un centíbar. El centíbar es una unidad de presión equivalente a 0.01 atmósferas. Por lo tanto, no es necesaria una conversión entre kilopascales y centibars.

La tensión hídrica del suelo es la principal fuerza que las plantas deben vencer para obtener el agua del suelo. Las principales condicionantes para la retención de agua asimilable y en consecuencia para su utilización por parte de la planta son las características y composición del suelo.

2.3. Métodos para determinar la humedad del suelo.

El monitorear el contenido de agua en el suelo es esencial para ayudar a los agricultores a optimizar la producción, conservar agua, reducir los impactos ambientales y ahorrar dinero. El monitorear la humedad del suelo le puede ayudar a tomar mejores decisiones en la programación del riego, tales como determinar la cantidad de agua a aplicar y cuándo aplicarla. También le puede ayudar a igualar los requerimientos de agua del cultivo con la cantidad aplicada con el riego y así evitar pérdidas de agua excesivas por percolación profunda o por escurrimientos o bien evitar aplicar una cantidad insuficiente.

El exceso de irrigación puede incrementar el consumo de energía y los costos de agua, aumentar el movimiento de fertilizantes por debajo de la zona radicular, producir erosión y transporte de suelo y partículas de químicos a los canales de drenaje. El riego

insuficiente puede reducir la producción de las cosechas [20].

2.3.1. Método gravimétrico

Esta técnica mide la masa del agua contenida en el suelo (porcentaje del peso del suelo seco *vs* porcentaje del peso del suelo húmedo). En el método gravimétrico se recolecta una muestra del suelo, se pesa, se seca en el horno durante 24 horas a 105°C y se pesa nuevamente para determinar el contenido de agua de la muestra. Para obtener el contenido volumétrico se multiplica por la densidad aparente. Sus ventajas y desventajas se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Ventajas y desventajas del método gravimétrico.

Desventajas	Ventajas
• Es una prueba destructiva	• Garantiza una medición exacta
• Se requiere de 24 horas de secado de la muestra	• Fácil de calcular
• Se debe de conocer la densidad aparente del suelo seco para poder conocer el contenido volumétrico	• No depende del tipo de suelo o de su salinidad

2.3.2. Método de dispersión de neutrones

Este método es ampliamente utilizado para estimar el contenido volumétrico de agua en el suelo al calcular la cantidad de hidrógeno presente mediante el uso de una sonda de neutrones que consiste en una unidad hecha de una fuente de neutrones rápidas y de alta energía (fuente de radioactividad encapsulada) y de un detector. Esta sonda se introduce en un tubo de PVC o aluminio a la profundidad deseada, la cual está conectada a una unidad de control que permanece en la superficie por medio de un cable. Los neutrones rápidos, emitidos de la fuente y que pasan a través del tubo de acceso dentro del suelo adyacente, pierden gradualmente su energía por medio de colisiones con otros núcleos atómicos. Los neutrones chocan con el hidrógeno del agua del suelo y pierden velocidad. Los neutrones lentos rebotan de nuevo a un detector, creando un impulso eléctrico que se registra automáticamente y proporciona un determinado número de neutrones por período de tiempo. Básicamente, este número de pulsos está relacionado linealmente con el contenido volumétrico total del agua en el suelo. Un registro más alto indica un mayor contenido de agua en el suelo. Mientras la relación sea lineal, el dispositivo se debe calibrar para cada tipo de suelo. Sus ventajas y desventajas se pueden ver en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Ventajas y desventajas del método de dispersión de neutrones.

Desventajas	Ventajas
•Es costoso	•No es destructivo
•Se debe calibrar para diferentes tipos de suelos	•Tiempo de respuesta de 1 a 2 minutos y la salinidad
•Requiere de procesos de seguridad para la radiación	•Medición directamente relacionada con el contenido de agua del suelo
•La medición depende de la física y propiedades químicas del suelo	•Es uno de los métodos mas exactos cuando se calibra con el método gravimétrico
• No puede proporcionar una lectura precisa en las primeras 6 pulgadas de profundidad del suelo	•Capacidad para medir el contenido volumétrico de agua en el suelo a diferentes profundidades
•Depende de la densidad del suelo seco	

2.3.3. Método por atenuación de rayos gamma

La determinación de la humedad por atenuación de rayos gamma es un método no destructivo que requiere calibrado y que mide el contenido volumétrico de agua en el suelo con un tiempo de respuesta menor a 1 minuto. Se basa en la asociación de una fuente emisora, generalmente Cs137 que emite una radiación gamma y un detector, que suele ser un contador de Centelleo, formado por un cristal de yoduro sódico colocados en tubos perfectamente paralelos y separados una cierta distancia exactamente medida. Es sólo razonable aplicarlo en el laboratorio, al ser allí posible definir con precisión la geometría del sistema. Sus ventajas y desventajas se exponen en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Ventajas y desventajas del método por atenuación de rayos gamma

Desventajas	Ventajas
•Limitado a suelo con espesor de una pulgada o menos pero con alta resolución	•Puede ser utilizado para hacer mediciones automáticas
•Es Afectado por el cambio de densidad aparente del suelo	•Medición no destructiva
•Costoso y difícil de utilizar	
•Presenta grandes errores cuando se utiliza en un suelo muy estratificado	

2.3.4. Sensor resistivo de yeso

Las técnicas electromagnéticas incluyen métodos que dependen del efecto de la humedad sobre las propiedades eléctricas del suelo. Uno de los métodos más comunes de estimación del potencial matricial es con bloques de yeso o porosos. El dispositivo consiste en un bloque poroso que contiene dos electrodos conectados a un alambre

conductor, el cual responde a los cambios de humedad del suelo de acuerdo a la profundidad en que éstos son colocados en el suelo al medir la resistencia eléctrica entre dos círculos de malla de alambre que están conectados por un material poroso. Sus ventajas y desventajas se pueden apreciar en la tabla 2.6.

Tabla 2.6: Ventajas y desventajas de usar sensores resistivos de yeso

Ventajas	Desventajas
• Buena precisión	• Requiere mano de obra intensa para recolectar información
• Fácil manejo	• Falta de precisión en suelos arenosos debido a sus partículas grandes
• Rango amplio de lecturas	• Requiere calibración para utilizarse en cada tipo de suelo
• Útil durante varias temporadas	• Respuesta lenta a cambios en el contenido de agua en el suelo después de una lluvia o un riego

2.3.5. Sensor capacitivo

Estos sensores miden los cambios en la constante dieléctrica del suelo con un capacitor que consta de dos placas de un material conductor, separadas por una distancia corta (menos de $\frac{3}{8}$ de pulgada). Se aplica un voltaje en un extremo de la placa y el material que está entre las dos placas almacena cierto voltaje. Un medidor lee el voltaje conducido entre las placas para determinar el contenido volumétrico de agua en el suelo. Sus ventajas y desventajas se pueden observar en la tabla 2.7.

Tabla 2.7: Ventajas y desventajas de usar sensores capacitivos

Desventajas	Ventajas
• Estabilidad a largo plazo cuestionable	• El contenido de agua puede ser determinado a cualquier profundidad
• Costoso	• No requiere de mantenimiento especial
	• Amplio rango de operación
	• Alta precisión

2.3.6. Método de reflectometría en dominios magnéticos de tiempo (TDR)

Los sensores TDR miden la constante dieléctrica del suelo afectado contra el valor dieléctrico del agua líquida (100 % de contenido de humedad) y la arena completamente seca. El TDR trabaja con el mismo principio del radar, es decir un pulso de energía se transmite a través de una guía de onda y cuando dicho pulso llega al final de la línea la energía del pulso se refleja nuevamente a la entrada. Las medidas de TDR relacionan

las constantes de la propagación de las ondas electromagnéticas, como la velocidad y la atenuación, con las propiedades del suelo como el contenido de agua y la conductividad. Sus ventajas y desventajas se muestran en la tabla 2.8.

Tabla 2.8: Ventajas y desventajas de usar reflectometría en dominios magnéticos de tiempo.

Ventajas	Desventajas
• Logra una exactitud superior al 97 %	• Elevado costo
• Produce una mínima perturbación en el suelo	• Aún en fase de experimentación
• La medición se basa en muestras mas extensas que los métodos anteriores	• Alta precisión

2.3.7. Tensiómetro.

El tensiómetro mide la tensión o la succión del agua del suelo. Este instrumento consiste de un tubo de plástico lleno de agua y herméticamente cerrado, equipado con un manómetro de vacío en la parte superior y una cápsula de cerámica porosa en el extremo inferior. Sus ventajas y desventajas se presentan en la tabla 2.9.

Tabla 2.9: Ventajas y desventajas de usar tensiómetros

Desventajas	Ventajas
• Alcance limitado de operación de 0 a 80 centibares inadecuado para suelos arenosos	• Trabaja bien en suelos saturados
• Difícil conversión de los datos a contenido volumétrico de agua	• Puede operar en suelo congelado con etilenglicol
• Requiere mantenimiento diario o semanal dependiendo del rango de las mediciones	• Barato
• Perturba el suelo por encima del punto de medición y puede permitir la infiltración del agua de riego o de lluvia a lo largo de su tallo	• Se puede adaptar para medir automáticamente con sensores de presión

2.3.8. Técnicas de teledetección o sensado remoto

Este método incluye satélites, radar (microondas) y otras técnicas de no contacto. El sensado remoto de la humedad del suelo depende de la medición de la energía electromagnética que ha sido reflejada o emitida desde la superficie del suelo. La intensidad de esta radiación con la humedad del suelo puede variar dependiendo de las propiedades dieléctricas, temperatura del suelo, o alguna combinación de ambas. Para el radar activo, la atenuación de la energía de microondas puede ser utilizada para indicar el contenido de humedad de medios porosos debido al efecto del contenido de

humedad en la constante dieléctrica. Las longitudes de onda termales son comúnmente utilizadas para esta medición. Sus ventajas y desventajas se pueden ver en la tabla 2.10.

Tabla 2.10: Ventajas y desventajas de usar técnicas de teledetección o sensado remoto [22]

Espectro	Propiedad observada	Ventajas	Desventajas
Radiación gamma	Atenuación de radiación emitida naturalmente	Existencia de programas aerotransportados	Resolución espacial limitada; promedios a lo largo de una línea; necesidad de calibración
Visible	Albedo; índice de refracción	Datos disponibles	La relación entre la reflectancia espectral y la humedad del suelo no es única; capa del suelo muy fina; interferencia de las nubes
Infrarrojo térmico	Temperatura superficial	Buena resolución espacial	Solo para suelos desnudos; Interferencia de las nubes de la topografía superficial; capa del suelo entre 2-4 cm.
Microondas activo	Coeficiente de retrodispersión; constante dieléctrica	Buena resolución espacial; sin interferencia de la nubosidad	Rugosidad superficial; vegetación topográfica
Microondas pasivo	Temperatura de brillo; constante dieléctrica	Sin interferencia de la nubosidad; amplia cobertura espacial	Resolución espacial limitada; Rugosidad superficial; vegetación; Interferencia con telecomunicaciones

2.3.9. Métodos ópticos

Los métodos ópticos se basan en los cambios en las características de la luz debido a las características del suelo. Estos métodos implican el uso de luz polarizada, fibra óptica y sensores de infrarrojo cercano. El método de la luz polarizada se basa en el principio de que la presencia de humedad en una superficie reflectora tiende a causar polarización en el haz reflejado. Para usar esta técnica, una fuente de luz acromática se dirige a la superficie del suelo. Los sensores de fibra óptica se basan en una sección de fibra sin revestimiento incrustada en el suelo. La atenuación de la luz en la fibra varía con la cantidad de agua en el suelo en contacto con la fibra debido a su efecto en el índice de refracción y por lo tanto en el ángulo crítico de reflexión interna. Los métodos que utilizan el infrarrojo cercano dependen de la absorción molecular en distintas longitudes de onda por el agua en las capas superficiales; por lo tanto, no son aplicables cuando la distribución de la humedad no es muy homogénea. Estos métodos miden el contenido de agua en el suelo de manera instantánea, pero están todavía en desarrollo y etapas experimentales.

Capítulo 3

Desarrollo del instrumento

Para atender la problemática descrita en los capítulos anteriores, se propone el desarrollo de un instrumento para medir la tensión hídrica y la temperatura del suelo en forma continua.

El diseño y la construcción del instrumento contempló que se constituyera por los módulos que se muestran en el diagrama a bloques de la figura 3.1. Debido a que el desarrollo fue hecho de manera modular, durante todo el proceso se tuvo la premisa de la compatibilidad que debía de existir entre los mismos para la conformación integral del instrumento.

En los siguientes apartados se presenta la descripción de cada uno de ellos, así como de la circuitería y de sus principales componentes según sea el caso.



Figura 3.1: Diagrama a bloques del instrumento de medición de la tensión hídrica y temperatura del suelo.

3.1. Sistema de administración de energía

También conocido como BMS (por sus siglas en inglés Battery Management System) y está compuesto por los elementos que se muestran en la figura 3.2 que se describen en las secciones subsecuentes.



Figura 3.2: Diagrama a bloques del sistema de administración de energía.

Este sistema en particular cumple con las siguientes funciones:

- Proporciona la alimentación al instrumento.
- Protege y prolonga la vida de las baterías.

3.1.1. Batería de ión de Litio

Una batería es un dispositivo que convierte la energía química, contenida en sus materiales activos, en energía eléctrica por medio de una reacción electroquímica de oxidación-reducción. Las baterías se clasifican en primarias y secundarias:

Las primarias: no son capaces de recargarse eléctricamente, por consiguiente una vez que se descargan son desechadas.

Las secundarias: se pueden recargar eléctricamente casi a su estado original mediante el paso de la corriente, a través de ellas, en la dirección opuesta a la de descarga.

Muchos avances se han hecho en la tecnología de baterías en los últimos años, como se ilustra en en la figura 3.3, tanto a través de la mejora continua de su sistema electroquímico específico como mediante el desarrollo e introducción de nuevos materiales.

La producción de energía de la batería se expresa como una proporción de su peso y volumen. La terminología preferida para esta relación, en base a su peso, es el Watthora/kilogramo (Wh/kg) llamada energía específica y, en base a su volumen, es el Watthora/Litro (Wh/L) que representa la densidad de energía. Comúnmente, el término “densidad de energía” puede usarse para referirse a cualquiera de las relaciones mencionadas [15].

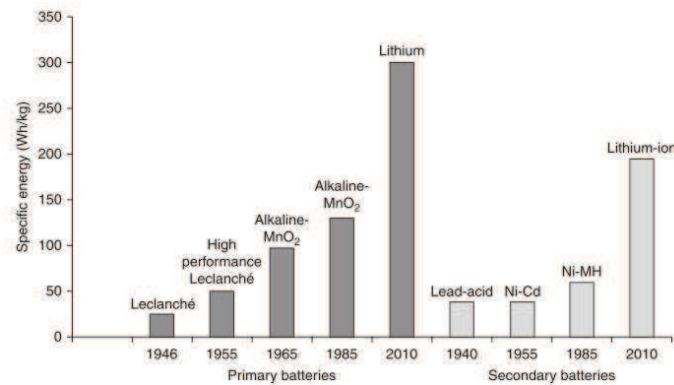


Figura 3.3: Avances en el rendimiento de las baterías para aplicaciones portátiles[15].

Una comparación de la energía específica (Wh/kg) y densidad de energía (Wh/L) entregada por las baterías secundarias se representa en la figura 3.4. En esta figura, la capacidad de almacenamiento de energía se muestra como un campo, en lugar de un valor, para ilustrar la cobertura en el rendimiento del sistema de la batería bajo diferentes condiciones de uso.

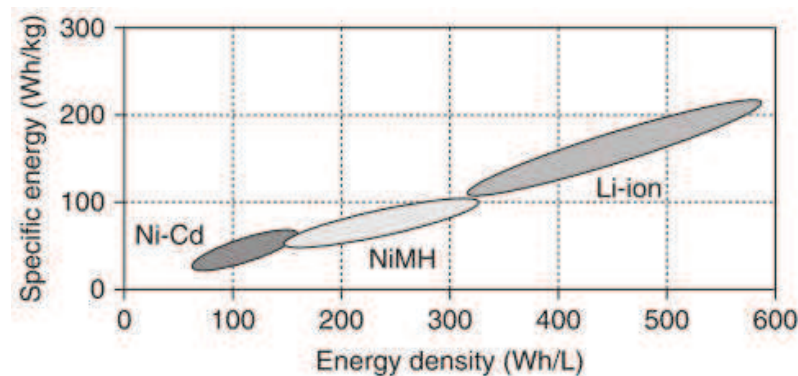


Figura 3.4: Comparación de la capacidad de almacenamiento de energía de baterías secundarias [15].

En base al rendimiento y densidad de energía de las diferentes tecnologías se decidió usar baterías secundarias de ión de Litio (Li-ion), ya que el instrumento así lo requiere para funcionar 24 horas al día, todos los días de la semana. La batería elegida se muestra en la figura 3.5 y tiene las siguientes especificaciones:

- Energía específica 192.4 Wh/Kg.
- Densidad de energía 515.81 Wh/L.
- Capacidad nominal 2600 mAh.
- Electrónica de protección.

- Voltaje nominal de 3.7 Vc.d.
- Ciclo de vida mayor a 500 recargas.
- Corriente de carga: 0.5 mA.c.d., de su capacidad nominal.
- Corriente máxima de descarga, 1.5 veces su capacidad nominal.

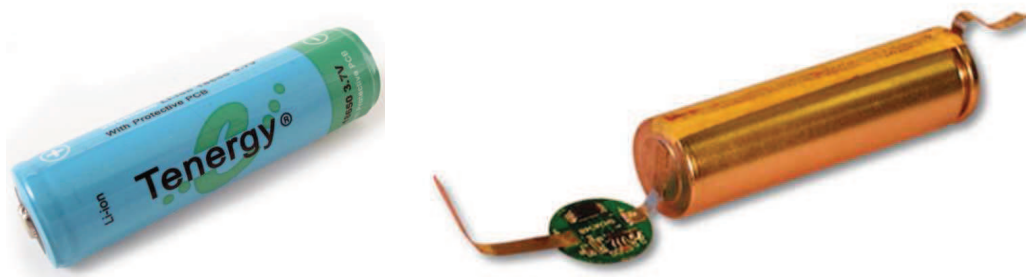


Figura 3.5: Batería recargable de ión de Litio 18650 de Tenergy

3.1.2. Circuito controlador de energía MCP73833 de Microchip

Como se eligió usar baterías de ión de Litio surgió la necesidad de seleccionar un controlador de carga adecuado para este tipo de baterías, uno de los más simples pero que cumple con las funciones básicas para poder conformar el sistema de administración de energía es el circuito MCP73833 de Microchip que se muestra en la figura 3.6 con su diagrama de aplicación.

Las características con las que cuenta este controlador son:

- Corriente de carga de hasta 1Ac.d. programable.
- Protección contra descargas.
- Monitoreo de temperatura de la batería.
- Indicadores del estado de cargado.

En la tabla 3.1 se muestra la etapa en que se encuentra el proceso de cargado dependiendo del estado de los diodos emisores de luz, así como el consumo de energía en cada etapa.

