



SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA  
COORDINACIÓN SECTORIAL ACADÉMICA  
DIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



---

---

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA**  
*“José María Morelos y Pavón”*

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**TESIS**

**“EQUIPO MULTIMODAL PARA MEDICIÓN  
INALÁMBRICA DE VARIABLES AMBIENTALES Y  
DETECCIÓN DE FRENTE DE HUMEDAD”**

**Que para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica**

**Presenta:**  
**Ing. Fernando Landeros Páramo.**

**Director:**  
**Dr. José Antonio Gutiérrez Gnechi**

**Codirector:**  
**Dr. Victor Hugo Olivares Peregrino**

Morelia, Michoacán, México. Agosto del 2012.

---

---

## Resumen.

La técnica de riego por goteo aplicada a los cultivos como en el caso de las fresas, ha demostrado ser una forma alternativa de riego que en los últimos años se ha aplicado en muchas culturas alrededor del mundo. A través del uso de esta técnica se han obtenido grandes beneficios, tales como el ahorro de agua y fertilizantes; recientes han demostrado que mediante la aplicación de los resultados de riego por goteo hay una disminución de la contaminación del suelo resultado de la lixiviación de riego fertilizante. La determinación del frente de humedad ha demostrado ser una gran herramienta en el estudio de los cultivos donde se aplica riego por goteo. Puesto que es a través del estudio de la dinámica de la progresión de humedad frontal puede cuantificarse con mayor precisión la cantidad de agua necesaria para el crecimiento del cultivo. Además del desarrollo tecnológico se ha demostrado que la variabilidad del clima afecta a la mayoría de los procesos físicos y biológicos que determinan la calidad y cantidad de la producción agrícola. Utilizar adecuadamente datos meteorológicos en tiempo y determinar los beneficios significativos tales como el control de plagas mejora, la previsión de heladas o hacer un riego eficiente, y para identificar el momento y la cantidad de fertilizante que se aplica durante el desarrollo de la planta, que en términos finales representan mayor producción, menor costo de cultivo, tierras de cultivo o producto de mayor calidad.

Debido a la importancia de la agricultura en la sociedad y el efecto del cambio climático en la agricultura y la necesidad de equipos automatizados de observación meteorológica accesible, razón por la cual, como trabajo de tesis en este artículo se presenta la medición de equipo de telefonía móvil multimodal de las variables ambientales y la detección del frente de humectación, lo que por la medición de la impedancia eléctrica del suelo mediante la técnica de la tomografía de impedancia eléctrica se puede determinar la progresión del frente de humedad a diferentes niveles de medición. Además de la medición de la temperatura, la temperatura del suelo, humedad ambiente de humedad, así como la humedad del suelo volumétrica. El equipo tiene la característica incorporada para ser portátil, para ser accionado por baterías que se recargan con las células solares, también tiene la capacidad de almacenar los datos de medición de cada uno de memoria SD de riego, transmite de forma inalámbrica a la central de monitoreo para el estudio adicional de los datos recogidos.

El equipo también cuenta con una interfaz de usuario que permite al usuario a través de la pantalla LCD para ver los datos obtenidos de cada medición de los riesgos y el estado actual de la temperatura del aire, temperatura del suelo, humedad y humedad del suelo, además de que el usuario puede modificar los parámetros de la medición los tiempos a través de la navegación mediante el teclado en práctica. Con lo cual el usuario tendrá una herramienta práctica para la medición y el estudio de las variables ambientales y la dinámica de la progresión del frente de la humedad en los cultivos donde se aplica el riego por goteo.

Con la construcción de este equipo se desea aportar algo al desarrollo tecnológico del campo y ayudar a aumentar la competitividad de la agricultura nacional, así como también en el cuidado del medio ambiente, permitiendo que el agua y el uso racional de menos contaminación del suelo.

