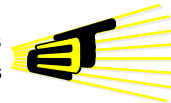


Trabajo de Investigación de Maestría:
**DETECCIÓN DE LA VARIACIÓN DE VOLUMEN DE
SEMILLAS MEDIANTE EL USO DE UN CAMPO
ELÉCTRICO DE BAJA FRECUENCIA
Y BAJA INTENSIDAD**

Ing. NIDIA QUINTERO PEÑA



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2012

Trabajo de Investigación de Maestría:
**DETECCIÓN DE LA VARIACIÓN DE VOLUMEN DE
SEMILLAS MEDIANTE EL USO DE UN CAMPO
ELÉCTRICO DE BAJA FRECUENCIA
Y BAJA INTENSIDAD**

Ing. NIDIA QUINTERO PEÑA

**Trabajo de Grado para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Electrónica**

Director

CARLOS RODRIGO CORREA CELY
Doctorado en Ingeniería Química

Codirector

RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA
Doctor en Tecnologías de la Información

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2012

Dedicado a mi esposo Sergio, a mi hija Elizabeth y a mis Padres Juan y Carmen, que me dieron las fuerzas y el empuje necesarios para culminar esta etapa de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1 MEDICIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN EN SEMILLAS	17
1.1 DEFINICIÓN DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO VEGETAL	17
1.2 FASES DE LA GERMINACIÓN	19
1.3 MEDICIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN DE SEMILLAS UTILIZANDO EL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES	20
2 ESTIMACIÓN DE DIMENSIONES DE UN OBJETO A PARTIR DE LA VARIACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	22
2.1 MEDICIÓN DE DIMENSIONES DE UN OBJETO MEDIANTE CAMPO ELÉCTRICO.....	22
2.2 CONSTANTE DIELECTRICA EN SEMILLAS.....	23
2.3 EFECTO DEL CAMPO ELÉCTRICO EN SISTEMAS VEGETALES.....	25
3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ELECTRÓNICO FUNCIONAL	27
3.1 REQUERIMIENTOS	27
3.1.1 Requerimientos técnicos.	27
3.1.2 Requerimientos funcionales.	28
3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	28
3.3 COMPONENTES.....	28
3.4 COMPONENTE <i>HARDWARE</i>	29
3.4.1 Bloque de generación y detección.	29
3.4.2 Bloque de acondicionamiento de señal.....	33
3.4.3 Bloque de filtrado y conversión.	35
3.4.4 Bloque del microcontrolador (μ C).....	38

3.4.5	Bloque de comunicación con el computador.....	39
3.4.6	Fuente de alimentación.....	40
3.4.7	Ruido generado por los componentes.....	42
3.4.8	Placa de circuito impreso (PCB).....	46
3.5	COMPONENTE <i>SOFTWARE</i>	46
3.5.1	<i>Software</i> del microcontrolador.....	46
3.5.2	<i>Software</i> del computador.....	51
3.6	INTERFAZ DE USUARIO.....	55
4	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ELECTRÓNICO FUNCIONAL.....	58
4.1	CURVA CARACTERÍSTICA DEL SENSOR.....	58
4.2	MEDICIÓN DEL RUIDO.....	61
4.2.1	Reguladores de tensión.....	62
4.2.2	Sensor de campo eléctrico sin electrodos.....	62
4.2.3	Sensor de campo eléctrico con electrodo tipo FEF.....	64
4.2.4	Sensor de campo eléctrico con electrodo tipo placas planas paralelas.....	67
5	MEDICIÓN DE LA VARIACIÓN DE VOLUMEN EN SEMILLAS CON EL MODELO ELECTRÓNICO FUNCIONAL VS EL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES.....	70
5.1	DETECCIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN DE SEMILLAS DE FRIJOL.....	71
5.1.1	Materiales y método.....	71
5.1.2	Resultados.....	71
5.2	DETECCIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN DE SEMILLAS DE ARVEJA.....	72

5.2.1	Materiales y método.	72
5.2.2	Resultados.	73
5.3	COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN DE SEMILLAS DE ARVEJA.....	75
5.3.1	Materiales y método.	75
5.3.2	Resultados.	76
5.4	DETECCIÓN DE MUERTE DE SEMILLAS DE ARVEJA Y FRIJOL.....	89
5.4.1	Materiales y método.	89
5.4.2	Resultados.	89
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
6.1	CONCLUSIONES.....	94
6.2	RECOMENDACIONES.....	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	96
	ANEXOS.....	99

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fases de imbibición de agua por la semilla medida mediante el incremento del peso fresco.	19
Figura 2. Entrada de agua de tres especies.	20
Figura 3. Modelo de medición de dimensiones de un objeto, utilizando campo eléctrico.	23
Figura 4. Diagrama de bloques del prototipo.	30
Figura 5. Tipos de electrodos.	30
Figura 6. Sección de un electrodo FEF con diferentes valores de profundidad de penetración.	31
Figura 7. Diagrama de conexiones del sensor de campo eléctrico.	33
Figura 8. Diagrama de acondicionamiento de señal.	34
Figura 9. Respuesta en frecuencia del filtro Butteworth de orden 2.	36
Figura 10. Diagrama de conexión del filtro analógico.	36
Figura 11. Diagrama de conexiones del conversor A/D.	37
Figura 12. Diagrama del microcontrolador.	39
Figura 13. Diagrama de conexión de comunicación Bluetooth.	40
Figura 14. Diagrama de flujo del programa en el PIC.	47
Figura 15. Diagrama de flujo de la interrupción por UART.	50
Figura 16. Diagrama de flujo del programa cíclico principal.	51
Figura 17. Diagrama de flujo de ventana principal.	52
Figura 18. Diagrama de flujo de ventana para el biólogo.	53
Figura 19. Diagrama de flujo de ventana para el ingeniero.	54
Figura 20. Ventana principal de la interfaz de usuario.	55
Figura 21. Ventana del usuario biólogo de la interfaz de usuario.	56
Figura 22. Ventana de usuario ingeniero de la interfaz de usuario.	57
Figura 23. Curva característica del sensor de la primera versión del prototipo.	59
Figura 24. Curva característica del sensor de la segunda versión del prototipo.	60
Figura 25. Curva característica del modelo electrónico funcional.	60
Figura 26. Señal del sensor de campo eléctrico sin amplificar (azul) y amplificada (rojo) a ELF.	63
Figura 27. Señal filtrada (azul) y sin amplificar (rojo) a ELF.	64
Figura 28. Señal del sensor de campo eléctrico sin amplificar (azul) y amplificada (rojo) a LF.	64
Figura 29. Señal sin amplificar (azul) y amplificada (rojo) a ELF.	65
Figura 30. Señal filtrada (azul) y señal amplificada (rojo) a ELF.	65
Figura 31. Señal sin amplificar (azul) y amplificada (rojo) a LF.	66
Figura 32. Señal filtrada (azul) y señal amplificada (rojo) a LF.	66
Figura 33. Señal sin amplificar (azul) y amplificada (rojo) a ELF.	67