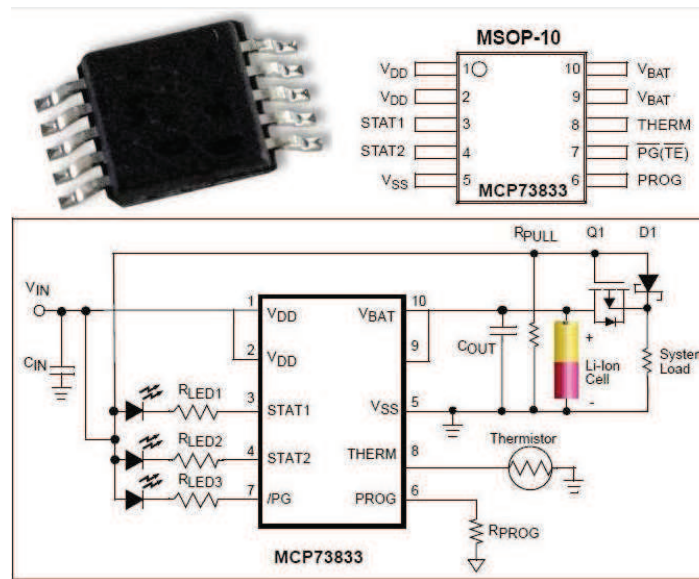


Figura 3.6: Circuito controlador de energía MCP73833 de Microchip

Tabla 3.1: Estados del proceso de cargado de la batería

Estado del ciclo de carga	Stat1	Stat2	PG
Apagado	Apagado	Apagado	Apagado
En espera (100 μ A)	Apagado	Apagado	Encendido
Carga en proceso (2 mA)	Apagado	Apagado	Encendido
Carga completa (150 μ A)	Apagado	Encendido	Encendido
Falla por temperatura	Apagado	Apagado	Encendido
Falla por temporización	Apagado	Apagado	Encendido
Sistema en modo de prueba	Encendido	Encendido	Encendido

3.1.3. Panel solar 750-00030 de Parallax

Al proceso de extraer energía del medio ambiente, en sus diversas formas (como por ejemplo: térmica, mecánica, solar, acústica, eólica o de las olas), se le denomina cosechado de energía. La tabla 3.2 muestra algunos de los métodos de cosechado más comunes con sus respectivas capacidades de generación energética.

Considerando información anterior, se optó por utilizar celdas solares para alimentar al circuito controlador de energía MCP73833. Se seleccionó el panel solar 750-00030 de Parallax que se muestra en la figura 3.7 y que tiene las siguientes características:

- Celdas de silicio monocristalino.
- Potencia máxima 1 W.
- Voltaje máximo 6 Vc.d.

Tabla 3.2: Fuentes de cosechado de energía [6]

Método de cosechado	Densidad de potencia
Celda solar	$15mW/cm^2$
Piezoeléctrico	$330 \mu W/cm^3$
Vibración	$116 \mu W/cm^3$
Termoeléctrico	$40 \mu W/cm^3$

- Corriente máxima 0.17 Ac.d.
- Voltaje en circuito abierto 6.9 Vc.d.
- Corriente de cortocircuito 0.18 Ac.d.
- Espesor de la celda 0.18 mm $\pm 20\mu m$.
- Tamaño de panel (ancho y alto) $12.5*6.3 cm^2$.
- Número de celdas 12.
- Temperatura de operación, con un alcance de 0 a 70°C.

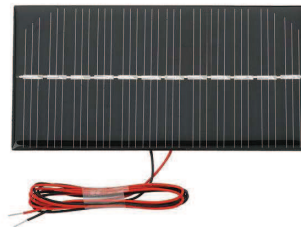


Figura 3.7: Panel solar modelo 750-00030 de Parallax.

3.2. Sistema mínimo

En esta sección se describen los elementos básicos que componen el sistema mínimo de la figura 3.8. El microcontrolador es la unidad más importante del instrumento porque ejecuta el código, proporciona el control y la comunicación entre los dispositivos que se le han integrado para la conformación del sistema.



Figura 3.8: Sistema mínimo.

3.2.1. Microcontrolador Atmega 328P de Atmel

El control de periféricos y etapas de comunicación del instrumento se basa en el microcontrolador Atmega 328P de Atmel, su elección fue hecha por la adecuación de sus características a las necesidades del proyecto. Es un microcontrolador de 8 bits de bajo consumo de energía, basado en una arquitectura avanzada del tipo RISC. El voltaje de operación óptimo comprende de 1.8 a 5.5 Voltios, con una frecuencia de reloj máxima de 20 MHz. cuenta con 32KBytes de memoria flash, 1KByte de eeprom y 2KBytes de ram. Su tipo de encapsulado y la descripción de sus patillas de salida se muestran en la figura 3.9.

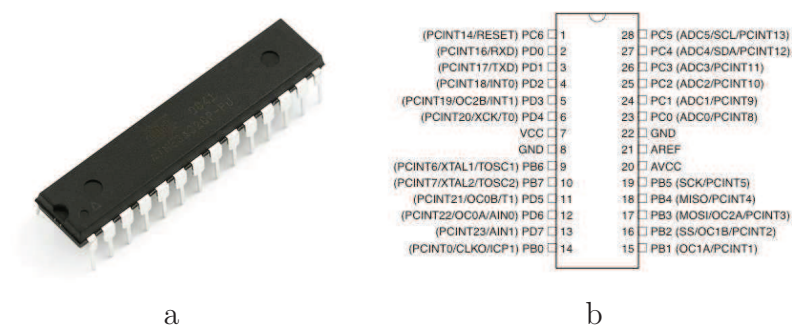


Figura 3.9: a) Microcontrolador Atmega328P de Atmel y b) Descripción de las patillas de salida

Los periféricos de mayor interés para este proyecto son los módulos proporcionados por dicho microcontrolador, tales como: la interfaz USART, la SPI y la I^2C .

El módulo USART del microcontrolador ayudará a la configuración del instrumento permitiéndole comunicarse con una computadora. La conexión se realizó mediante un cable FTDI, que es un conversor serie-USB (TTL) que permite conectar dispositivos TTL por USB. La utilización del protocolo SPI que proporciona el microcontrolador se usa para establecer comunicación con el convertidor analógico-digital, extraer los valores de los sensores, y también para comunicarse con la memoria eeprom y almacenar los datos adquiridos. La interfaz I^2C permite la comunicación con el circuito de tiempo real, para la escritura y lectura de la hora, fecha, alarmas, interrupción y temporizador.

El I^2C protocolo es fundamental para establecer la sincronía que el circuito de tiempo real proporciona con todos los dispositivos electrónicos utilizados, así como también, el periodo para tomar la muestra de la variable de interés.

Otra de sus actividades por realizar es la conversión de diferentes datos como lo son la hora, fecha y datos de las variables de interés que proporcionan los diversos dispositivos electrónicos, para su visualización adecuada para los usuarios. Su diagrama a bloques se muestra en la figura 3.10

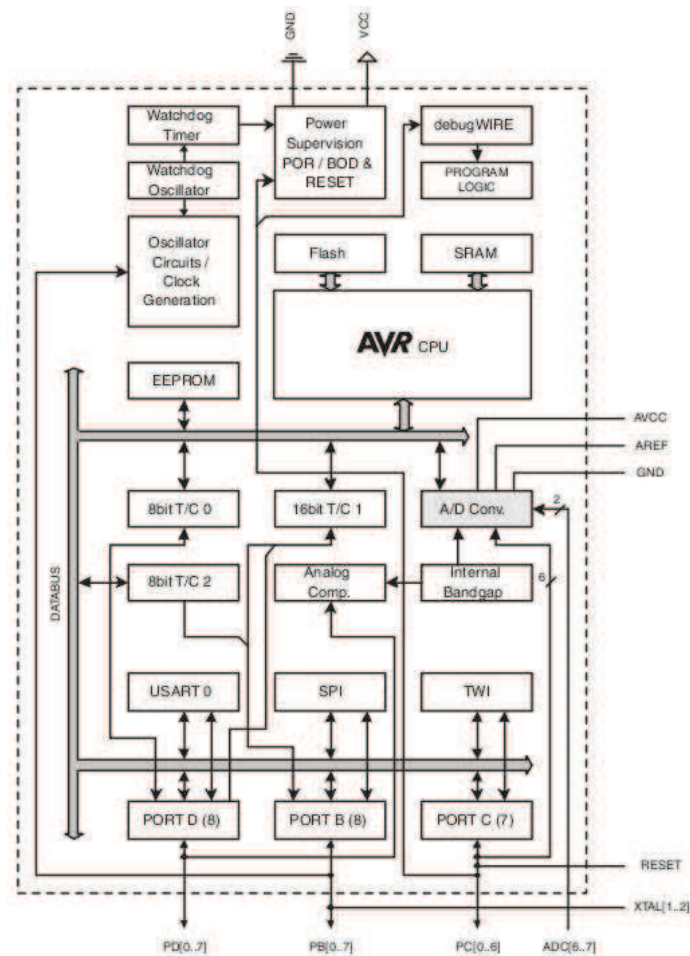


Figura 3.10: Diagrama a bloques del microcontrolador ATmega328P Atmel.

El código para el microcontrolador se realizó con ayuda del paquete AVR Studio 5 mostrado en la figura 3.11, que es el Entorno de Desarrollo Integrado de Atmel (IDE por sus siglas en inglés) para el desarrollo de proyectos con varios de sus productos, relacionados con sus microcontroladores. Incluye las siguientes herramientas:

- Un editor de códigos, para editar los programas.
- Permite mostrar los códigos fuente a colores, con números de línea, etc.

- Un administrador de proyectos,
- Los compiladores de software libre GCC AVR y GCC AVR32 en su versión para Windows (WinAVR), para desarrollar programas en C de los AVR de 8 y 32 bits, como los ATtiny, megaAVR, ATxMega y AVR32.
- El simulador AVR Simulator, para simular los programas de los AVR tanto en lenguaje C como en ensamblador.
- El paquete AVR Software Framework o ASF, que es un conjunto de más de 400 proyectos de ejemplo en lenguaje C para los AVR de 8 y de 32 bits, desde el uso de puertos hasta el control del puerto USB.
- Un sistema completo de ayuda.

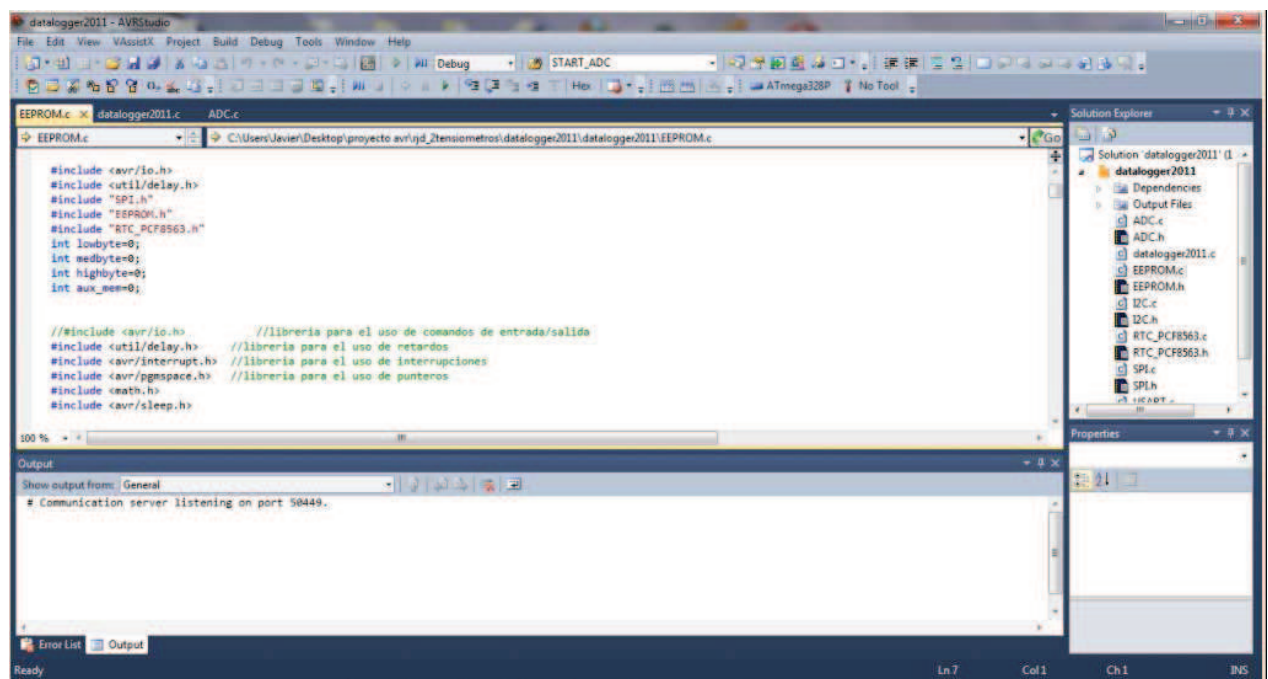


Figura 3.11: AVR Studio 5.

3.2.2. Convertidor analógico digital MCP32008

El circuito MCP3008 de Microchip que se muestra en la figura 3.12 junto con la descripción de sus patillas de salida cuenta con 8 entradas analógicas, comunicación SPI y tecnología CMOS, utiliza un convertidor analógico-digital de aproximaciones sucesivas con resolución de 12 bits.

Opera en un alcance de voltaje de 2.7 a 5.5 Voltios, su bajo consumo de corriente en espera es típico de 500 nA y una corriente activa de 400 μ A a 5V. Puede capturar una

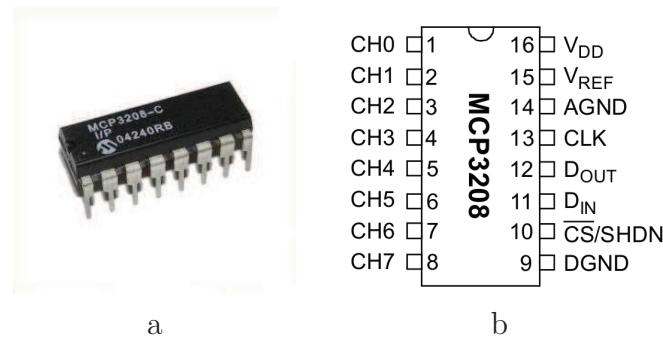


Figura 3.12: a) Convertidor analógico digital MCP32008 b) Descripción de las patillas de salida

muestra a 100 KHz (con voltaje de polarización de 5 Voltios) o 50 KHz (con voltaje de polarización de 2.7 Volts).

3.2.3. Memoria eeprom 25AA1024

Aunque el instrumento cuenta con transmisión inalámbrica de los datos, los cuales son almacenados en un servidor Web, el uso de una memoria no volátil es indispensable para tener un respaldo de la información obtenida; en el caso de que la comunicación llegue a fallar, es por esto que se empleó un dispositivo de almacenamiento con capacidad moderada.

El circuito integrado 25AA1024 que se muestra en la figura 3.13 es una memoria eeprom con capacidad de almacenamiento de 1024 Kbits, 256 bytes por página y comunicación SPI. Contiene funciones predefinidas que permiten el borrado parcial o total de su contenido. Puede operar en un alcance de voltaje de 1.8 a 5.5 Voltios, su velocidad máxima de reloj es de 20 MHz, tiene un bajo consumo en potencia, ya que está construida con tecnología CMOS (5mA para escritura, 7mA para lectura y 1μA en espera y lo anterior trabajando a 5.5V y 20 MHz). Además, soporta 1 millón de ciclos de borrado y posee un tiempo de retención de más de 200 años y puede operar en un alcance de temperatura de -40 a 85 °C

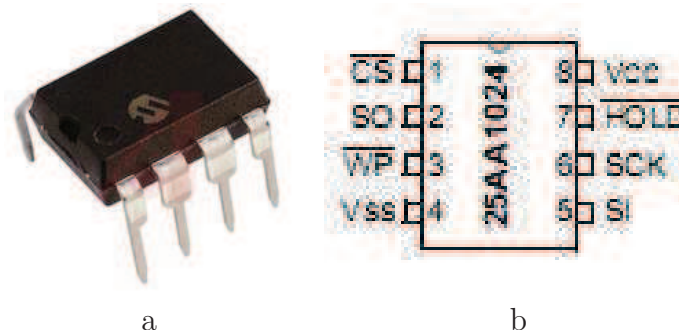


Figura 3.13: a) Eeprom 25AA1024 y b) Descripción de las patillas de salida

3.2.4. Reloj y calendario de tiempo real PCF8563P

Si bien el microcontrolador elegido para realizar el proyecto, el Atmega328P, posee un oscilador interno de 32kHz, se utiliza el reloj y calendario de tiempo real PCF8563P por su facilidad de manejo, ya que el mismo se encarga de los calendarios, años bisiestos, etc. Los relojes-calendario no suelen ser el elemento principal en los dispositivos electrónicos, sino más bien un complemento que es preferible opere independientemente, incluso con su propia fuente de alimentación.

Se utilizó el circuito PCF8563P, por sus funciones y características de operación, su relativa sencillez para su empleo y su bajo consumo de energía. El dispositivo es un calendario/reloj de tiempo real basado en la tecnología CMOS de bajo consumo de potencia. Está provisto de las señales de reloj, interrupción y detección de voltaje bajo, éstas dos últimas son programables.

Todas las direcciones y datos son comunicados de manera bidireccional vía I^2C , con una velocidad máxima de transmisión de 400 Kbits/s. Las direcciones de registros incrementan automáticamente después de cada escritura o lectura de datos. Provee el año, mes, día, día de la semana, hora, minuto y segundo, gracias al oscilador de cuarzo de 32.768 kHz. Puede operar con un alcance de voltaje de 1.0 a 5.5 Volts y contiene funciones para alarmas y temporizado.

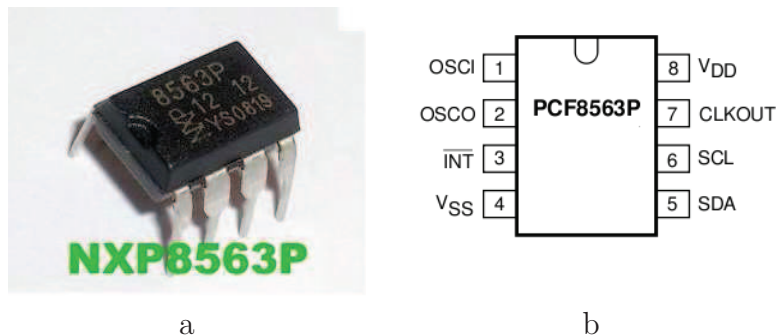


Figura 3.14: a)Reloj y calendario de tiempo real PCF8563P y b)Descripción de las patillas de salida

3.3. Sensores

Como se describió en el capítulo 2 existe una amplia variedad de métodos para determinar la humedad del suelo, sin embargo por varias razones solo algunos de ellos tienen una amplia aceptación. En general se busca un método con las siguientes características:

- El método no debe ser destructivo, de modo que no debe alterarse el suelo con cada medición.
- Debe ser posible su interfaz a un sistema de adquisición de datos.

- Debe permitir varias mediciones diarias con tiempos de respuesta cortos.
- Debe tener una buena precisión (superior al 90 %).
- Debe ser seguro y sencillo para el operador.
- Debe ser económico.
- Debe ser independiente de las propiedades del suelo (*v.g.*, la salinidad, etc.), de fácil mantenimiento y de una vida útil razonable.

Según [13] hay dos objetivos principales en la medición del contenido de agua en el suelo.

1. Determinar el contenido de humedad del suelo. Esto se refiere a la cantidad de agua contenida en una unidad de masa o volumen de suelo. Con este dato se puede calcular el agua necesaria para restaurar la humedad del suelo a la capacidad de campo.
2. Determinar la magnitud de la tensión del agua en el suelo. Representa la cantidad de trabajo necesario para remover una cantidad equivalente a una unidad de agua retenida más flojamente, medida en centibares (o kPa) de tensión de agua del suelo.