---

---

## Tabla de contenido.

<b>Abstract</b> .....	xi
<b>Resumen</b> .....	xiii
<b>Dedicatoria</b> .....	xv
<b>Agradecimientos</b> .....	xvii
<b>Tabla de contenido</b> .....	xix
<b>Simbología</b> .....	xxiii
<b>Abreviaturas y acrónimos</b> .....	xxv
<b>Lista de Figuras</b> .....	xxvii
<b>Lista de Tablas</b> .....	xxxv
<b>Capítulo 1</b> .....	1
<i>Introducción</i> .....	1
Prefacio.....	2
1.1 Producción agrícola en el estado de Michoacán.....	4
1.2 Importancia de la producción de fresa en Michoacán.....	5
1.3 Uso del Agua en México.....	6
1.4 Retos en el uso del Recurso Agua en la producción de fresa.....	8
1.5 Propuestas de soluciones para optimizar el uso de los recursos hídricos en el sector fresero. ..	8
1.5.1 Desarrollo de sistemas de medición dedicados a la optimización de los recursos hídricos en los distritos de riego.....	9
1.6 Importancia del desarrollo de sistemas automáticos para la detección del frente de humedad.....	10
1.7 Trabajos previos en el desarrollo de sistemas de medición de frente de humedad.....	12
1.8 Importancia y equipos para realizar mediciones ambientales.....	15
1.9 Propuesta del proyecto de investigación y desarrollo tecnológico.....	17
1.10 Objetivos.....	17
1.10.1 Objetivo general.....	17
1.10.2 objetivos particulares.....	17
1.11 Hipótesis.....	18
1.12 Justificación.....	18
1.13 Contenido de la Tesis.....	19
<b>Capítulo 2</b> .....	21
<i>Marco Teórico</i> .....	21
2.1 Sistema agrícola del estado de Michoacán.....	22
2.1.1 Regiones de producción agrícola de Michoacán.....	22
2.1.2 Recursos hidrológicos del Estado de Michoacán.....	24
2.1.3 Tipos de suelos del estado de Michoacán.....	25
2.1.4 Tipos de riego utilizados en el sistema agrícola de Michoacán.....	28
2.2 Variables ambientales y dinámicas de progresión de frente de humedad.....	29
2.2.1 Temperatura del ambiente.....	29
2.2.2 Temperatura del suelo.....	31
2.2.3 Humedad relativa del ambiente.....	31
2.2.4 Humedad volumétrica del suelo.....	32
2.2.5 Punto de rocío.....	33
2.2.6 Dinámica de progresión de frente de humedad.....	34
2.3 Técnicas de medición de humedad.....	36

2.3.1 Técnica de medición gravimétrica del agua en el suelo.....	36
2.3.2 Técnica nuclear de medición de contenido de agua en el suelo.....	37
2.3.3 Técnica de medición del contenido de agua en el suelo por método de Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR: Time Domain Reflectometry). ....	37
2.3.4 Técnica de análisis de humedad mediante medición de capacitancia.....	39
2.3.5 Técnica de análisis de humedad mediante medición de impedancia. ....	40
2.4 Tomografía de impedancia eléctrica. ....	40
2.4.1 Medición de impedancia Eléctrica. ....	41
2.4.2 Métodos básicos de medición de impedancia eléctrica. ....	43
2.5 Telemetría. ....	48
2.6 Memoria SD. ....	49
2.6.1 Sistema de Archivos FAT32. ....	50
2.5 Conclusiones .....	53
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>55</b>
<i>Desarrollo del Equipo.....</i>	<i>55</i>
3.1 Requerimientos del equipo.....	56
3.2 Diseño del equipo.....	57
3.3 Sistema Digital de control.....	58
3.3.1 Módulo de condicionamiento de señales analógicas adquiridas.....	59
3.3.2 Módulo de comunicación con el sensor de humedad relativa. ....	60
3.3.3 Módulo de comunicación inalámbrica.....	62
3.3.4 Módulo de almacenamiento en memoria $\mu$ SD.....	62
3.3.5 Módulo de control para el sintetizador digital de señales (DDS: Direct Digital Synthesizer).....	63
3.3.6 Módulo de líneas digitales para los multiplexores de los sistemas de medición. ....	64
3.3.7 Interfaz de Usuario: Pantalla LCD y Teclado.....	65
3.3.8 Sistema mínimo para el Microcontrolador MSP430F2618. ....	66
3.4 Sistema analógico de medición de variables ambientales. ....	67
3.4.1 Etapas de acondicionamiento para las temperaturas del suelo. ....	67
3.4.2 Etapas de acondicionamiento para la medición de humedad volumétrica del suelo.....	69
3.5 Analizador de impedancia Eléctrica del suelo. ....	71
3.5.1 Interfaz de medición de impedancia eléctrica del suelo. ....	74
3.5.2 Generación de la señal de inyección del sistema de medición de impedancia eléctrica...	75
3.5.3 Fuente de corriente.....	76
3.5.4 Multiplexores de los canales de medición de impedancia eléctrica.....	78
3.6 Obtención de los parámetros del valor de Impedancia. ....	79
3.6.1 Convertidor RMS a CD.....	81
3.7.2 Obtención del ángulo de desfase.....	82
3.7 Fuente de alimentación del equipo.....	82
3.8 Conclusiones. ....	84
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>85</b>
<i>Desarrollo del Software del equipo. ....</i>	<i>85</i>
4.1 Diseño del software del Equipo. ....	86
4.1.1 Descripción general de las operaciones a realizar por el programa del microcontrolador.	86
4.1.2 Descripción general de las operaciones a realizar por el programa en la computadora personal. ....	86
4.2 Diseño del programa residente en el microcontrolador para operación del sistema digital.	87