Figura 34. Señal filtrada (azul) y señal amplificada (rojo) a ELF.....	68
Figura 35. Señal sin amplificar (azul) y amplificada (rojo) a LF.....	68
Figura 36. Señal filtrada (azul) y señal amplificada (rojo) a LF.	69
Figura 37. Semillas de frijol en remojo.	72
Figura 38. Semillas de arveja en remojo.	74
Figura 39. Semillas de arveja en germinación.	74
Figura 40. Tasa de imbibición de las semillas de arveja.	77
Figura 41. Electrodo tipo placas planas paralelas.	79
Figura 42. Electrodo tipo FEF.	80
Figura 43. Comparación de datos de imbibición de arveja.	81
Figura 44. Comportamiento de las semillas de arveja en la etapa de germinación.	82
Figura 45. Etapa de germinación con electrodos planos paralelos.	83
Figura 46. Etapa de germinación con electrodos FEF.	84
Figura 47. Comparación de datos de germinación de arvejas.	84
Figura 48. Tasa de imbibición de semillas de arveja con el regulador de crecimiento.	86
Figura 49. Etapa de imbibición con electrodo placas planas paralelas.	86
Figura 50. Etapa de imbibición con electrodo tipo FEF.	87
Figura 51. Comparación de datos de imbibición de arvejas.	88
Figura 52. Tasas de imbibición en solución salina, de arvejas (izquierda) y frijoles (derecha) en forma manual.	90
Figura 53. Etapa de imbibición en solución salina de arvejas (izquierda) y frijol (derecha) usando electrodo tipo placas planas paralelas.	91
Figura 54. Etapa de imbibición en solución salina de arvejas (izquierda) y frijol (derecha) usando electrodo tipo FEF.	91
Figura 55. Comparación de datos de imbibición de arvejas en sal.	92
Figura 56. Comparación de datos de imbibición de frijoles en sal.	92
Figura 57. <i>Hardware</i> del prototipo.	100
Figura 58. Colocación de las semillas en los electrodos de placas planas paralelas (arriba) y FEF (abajo).	101
Figura 59. Ventana principal de la interfaz de usuario.	102
Figura 60. Ventana donde se agrega el equipo de medición.	104
Figura 61. Ventana que muestra el puerto COM generado por el equipo.	104
Figura 62. Ventana del usuario biólogo de la interfaz de usuario.	106
Figura 63. Ejemplo de informe de resultados en archivo de Excel.	106
Figura 64. Ventana de usuario ingeniero de la interfaz de usuario.	107

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características sensor de campo eléctrico.	32
Tabla 2. Consumo de corriente de los elementos del modelo electrónico funcional.....	41
Tabla 3. Regresiones lineales del modelo electrónico funcional.....	61
Tabla 4. Pruebas de medición de variación de volumen en semillas.....	70
Tabla 5. Datos manuales de imbibición.	77
Tabla 6. Datos manuales de germinación.....	82
Tabla 7. Variación de volumen acelerado de semillas de arveja.	85

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Manual de usuario del equipo	99

RESUMEN

TITULO: DETECTOR DE LA VARIACIÓN DE VOLUMEN DE SEMILLAS MEDIANTE EL USO DE UN CAMPO ELÉCTRICO DE BAJA FRECUENCIA Y BAJA INTENSIDAD*

AUTOR: NIDIA QUINTERO PEÑA.**

PALABRAS CLAVES: Volumen de Semillas, Campo eléctrico, Prototipo.

En este trabajo se diseñó, implementó y probó un sistema de medición de variación de volumen de semillas usando un campo eléctrico de baja frecuencia (120 kHz) y baja intensidad (200 V/m), y se comparó con el método del principio de Arquímedes.

Al realizar la medición por medio de este tipo de campo eléctrico se garantiza: la no destrucción de la muestra vegetal en la cual se está midiendo su incremento de volumen, la no interferencia en su imbibición y germinación, y la toma de datos de forma automática.

El campo eléctrico es emitido por un electrodo (tipo franjas interlineadas o tipo placas planas paralelas), el sistema vegetal (semillas) se localiza dentro de este campo para que, al variar su volumen, la magnitud del campo eléctrico se vea afectada. Este cambio en el campo eléctrico sucede por el cambio que se presenta en las propiedades físico-químicas del vegetal a medida que germina. Las variaciones son detectadas por un sensor electrónico que envía las señales a un circuito de acondicionamiento, para luego ser almacenadas por un microcontrolador, del cual se pueden descargar los datos desde un computador de forma inalámbrica con tecnología Bluetooth.

Se desarrolló un prototipo electrónico y de cómputo piloto, con el cual se realizaron pruebas iniciales en semillas de arveja y frijol, que permitieron mejorar los diseños para luego implementar el prototipo final, el cual contiene un elemento *hardware* que sensa, acondiciona y almacena los datos, y un elemento *software* que permite configurar y descargar datos del *hardware*.

Se compararon las mediciones del prototipo con las tomadas por el método de Arquímedes, usando semillas de arveja; observándose que los datos registrados con los electrodos FEF (franjas interlineadas) se acercan más a las tendencias de la medición manual de variación de volumen.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ph.D. Carlos Rodrigo Correa Cely. Codirector: Ph.D. Rodolfo Villamizar Mejía.

ABSTRACT

TITLE: DETECTOR OF SEED VOLUME CHANGE USING AN ELECTRIC FIELD WITH LOW FREQUENCY AND LOW INTENSITY*

AUTHOR: NIDIA QUINTERO PEÑA**

KEYWORDS: Seed Volume, Electric Field, Prototype.

In this project, a measure system of seed volume change was designed, implemented and tested using an electric field with low frequency (120 kHz) and low intensity (200 V/m). It was compared with the method of Archimedes principle.

When the measure is made with this kind of electric field, it is possible ensured: measuring the volume increase without destroying the plant sample, noninterference in its imbibition and germination process, and data capture is automatic.

Electric field is emitted by an electrode (interlined fringing o parallel flat plates). The vegetal system (seeds) is localized within this field, so that the magnitude of the electric field is affected when a volume change appears. This change in the electric field occurs due to the change in the physico-chemical properties as vegetal germinates. Variations are detected by a sensor that sends electronic signals to a conditioning circuit and then they are stored by a microcontroller, from which, data can be downloaded from a computer wirelessly with Bluetooth technology.

A hardware and software prototype was developed and used for made initial tests with pea and bean seeds. These tests allowed improving designs and then implementing the final prototype, which has a hardware element responsible for sensing, conditioning and storage data, and a software element responsible for configuring and downloading data from hardware.

The prototype measures and the method of Archimedes measures were compared using pea seeds. Data recorded with FEF (Fringing Electric Field) electrodes are closer to trends of the manual measurement of volume change, when the data are observed.

* Degree Project

** Faculty of Physic-mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Ph.D. Carlos Rodrigo Correa Cely. Associate Director: Ph.D. Rodolfo Villamizar Mejía.

INTRODUCCIÓN

El proceso de crecimiento y desarrollo de una planta se inicia con una semilla, éste es el material biológico fundamental en la propagación sexual de una planta, por esta razón es de suma importancia conocer los aspectos que afectan su germinación.

La semilla germina cuando se tienen condiciones favorables de temperatura, humedad y aireación, obteniéndose una nueva plántula. Sin embargo, en algunos casos no se produce la germinación. Un caso es cuando las semillas no germinan en condiciones favorables debido a que se encuentran en un estado de dormición¹. Otro caso es cuando no se tienen las condiciones adecuadas para la germinación, por lo tanto la semilla se mantiene en un estado de latencia durante un tiempo variable pero luego pierde la capacidad de germinar y muere.