Desde el punto de vista de la ingeniería, muchas de las propiedades del suelo están más íntimamente relacionadas con el potencial del agua que con la cantidad de ella. Es útil que los agricultores que aplican riego conozcan también el potencial del agua, ya que éste indica directamente cuándo debe regarse.

La medición de humedad del suelo en este proyecto se basa en la medición de la magnitud de la tensión del agua en el suelo y no en su contenido de humedad, por el hecho de que la cantidad de agua no es tan importante como lo difícil que es para la planta extraerla de la tierra.

La tensión hídrica del suelo, tiene que ser superado por la planta para mover el agua en su sistema de raíces. Diferentes tipos de suelo tendrán tensiones diferentes, incluso con la misma medición volumétrica.

Sin embargo, la medición de la tensión hídrica o humedad del suelo solo se puede hacer con dos de los métodos estudiados, los cuales se describen a continuación. Estos dos métodos deben de ser usados de acuerdo a las características del cultivo.

3.3.1. Tensiómetro

Un tensiómetro mide la presión con que el suelo retiene al agua. Dicha tensión será mayor cuanto menor sea el contenido de agua en el suelo y variará con el tipo de suelo. La planta, para succionar el agua del suelo, debe vencer esa presión ó tensión.

Un tensiómetro, (ver figura 3.15) no es más que un tubo lleno de agua cerrado herméticamente por uno de sus extremos y teniendo en el otro una cápsula de material

cerámico poroso que se pone en contacto con el suelo. Junto al extremo cerrado se coloca un medidor de presión o vacuómetro, para medir presiones inferiores a la atmosférica (*i.e.*, depresiones). Esta cápsula porosa permite que la succión del suelo se transmita al agua del tensiómetro y la depresión se lee por el vacuómetro. La medida del vacuómetro se da en centibars ($1 \text{ cbar} = 0,10 \text{ m}$ de columna de agua) y su escala esta graduada de 0 a 100. Una lectura cero indica que el suelo no ejerce ninguna retención sobre el agua por lo que está saturado o sobresaturado.

Realmente el vacuómetro no llegará a marcar nunca 100 cbars pues alrededor de unos 80 cbars como máximo (*v.g.*, en suelos de textura gruesa el limite es aún menor y además siempre disminuye con la altitud), al estar el tensiómetro herméticamente cerrado por su extremo superior cuando su depresión interior alcanza este limite comienza a entrar aire desde el suelo, desapareciendo la continuidad entre el agua del suelo y la del tubo, siendo erróneas las lecturas [2].



Figura 3.15: Tensiómetro Irrometer modelo SR.

Aunque existen varios modelos de tensiómetros se eligió el modelo SR debido a que tiene una punta roscada sustituible y cuenta con las siguientes características.

- Alcance de medición de 0 a 100 cb.
- Punta de cerámica de repuesto.
- Medidor sellado herméticamente, no se permite la entrada de aire.
- Depósito grande que permite un fácil mantenimiento.
- Tapa hermética, permite un llenado fácil del depósito.
- Tubo de plástico inalterable por sustancias químicas o electrolíticas.
- Varias longitudes en medidas de 15, 30, 45, 60, 90 y 120 cm.

Instalación y lectura.

Antes de instalar el tensiómetro, se debe mojar en un recipiente con agua durante 2 o 3 días. Luego se deben dar los siguientes pasos:

- Saturar el filtro de cerámica con agua para eliminar cualquier burbuja de aire.
- Llenar el tubo con agua destilada, coloreada y tratada con alguicida. Remover las burbujas de aire del tubo y del manómetro de vacío, golpeando suavemente la parte superior del tensiómetro.
- Vaciar el aire del tubo del tensiómetro con una bomba manual de vacío hasta que el manómetro indique una lectura de 80-85 cb.
- Sellar la tapa adecuadamente.
- Comprobar que la lectura que se obtiene en el manómetro cuando la punta del tensiómetro se sumerja en agua indique 0 centibars.
- Instalar el tensiómetro cuidando que la cápsula de cerámica esté a la profundidad de la zona de raíces del suelo. Se necesitan dos tensiómetros en cada sitio. Para cultivos con raíces superficiales tales como las hortalizas, se debe instalar un tensiómetro a 15 centímetros y otro a 30 centímetros de profundidad. Para cultivos con raíces más profundas, se debe instalar un tensiómetro a 30 centímetros y otro a 60 o a 90 centímetros.
- Usar una broca de $\frac{7}{8}$ o que tenga el mismo diámetro que el tubo del tensiómetro para perforar un agujero a la profundidad deseada (menos la altura del extremo de la cerámica). Termine el agujero inicial con una sonda de diámetro más pequeño y empuje el tensiómetro para colocarlo en el lugar. La precisión de la lectura depende del buen contacto del dispositivo con el suelo.
- Tapar bien el agujero y vertir agua alrededor del tensiómetro para mejorar su contacto con el suelo, acumular de 7 a 10 centímetros de tierra alrededor del tubo. También se puede rellenar el agujero con lodo del mismo suelo, vertiéndolo dentro del agujero antes de colocar el tensiómetro.

3.3.2. Sensor de la tensión hídrica del suelo Watermark 200ss-v

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 [4].

Funcionamiento.

La resistencia eléctrica aumenta a medida que se incrementa la succión del agua en el suelo, o a medida que disminuye la humedad del suelo. El sensor Watermark (Figura 3.16) funciona similarmente al sensor de bloques de yeso, sin embargo difiere de éste porque es más duradero en el suelo y puede responder mejor a los cambios de humedad del mismo. Entre sus principales características se encuentran las siguientes:

- No se disuelve en el suelo.
- No se ve afectado por las bajas temperaturas.
- Compensado internamente para niveles de salinidad.
- Compatible con muchos dispositivos de lectura de voltaje.
- Alcance de medición de 0 a 239 cbars.
- No requiere de un dispositivo de lectura personalizado.
- Voltaje de alimentación, con un alcance de 3.2-30Vcd.
- Salida de voltaje lineal, con un alcance de 0-3Vcd.
- Cuenta con 3 cables conductores de calibre AWG22.



Figura 3.16: Sensores Watermark 200ss y 200ss-v.

Los sensores deben estar enterrados a diferentes profundidades, según el tipo de cultivo (a la profundidad efectiva de la raíz), con el fin de evaluar el movimiento y la extracción de la humedad a lo largo de la temporada del cultivo. La colocación de los sensores debe variarse ligeramente de acuerdo al método de riego. Además, los sensores deben de colocarse en un área representativa, tal como dentro de una hilera de plantas para cultivos que se siembran en hileras, o en la cama para cultivos hortícolas o bien en áreas mojadas bajo riego por goteo. La profundidad a la que se colocará el sensor

también debe ser representativa de la zona efectiva de la raíz.

Los sensores deben instalarse mojados para mejorar la respuesta de los sensores al primer riego. Para colocarlos dentro del suelo y a una profundidad apropiada, se utiliza un broca de $\frac{7}{8}$ de pulgada para perforar un hoyo en el suelo hasta la profundidad deseada. Se empuja el sensor con una varilla dentro del agujero, se agrega agua y tierra para rellenar el agujero, dejando accesible el alambre por encima del terreno. El uso de una bandera o una señal en cada sitio facilitará la localización de los sensores para lecturas posteriores.

En caso de que se remuevan los sensores, éstos pueden utilizarse nuevamente por muchas temporadas si se les presta el cuidado apropiado; por lo tanto, se deben limpiar y secar bien antes de guardarlos. Sin embargo, los sensores deben revisarse antes de instalarlos nuevamente. La revisión consiste en colocarlos dentro de un recipiente con agua y asegurarse que los sensores sumergidos indiquen entre 0 y 5 cb. Si la lectura es mayor que 5 cb, se deben descartar.

La Figura 3.17 muestra el movimiento del contenido de agua en el suelo a diferentes profundidades (*v.g.*, 15, 45 y 75 centímetros) en una huerta de naranjas. En esta se practica el riego por goteo y se aplica cuando el sensor colocado a una profundidad de 45 centímetros alcanza una lectura de aproximada de 40 cbars. Debe observarse que el suelo se seque primero en la parte superior de la zona de la raíz y luego en el área más profunda de la zona radicular.

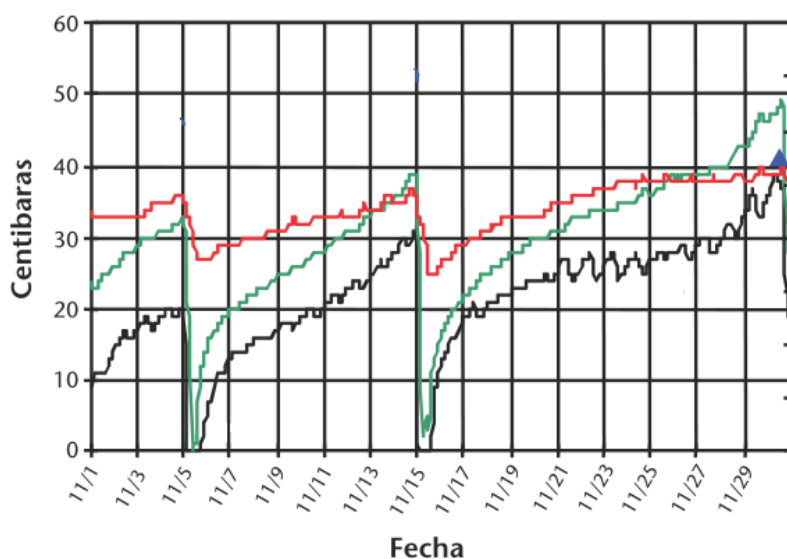


Figura 3.17: Lecturas del contenido de agua en el suelo realizadas en árboles de naranja bajo riego por goteo con sensores Watermark. a) El trazo rojo (superior) muestra la lectura de un sensor enterrado a 75 cm, b) El trazo verde (medio) corresponde a un sensor 45 cm y c) El trazo negro (inferior) muestra la lectura de un sensor a 15 cm.

Los sensores sirven para dar seguimiento al riego e indican la tendencia de la humedad del suelo de acuerdo a su lectura. Su interpretación de acuerdo a la lectura, se puede interpretar con ayuda de la tabla 3.3, para la mayoría de suelos.

Tabla 3.3: Interpretación de las lecturas del sensor Watermark 200ss-v

Lectura (cb)	Interpretación de las lecturas
0-10	Suelo saturado
10-30	Suelo adecuadamente humedecido
30-60	Alcance usual para irrigación
60-100	Alcance usual para irrigación en suelos pesados
100-200	El suelo se está secando peligrosamente, la producción puede afectarse severamente

3.3.3. Sonda de temperatura 6345 de Davis Instruments

Los termistores son sensores de temperatura de tipo resistivo, el nombre de termistor nace de la contracción de las palabras inglesas “**thermal**” y “**resistor**” (resistencia sensible a la temperatura). El termistor exhibe grandes cambios en su resistencia cuando sufre pequeños cambios en su temperatura. Los termistores están generalmente compuestos de materiales semiconductores y existen básicamente dos tipos: los de coeficiente negativo de temperatura (NTC) y los de coeficiente positivo de temperatura (PTC). Los primeros son los más usados y disminuyen su resistencia con el incremento de temperatura. El precio que se paga por el incremento en la sensibilidad, es la pérdida de linealidad.

La sonda seleccionada modelo 6345 de Davis Instruments, está diseñada para medir la temperatura del suelo y se muestra en la figura 3.18. El encapsulado es de acero inoxidable y el sensor es un termistor de precisión que produce un cambio de resistencia proporcional a la temperatura.



Figura 3.18: Sonda de temperatura (# 6345) de Davis Instruments.

En general la sonda cuenta con las siguientes características:

- Tiene un contaste de tiempo en líquidos y en el aire de 28 y 100 segundos, respectivamente.
- Cuenta con un cable de una longitud de 4.6 metros del tipo 22AWG.
- La carcasa es de acero inoxidable 316, apta para aplicaciones navales y de las industrias alimenticia y médica.
- Tiene un rango de medición de -40 a +65 °C.
- La precisión del sensor es de ± 0.5 °C.

3.4. Nodos para la transmisión inalámbrica

Para agregar conectividad inalámbrica al instrumento se eligieron los módulos Xbee de MaxStream de la figura 3.19, los cuales proveen 2 formas principales de comunicación:

1. Modo transparente. Es el enlace serie entre dos módulos, y la forma más sencilla de configurar el módem por medio de los comandos AT que son instrucciones codificadas que conforman un lenguaje de comunicación entre el hombre y el módem. Básicamente todo lo que pasa por el puerto UART (DIN, patilla 3), se envía al módulo deseado, y lo que se recibe en el módulo, se envía de regreso por el mismo puerto UART (DOUT, patilla 2).
2. El modo API. Interfaz de programación de aplicaciones (API por sus siglas en inglés Application Programming Interface). Este modo es más complejo, agrega información extra a los paquetes de datos RF. Ya no son enviados de forma transparente, sino que cada paquete de datos, es almacenado dentro de una trama, con una estructura definida que permite una forma más robusta para enviar datos. Esto permite entre otras cosas determinar el origen de algún paquete recibido dentro de la red.

Entre las necesidades que satisfacen los módulos Xbee de MaxStream se encuentran:

- Bajo costo.
- Ultra-bajo consumo de potencia.
- Uso de bandas de radio libres y sin necesidad de licencias.
- Instalación económica y simple.
- Redes flexibles y expandibles.

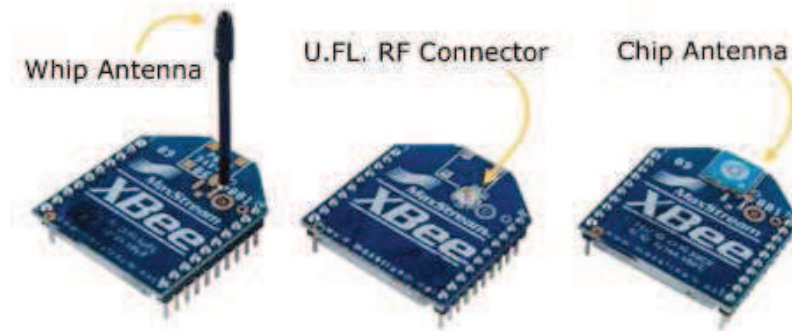


Figura 3.19: Xbee serie 1 con sus opciones de antena.

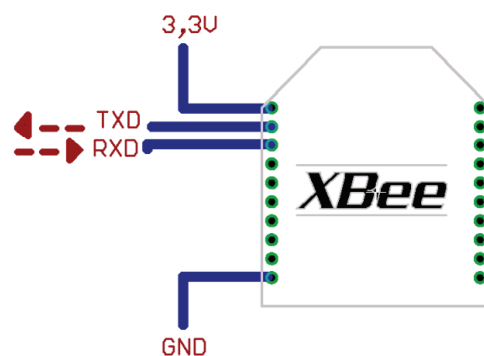


Figura 3.20: Conexiones mínimas del módulo Xbee serie 1.

La figura 3.20 muestra las conexiones mínimas que necesita el módulo Xbee para poder utilizarse. Se debe configurar según el modo de operación adecuado para la aplicación requerida por el usuario.

El módulo requiere una alimentación de 2.8 a 3.4 Vc.d., la conexión a tierra y las líneas de transmisión de datos por medio del Transmisor Receptor Asíncrono Universal (UART por sus siglas en inglés) para comunicarse con un microcontrolador, o directamente a un puerto serial utilizando algún adecuador para los niveles de voltaje.

En caso de que se envíe una gran cantidad de información, la memoria para el almacenamiento temporal de la información del módulo podrá sobrepasarse con más de 100 octetos o palabras de información. Para evitar esto existen dos alternativas:

- Bajar la tasa de transmisión.
- Activar el control de flujo.

Los módulos Xbee pueden ser configurados desde una computadora utilizando el programa X-CTU, el cual permite realizar estas operaciones de manera más intuitiva, fácil y rápida que utilizando la Hyperteminal de Windows o bien desde el propio microcontrolador.

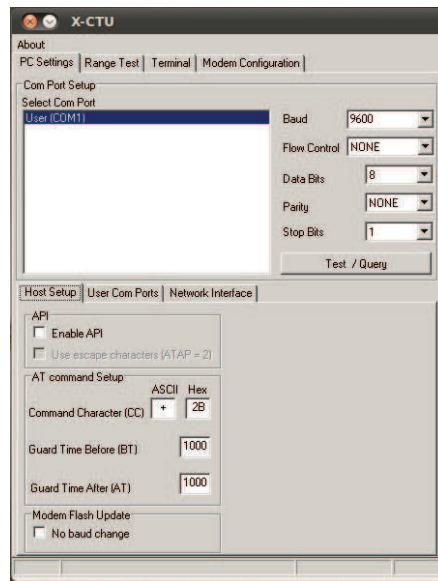


Figura 3.21: Programa X-ctu para configurar un módulo Xbee.

En la pestaña llamada PC Settings es posible configurar el número y la velocidad del puerto serial, así como la paridad, entre otras cosas. Además permite configurar opciones más generales para los mandos AT: como el signo elegido para salir del modo de mandos que por asignación corresponde al signo + (2B en hexadecimal).

En la pestaña Range Test, es posible enviar una cadena de datos de cualquier tipo para probar el alcance de la señal. Esto genera automáticamente datos y los envía por el módulo, de tal forma que permite verificar cuales datos llegan correctamente y cuales no y a partir de esa estadística determinar el alcance de la señal.

En la pestaña de Terminal, el funcionamiento es idéntico al del Hyperterminal. Todo lo escrito en dicha terminal entra directamente al módulo como si estuviera en el modo de mandos.

La pestaña de Modem Configuration, permite leer, guardar o cargar cierta configuración predeterminada. También permite ver cómo está configurado cada módem, cambiar alguna característica o luego guardarla o cargarla de una previamente guardada.

Existen 2 series de estos módulos. La serie 1 y la serie 2 o también conocida como 2.5. Los módulos de la Serie 1 y la Serie 2 tienen el mismo arreglo de terminales (patillas de salida), sin embargo, no son compatibles entre sí ya que utilizan distintos selectores de circuito y trabajan con protocolos diferentes.

La serie 1 está basada en el circuito integrado auxiliar Freescale y está pensado para ser utilizado en redes punto a punto y punto a multipunto. Los módulos de la serie 2 están basados en el circuito integrado auxiliar de Ember y están diseñados para ser utilizados en aplicaciones que requieren repetidores o una red. Ambos módulos pueden ser utilizados en los modos AT y API.

La Serie 1 viene con firmware 802.15.4 que permite redes punto a punto o de topología en estrella. Este firmware ofrece ADC (conversión analógica-digital), entradas y salidas digitales, y 128-bit AES. El sistema basado en el estándar 802.15.4 es mucho más rápido que ZigBee.

Los módulos XBS1, tienen limitaciones en topologías de red, tales como la cantidad de saltos que un mensaje puede dar (max depth), y cuántos routers puede soportar un nodo primario (max children). Sólo tiene unicast (transmisión a un módulo) o difusión (transmisión a todos en la red).

Los módulos Xbee son económicos, poderosos y fáciles de utilizar. Algunas sus principales características son:

- Buen alcance: hasta 300ft (100 mts) en línea vista para los módulos Xbee y hasta 1 milla (1.6 Km) para los módulos Xbee Pro.
- 9 entradas/salidas analógicas y digitales.
- Bajo consumo <50mA cuando están en funcionamiento y < 10 μ A cuando están en modo sleep.
- Interfaz de comunicación tipo serie.
- 65,000 direcciones para cada uno de los 16 canales disponibles. Se pueden tener muchos de estos dispositivos en una misma red.