4.2.1 Diagrama de flujo del programa del microcontrolador.....	87
4.2.2 Inicialización general del equipo.....	89
4.2.3 interfaz de usuario.....	91
4.2.4 Protocolo de comunicación inalámbrica.....	95
4.2.5 Manejo de la memoria $\mu$ SD (Micro-Secure Digital).....	97
4.2.6 Creación de archivos de datos en la memoria $\mu$ SD.....	100
4.2.7 Medición de las variables ambientales.....	104
4.2.8 Medición de impedancia eléctrica del suelo.....	105
4.2.9 Escritura de los datos de medición de las variables ambientales en el archivo de la memoria Micro SD.....	109
4.2.10 Escritura de los datos de la medición de la impedancia eléctrica en el archivo de la memoria $\mu$ SD.....	110
4.2.11 Transmisión inalámbrica de los datos de medición de las variables ambientales.....	113
4.2.12 Transmisión inalámbrica de los datos de la medición de Impedancia Eléctrica.....	114
4.3 Programa para la central de monitoreo en PC.....	115
4.3.1 Objetos gráficos utilizados.....	115
4.3.2 Operación de programa.....	119
4.4 Algoritmo de determinación de Frente de Humedad.....	120
4.5 Conclusiones.....	122
<b>Capítulo 5</b> .....	123
<i>Pruebas y resultados</i> .....	123
5.1 introducción.....	124
5.2 Montaje de las pruebas del equipo en el laboratorio.....	124
5.2.1 Ensamble del arreglo de electrodos.....	124
5.2.2 Ensamble del sistema de medición.....	126
5.2.3 Arreglo Experimental.....	126
5.3 Pruebas de funcionamiento.....	128
5.3.1 Mediciones de impedancia usando el medidor LCR-821 GWINSTEK.....	128
5.3.2 Ajuste del equipo desarrollado para experimentación.....	128
5.4 Resultados de las pruebas Realizadas.....	131
5.4.1 Definición de los parámetros de medición de las pruebas realizadas.....	131
5.4.2 Resultados de la medición de impedancia utilizando el equipo GWINSTEK LCR-82.....	132
5.4.3 Resultados obtenidos en la aplicación de la central de monitoreo.....	133
5.4.4 Análisis de los resultados de las pruebas y almacenados en la memoria Micro SD.....	139
5.5 Obtención del frente de humedad con los datos obtenidos de las pruebas realizadas.....	149
5.6 Conclusiones.....	156
<b>Capítulo 6</b> .....	161
<i>Conclusiones y trabajos futuros</i> .....	161
6.1 Conclusiones.....	162
6.2 Contribuciones.....	164
6.3 Trabajos Futuros.....	164
<b>Referencias</b> .....	167
<b>Apéndice A</b> .....	177
<i>Esquematicos y PCB's de las etapas del equipo</i> .....	177
<b>Apéndice B</b> .....	189
<i>Programa del microcontrolador para el equipo</i> .....	189
<b>Apéndice C</b> .....	199
<i>Programa de la Aplicación de la central de monitoreo</i> .....	199