La medición y seguimiento de la imbibición y germinación de las semillas es necesaria en experimentos realizados con semillas de plantas, con el objetivo de evaluar si las condiciones ambientales, los nutrientes y el medio donde se está desarrollando el experimento es adecuado y/o permite un buen desarrollo de la misma. Sin embargo, no existen equipos automatizados que permitan realizar este tipo de evaluación y registro para este tipo de investigación Biológica.

Este trabajo de investigación aborda el problema de la medición automatizada de la imbibición y germinación de semillas, empleando la variación de volumen. Se propone utilizar un campo eléctrico de baja frecuencia (del orden de 120 kHz) y baja intensidad (del orden de 200 V/m) que permita detectar las variaciones de

¹ Dormición: Falta de germinación que presentan las semillas viables de algunas especies, ante condiciones favorables de humedad, temperatura, aireación, y en algunos casos iluminación.

volumen en tiempo real, en forma automática y realizar un análisis inmediato de los datos.

Para cumplir con el propósito de este trabajo se plantearon tres objetivos específicos:

- ✓ Seleccionar los componentes electrónicos del prototipo (sensor de campo eléctrico, microcontrolador, protocolo de comunicación, entre otros). Ver capítulo 3.
- ✓ Construir un prototipo para medir en tiempo real la variación de volumen de semillas, utilizando un campo eléctrico de baja frecuencia. Ver capítulo 3 y 4.
- ✓ Comparar los resultados frente a un método patrón primario (principio de Arquímedes). Ver capítulo 5.

El presente informe consta de seis capítulos, organizados de la siguiente forma: en el capítulo 1, se define el crecimiento vegetal y se muestran las fases de la germinación, además se explica la medición de variación de volumen utilizando el método de Arquímedes; en el capítulo 2, se muestra como se estiman las dimensiones de un objeto a partir de la variación del campo eléctrico; el diseño y la implementación del modelo electrónico funcional propuesto se presenta en el capítulo 3; en el capítulo 4, se plantean los resultados experimentales de la implementación del modelo electrónico funcional y en el capítulo 5, se compara la medición de la variación de volumen de semillas utilizando el modelo electrónico funcional y el principio de Arquímedes, finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

1 MEDICIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN EN SEMILLAS

El presente capítulo contiene la definición de crecimiento vegetal, las tres fases de la germinación y explica la medición de variación de volumen utilizando el método del principio de Arquímedes.

1.1 DEFINICIÓN DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO VEGETAL

El desarrollo del fruto de una planta inicia con la embriogénesis², éste es un proceso continuo en el que se establece la forma básica de una planta y se forman los meristemas que generan los órganos de la planta adulta [29].

Los meristemas pueden ser considerados como fabricas de células en las que el proceso continuo de división celular, expansión y diferenciación generan la forma de la planta, al igual que determinan su tamaño y estructura. El crecimiento total de una planta puede ser definido como la suma de patrones locales de expansión celular, que finalmente permiten una ganancia y acumulación de masa seca.

El número de células es un parámetro conveniente para medir el crecimiento de organismos unicelulares, pero no de multicelulares, debido a que el incremento en células puede no incrementar el volumen. Sin embargo, si la división celular está asociada a una expansión que produzca desplazamiento de pequeñas distancias desde el ápice, se verá un crecimiento por desplazamiento y se puede aplicar el principio de cinemática (medición de movimiento). El crecimiento meristemático es similar al movimiento de los fluidos y por tanto se puede usar un método similar de medición [29].

² Embriogénesis: Conjunto de procesos fisiológicos que conducen a la transformación de una sola célula, el cigoto, en un individuo multicelular más complejo, el embrión, contenido en la semilla madura.

El crecimiento vegetal no es uniforme y está relacionado con el cambio de volumen y/o peso en la semilla, raíz, tallo y hojas de la planta. Entre las principales medidas que se utilizan para cuantificarlo se encuentran la elongación, el peso fresco y el peso seco.

El crecimiento se define como un aumento de tamaño, éste se ve reflejado en variación de volumen, peso, número de células, cantidad de protoplasma y complejidad. Las dos medidas más utilizadas para evaluar el crecimiento son las que cuantifican la variación de volumen y la variación de masa, [23].

El aumento de volumen se calcula en forma aproximada midiendo la expansión en sólo una o dos direcciones, tal como la longitud (altura del tallo), el diámetro (del tronco), o el área (de una hoja). Las medidas de volumen como el desplazamiento de agua pueden ser no destructivas, de manera que se pueden efectuar varias medidas iguales en la misma planta, [23].

El aumento de masa se estima cosechando la planta completa o la parte de interés y pesándola inmediatamente, antes de que se evapore demasiada agua de ella, este valor corresponde a la masa fresca, que es una cantidad variable debido a que depende del estado hídrico de la planta. Para evitar estos inconvenientes se utiliza como medida de crecimiento el aumento de masa seca de la planta o de parte de ella. La masa seca se obtiene secando el material recién cortado durante un periodo de tiempo comprendido entre 48 y 96 horas, a temperaturas entre 70°C y 80°C. Las medidas de crecimiento por medio de la masa fresca y masa seca son destructivas, por lo tanto se debe utilizar una nueva planta en cada experimento [23].

1.2 FASES DE LA GERMINACIÓN

En el proceso de germinación se pueden distinguir tres fases [8], como se muestra en la Figura 1:

Fase I, de hidratación: la absorción de agua es el primer paso de la germinación. Durante esta fase se produce una intensa absorción de agua por parte de los distintos tejidos que forman la semilla, esto va acompañado de un aumento proporcional en la actividad respiratoria.

Fase II, de germinación: representa el verdadero proceso de germinación, en ella se producen las transformaciones metabólicas, necesarias para el correcto desarrollo de la plántula. En esta fase se reduce la absorción de agua.

Fase III, de crecimiento: es la última fase de la germinación y se asocia con la emergencia de la radícula. En esta fase la absorción de agua vuelve a aumentar así como la actividad respiratoria.

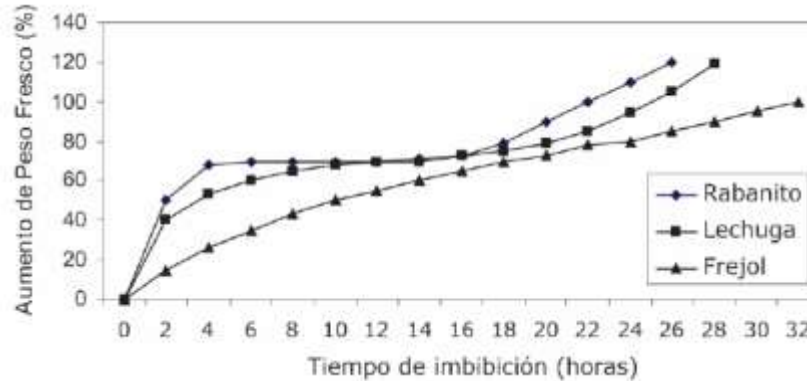
Figura 1. Fases de imbibición de agua por la semilla medida mediante el incremento del peso fresco.