3.5. Interfaz gráfica

Para la visualización de los datos de tensión hídrica y temperatura del suelo se optó por instalar un servidor Web en una computadora con sistema operativo Linux, en particular una distribución Ubuntu versión LTS 10.04 mediante la utilización de Apache 2 y PHP 5, debido a que de esta forma se puede tener acceso a la información en línea y sin tener que instalar algún programa ya sea en la computadora, smarthphone, tablet o cualquier dispositivo con acceso a internet

Apache es el servidor Web más popular en el mundo, de código libre y abierto, disponible para su uso o cualquier modificación, modular, flexible y totalmente configurable. Se caracteriza por ser el principal servidor en sistemas operativos Linux, aunque también es posible instalarlo en Windows en todas sus versiones. Fue lanzado por primera vez en diciembre de 1995 [1].

PHP es un lenguaje de intérprete que puede ser usado principalmente para tres tareas: escribir páginas dinámicas, crear programas de consola o mediante el uso conjunto del paquete GTK codificar aplicaciones gráficas. Es un lenguaje de programación Web del lado del servidor. El cliente realiza la petición al servidor, éste la procesa con sus scripts PHP y devuelve una salida al cliente que no incluye nada de PHP. Las ventajas de PHP son: su facilidad de uso, su carácter de software libre, su capacidad de conexión

con la mayoría de los sistemas gestores de bases de datos, la abundante documentación disponible en la red y su capacidad de expansión mediante el uso de módulos.

Para el graficado de los datos se utilizó la biblioteca JpGraph que sirve para crear imágenes con todo tipo de gráficas, dinámicamente desde páginas PHP. Es una librería gratuita (para uso no comercial), fácil de instalar y de manejo sencillo.

Incluye una documentación muy completa con multitud de ejemplos de los distintos gráficos que se pueden generar.

Algunas de las características del sistema son:

- Reducido peso de bytes de las imágenes generadas, habitualmente unos pocos KB.
- Uso de la interpolación matemática para obtener curvas a partir de unos pocos valores.
- Diversos tipos de gráficas en 2D o 3D.
- Escalas flexibles tanto en el eje X como el Y, que se ajustan al juego de datos que se tenga que representar.
- Soporte para generar gráficas con varios juegos de valores a la vez.
- Configurable con distintos tipos de colores, leyendas, tipografías, imágenes de fondo, etc.

A grandes rasgos, en la computadora que mantiene en operación el servidor corre un programa que lee los datos que arriban al puerto usb y genera un archivo tipo de texto (txt), en que se almacenan los datos recibidos. Por otro lado, el paquete Apache es utilizado en conjunto con el paquete Php, el cual lee el archivo de texto para posteriormente mostrar los datos en formato html y javascript, de tal manera que se genera una gráfica de la variable medida (que en realidad es una imagen) por medio de la biblioteca Jpgraph.

3.6. Especificaciones del instrumento.

En la tabla 3.4 se muestran algunos de los parámetros que se han especificado para el instrumento.

Tabla 3.4: Especificaciones del instrumento.

Tipo:	Valor:	Unidades:
Alcance de tensión hídrica.	0-75	Centibares (KPa.)
Alcance de temperatura.	25 ± 15	°Centigrados.
Precisión tensión hídrica.	± 3	Por ciento.
Precisión temperatura.	± 0.5	Por ciento.
Voltaje de alimentación.	3.3	Vc.d.
Resolución.	0.8	mVc.d.
Consumo energético.	49.5	mWatts-hora.

Capítulo 4

Experimentos y análisis de resultados

En este capítulo se muestran las diversas pruebas que se llevaron a cabo con los componentes seleccionados y que ya se describieron en el capítulo anterior.

4.1. Caracterización y pruebas de los sensores.

A continuación se muestran las pruebas más relevantes que se le practicaron a cada uno de los sensores para poder adaptarlos al sistema mínimo.

4.1.1. Sensor Watermark modelo 200ss-v

De acuerdo a la información que provee el fabricante y que viene incluida con el sensor, una lectura de 0.0117155V equivale a 1 centibar, y como su alcance de medición está entre 0 y 239 centibares la respuesta que podemos obtener del sensor se encuentra entre 0 y 2.811715V. Debido a que no requiere de ningún lector especial basta con tener un multímetro, medir el voltaje y hacer la equivalencia con la resolución dada. Lo único que hay que hacer es energizarlo como se muestra en la figura 4.1, con un voltaje entre 3.2 y 30Vdc.

Para corroborar la información proporcionada por el sensor, se realizó el montaje de la figura 4.2a. El sensor se excitó con 5Vc.d. y los datos fueron registrados empleando el módulo de adquisición de datos NI USB-6216 de National Instruments que se muestra en la figura 4.2b, la cual cuenta con 16 entradas analógicas y una resolución de 16 bits. El módulo se controló mediante el uso de rutinas escritas en lenguaje Matlab, para hacer mediciones de los sensores cada 15 minutos durante 3 días consecutivos y generar un archivo por día para los datos obtenidos junto con el día y hora de la medición. Las rutinas mencionadas pueden ser consultadas en el apéndice A.

Los resultados obtenidos se pueden ver en la figura 4.3, en donde se esperaría ver una respuesta más uniforme y no como una serie de transiciones ya que en el montaje el suelo se encontraba saturado por lo que se esperaría una lectura entre 0 y 10 centibares.



Figura 4.1: Alambrado del sensor Watermark 200ss-v.

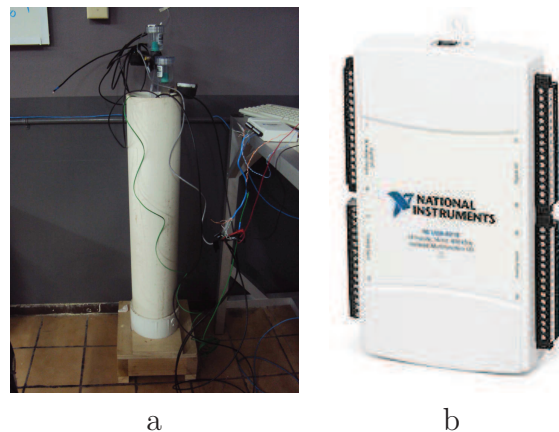


Figura 4.2: a)Primer montaje y b)Módulo de adquisición de datos DAQ NI-USB6216

Después de repetir el experimento y descartar posibles variables como ruido eléctrico por la presencia de un compresor que se estaba utilizando en la primera prueba, la fuente de voltaje, e inclusive alimentar los sensores con 2 fuentes distintas, finalmente se descubrió que los sensores se interferían mutuamente por la conductividad eléctrica del medio, por lo que se optó poner los sensores en contenedores diferentes.

Hecho lo anterior se obtuvo el resultado de la figura 4.4, en donde se observa una respuesta más cercana a la realidad, ya que el sensor 1 se encontraba en tierra húmeda y se ve como su respuesta va decreciendo por el contenido de humedad, mientras que el sensor 2 al estar en tierra seca mantiene su respuesta casi constante. Con esto se infirió que los sensores debían ser excitados alternadamente para evitar los sobretiros del primer experimento.

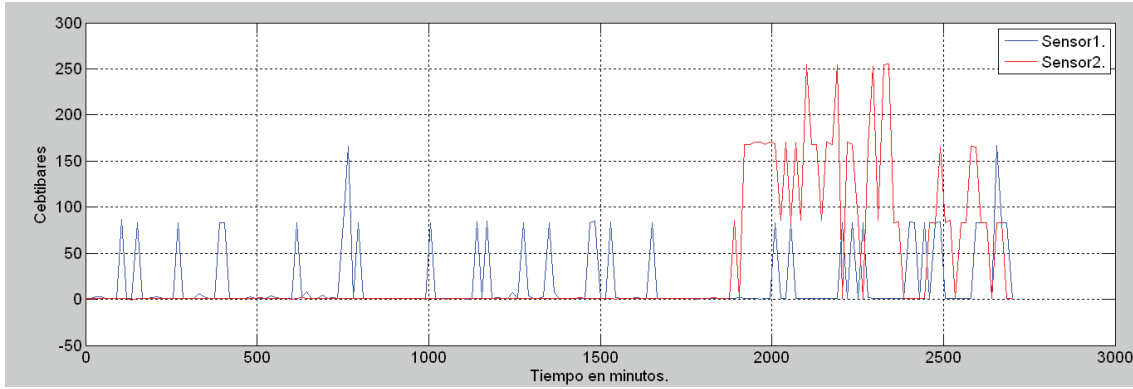


Figura 4.3: a) Trazo azul lectura sensor1 Watermark 200ss-v y b) Trazo rojo lectura sensor2 Watermark 200ss-v. Enterrados a la misma profundidad y en el mismo contenedor

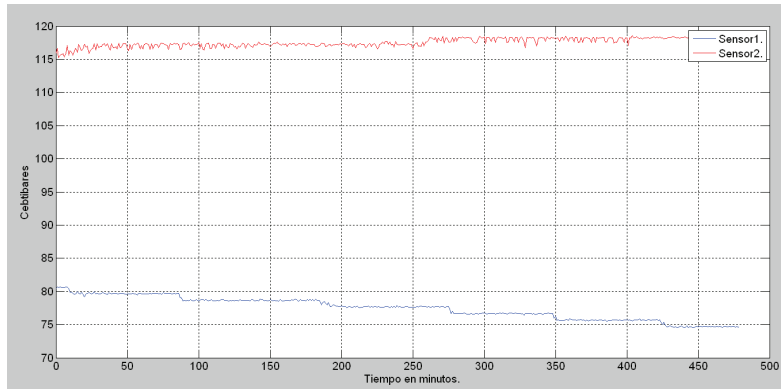


Figura 4.4: a) Trazo azul lectura sensor1 Watermark 200ss-v y b) Trazo rojo lectura sensor2 Watermark 200ss-v. Enterrados a la misma profundidad pero en distintos contenedores

4.1.2. Tensiómetro Irrrometer modelo SR.

Debido a que el tensiómetro originalmente incluye un medidor del cual solo se puede obtener una lectura de manera visual, fue necesario buscar una opción que permitiera adaptar esta herramienta a un sistema de adquisición de datos. La solución se obtuvo del propio fabricante mediante la sustitución del medidor por uno electrónico que está diseñado para indicar los niveles de humedad del suelo tanto en forma electrónica como visual. El medidor ya instalado se muestra en la figura 4.5.

Este medidor provee un voltaje de salida en relación con el voltaje de alimentación que está restringido al alcance de 2.7V mínimo y 5.5V máximo. Para poder convertir el voltaje medido a centibares el fabricante proporciona la ecuación 4.1, así como los valores correspondientes cuando se alimenta por 5Vc.d.

$$cb = \frac{(V_{sm} - V_m)}{((265 * V_g)/(V_{mam} - V_{mim}))} \quad (4.1)$$

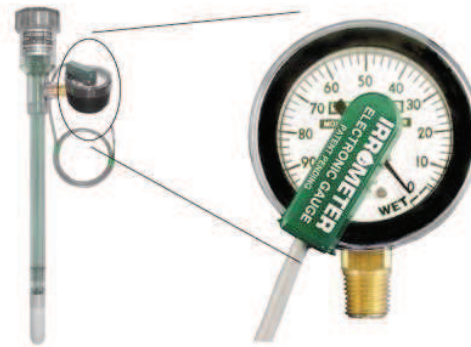


Figura 4.5: Tensiómetro Irrometer modelo SR con medidor opción E.

donde:

V_{sm} : Voltaje de salida máximo calculado del medidor.

V_m : Voltaje medido.

V_g : Volts por grado.

V_{mam} : Valor máximo en centibares del medidor.

V_{mim} : Valor mínimo en centibares del medidor.

Con una entrada de 5V el medidor tiene una salida con una amplitud de 4V que abarcan 360 grados. Esto equivale a 0.011111 volts por grado de movimiento del medidor ($4/360$). Cabe aclarar que el medidor sólo utiliza 265 grados desde el valor mínimo hasta el valor máximo.

El medidor está calibrado para proporcionar 4.25V cuando marca 100 cb y 1,305V cuando la lectura es de 0 cb en sentido antihorario. Como el instrumento funciona a 3.3V. Se realizó el cálculo de los valores para obtener la ecuación correspondiente a este voltaje de entrada.

Como el voltaje de alimentación se redujo de 5 a 3.3V el fabricante nos dice que tanto el voltaje de salida máximo como el mínimo también lo harán proporcionalmente. En este caso 3.3 es el 66 % de 5V, por lo tanto el voltaje de salida máximo será de 2.805V y el mínimo de 0.8613V. Como para 5V el medidor tiene una salida con una amplitud de 4V con la proporción obtenida se tiene que la amplitud de la salida para 3.3V será de 2.64V, esto equivale a 0.007333333V por grado.

Ya calculados todos los parámetros de la ecuación 4.1, y sustituidos en la misma obtenemos la ecuación 4.2.

$$cb = \frac{(2.805 - V_m)}{((265 * 0.007333333)/(100 - 0))} \quad (4.2)$$

Haciendo las operaciones correspondientes la ecuación 4.2 queda de la siguiente manera:

$$cb = \frac{(2.805 - V_m)}{(0.01943332)} \quad (4.3)$$

Después de haber obtenido la ecuación 4.3 se corroboró que efectivamente relaciona el voltaje de salida del medidor con los centibares que muestra el mismo, haciendo unos cuantos puntos de prueba.

Debido al antecedente con los sensores Watermark que creaban interferencia al energizarlos al mismo tiempo, se pusieron a funcionar juntos el sensor y el tensiómetro utilizando nuevamente el montaje de la figura 4.2, así como la tarjetas de adquisición de datos NI USB-6216 y el programa Matlab, que se encarga de controlar el tiempo de muestreo, almacenaje y graficado de los datos y en donde además se implementó la ecuación 4.3

Los resultados obtenidos de la caracterización del tensiómetro se pueden observar en la figura 4.6, en donde se puede apreciar como al principio el medidor arroja una lectura de aproximadamente 61 cb y aumenta a 65 después de los 1000 minutos de estar midiendo. Esto nos indica que el suelo se estaba secando. Poco antes de los 1500 minutos se agrego agua al tubo que contenía la tierra y el tensiómetro para simular un riego, lo que provocó que la humedad del suelo cayera a unos 12 cb lo que se interpreta como un suelo adecuadamente mojado.

La simulación de un pequeño riego en el montaje nos asemeja la dinámica que tienen los suelos de cultivo, donde se busca mantener la tensión hídrica del suelo en cierto intervalo, así que este proceso de secado natural y regar se mantendrá indefinidamente mientras el cultivo lo amerite dentro de los márgenes óptimos para el mismo.

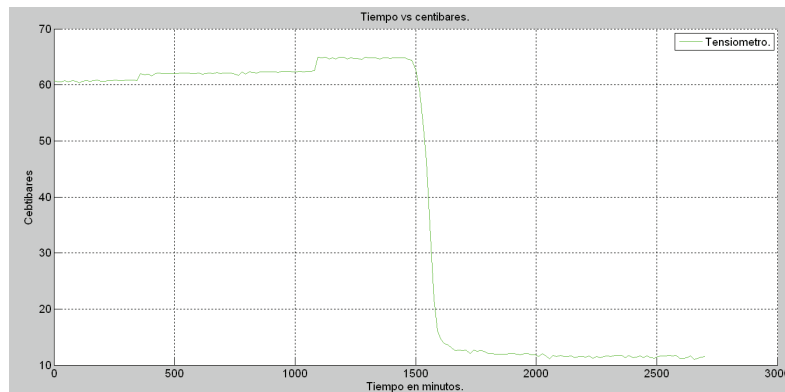


Figura 4.6: Caracterización del tensiómetro Irrometer modelo SR.

4.1.3. Sonda de temperatura

El termistor es un dispositivo extremadamente no lineal y su curva característica varía según sea el fabricante como se aprecia en la figura 4.7, la cual pertenece al termistor usado en el proyecto para medir la temperatura del suelo; pero puede ser aproximada por medio de la ecuación 4.4 conocida como ecuación de Steinhart-Hart.

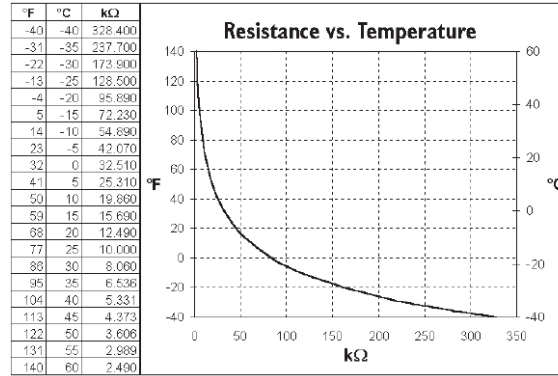


Figura 4.7: Curva característica del termistor que provee el fabricante

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R_{term}) + C(\ln R_{term})^3, \quad (4.4)$$

donde:

T: Temperatura en °Kelvin.

Rterm: Resistencia del termistor en Kohm.

A, B, C: Constante de la curva de aproximación.

Las constantes A, B, y C pueden ser calculadas seleccionando tres puntos de la tabla o curva que acompaña el termistor y resolviendo un sistema de ecuaciones simultáneas de tres incógnitas. Para calcular las constantes se resolvió el sistema de ecuaciones simultáneas de tres incógnitas para los puntos 60, 25 y 0°C, donde los valores de resistencias fueron tomados de la segunda columna de la tabla 4.1 que se obtuvo de la hoja de datos del termistor.

$$[A + B(\ln 2.49) + C(\ln 2.49)^3]^{-1} \quad (4.5)$$

$$[A + B(\ln 10) + C(\ln 10)^3]^{-1} \quad (4.6)$$

$$[A + B(\ln 32.51) + C(\ln 32.51)^3]^{-1} \quad (4.7)$$

Para resolver este sistema de ecuaciones se utilizó el archivo de órdenes del apéndice B, que se ejecuta en Matlab y que arrojó el siguiente resultado:

$$A=0.002773158328763$$

$$B=0.000250127116199$$

$$C=0.000000402941348$$

Entonces, la ecuación de Steinhart-Hart para este termistor es:

$$T^{\circ}C = \frac{1}{(2.773 \times 10^{-7} + 2.501 \times 10^{-7} \ln(R_{term}) + 4.029 \times 10^{-7} \ln(R_{term}^3))} - 273.15 \quad (4.8)$$

Después de obtener la ecuación 4.8 se procedió a medir la resistencia que daba el termistor grado por grado en el alcance de interés, un resumen de esta medición se muestra en la columna 3 de la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Equivalencia de resistencia vs temperatura obtenida de la hoja de datos y medida.

$^{\circ}C$	Resistencia de las hojas de datos en $K\Omega$.	Resistencia medida en $K\Omega$.
-40	328.400	—
-35	237.700	—
-30	173.900	—
-25	128.500	—
-20	95.890	—
-15	72.230	—
-10	54.890	—
-5	42.070	—
0	32.510	—
5	25.310	25.2
10	19.860	19.94
15	15.690	15.72
20	12.490	12.52
25	10.000	10.1
30	8.060	8.14
35	6.536	6.55
40	5.331	5.44
45	4.373	4.43
50	3.606	3.65
55	2.989	3.02
60	2.490	2.55

En la figura 4.8 se muestra la comparación entre la curva obtenida con los datos del fabricante, con los medidos y los que arrojó la ecuación 4.8. Como se puede observar las 3 curvas son prácticamente iguales.

Una vez verificada la ecuación se procedió a realizar la interfaz para el termistor y el convertidor analógico digital, la cual consiste en un divisor de voltaje con el termistor (R_{term}) y una resistencia de $10K\Omega$, se escogió este valor porque de acuerdo a la literatura la resistencia de referencia debe ser igual a la que el termistor da a una temperatura de $25^{\circ}C$, tal como se muestra en la figura 4.9. Como voltaje de referencia se utilizan $3.3V$.

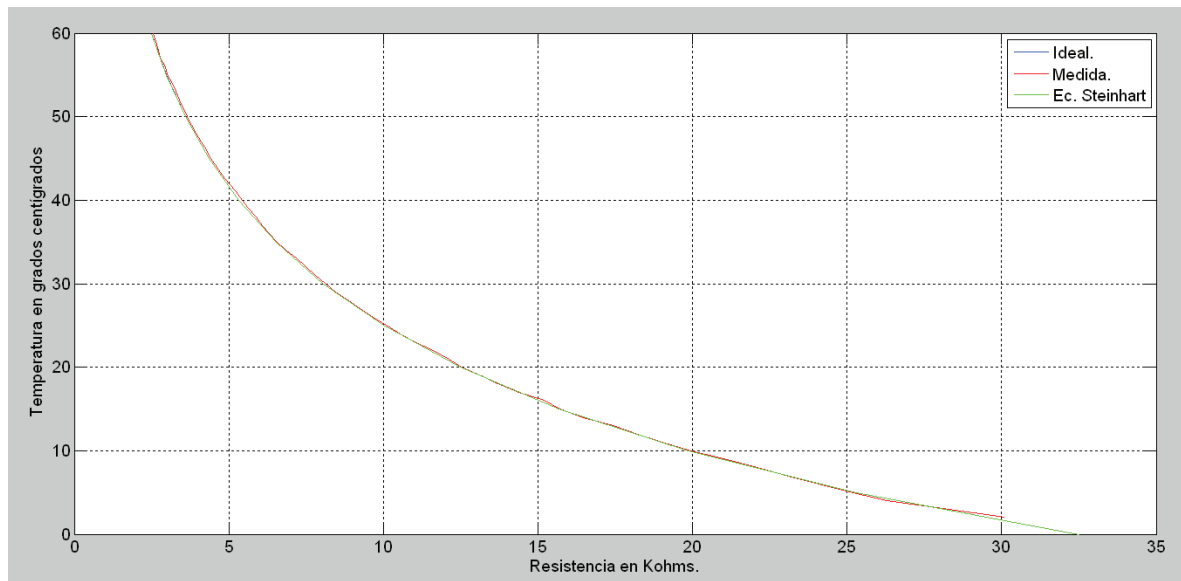


Figura 4.8: a) El trazo azul muestra la curva del termistor ideal en el alcance de 5 a 60°C, b) El trazo rojo corresponde a la curva medida y c) El trazo verde muestra la curva obtenida con la ecuación de Steinhart en el alcance de 0 a 60°C.

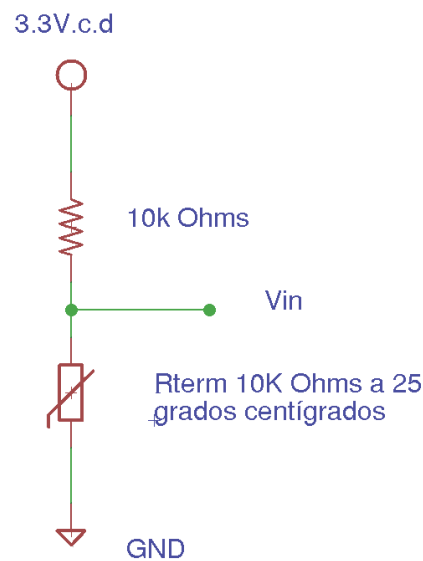


Figura 4.9: Interfaz para el termistor y el convertidor analógico-digital.

Como se observa en la figura 4.9, se tiene un divisor de voltaje por lo que:

$$V_{in} = \frac{R_{term}}{(R1 + R_{term}) * V_{ref}} \quad (4.9)$$

El ADC que se utiliza es de 12 Bits de resolución, luego los valores entre 0.0 y V_{ref} son cuantificados como valores de 12 Bits desde 0 hasta 4096 decimal.

$$V_{in} = \frac{V_{ad}}{4096 * V_{ref}} \quad (4.10)$$

Igualando 4.9 y 4.10 y cancelando V_{ref} , R_{term} puede ser expresada como:

$$R_{term} = \frac{(R1 * V_{ad})}{(4096 - V_{ad})} \quad (4.11)$$

Conocida R_{term} la temperatura en °Centígrados puede calcularse usando la ecuación 4.8, la cual fue obtenida anteriormente.

4.2. Implementación del sistema mínimo en tablilla de pruebas

Para tener una mayor versatilidad en las primeras pruebas del sistema mínimo se montó en una tablilla de pruebas (ver figura 4.10).

Como los sensores Watermark deben ser excitados alternadamente y para no exigirle la corriente necesaria para alimentarlos al microcontrolador, al sistema mínimo se le agregaron dos reguladores de voltaje LD2980ABM33R. La elección de este regulador se debe a que puede ser activado y desactivado mediante una patilla del microcontrolador y cuenta con las siguientes características:

- Muy baja caída de voltaje en sentido directo.
- Temperatura de operación, con un alcance de -40 a 125°C.
- Corriente en estado inactivo, 1μAc.d. (máxima).
- Corriente de salida, 50 mAc.d. (máxima).

4.3. Sistema de administración de energía.

Ya con el sistema mínimo funcionando en conjunto con los sensores solo faltaba la fuente que le proporcionara energía, la cual, para este caso está compuesta de un panel solar, baterías recargables y el circuito que controla el cargado de la batería.

Una vez adquirido el panel solar se procedió a su caracterización bajo condiciones reales de operación, usando las configuraciones que se muestran en la figura 4.11a) y b) para medir su corriente y su voltaje, respectivamente.

La medición de la temperatura de la superficie del panel solar se realizó con el termopar tipo “J” de Omega de la figura 4.12. La temperatura máxima alcanzada fue de 48°C y coincide con el pico máximo de corriente.

Con los datos obtenidos de la caracterización del panel solar bajo condiciones de prueba aproximadas a AM1 (Masa de Aire, AM1 = 1 KW/m² [16]), muestreando cada

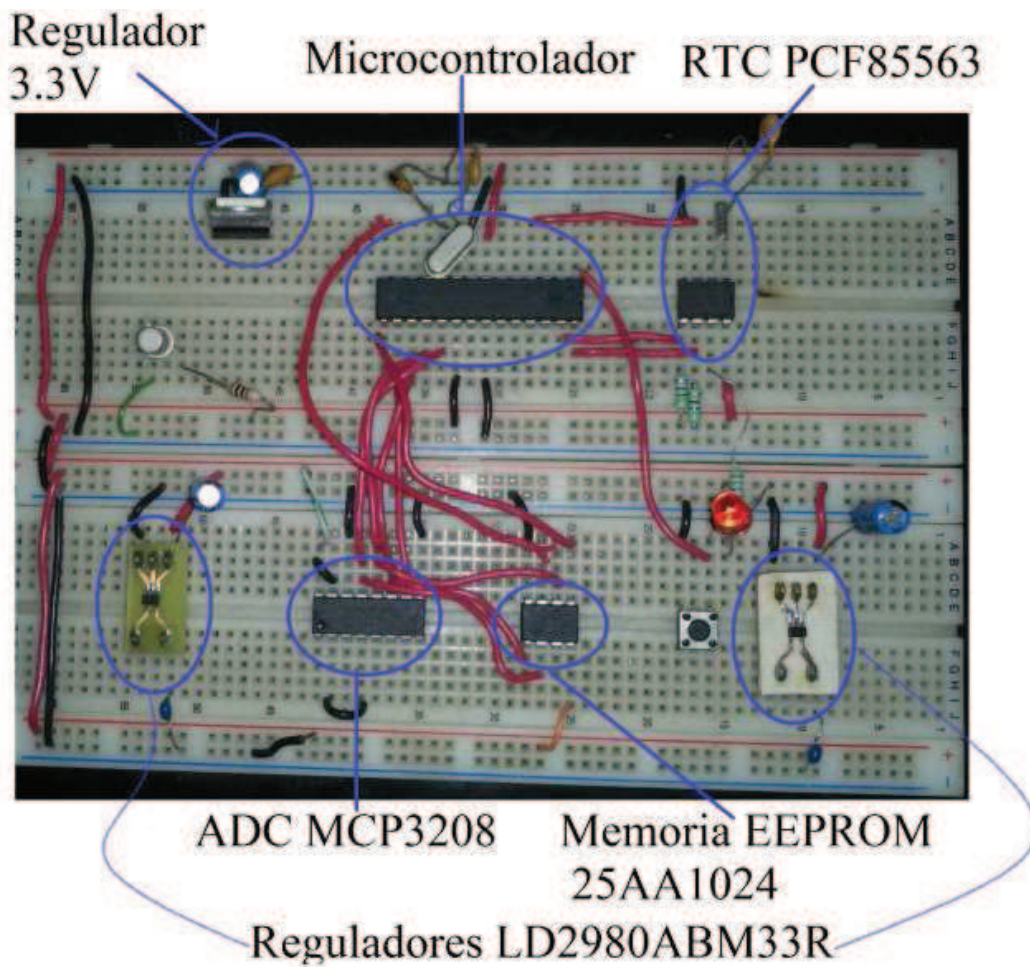


Figura 4.10: Sistema mínimo montado en tablilla de pruebas.

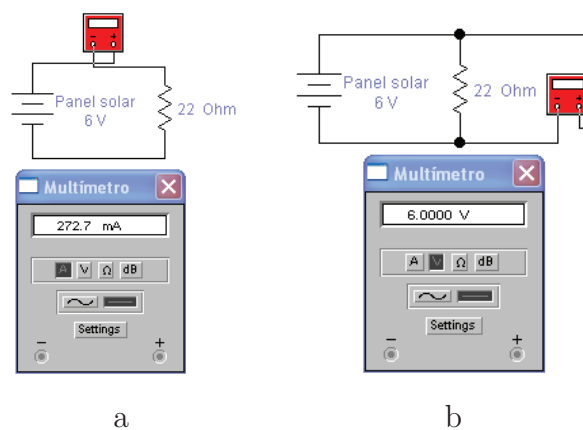


Figura 4.11: Configuración para medir a) corriente y b) voltaje del panel solar

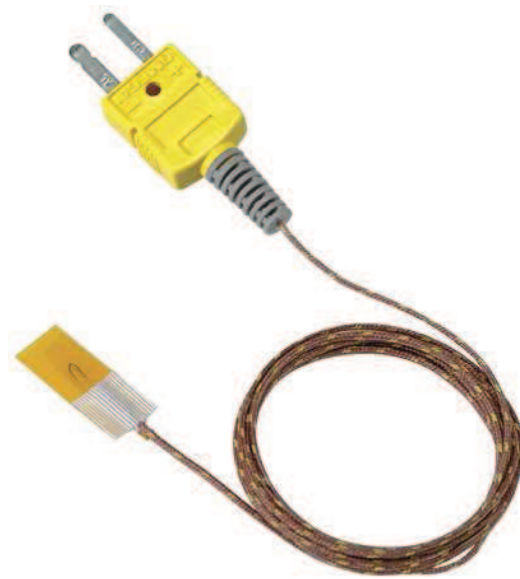


Figura 4.12: Termopar tipo “J” de Omega para medir la temperatura del panel solar.

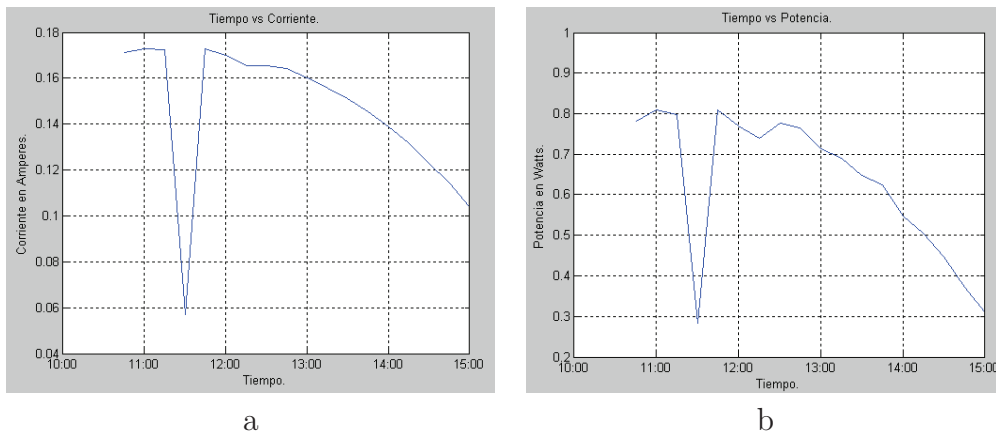


Figura 4.13: Perfil de a)corriente y de b)potencia del panel solar.

15 minutos en un periodo de las 10:45 horas a las 15:00 horas, se generaron los perfiles de corriente y potencia que se observan en la figura 4.13.

Las mediciones se realizaron casi de manera simultánea, podemos ver que en ambas gráficas hay una caída notable tanto en corriente como en potencia, esto se debió al paso de una nube, factor que debe ser tomado en cuenta para realizar un perfil en un día nublado, sabiendo de antemano que habrá una disminución significativa en la eficiencia de la celda. El proceso para llegar al prototipo final, del sistema de administración de energía, tuvo varias etapas. Todas partiendo del diagrama que se muestra en la figura 4.14, en donde V_{in} es el que genera el panel solar.

Una vez que fue caracterizado el panel solar se procedió a realizar las pruebas preliminares en tablilla de pruebas. La implementación se muestra en la figura 4.15, en

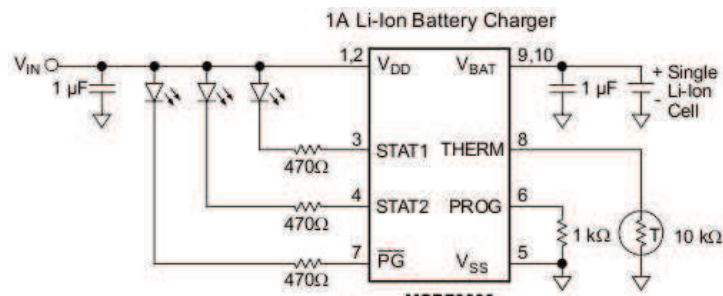


Figura 4.14: Cargador de baterías de ión de Litio MCP73833 de Microchip.

donde se puede observar que el panel solar suministra una corriente de 156.3 mA.c.d. a la batería a través del circuito integrado MCP73833, aunque según la hoja de datos del panel solar, éste puede suministrar hasta una corriente máxima de 167mA.c.d., por lo que este resultado fue satisfactorio.

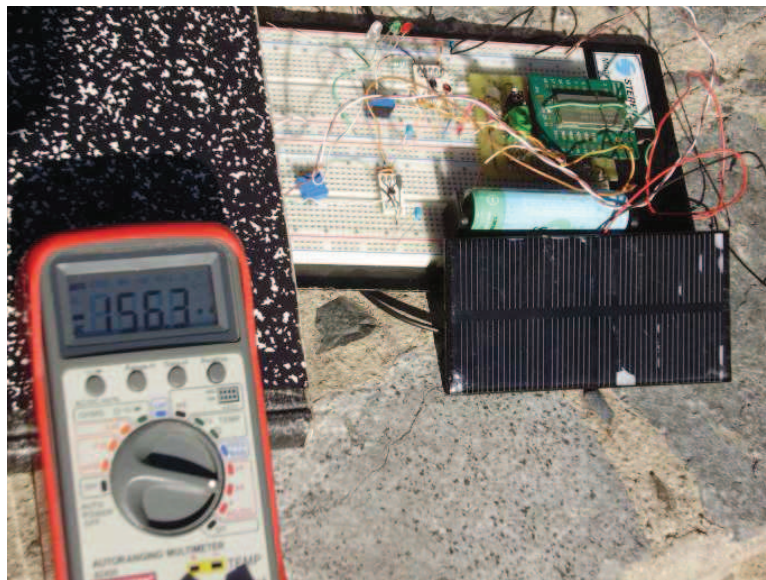


Figura 4.15: El sistema de administración de energía implementado en tablilla de pruebas; donde el multímetro indica que a la batería se le están suministrando 156.3 mA.

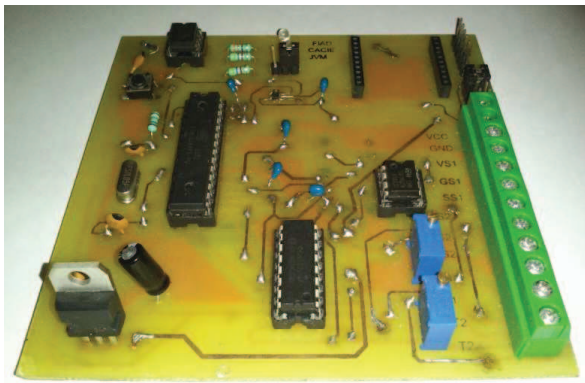
La siguiente etapa de la implementación, se llevó a cabo en una tarjeta perforada tal como se muestra en la figura 4.16, en donde la batería alimentaba al sensor Watermark 200ss-v y a un radio Xbee. La salida del sensor se cuantiza por el convertidor analógico-digital del Xbee y la medición se envía a otro radio receptor, de el cual se lee por el puerto serie de la computadora y se sube a una base de datos.



Figura 4.16: Sistema de administración de energía implementado en tarjeta perforada.

4.4. Pruebas preliminares en campo

Realizadas las pruebas pertinentes en laboratorio se procedió a la realización de los experimentos en campo, para lo cual fue necesaria la elaboración de una tarjeta de circuito impreso (ver figura 4.17a), el diseño se hizo mediante la utilización del programa CadSoft Eagle Professional.



a



b

Figura 4.17: a) Sistema mínimo versión 1 y b) Prueba en campo del sistema mínimo.

Como no se podía dejar la tarjeta a la intemperie, se instaló de forma provisional en una caja como se muestra en la figura 4.17b. El periodo de medición inició el 3 de agosto del 2012 a las 4:59 hrs. de la tarde y finalizó el 4 de agosto del 2012 a las 11:23 hrs. de la mañana. Los resultados fueron desalentadores ya que los sensores instalados

marcaban 0 cb y un tensiómetro de referencia registraba lecturas entre 7 y 10 cbars, en el mismo periodo.

La respuesta a este problema se encontró en un manual de irrigación agrícola con sensores de humedad [5], donde aclara que el sensor Watermark modelo 200ss-v es menos sensible y más lento para responder en el extremo mojado, pero puede llegar más alto en el seco hasta 199 cb y se recomienda usarlo en tensiones del suelo en el alcance de 20 a 200 cb. Por el contrario el tensiómetro tiene mayor sensibilidad y exactitud en el alcance de baja tensión de hasta los 75 cb, además de ser un método directo de la tensión hídrica del suelo.

Para corroborar lo anterior se regresó al laboratorio y se realizó el montaje que se muestra en la figura 4.18, donde el suelo fue previamente humedecido.



Figura 4.18: Montaje para comparar la respuesta del tensiómetro vs sensor Watermark.

Como se observa en la figura 4.19, el sensor efectivamente no responde bien en suelo saturado y su respuesta es demasiado lenta. Con estos datos y tomando en consideración que las tensiones que se manejan en el campo de cultivo están en el intervalo de los 7 a 15 cb se optó por usar los tensiómetros.

4.5. Integración del instrumento.

Después de las pruebas preliminares tanto en campo como en el laboratorio, se llegó al diseño final de las tarjetas de circuito impreso de los 2 módulos que componen el instrumento. La del sistema mínimo y la del sistema de administración de energía. La decisión de hacerlas en tarjetas de circuito impreso separadas es para poder usar estos módulos en otras aplicaciones por separado o en caso de fallar alguno de ellos no tener que cambiar toda la placa.