Fuente: Tomado de [8]

En la Figura 2 se muestra la variación del peso fresco con respecto al tiempo de imbibición en semillas de tres especies: rábano, lechuga y fríjol, a una temperatura de 25°C. La fase I comprende las primeras 6 horas, la fase II entre las 6 y 17 horas y la fase III entre las 17 y 22 horas aproximadamente, [10].

Figura 2. Entrada de agua de tres especies.



Fuente: Tomado de [10]

Antes de ocurrir la germinación las semillas pasan por un periodo de latencia, detención del crecimiento, cuando inicia la germinación se rompe la cubierta de la semilla y surge el esporófito joven. En los primeros estadios del desarrollo, el crecimiento del joven esporófito depende de las reservas acumuladas en la semilla. Antes de la germinación, la semilla absorbe agua y se hincha, rompiendo la cubierta seminal, primero emerge la raíz joven, seguida del hipocótilo ("debajo de los cotiledones"), los cotiledones finalmente se marchitarán y caerán, luego emerge el epicótilo que se encuentra entre cotiledón y el haz de hojas [9].

1.3 MEDICIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN DE SEMILLAS UTILIZANDO EL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

Para determinar la variación de volumen de semillas utilizando este método, se selecciona una cantidad determinada de éstas (por ejemplo 20 semillas). Se coloca agua hasta la mitad de una probeta de 100 ml y se introducen las semillas

secas, el desplazamiento del agua observado en la probeta indica el volumen inicial de las semillas.

Se colocan las semillas en una placa de Petri³ con papel húmedo a una temperatura ambiente de 22°C a 25°C, se vuelve a medir el cambio de volumen de las semillas a las 8, 16 y 24 horas. Con esto se determina el cambio de volumen de las semillas como consecuencia del inicio de la germinación, [1].

El prototipo diseñado y evaluado en este trabajo tiene una potencial aplicación en la medición de crecimiento de plántulas, por esta razón se investigaron algunas técnicas utilizadas para medir este crecimiento como: el método de fluorescencia inducida por láser, el método interferométrico, el análisis de imágenes, la técnica espectroscópica, la técnica de inductancia eléctrica y la técnica de capacitancia eléctrica [22].

³ Placa de Petri: recipiente redondo de cristal o plástico, con una cubierta de la misma forma que la placa que se coloca encima para cerrar el recipiente, tiene uso en microbiología.

2 ESTIMACIÓN DE DIMENSIONES DE UN OBJETO A PARTIR DE LA VARIACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO

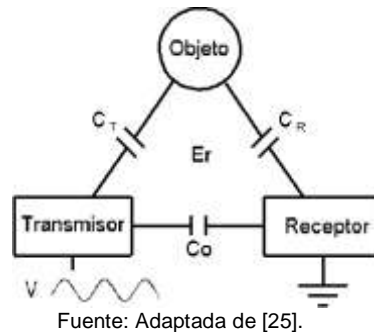
En este capítulo se explica cómo se puede correlacionar la variación del campo eléctrico ante los cambios de dimensiones (posición, tamaño y forma) de un objeto, cómo varía la constante dieléctrica de las semillas en función de la frecuencia y el tiempo, y el efecto que tiene el campo eléctrico sobre los sistemas vegetales.

La primera aplicación del sensado de campo eléctrico se dio a conocer en 1919 por Galejev y Termen [12] denominado el *Theremin*, que consiste en un dispositivo musical que utiliza el principio de campo eléctrico para variar el sonido dependiendo de la cercanía de una persona. Las investigaciones en este tema han permitido aplicar estos sensores de campo eléctrico como método de detección y medición de variables tales como presencia, proximidad, nivel de líquido, contenido de humedad, viscosidad y dureza, entre otros.

2.1 MEDICIÓN DE DIMENSIONES DE UN OBJETO MEDIANTE CAMPO ELÉCTRICO

El modelo utilizado para medir las dimensiones de un objeto (posición, tamaño y forma) se muestra en la Figura 3. Está compuesto por dos placas conductoras separadas una distancia conocida, entre las que se encuentra un dieléctrico de permitividad definida (ϵ_r). Una de las placas se conecta a tierra (receptor) y la otra a una tensión (transmisor), que puede ser fijo o variable en el tiempo, de esta forma se crea un campo eléctrico entre las placas, cuya capacitancia asociada es C_0 [25].

Figura 3. Modelo de medición de dimensiones de un objeto, utilizando campo eléctrico.



Fuente: Adaptada de [25].

Cuando un objeto se acerca a las placas, perturba el campo eléctrico del sistema original y se producen cambios en la capacitancia total. De esta forma se tiene un nuevo sistema con dos capacitancias adicionales entre cada una de las placas y el objeto, C_T y C_R . Debido a que el campo eléctrico se ha modificado, se percibe una variación en la capacitancia total del sistema y por lo tanto en el potencial entre las placas [25]. El dispositivo formado por las placas se conoce con el nombre de electrodo, la variación de tensión obtenida en el electrodo es enviada a un dispositivo electrónico, que identifica, analiza y relaciona la medida de tensión con la variable física (posición, tamaño o forma) que se desea medir del objeto.

El objeto de estudio en este trabajo son semillas en etapa de germinación. Cuando se inicia la germinación se presenta variación de sus dimensiones (tamaño y forma) y por lo tanto variación del campo eléctrico en el que se encuentran las semillas.

2.2 CONSTANTE DIELECTRICA EN SEMILLAS

El proceso de germinación es afectado por factores ambientales tales como la temperatura, humedad, iluminación, campo eléctrico, campo magnético, agua y componentes químicos [30]. Para esta investigación fue necesario conocer la forma en que varía la constante dieléctrica de semillas en germinación afectadas

por un campo eléctrico de bajas frecuencias, debido a que este es el principio de medición utilizado en el modelo electrónico funcional desarrollado.

Kurinobu y Okazaki en 1995 experimentaron con varias semillas para determinar la variación de la constante dieléctrica y la conductividad a partir de un cálculo numérico del campo eléctrico en función de la frecuencia, para un rango de 1 kHz a 10 MHz una vez por día, durante catorce días, encontrando que la constante dieléctrica relativa incrementa a bajas frecuencias. Obtuvieron que desde el día cero hasta el día diez la constante dieléctrica se mantiene constante y empieza a incrementar desde el día diez hasta el día catorce. Comprobaron por microscopía que a partir del día nueve las células de la semilla incrementaban su tamaño, mostrando que hay una relación entre la variación del tamaño de la semilla y la constante dieléctrica. Además, observaron que el tamaño de la semilla incrementaba gradualmente desde el día diez hasta el día dieciséis, cuando se presentó la germinación de la semilla [15].

En 2011, Soltani y Alimardani analizaron los cambios en la constante dieléctrica de las semillas de arveja y frijol cabeza negra en función del contenido de humedad, demostrando que hay una alta dependencia de estas dos variables para frecuencias en el rango de 1 kHz y 1 MHz. Los mejores resultados los obtuvieron a 1 MHz, realizando el experimento a una temperatura promedio de 25°C [26].

Según este estudio [26], a una frecuencia de 100 kHz la constante dieléctrica de la arveja tiene un valor entre 3 y 6 para un contenido de humedad entre 4 %db y 19 %db respectivamente.