Para instalar y proteger estos módulos se escogió la caja de montaje de la figura 4.20, de policarbonato y que cumple con las normas Nemas 4, 4X, 12, 13, i.e., está sellada contra agua y polvo y es resistente a la corrosión. Por lo que es ideal para uso en interiores y exteriores, protegiendo el equipo contra salpicaduras de agua, filtraciones de agua, derrames de agua sobre la caja y condensación externa severa.

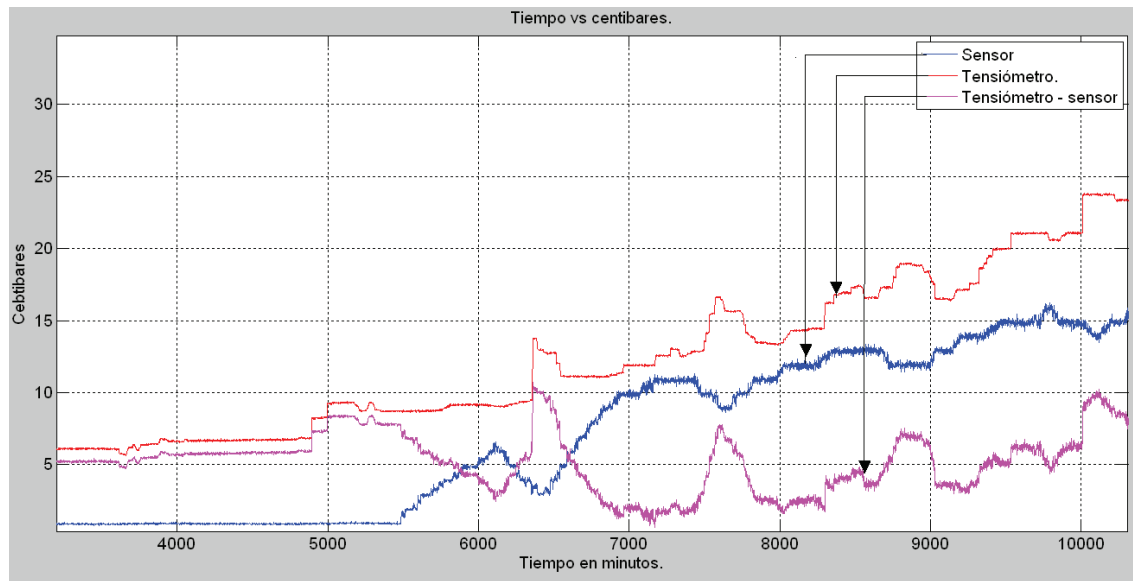


Figura 4.19: Tensiómetro vs sensor Watermark.

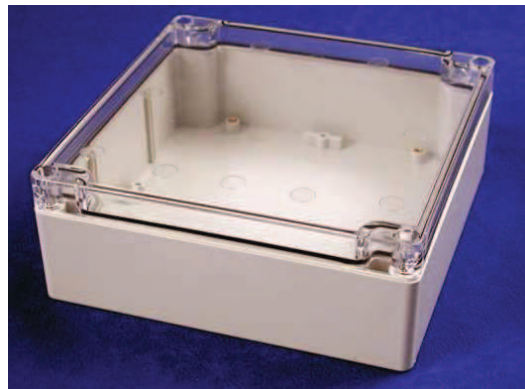


Figura 4.20: Caja para montaje del instrumento Nema 4x.

El diseño de ambos módulos se realizó en base a la limitación del espacio de la caja mediante la utilización de CadSoft Eagle Professional. El esquemático del sistema de administración de energía se presenta en las figura 4.21.

Por otra parte en la figura 4.22 se muestra el esquemático del sistema mínimo. Cabe mencionar que ambos diseños son de doble cara por el gran número de componentes que contiene.

Una vez que se tuvieron los diseños de las tarjetas de circuito impreso de los módulos se procedió a la realización de los PCBs por medio del procedimiento de transferencia de tóner. Así que lo primero fue imprimir los diseños en hojas de transferencia para su posterior planchado en las placas fenólicas de fibra de vidrio, con doble cara de cobre con lo que se fija el tóner sobre la superficie de la placa. Después se sumergieron en agua para desprender el papel y se les dio un retoque con plumón indeleble.

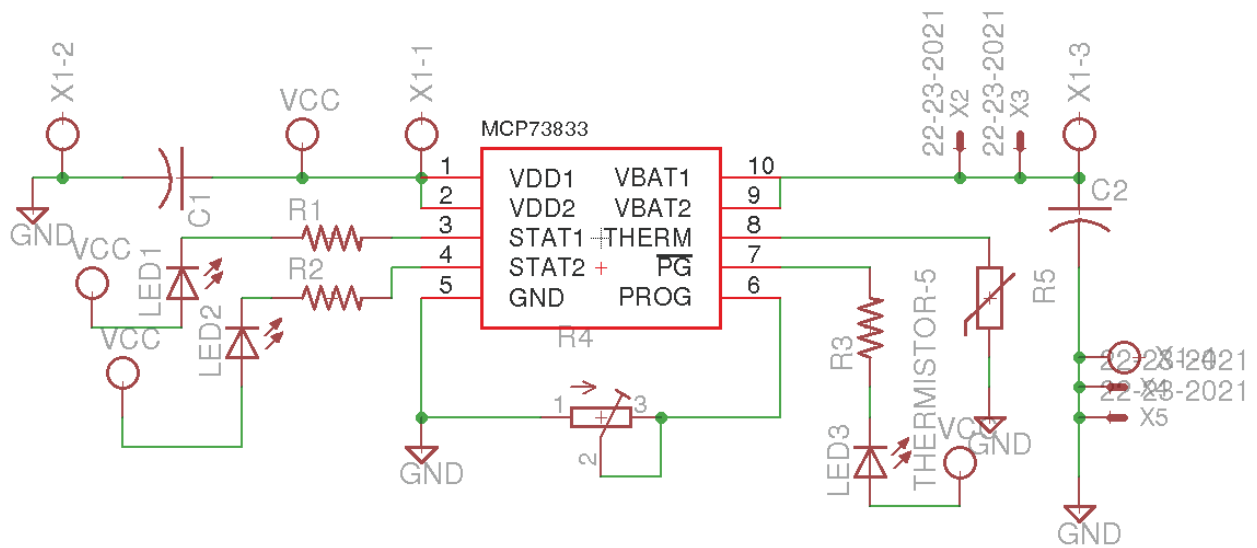


Figura 4.21: Esquemático del sistema de administración de energía.

La siguiente etapa consistió en sacar el cobre de las placas excepto de las zonas grabadas utilizando cloruro férrico para grabado de circuito impreso.

Al terminar el proceso descrito anteriormente, se procedió a lijar cada una de las placas para pulirles el cobre y perforarlas, dando como resultado que ambas quedaran como se puede ver en la figura 4.23

Posteriormente se procedió a soldar todos los componentes y algunas bases para montar otros, esto último se hizo para que fuera más fácil remplazarlos o en el caso del microcontrolador para poder programarlo fuera de la placa, los resultados se pueden observar en la figura 4.24.

Para poder conectar los sensores a la caja, fue necesario agregar 4 conectores especiales los cuales cumplen con la norma nema 4x, con esta acción se asegura que aún con estas perforaciones la caja sigue manteniendo toda la electrónica protegida. También se le agregó una base para poder atornillar ambas placas, tal como se puede apreciar en la figura 4.25a.

En la figura 4.25b se muestra el prototipo funcional del medidor modular inalámbrico de la tensión hídrica del suelo.

En la figura 4.26a, se observa el instrumento en una prueba preliminar, de donde se dedujo que el sistema de administración de energía no cargaba las baterías como debería. Esto debido a que se encontraba expuesto a los rayos del sol directamente y como el peor enemigo de las baterías de ión de Litio es el calor, porque actúa disminuyendo la resistencia de la batería, y por consiguiente su capacidad para retener electricidad será cada vez menor. De hecho una batería de ión de Litio nunca debe de trabajar a temperaturas mayores a 60°C.

Para solucionar este problema se improvisó al instrumento la sombra que se observa en la figura 4.26b, para disminuir la temperatura dentro de la caja que protege la

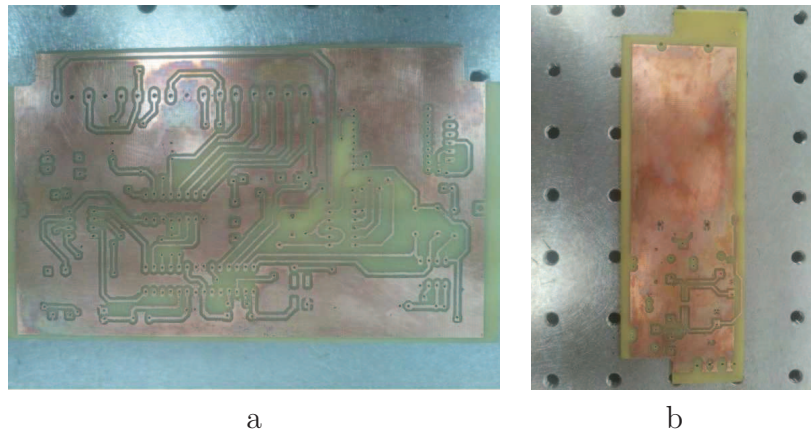


Figura 4.23: Placas pulidas de a)sistema mínimo y de b)sistema de administración de energía

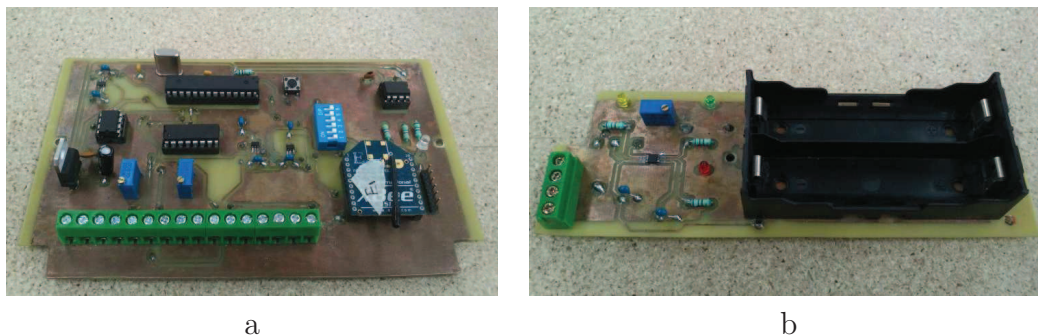


Figura 4.24: Placas soldadas de a)sistema mínimo y de b)sistema de administración de energía

4.6. Configuración y funcionamiento del medidor.

Para su configuración el medidor se comunica con la computadora mediante el dispositivo FTDI TTL-232RG-VSW3V3-WE a través del programa Access port que es muy parecido al Hyperterminal. Al iniciar despliega un menú muy parecido al de la figura 4.28 pero en el ambiente gráfico de Acces port ya que este menú es parte de una simulación hecha con el programa Proteus.

El menú tiene 6 opciones y a continuación se presenta una breve descripción de cada una.

Opción 0.- Al energizar el instrumento, el reloj de tiempo real (RTC por sus siglas en inglés) tiene una hora errónea si no se le asignó una previamente y además no se le interrumpió el suministro de energía, por lo que si selecciona esta opción, pedirá la hora en formato de 24 horas (HH:MM:SS), enseguida la fecha con el formato DD:MM:AA. Si se ingreso algún valor incorrecto como por ejemplo 13 en el parámetro mes, volverá a pedir toda la fecha; lo mismo sucederá con la hora.

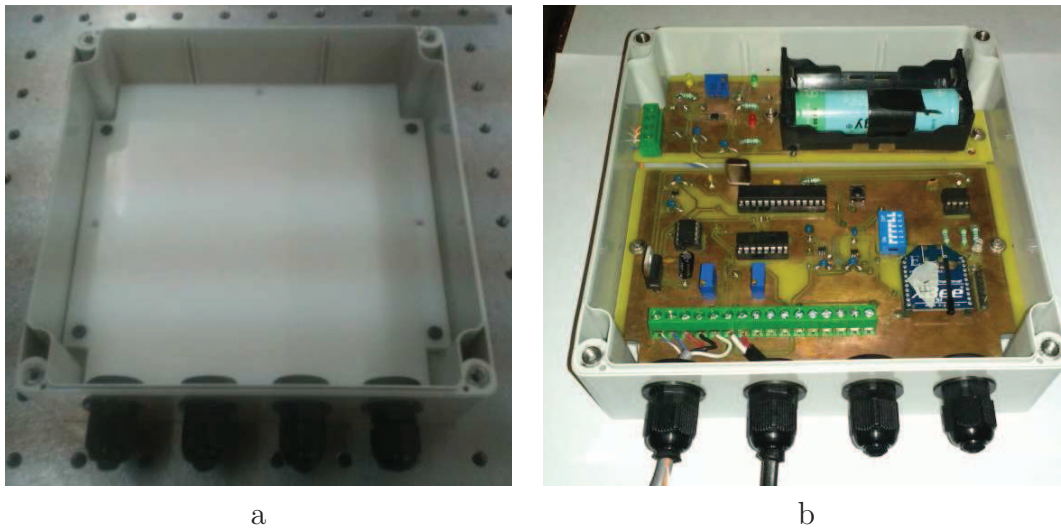


Figura 4.25: Caja a) con base y conectores y b) terminada.

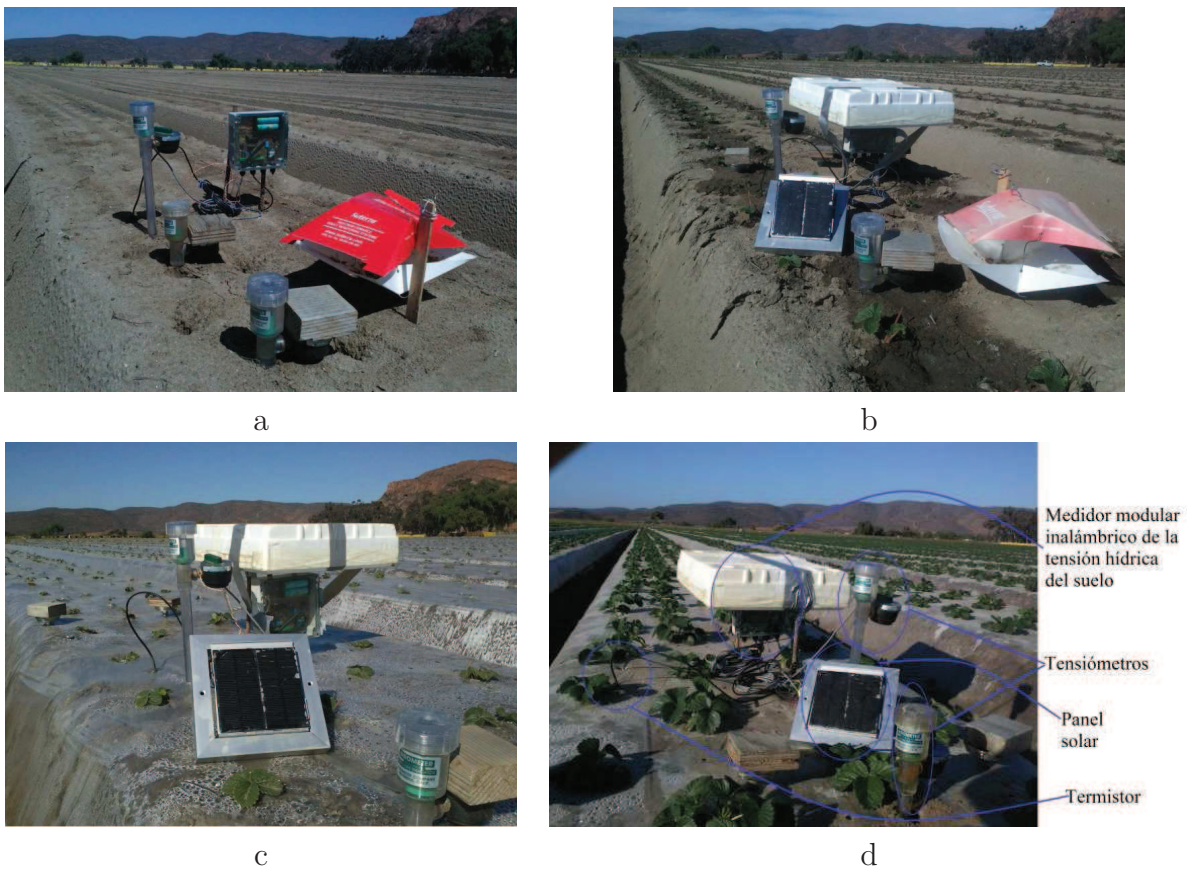


Figura 4.26: Diferentes vistas del medidor instalado en un cultivo de fresa en San Quintín, B.C. México.



Figura 4.27: Vista del medidor instalado en un cultivo de fresa ya en etapa de cosechado en San Quintín, B.C. México.

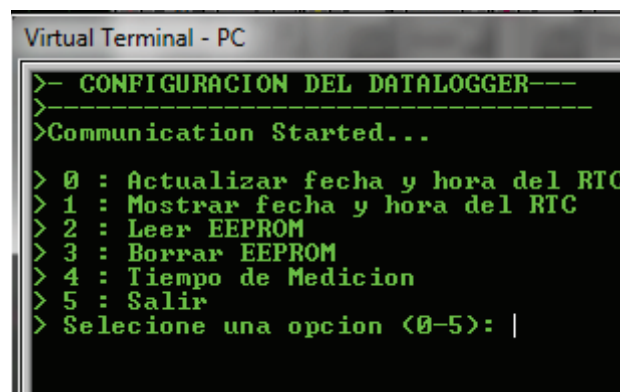


Figura 4.28: Menú principal del instrumento.

Opción 1.- Si se tiene la duda sobre haber ingresado una hora o fecha incorrecta, o simplemente se quiere saber que hora y fecha tiene el RTC, se puede verificar con esta opción.

Opción 2.- Esta opción permite extraer los datos que han sido almacenados en la memoria eeprom.

Opción 3.- Permite el borrado total de la memoria eeprom.

Opción 4.- Al acceder a esta opción se puede escoger el intervalo de tiempo en el que el instrumento hará las mediciones y éste puede ir de 1 a 60 minutos.

Opción 5.- En todas las opciones al realizar la operación solicitada se regresara al menú principal, esta opción es la única que te permite salir del menú.

Una vez fuera del menú principal, el instrumento está configurado para generar una interrupción para el microcontrolador a través del reloj y calendario de tiempo real, de acuerdo al número de minutos que el usuario introdujo en la opción 4 y tomará una

muestra del canal CH0 al CH3 del convertidor analógico-digital para procesarlas, después las salvaguarda en la memoria eeprom y posteriormente las envía por el aire a través del radio Xbee y serán recibidas en el extremo opuesto por otro radio Xbee.

El sistema contiene un pulsador de puesta a cero, el cual se utiliza en caso de que el microcontrolador tenga algún problema de comunicación con los diversos periféricos. Para saber si el instrumento está funcionando de forma adecuada, cuenta con un testigo lumínico tipo diodo emisor de luz (del) que puede ser activado con el pulsador 2 del interruptor deslizante de pastilla en cuyo caso el diodo emisor de luz debe de estar parpadeando a 1 Hz.

La programación del microcontrolador se realiza mediante el programa ARVUDGE en conjunto con Arduino UNO. ARVUDGE, mediante diferentes mandos realiza el reconocimiento del microcontrolador por utilizar, especifica el archivo por grabar, la velocidad de transferencia de datos, etc. El archivo a grabar es compilado utilizando AVR Studio 5 y se muestra en el apéndice C. Con Arduino UNO, se obtiene la comunicación SPI para el grabado del archivo en la memoria instantánea del microcontrolador.

4.7. Visualización de la información.

La visualización de los datos que llegan del medidor al servidor Web vía inalámbrica por medio de los radios Xbee tiene la apariencia de la figura 4.29, donde pasando el cursor sobre el mes que se desean ver las mediciones se despliegan los días que cuentan con datos en el servidor.

Después de haber seleccionado el día, la información se mostrará en forma de una gráfica (ver figura 4.30). En la parte inferior se indica la figura y color que representa cada uno de los 4 sensores con los que cuenta el instrumento. El tensiómetro1 y el termistor1 se encuentran enterrados a una profundidad de 15 centímetros, por otro lado el tensiómetro2 y el termistor 2 están a 30 centímetros. Claramente se ve que los sensores que se encuentran más cerca de la superficie, presentan una dinámica mayor que los otros, al encontrarse más expuestos por el contrario de los otros que permanecen casi constantes.

En las abscisas podemos ver la hora de la medición, y en las ordenadas el de tensión hídrica en cb o temperatura en °Centígrados, de acuerdo a la lectura del sensor que se esté consultando.

4.8. Validación de los resultados

En lo que se refiere a cuestiones de validación de los datos obtenidos con los tensiómetros, ésta se realizó haciendo mediciones redundantes con otros tensiómetros. En la figura 4.31 se pueden observar los datos obtenidos a lo largo de 13 días de medición, en donde se compararon los datos que arrojaba el instrumento *vs* la lectura que tomaba una persona diariamente de un tensiómetro diferente al del instrumento. Ambos tensiómetros se encontraban enterrados a una profundidad de 30 cm.

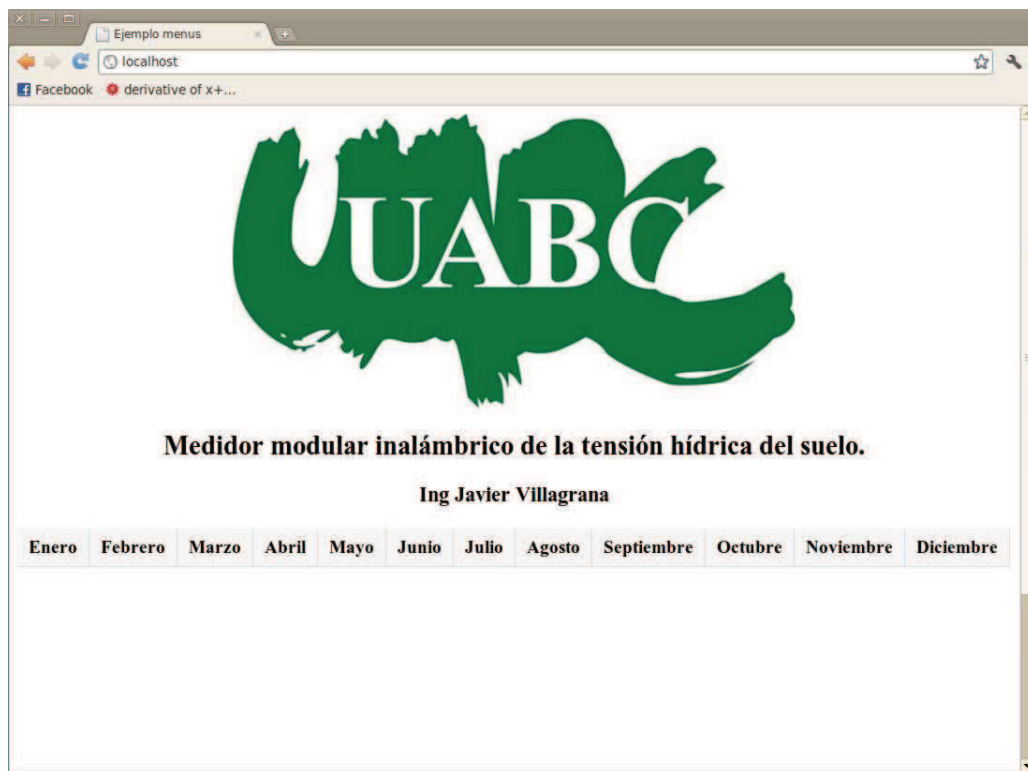


Figura 4.29: Página principal para el usuario de medidor inalámbrico de la tensión hídrica del suelo.

La razón de realizar la validación de esta manera, es porque el tensiómetro es la manera directa de medir la tensión hídrica del suelo, ya que actúa como una raíz mecánica que mide la fuerza que tiene que superar la planta para extraer el agua del suelo.

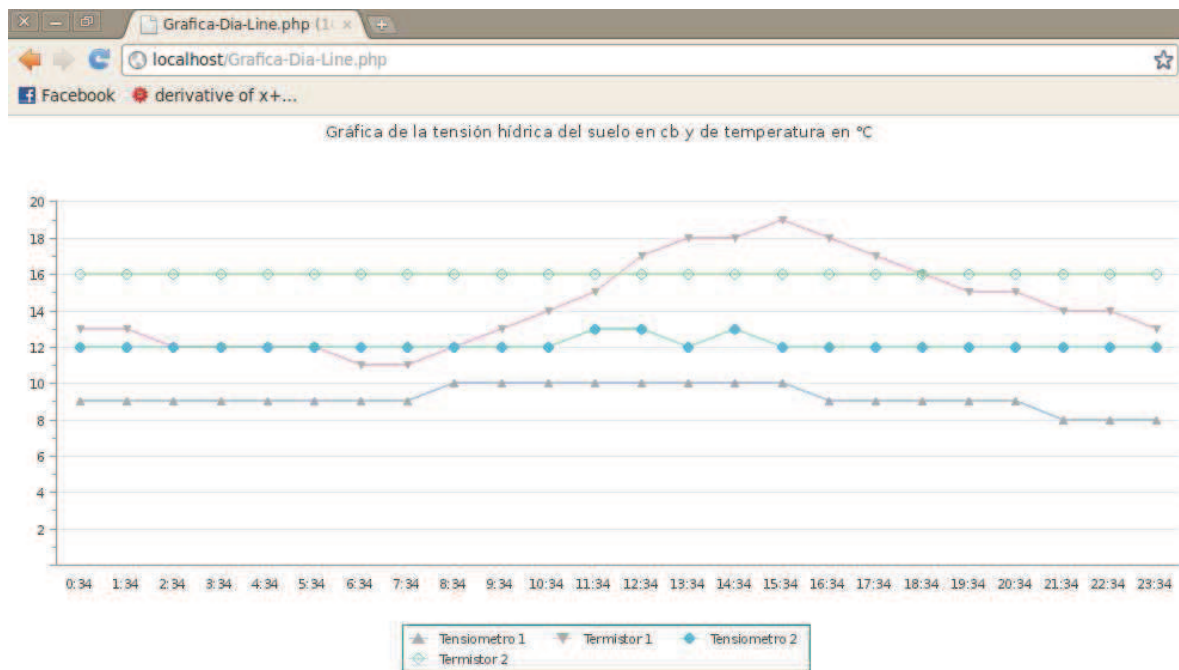


Figura 4.30: Despliegue de los datos de tensión hídrica y de la temperatura del suelo.

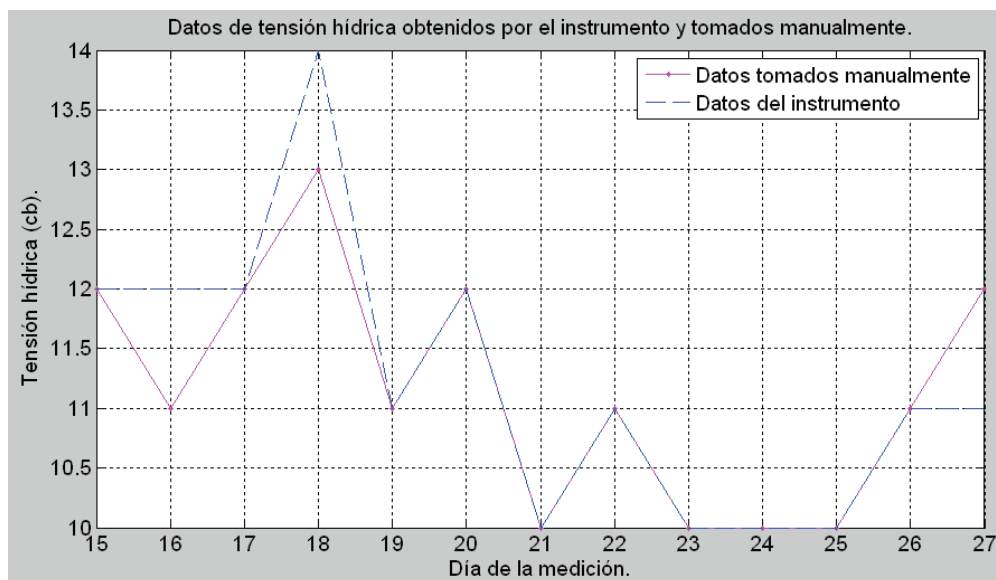


Figura 4.31: Datos de validación de tensión hídrica del suelo. El trazo en color violeta representa los datos tomados en forma manual y el trazo en azul los que fueron obtenidos con el instrumento.

Capítulo 5

Conclusiones

Se describe el diseño y construcción de un instrumento para medir la tensión hídrica y temperatura del suelo, el cual incluye un suministro de energía que le permite funcionar de manera ininterrumpida durante una temporada completa de cultivo. Por otro lado, el instrumento permite verificar el estado de las variables medidas de forma remota, por lo que incluye un módulo de transmisión inalámbrica de datos que se enlaza con una computadora personal.

El prototipo cumple satisfactoriamente con las características y especificaciones planteadas inicialmente, es totalmente configurable a las necesidades de presentación de información del agricultor y puede ser utilizado prácticamente en cualquier cultivo sobre suelo. La programación del instrumento se realizó con el objetivo de que fuera adaptable a las necesidades específicas del usuario final.

Durante el desarrollo del instrumento, se efectuaron varias pruebas en el laboratorio y en los campos de cultivo. Los resultados obtenidos, corroboran su adecuado funcionamiento, en condiciones reales de operación, por lo que se puede mencionar que se tiene un sistema capaz de competir con otros afines, ya en el mercado, y cuyo costo es elevado.

Dependiendo del tipo de cultivo, el instrumento puede configurar sus dos tipos de sensores para la medición de la tensión hídrica del suelo: uno de manera directa, por medio de un tensiómetro, y otro indirecta con el uso del sensor Watermark de matriz de yeso. Este último funciona para diferentes alcances de tensión hídrica, más aún, cuando se colocan dos sensores a diferentes profundidades se puede conocer el gradiente de infiltración del agua en el suelo, con todo el potencial que esto representa.

En cuanto lo que se refiere al usuario, aunado a la ventaja que representa el uso del instrumento como lo son: la programación de riegos con la ventaja del ahorro de agua principalmente, ya que también se ahorra fertilizantes, mano de obra y se obtiene un mejor desarrollo de los cultivos. Este instrumento en particular tiene la característica de que al ser un sistema abierto se puede ir modificando a sus necesidades particulares, cosa que no sucede con otros instrumentos comerciales y con los que además por lo regular se tiene problemas de continuidad tecnológica.

5.1. Trabajo a futuro

Como trabajo futuro, se plantean los siguientes aspectos para mejorar el desempeño del sistema:

- Realizar más pruebas sobre el proceso de interferencia eléctrica producto del efecto de ionización que aparentemente ocurre cuando se conectan 2 sensores Watermark al mismo tiempo para corroborar dicha teoría.
- Incorporar más sensores al instrumento para medir otras variables de interés para el agricultor, como por ejemplo: PH, conductividad, humedad relativa, luminosidad, oxígeno en el agua, temperatura externa, etc. Ya que aún cuenta con 4 canales disponibles del módulo convertidor analógico-digital .
- Reducir el tamaño y el consumo tanto de espacio como de energía de las tarjetas de circuito impreso utilizando componentes de montaje superficial.
- Hacer que el reloj y calendario de tiempo real opere con su propia fuente de alimentación.
- Mejorar la interfaz gráfica, agregando la opción de reportes mensuales que indiquen la media, valores máximos y mínimos de los datos obtenidos.
- Agregar un módulo de Sistema Global para las comunicaciones Móviles (GSM por sus siglas en inglés) y que el instrumento envíe mensajes de alerta al usuario en forma de texto a un teléfono celular.
- Cambiar los radios Xbee serie 1 por los de la serie 2 para utilizarlos como repetidores o en una red mesh.

Bibliografía

- [1] Ryan B. Bloom. *Apache Server 2.0: The Complete Reference*. McGraw-Hill, ISBN: 0-07-222344-8, DOI: 10.1036/0072228032, Berkeley, California U.S.A., 2002.
- [2] Carlos Cadahí López. *Fertirrigación: Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Mundi-Prensa México, S.A. de C.V., 2.^a edición, ISBN: 84-7114-921-4, México, D.F., 2000.
- [3] Juan Carlos Hernández Canales. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Universiad de San Carlos de Guatemala, 2008.
- [4] Julie Chard. *Watermark soil moisture sensors: Characteristics and operating instructions*. Utah State University, 2004.
- [5] Irrometer company. *Moisture Sensor Agricultural Irrigation Design Manual*. <http://www.irrometer.com/pdf/supportmaterial/ADG2006.pdf>, Riverside, California, 2005.
- [6] James M. Conrad. *A survey of energy harvesting sources for embedded systems*. IEEE, ISBN: 978-1-4244-1883-1, DOI: 10.1109/SECON.2008.4494336, 2008.
- [7] SEDESOL y Hábitat COPLADEM, IMIP. *Programa de desarrollo regional: Región San Quintín*. Ensenada, B.C., 2007.
- [8] Gobierno Municipal de Ensenada. *Programa de desarrollo urbano de los centros de población San Quintín - Vicente Guerrero, 1.^a edición*, <http://www.ensenada.gob.mx/transparencia/docs/planes/plan-desurb-sq.pdf>. Ensenada, B.C., 2008.
- [9] Secretaría de fomento agropecuario. *Principales acuíferos en Baja California*, <http://www.sefoa.gob.mx/hidroInfoAcuiferos.aspx>. 2005.
- [10] Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT). *Programa de Ordenamiento Ecológico del Corredor San Antonio de las Minas-Valle de Guadalupe, 1.^a edición*. Mexicali, B.C., 2006.

- [11] Comité de Planeación para el Desarrollo Municipal (COPLADEM). *Programa de desarrollo regional: Región del vino*. Castañeda Express, 1ª edición, Ensenada, 2006.
- [12] Comisión Nacional del Agua. *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. SEMARNAT, México, D.F., 2011.
- [13] Sampat A. Gavande. *Física de suelos, principios y aplicaciones*. Editorial Limusa, S.A. de C.V., 8ª reimpresión, ISBN: 968-18-0304-3, México, D.F., 1991.
- [14] Ismael Hernández Capuchin. *Instrumento de medición de la humedad relativa del suelo*. Universidad Autónoma de Baja California, 2009.
- [15] David Linden and Thomas B Reddy. *Linden's handbook of batteries*. McGraw-Hill, 4ª edición, ISBN: 9780071624190, New York, EUA, 2010.
- [16] Oscar Alfredo Jaramillo Salgado. *Transporte de energía solar concentrada a través de fibras ópticas: acoplamiento fibra-concentrador y estudio térmico*. Universidad Nacional Autónoma de México, 1998.
- [17] José M.^a Tarjuelo Martín-Benito. *El riego por aspersión y su tecnología*. Mundi-Prensa México, S.A. de C.V. 3ª edición. ISBN: 84-8476-225-4, México, D.F., 2005.
- [18] Área de Edafología y Química Agrícola Universidad de Extremadura. *Componentes del suelo. Fase líquida. Retención de agua por el suelo*. Extremadura, España, 2005.
- [19] Macarena Vazquez. *Características generales de los seres vivos*. <http://vazquezmacarenabio1.blogspot.mx/2012-02-01-archive.html>, 2012.
- [20] Juan M. Enciso y Dana Porter. *Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego*. Sistema Universitario Texas A&M, 2007.
- [21] Simón Navarro Blaya y Gines Navarro García. *Química Agrícola*. Ediciones Mundi-Prensa, 2ª edición, ISBN: 84-8476-155-X, Madrid, España, 2003.
- [22] Carlos Pérez Gutiérrez y Ángel Luis Muñoz Nieto. *Teledetección: nociones y aplicaciones*. 2ª edición, ISBN: 9788460776246, Salamanca, España, 2003.