En el mismo año Soltani y Alimardani, construyeron un equipo para medir la humedad de semillas como arveja, frijol cabeza negra, maíz, trigo y mijo a partir de la constante dieléctrica a diferentes frecuencias (1 KHz a 1 MHz). Demostrando

que a 1 MHz se obtiene la menor desviación estándar y el mejor ajuste de una curva cuadrática de la relación entre la humedad y la constante dieléctrica [27].

Luego de realizar esta revisión se concluye que la constante dieléctrica de las semillas en germinación tiene una estrecha relación con el contenido de humedad y el crecimiento celular de las semillas, para bajas frecuencias. Por tanto se puede utilizar la variación de la constante dieléctrica y su efecto en el campo eléctrico para determinar el crecimiento de semillas.

2.3 EFECTO DEL CAMPO ELÉCTRICO EN SISTEMAS VEGETALES

Al realizar una revisión bibliográfica [17], [14], [13], [21], [19], en las bases de datos de la Universidad Industrial de Santander, sobre el efecto que producen los campos eléctricos en sistemas vegetales, se puede concluir que sólo los campos eléctricos de alta intensidad afectan de manera directa el crecimiento.

Como en “*Weak Electric Fields Affect Plant Development*” [17], donde se aplicó un campo eléctrico de 5 kV/m a una frecuencia de 60 Hz observándose que hubo una reducción de 5% en la tasa de germinación de una semilla de girasol, en cambio no se detectaron efectos en la semilla para un campo eléctrico de 1 kV/m.

Para un campo electrostático de 1,5 kV/m aplicado longitudinalmente a lo largo de 96 plántulas de maíz, Karcz y Burdach encontraron que se inhibe la elongación de las plantas dependiendo de la polaridad y la duración de la tensión aplicada [14].

En el estudio realizado por Jovanić, Belča y Kasalica “*Effect of a high DC electric field on plant leaves reflectivity*” [13], encontraron un efecto desfavorable sobre la reflectividad de las hojas de maíz a 550 nm y 682 nm afectadas por un campo electrostático de 14,4 kV/m observadas durante 42 días. En el mismo año

Pozeliene [21] estimuló la germinación de semillas de linaza aplicando un campo electrostático de 3 a 350 kV/m y obtuvo una minimización de las enfermedades en las mismas. Luego Okumura y otros [19] aplicaron un campo electrostático de 2,5 kV/m en semillas de rábano blanco obteniendo una aceleración en la tasa de crecimiento.

Por lo tanto, dado que el modelo electrónico funcional propuesto en este trabajo utiliza campos eléctricos de baja intensidad (del orden de 200 V/m) y baja frecuencia (120 kHz), no se esperan consecuencias, positivas o negativas, en la germinación de las semillas.

3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ELECTRÓNICO FUNCIONAL

Este capítulo contiene los requerimientos y la descripción del modelo electrónico funcional, diseñado para la detección de la variación de volumen en semillas mediante el uso de un campo eléctrico de baja frecuencia (del orden de 120 kHz) y baja intensidad (del orden de 200 V/m), así como el diseño del *hardware* y el *software* utilizado para capturar las señales con datos de variación de volumen.

3.1 REQUERIMIENTOS

En esta investigación se diseñó e implementó un modelo electrónico funcional que permite medir la variación de volumen en semillas, utilizando campos eléctricos de baja frecuencia y baja intensidad.

3.1.1 Requerimientos técnicos.

- La intensidad y frecuencia del campo eléctrico necesaria para realizar la medida de variación de volumen en semillas, debe ser baja, del orden de los 200 V/m y 120 kHz respectivamente, debido a que se quiere que el campo eléctrico no afecte la germinación.
- Se busca que la potencia consumida por el modelo electrónico funcional sea del orden de 1 W, seleccionando dispositivos de baja potencia.
- Usar comunicación inalámbrica para comunicar el equipo con el computador, buscando que no se requiera conectar cables al equipo y que varios equipos de medición se puedan conectar a un mismo computador.
- Medición de varios sistemas de semillas en germinación, para que el usuario pueda realizar más de una medida en un mismo experimento.

3.1.2 Requerimientos funcionales.

- No destruye la muestra del sistema vegetal en estudio.
- Tome la medida de variación de volumen sin afectar el medio en el que se desarrolla el sistema vegetal.
- Realice el registro de los datos en forma automática, tal que el usuario no requiere manipular los datos cuando se realiza el experimento.
- Utilice una interfaz gráfica de usuario sencilla, tanto para biólogos como para ingenieros y un módulo *hardware* que no requiere equipos especializados externos, ni configuración adicional.

3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL

El prototipo construido tiene las siguientes características:

- Genera y detecta el campo eléctrico de baja frecuencia y baja intensidad.
- Permite configurar, por medio de la interfaz diseñada, el tiempo de muestreo de los datos.
- Permite seleccionar hasta nueve electrodos para realizar la lectura de varias muestras de sistemas vegetales al mismo tiempo.
- Guarda los datos en una memoria no volátil interna y cuando el usuario lo desee puede descargarlos, utilizando la interfaz de usuario, a un computador personal o a un dispositivo inalámbrico, con el *software* apropiado, por medio del protocolo *bluetooth*, en donde los datos pueden ser visualizados, almacenados y analizados en formato de Excel (.xls).

3.3 COMPONENTES

El equipo consta de tres partes, el *hardware* que realiza la adquisición de los datos, el *software* y la interfaz de usuario que permiten la configuración, puesta en

marcha y descarga de datos del *hardware*. A continuación se describe con más detalle cada una de ellas.