Apéndice A

Rutina para controlar la tarjeta de adquisición de datos

```
%rutina escritas en lenguaje Matlab para controlar la tarjeta de adquisición de
% datos NI USB-6216 de National Instruments
global datos cha0_data cha1_data cha2_data sen1 termistor tensiometro;
for x = 1:2147483647 %numero de ciclos de medicion
    %('Coeficientes de la ecuacion Steinhart-Hart: A , B y C');
    A=[1 log(32.510) log(32.510)^3;1 log(10) log(10)^3;1 log(2.49) log(2.49)^3];
    B=[1/(0+273.15) 1/(25+273.15) 1/(60+273.15)]';
    X = A \ B;
    %disp('Coeficientes de la ecuacion Steinhart-Hart: A , B y C');
    %disp('1/T= A + B Ln (R) + C(Ln (R)^3)')
    A=X(1);
    B=X(2);
    C=X(3);
    %Funcion para la adquisicion de los vectores correspondientes a
    %los datos y al tiempo.
    % se asigna una entrada analogica del dispositivo en especifico.
    ai = analoginput('nidaq','Dev2');
    % se define el canal a utilizar.
    addchannel(ai,0:2);
    % duracion de la adquisicion de datos, dada en segundos.
    duration =15;
    % configuracion de la entrada, en este caso SingleEnded
    set(ai,'InputType','SingleEnded');
    % muestras por segundo adquiridas.
    ai.SampleRate = 1;
    % se determina el numero de muestras requeridas.
    sampleRate = get(ai,'SampleRate');
    requiredSamples = floor(sampleRate * duration);
    % asignacion de la duracion de la adquisicion de los datos.
    ai.SamplesPerTrigger = requiredSamples;
    % comienza la adquisicion.
    start(ai);
    % tiempo que se espera hasta que termine la adquisicion
    % y muestra el tiempo en la ventana de comandos.
```

APÉNDICE A. RUTINA PARA CONTROLAR LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS⁷²

```
waitTime = duration * 1.1 + 0.5;
wait(ai,waitTime);
% se obtienen los vectores correspondientes a los datos y al tiempo.
[data , time] = getdata(ai);
cha0_data = data(:,1);
cha1_data = data(:,2);
cha2_data = data(:,3);
%cha3_data = data(:,4);
grid on
% se detiene la funcion y se libera memoria.
stop(ai);
delete(ai);
x=x+1;
%guardado y promediacion de los datos
a=cha0_data;
b=cha1_data;
c=cha2_data;
e=(a(1)+a(2)+a(3)+a(4)+a(5)+a(6)+a(7)+a(8)+a(9)+a(10)+a(11)+a(12)+a(13)+a(14)+a(15))/15;
f=(b(1)+b(2)+b(3)+b(4)+b(5)+b(6)+b(7)+b(8)+b(9)+b(10)+b(11)+b(12)+b(13)+b(14)+b(15))/15;
g=(c(1)+c(2)+c(3)+c(4)+c(5)+c(6)+c(7)+c(8)+c(9)+c(10)+c(11)+c(12)+c(13)+c(14)+c(15))/15;
i=(e/.0117155);
j=(4.25-f)/.02925;
l=(54.5/g)-10;
Grados=(1/(A+(B*log(l))+(C*log(l)^3)))-273.15;
sen1(x-1)=i;
tensiometro(x-1)=j;
termistor(x-1)=Grados;
sen_1=num2str(i);
ten=num2str(j);
termistor_1=num2str(Grados);
dat=datestr(now);
%concateno la cadena de caracteres
datos=strcat(dat,' sensor1 =',sen_1,'tensiometro =',ten,'temperatura = ',termistor_1);
foy1=today;
foy=datestr(foy1);
diary (sprintf('Medicion NI %s.doc',foy)) %nombre de acuerdo a la fecha actual
datos
diary off %cierro diario
%Graficado de los datos
p(x-1)=(x-2);
plot(p,sen1);
xlabel('Tiempo en minutos. ');
ylabel('Centibares');
title('Tiempo vs centibares. ');
hold on;
plot(p,tensiometro,'r');
plot(p,termistor,'g');
legend('sen1','tensiometro.','termistor');
grid on;
hold off;
pause (45);
end
```

Apéndice B

Programa para resolver la ecuación de Steinhart-Hart del termistor

```
%INICIO DEL PROGRAMA.  
% Programa para resolver la ecuación de Steinhart-Hart del termistor.  
format long;  
disp('Programa para Resolver la Ecuación de Steinhart-Hart del Termistor');  
A=[1 log(32510) log(32510)^3;1 log(10000) log(10000)^3;1 log(2490) log(2490)^3];  
B=[1/(0+273.15) 1/(25+273.15) 1/(60+273.15)]';  
X = A \ B;  
disp('Coeficientes de la ecuacion Steinhart-Hart: A , B y C');  
disp('1/T= A + B Ln (R) + C(Ln (R)^3)')  
A=X(1)  
B=X(2)  
C=X(3)  
%FIN DEL PROGRAMA.
```

Apéndice C

Código del microcontrolador

C.1. Programa principal

```
// ////////////////////////////////////////
// Programa creado y utilizado para la captura, guardado y envio de datos,
// basado en una comunicación con 3 dispositivos:
// % Circuito de tiempo real(PCF8563):
// Establece la hora,fecha,alarmas y timer del sistema.
// % Convertidor analogico-digital(MC3208):
// Discretiza el valor de la variable de interés, con una resolución de
// 12 bits.
// % Memoria EEPROM(25AA1024):
// Guarda los datos medidos,hora y fecha obtenidos del ADC, con 500
// paginas de 256 bytes cada una.
// ////////////////////////////////////////
/*****
/* L i b r a r i e s                               */
/*****
#include <avr/io.h>//librería para el uso de comandos de entrada/salida
#include <util/delay.h>//librería para el uso de retardos
#include <avr/interrupt.h>//librería para el uso de interrupciones
#include <avr/pgmspace.h>//librería para el uso de punteros
#include <math.h>
#include <avr/sleep.h>

////////////////////////////////////////
//variables globales
////////////////////////////////////////

#define XTALIN PORTB6 //oscilador pin in
#define XTALOUT PORTB7 //oscilador pin out

//
#include "I2C.h" //librería para la comunicación I2C
#include "USART.h" //librería para la comunicación PC
```

```

#include "SPI.h" //librería para la comunicación con la EEPROM y ADC
#include "RTC_PCF8563.h" //librería para el RTC(PCF8563)
#include "ADC.h" //librería para el ADC(MCP3008)
#include "EEPROM.h" //librería para la EEPROM(25AA512)

//Vector de interrupcion externa (config)
void EXT_INT0_init(void)
{
    /*Set Interrupt INT0*/
    DDRD &= ~(1 << DDD2);    // Clear the PD2 pin
    // PD2 (PCINT0 pin) is now an input

    PORTD |= (1 << PORTD2);    // turn On the Pull-up
    // PD2 is now an input with pull-up enabled

    //External interrupt 0
    EICRA &= !(1 << ISC00);    // set INT0 to trigger
    EICRA &= !(1 << ISC01);    // on FALLING edge - when switch actived

    EIMSK |= (1 << INT0);    // Turns on INT0

    sei();    // turn on interrupts
}

/*****
/* Configuracion puertos B,C,D                                     */
*****/
void ports_config(void)
{
    //DDRB |= (1<<WP_EEPROM)|(1<<SLAVE_EEPROM)|(1<<SLAVE_ADC)|(1<<XTALOUT)|
    (1<<DATAOUT)|(1<<SPICLOCK);
    DDRB |= (1<<PORTB0)|(1<<PORTB1)|(1<<PORTB2)|(1<<PORTB3)|(1<<PORTB5)|(1<<PORTB7);
    // wp_mem mem ADC mosi sclk xtal

    WP_OFF_EEPROM; //off write-protected (EEPROM)
    SS_OFF_EEPROM; //off slave (EEPROM)
    SS_OFF_ADC; //off slave (ADC)
    //Configuracion para activar reguladores
    DDRC |= (1<<PORTC0)|(1<<PORTC1)|(1<<PORTC2)|(1<<PORTC3);
}

/*****
/*===== Programa Principal =====*/
*****/
char muestra2=0;
int main(void)
{
    _delay_ms(1000); //estabilizar frecuencia,voltaje
    _delay_ms(1000); //estabilizar frecuencia,voltaje

```

```

_delay_ms(1000); //estabilizar frecuencia, voltaje

ports_config(); //configuracion de puertos

EXT_INT0_init(); //Configuracion de interrupcion externa

twi_init(); //Configuracion de protocolo I2C

spi_config(); //Configuracion de protocolo SPI

USART_Init(MYUBRR); //Configuracion del protocolo USART

////////////////////////////////////
//Menu de configuracion del instrumento.
////////////////////////////////////

int menu=1;

while (menu ==1)
{

unsigned char option;

    USART_Transmit(0x0C); //Home
    USART_Trans_String_F(PSTR(">- CONFIGURACION DEL DATALOGGER---"));
    new_line(); //envio de "new line" en ASCII
    USART_Trans_String_F(PSTR(">-----"));
    new_line(); //envio de "new line" en ASCII
    USART_Trans_String_F(PSTR(">Comunicacion iniciada..."));
    new_line(); //envio de "new line" en ASCII

    new_line(); //envio de "new line" en ASCII
    USART_Trans_String_F(PSTR("> 0 : Actualizar fecha y hora del RTC"));
    new_line(); //envio de "new line" en ASCII

    USART_Trans_String_F(PSTR("> 1 : Mostrar fecha y hora del RTC"));
    new_line(); //envio de "new line" en ASCII

    USART_Trans_String_F(PSTR("> 2 : Leer EEPROM"));
    new_line(); //envio de "new line" en ASCII

    USART_Trans_String_F(PSTR("> 3 : Borrar EEPROM"));
    new_line(); //envio de "new line" en ASCII

    USART_Trans_String_F(PSTR("> 4 : Tiempo de Medicion"));
    new_line(); //envio de "new line" en ASCII

    USART_Trans_String_F(PSTR("> 5 : Salir"));
    new_line(); //envio de "new line" en ASCII
    USART_Trans_String_F(PSTR("> Seleccione una opcion (0-5): "));

```

```

    option = USART_Receive();
    switch (option)
    {

case '0': RTC_upTimeDate();
    new_line();//envio de "new line" en ASCII
    break;
case '1': RTC_readTimeDate();
    //conversion BCD a binario del vector "date" para desplegar
    RTC_DateBDC_bin();
    RTC_displayDate();//desplegar en pantalla
    new_line();
    //conversion BCD a binario del vector "time" para desplegar
    RTC_TimeBDC_bin();
    RTC_displayTime();//desplegar en pantalla
    break;
case '2': Read_EEPROM();
    USART_Trans_String_F(PSTR("> Memoria leida exitosamente"));
    break;
case '3': Erase_EEPROM();
    USART_Trans_String_F(PSTR("> Memoria borrada exitosamente"));
    break;
case '4': muestra2=Muestreo();
    break;
case '5': menu=0;

    break;
default: new_line();//envio de "new line" en ASCII
    USART_Trans_String_F(PSTR("> Opcion invalida"));
}

}

////////////////////////////////////
//Inicializacion de parametros del RTC
////////////////////////////////////
    RTC_init();

    RTC_init_control(0x00,0x11,0x83);//ctrl1,ctrl2,clkout(1Hz)

    RTC_writeAlarms(0x80,0x80,0x80,0x80);//alarmas: no min,no hr,no day,no weekday

    RTC_init_timer(0x83,muestra2);//activacion de TIMER cada n minutos
    PORTC = 0x08; //DUERMO EL RADIO

    while (1)
    {
    }
}

```

C.2. Rutina para el convertidor analógico-digital

```

/*
 * ADC.c
 */

#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include "ADC.h"
#include "SPI.h"

#include "EEPROM.h"
#include "USART.h"
#include "RTC_PCF8563.h"

// *****
//  conversión del ADC
//  *****
//  Parámetros
//  -----
//  int ch: Variable para elegir CH0-7(SINGLE) o
//  DIFF0-7(DIFFERENTIAL).
//
//  *****/
////////////////////////////////////
//subrutina para el sensor watermark 200ss-v
char ADC_conv_humedad(int ch)
{
//OFF Slaves
_delay_us(2);
WP_OFF_EEPROM; //off write_protected
_delay_us(2);
SS_OFF_EEPROM; //off eeprom
_delay_us(2);
SS_OFF_ADC; //off adc
////////////////////////////////////
//tomar muestra
uint16_t datah = 0; //datahigh >> b9-b8
uint8_t datal = 0; //datalow >> b7-b0
//uint32_t aux_conv = 0;
float aux_conv=0;
uint8_t aux=0;
SS_ON_ADC; //on adc
_delay_us(1);
SS_ON_ADC;
//esperar/estabilizar
_delay_ms(2);
spi_send(START_ADC); //start bit
spi_send(ch); //canal simple CH0
datah = spi_receive(); //0 0 0 0 0 b9 b8
spi_send(DUMMY);

```

```

data1 = spi_receive(); //b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1 b0
_delay_us(1);
SS_OFF_ADC; //off adc
_delay_us(2);
WP_OFF_EEPROM; //off write_protectd
_delay_us(2);
aux_conv = ((datah<<8) | (data1)) & 0x03FF;
aux_conv = aux_conv*0.0029160156; //
aux_conv = aux_conv/0.0117155;
aux=aux_conv;
return aux;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
/Rutina para el muestreo del termistor.
char ADC_conv_temp(int ch)
{
//OFF Slaves
_delay_us(2);
WP_OFF_EEPROM; //off write_protectd
_delay_us(2);
SS_OFF_EEPROM; //off eeprom
_delay_us(2);
SS_OFF_ADC; //off adc
/////////////////////////////////////////////////////////////////
//tomar muestra
uint16_t datah = 0; //datahigh >> b9-b8
uint8_t data1 = 0; //datalow >> b7-b0
uint16_t Lect_adc=0;
float Ln_Resist=0;
float Ln_Resist3=0;
float Temp=0;
float Resist=0;
float aux1=0;
float aux2=0;
SS_ON_ADC;
_delay_us(1);
SS_ON_ADC;
//esperar/estabilizar
_delay_ms(2);
spi_send(START_ADC); //start bit
spi_send(ch); //canal simple CH0
datah = spi_receive(); //0 0 0 0 0 0 b9 b8
spi_send(DUMMY);
data1 = spi_receive(); //b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1 b0

_delay_us(1);
//off adc
SS_OFF_ADC;
_delay_us(1);
SS_OFF_ADC;

_delay_us(2);

```

```

WP_OFF_EEPROM; //off write_protectd
_delay_us(2);
SS_OFF_EEPROM; //off eeprom
_delay_us(2);
WP_OFF_EEPROM; //off write_protectd
_delay_us(2);
SS_OFF_EEPROM; //off eeprom
Lect_adc = ((datah<<8) | (datal)) & 0x03FF;
aux1 = ((Lect_adc)*(0.0029160156));
Resist = ((32.7/aux1)-10);//          (((10000)*3.3)/aux_conv2)-10000);

    Ln_Resist =log(Resist);

    Ln_Resist3=Ln_Resist*Ln_Resist*Ln_Resist;

Temp=(1/(0.002773158328763+(0.000250127116199*Ln_Resist)+(0.000000402941348*Ln_Resist3)))-273.15;
int T= 0;
    T=Temp;
return T;

}

////////////////////////////////////
/Rutina para el tensiómetro
char ADC_conv_tensio metro(int ch)
{
//OFF Slaves
_delay_us(2);
WP_OFF_EEPROM; //off write_protectd
_delay_us(2);
SS_OFF_EEPROM; //off eeprom
_delay_us(2);
SS_OFF_ADC; //off adc
////////////////////////////////////

uint16_t datah = 0; //datahigh >> b9-b8
uint8_t datal = 0; //datalow >> b7-b0
//uint32_t aux_conv = 0;
float aux_conv=0;
uint8_t aux=0;
//on adc
SS_ON_ADC;
_delay_us(1);
SS_ON_ADC;
//esperar/estabilizar
_delay_ms(2);
spi_send(START_ADC); //start bit
spi_send(ch); //canal simple CH0
datah = spi_receive(); //0 0 0 0 0 0 b9 b8
spi_send(DUMMY);
datal = spi_receive(); //b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1 b0

```

```

_delay_us(1);
//off adc
SS_OFF_ADC;
aux_conv = ((datah<<8) | (datal)) & 0x03FF;
aux_conv = aux_conv*0.0029160156; //resolucion para 10 bits
aux_conv = ((2.855 - aux_conv) / (0.021));
aux=aux_conv;
return aux;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////

```

C.3. Rutina para la memoria eeprom

```

/ /*
// * EEPROM.c
// *
// */

#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include "SPI.h"
#include "EEPROM.h"
#include "RTC_PCF8563.h"
int lowbyte=0;
int medbyte=0;
int highbyte=0;
int aux_mem=0;

// #include <avr/io.h> //librería para el uso de comandos de entrada/salida
#include <util/delay.h> //librería para el uso de retardos
#include <avr/interrupt.h> //librería para el uso de interrupciones
#include <avr/pgmspace.h> //librería para el uso de punteros
#include <math.h>
#include <avr/sleep.h>

// /*-----
//  EEPROM tools
//  -----*/
//Subrutina para el almacenamiento de los datos
void write_eeprom(int address_hi,int med,int address_low,int inicio,
int id,int sepf, int dd,
int mm, int yy,int seph, int hh, int mn,int sepd1, int h1, int t1,
int sepd2,int h2, int t2,int sepff,int fin)
{

//OFF slaves
SS_OFF_ADC; //apagar todos los slaves y wp
_delay_us(2);
SS_OFF_EEPROM;
_delay_us(2);

```

```

WP_OFF_EEPROM;

WP_ON_EEPROM; //enciendo la protección de escritura(0)
_delay_us(1);
WP_ON_EEPROM;
_delay_us(1);

SS_ON_EEPROM; //!SS actived
spi_send(EE_WREN); //Instruction write_enable
SS_OFF_EEPROM; //!SS desactived

//SS_OFF_ADC;

SS_ON_EEPROM; //!SS actived
spi_send(EE_WRITE);

spi_send(address_hi); //Send address
spi_send(med);
spi_send(address_low);

spi_send(inicio); //dato guardado en 0x0000
    spi_send(id); //dato guardado en 0x0000
spi_send(sepf); //dato guardado en 0x0000
spi_send(dd); //dato guardado en 0x0000
spi_send(mm); //dato guardado en 0x0001
spi_send(yy); //dato guardado en 0x0002
spi_send(seph); //dato guardado en 0x0000
spi_send(hh); //dato guardado en 0x0003
spi_send(mn); //dato guardado en 0x0004
spi_send(sepd1); //dato guardado en 0x0000
spi_send(h1); //dato guardado en 0x0005
spi_send(t1); //dato guardado en 0x0006
spi_send(sepd2); //dato guardado en 0x0000
spi_send(h2); //dato guardado en 0x0007
spi_send(t2); //dato guardado en 0x0008
spi_send(sepff); //dato guardado en 0x0000
spi_send(fin); //dato guardado en 0x0000

SS_OFF_EEPROM; //!SS desactived
_delay_us(2);
SS_OFF_EEPROM; //!SS desactived

// /*????????????????????????????????????????????????????????????
// 5 ms Max. selon la feuille de MC
// ?????????????????????????????????????????????????????????????*/
_delay_ms(100);

////////////////////////////////////
WP_OFF_EEPROM;
_delay_us(2);
SS_OFF_EEPROM;

```

```

}

/*-----*/
void Read_EEPROM(void)
{
  int true =0;
  for (int j=0; j<=1; j++)
  {
    for (int i=0; i<=255; i++)
    {
      for (int k=0; k<=255; k++)
      {
        char cell= read_eeprom(j,i,k);
        if (cell != 0xff)
        {
          USART_Transmit(cell);
          //USART_Transmit(':');
        }
        else
        {
          int true=1;
          break;
        }
      }
      if (true == 1)
      {
        break;
      }
    }
    if (true == 1)
    {
      break;
    }
  }
}

/*-----*/

void Erase_EEPROM(void)
{
  // for (int j=0; j<=0; j++)
  // {
  // for (int i=0; i<=128; i++)
  // {
  SS_OFF_ADC; //apagar todos los slaves y wp
  _delay_us(2);
  SS_OFF_EEPROM;
  _delay_us(2);
}

```

```

WP_OFF_EEPROM;

//PORTB |= (1<<DATAIN)|(1<<SLAVESELECT); //Z-high
//SS_OFF_ADC;

WP_ON_EEPROM; //enciendo la proteccion de escritura(0)
_delay_us(1);
WP_ON_EEPROM;
_delay_us(1);

SS_ON_EEPROM; //!SS actived
spi_send(EE_WREN); //Instruction write_enable
SS_OFF_EEPROM; //!SS desactived

//SS_OFF_ADC;
_delay_us(1);

SS_ON_EEPROM; //!SS actived
spi_send(EE_CE);

// spi_send(j); //Send address
// spi_send(i);
//
// spi_send(0xff); //dato guardado en 0x0000

SS_OFF_EEPROM; //!SS desactived
_delay_us(2);
SS_OFF_EEPROM; //!SS desactived

// /*????????????????????????????????????????????????????????????
// 5 ms Max. selon la feuille de MC
// ?????????????????????????????????????????????????????????????*/
_delay_ms(10000);

////////////////////////////////////
WP_OFF_EEPROM;
_delay_us(2);
SS_OFF_EEPROM;
_delay_us(2);

}

/*-----*/
void Guardar_datos(void)
{
    write_eeprom(highbyte,medbyte,lowbyte,register_datos[1], register_datos[2],
    register_datos[3],register_datos[4],register_datos[5],register_datos[6],register_datos[7],
    register_datos[8],register_datos[9],register_datos[10],register_datos[11],register_datos[12],

```

```
register_datos[13],register_datos[14],register_datos[15],register_datos[16],register_datos[17]);
```

```
lowbyte=lowbyte+17;
```

```
if(lowbyte == 255)
```

{

```
medbyte=medbyte+1;
```

```
lowbyte=0;
```

```
if (medbyte==255)
```

{

```
lowbyte=0;
```

```
medbyte=0;
```

```
highbyte=1;
```

```
aux_mem++;
```

```
if (aux_mem==2)
```

{

```
lowbyte=0;
```

```
medbyte=0;
```

```
highbyte=0;
```

```
aux_mem=0;
```

}

}

}

}

////////////////////////////////////