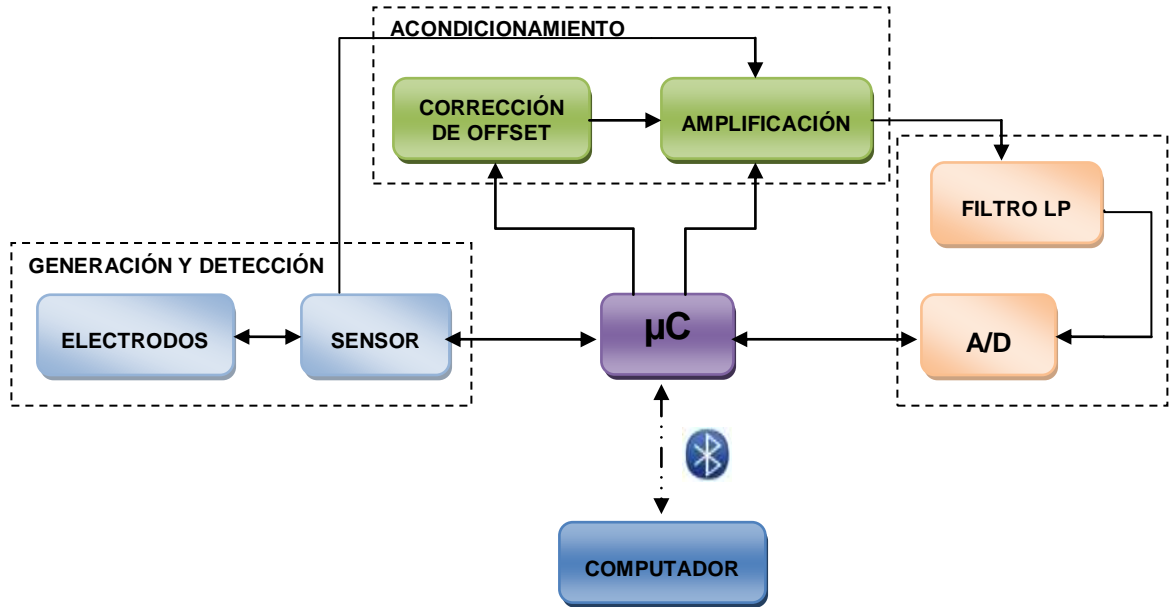
3.4 COMPONENTE *HARDWARE*

El *hardware* del prototipo se diseñó en forma de bloques, como se muestra en la Figura 4. El primer bloque consiste en la generación del campo eléctrico y la detección de las variaciones del mismo debido a los cambios presentados en el sistema vegetal, mostrando esta información en variaciones de tensión. El segundo bloque consiste en el acondicionamiento de la señal de tensión generada por el primer bloque. El tercer bloque filtra y convierte la señal de tensión en señal digital para ser procesada por el microcontrolador, que es el cuarto bloque. Éste controla todos los dispositivos del *hardware* y transmite los datos por medio del protocolo *bluetooth* a un computador personal. A continuación se explica el funcionamiento de cada uno de los bloques.

3.4.1 Bloque de generación y detección.

Este bloque consiste de un (1) sensor de campo eléctrico que puede contener hasta nueve (9) electrodos. El sensor cumple dos funciones: i) genera la tensión necesaria para ser aplicada a los electrodos, quienes se encargan de irradiar el campo eléctrico al sistema vegetal y ii) detecta las variaciones del campo eléctrico ante cambios presentados en el sistema vegetal, a partir de variaciones de tensión.

Figura 4. Diagrama de bloques del prototipo.

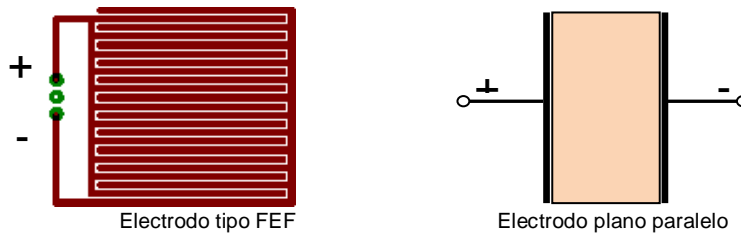


Fuente: Autora.

- **Electrodos.**

El electrodo irradia el campo eléctrico sobre el sistema vegetal en estudio (semillas) que se encuentra dentro de una placa de Petri o un frasco de vidrio. Teniendo en cuenta las variables del sistema vegetal (variación de volumen y variación de la constante dieléctrica) y el compartimento utilizado para aplicar el campo, se analizaron dos tipos de electrodos: electrodos FEF (*Fringing Electric-Field*) y electrodos planos paralelos (ver Figura 5).

Figura 5. Tipos de electrodos.

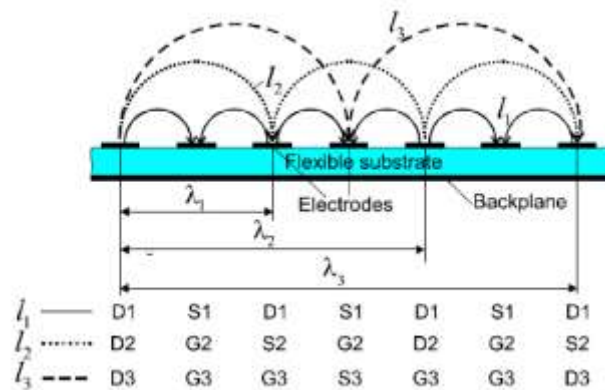


Fuente: Autora

Electrodo tipo FEF. En este electrodo, el campo eléctrico creado depende de la separación y el tamaño de las franjas. Para generar el campo eléctrico, se crea una diferencia de potencial conectando una de las franjas del electrodo al sensor y la otra a tierra. En la Figura 6 se muestra la variación de la profundidad de penetración (l) del campo eléctrico según la separación de las franjas (λ) [16].

Para el caso de medición de la variación de volumen de las semillas, el Petri o frasco de vidrio que contiene el sistema vegetal, se ubica sobre el electrodo, de forma que el campo eléctrico generado se afecta tanto por el recipiente (volumen y propiedades dieléctricas constantes), como por el sistema vegetal (volumen y propiedades dieléctricas que varían de acuerdo con su etapa de germinación). La capacitancia de los electrodos disminuye cuando aumenta el valor del dieléctrico que conforma el capacitor [28]. Por tanto mediante este principio de medición, se pueden registrar cambios de volumen en la semilla y/o cambios en sus propiedades dieléctricas.

Figura 6. Sección de un electrodo FEF con diferentes valores de profundidad de penetración.



D: electrodo conductor; S: electrodo detector; G: tierra.

λ : separación de las franjas; l : profundidad de penetración

Fuente: Tomado de [16]

Electrodo plano paralelo. En este electrodo el campo eléctrico depende de la distancia entre las placas y su área. Una de las placas del condensador se conecta al sensor y la otra a tierra, para generar la diferencia de tensión y crear el campo eléctrico dentro del electrodo. Para la medición de la variación de volumen en semillas, la placa de Petri o frasco de vidrio que contiene la muestra se coloca en medio de un par de electrodos, formando un condensador en el recipiente hace parte del dieléctrico. Cuando se presenta una variación (dieléctrica o de volumen) en el sistema vegetal, se afectará el campo eléctrico manifestado en una variación en la tensión del sensor.

- **Sensor.**

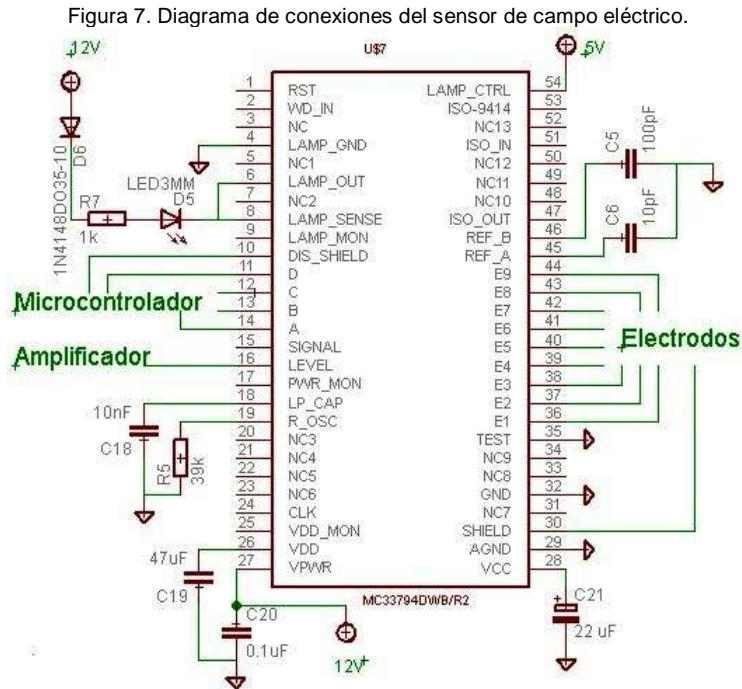
El sensor requerido para la medición de variación de volumen en semillas debe trabajar con un campo eléctrico de baja frecuencia y baja intensidad, ser no invasivo, ser de fácil acoplamiento con otros elementos electrónicos y de bajo costo. En el grupo de investigación CEMOS de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, se realizaron trabajos de investigación con el sensor de campo eléctrico MC33794 [7] y [20]. En la Tabla 1 se muestran sus características.

Tabla 1. Características sensor de campo eléctrico.

Característica	Valores
Frecuencia de campo eléctrico	Ajustable a través de un resistor externo. La frecuencia óptima es 120 kHz
Rango de trabajo	10 pF a 100 pF ó 4V a 1V respectivamente
Número de electrodos permitidos	9 electrodos, pero se puede leer el dato de sólo uno a la vez
Electrodos de referencia (internos)	2 electrodos
Protector de conductor (Shield)	Minimiza los efectos causados por el uso de electrodos remotos a través de cables coaxiales
Comunicación con otros dispositivos	Trabaja y soporta la comunicación con un microcontrolador

Fuente: Hoja de datos del sensor [11]

Teniendo en cuenta que este sensor cumple con los requerimientos establecidos inicialmente, se decidió utilizarlo e implementar otra aplicación de los campos eléctricos de baja frecuencia con el prototipo producto de este trabajo de investigación. En la Figura 7 se muestra el diagrama de conexiones del sensor de campo eléctrico.

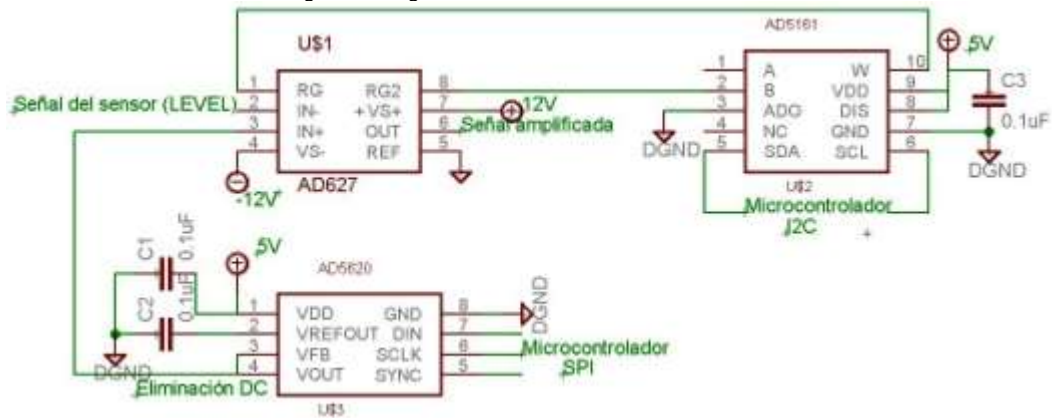


Fuente: autora.

3.4.2 Bloque de acondicionamiento de señal.

En este bloque se elimina la señal de tensión continua que genera el sensor MC33794 cuando detecta variaciones de tensión con respecto a una tensión continuo (nivel DC), si un objeto se encuentra cerca de uno de los electrodos. Adicionalmente, este bloque amplifica hasta 100 veces las variaciones de tensión sensadas (sin señal de DC), para ampliar el rango de tensión de la señal que representa las variaciones de crecimiento del sistema vegetal. En la Figura 8 se muestra el diagrama del circuito acondicionador de señal.

Figura 8. Diagrama de acondicionamiento de señal.



Fuente: autora.

- **Eliminación del nivel de DC.**

La señal de tensión generada por el sensor se encuentra inversamente relacionada con la capacitancia formada por los electrodos. Por lo tanto, cualquier variación en el tamaño y la forma de los electrodos se verá reflejada en un nivel de tensión continua diferente. Para disminuir este efecto sobre la señal de tensión de interés (variaciones de tensión sobre el nivel de tensión continua) y mejorar el rango de sensibilidad del equipo, se elimina dicho nivel utilizando el amplificador de instrumentación AD627A.

El AD627A es un amplificador de baja potencia, que alimentado en forma dual permite una ganancia de 5 hasta 1000, modificada mediante un resistor externo, tiene una relación de rechazo en modo común mayor de 90 dB hasta 200 Hz y es de bajo costo [5].

Para convertir el valor de tensión que será restado de la señal sensada, se utilizó un conversor digital-analógico, debido a que se buscaba que el usuario por medio del *software* tuviera control sobre este valor. El conversor seleccionado fue el AD5620, debido a que es un nano conversor de 12 bits, de baja potencia que se

alimenta en forma simple, opera a frecuencias de reloj de hasta 30 MHz y utiliza interfaz serial SPI [4].

- **Amplificación.**

El resultado de la resta se amplifica, hasta 100 veces dependiendo de las restricciones del *hardware*, para tener mayor sensibilidad de la señal de interés del sensor. La amplificación la realiza el amplificador de instrumentación AD627A, utilizando una resistencia digital variable, debido a que se buscaba que el usuario por medio del *software* tuviera control sobre el valor de ganancia.

El potenciómetro digital seleccionado fue el AD5161, debido a que es de baja potencia, se alimenta en forma simple, utiliza interfaz serial SPI e I2C para controlarlo y permite volverlo a su posición media a través de comandos [3]. En el prototipo construido se utiliza I2C, debido a que se requieren sólo dos líneas de comunicación con el microcontrolador.

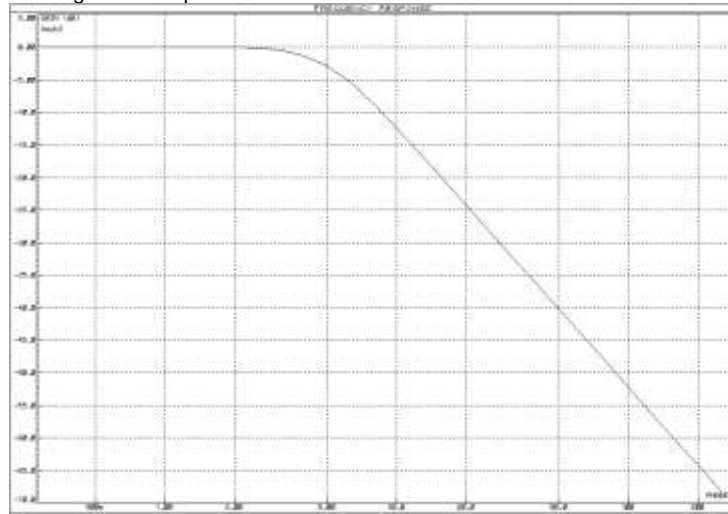
3.4.3 Bloque de filtrado y conversión.

Luego de acondicionar la señal de interés, se introduce a este bloque para disminuir las interferencias que puedan afectarla y se convierte la señal de analógica a digital para realizar su procesamiento y análisis.

- **Filtro.**

Para disminuir las interferencias en la señal acondicionada, se implementó un filtro activo pasa-bajas en el *hardware*. Tipo *Butterworth* de orden 2 con frecuencia de corte 5 Hz, debido a que su respuesta en frecuencia es plana, como se observa en la Figura 9 y se puede implementar con sólo un amplificador operacional.

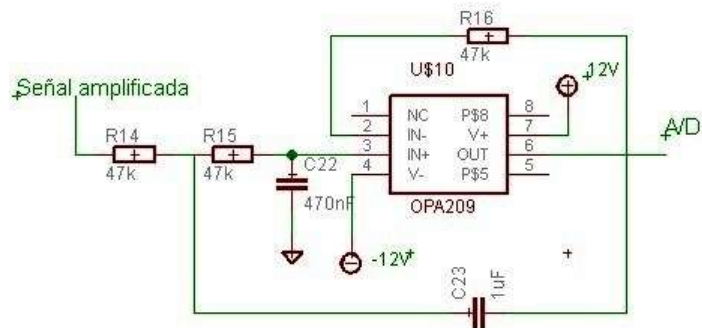
Figura 9. Respuesta en frecuencia del filtro Butteworth de orden 2.



Fuente: Autora.

En la Figura 10 se muestra el diagrama de conexión del filtro, el amplificador operacional utilizado es el OPA209, debido a que es un amplificador de precisión, se puede alimentar en forma simple o dual, para esta aplicación se alimenta en forma dual, consume poca potencia y es recomendado por el fabricante para este tipo de aplicaciones [32].

Figura 10. Diagrama de conexión del filtro analógico.



Fuente: Autora.

- **Conversión analógica digital (A/D).**

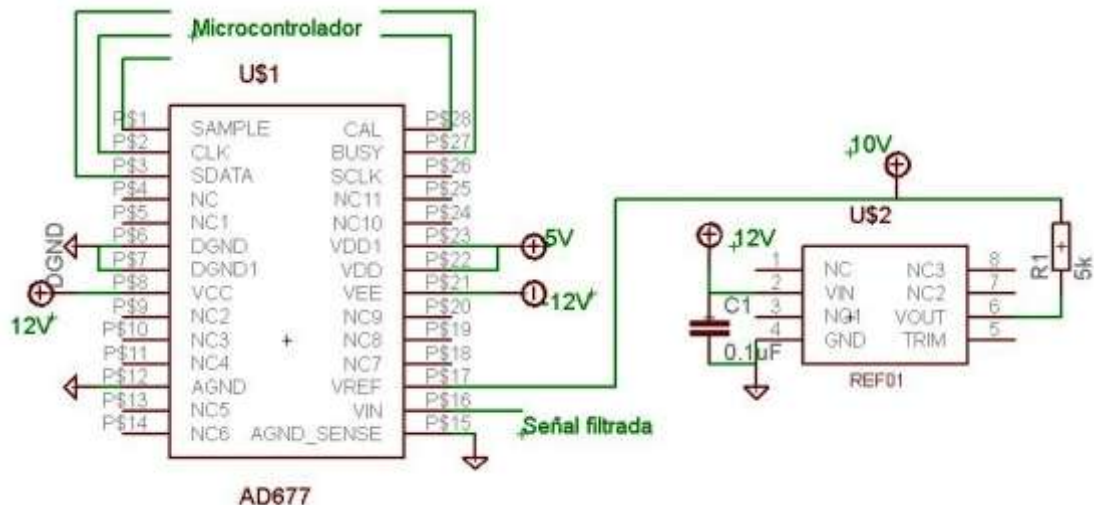
Luego de acondicionar y filtrar la señal de interés es necesario convertirla de analógica a digital, para transmitirla al computador y realizar su análisis,

almacenamiento y visualización. Según el fabricante del sensor MC33794 con un conversor analógico-digital de 8 bits se tiene resolución de 0,4 pF y con uno de 10 bits se tiene 0,1 pF de resolución, por lo tanto a mayor resolución se tiene mayor distancia de detección de objetos pequeños [11].

Como se buscaba tener una alta resolución de los datos que representan los cambios en el sistema vegetal se decidió utilizar un conversor analógico-digital de 16 bits, dando como resultado una resolución de 0,001 pF.

El integrado seleccionado fue el AD677, debido a que la salida de los datos era tipo serial, por lo tanto se requerían menos líneas de comunicación con el microcontrolador, la salida es en formato complemento a dos, es decir que el bit más significativo representa el signo positivo o negativo de los datos. Permite referencia de 5 V a 10 V, consume 450 mW usando 10 V y 360 mW usando 5 V [2]. En esta aplicación se trabajó con una referencia de 10 V, como se muestra en la Figura 11, para que el rango de las señales analógicas fuese de ± 10 V, obteniendo una resolución de 0,3052 mV/bit.

Figura 11. Diagrama de conexiones del conversor A/D.



Fuente: Autora.

3.4.4 Bloque del microcontrolador (μ C).

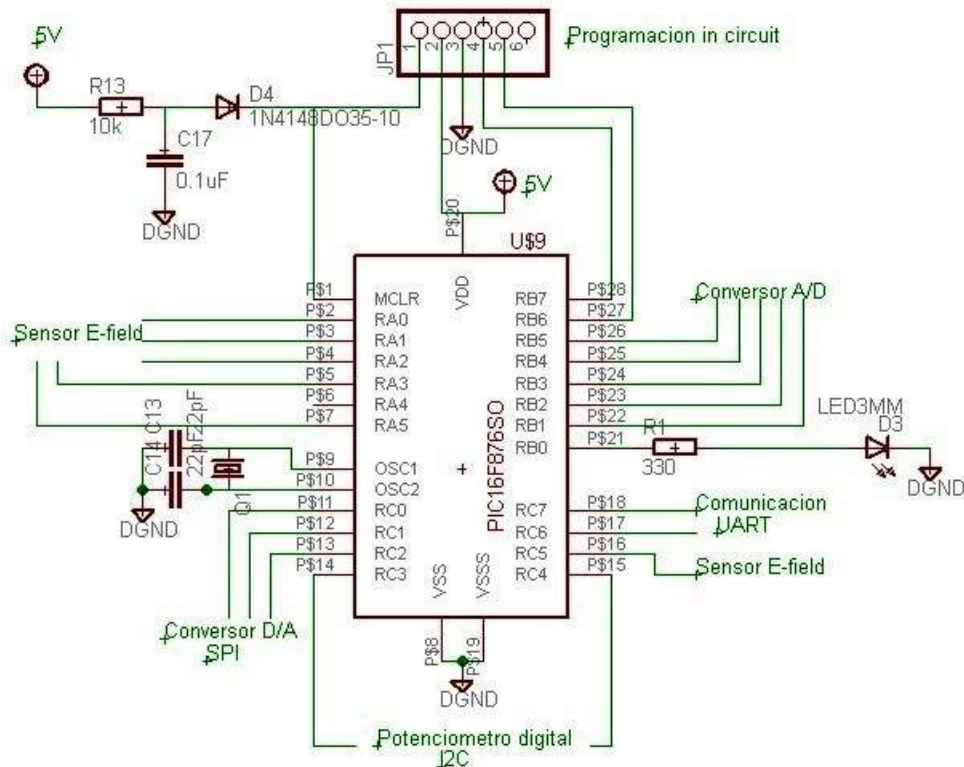
Los bloques que conforman el prototipo debían ser configurados y controlados por un dispositivo principal, como se muestra en la Figura 4, para ello se seleccionó un microcontrolador cuyas características se ajustaran a las necesidades del equipo. Las tareas que debía realizar este bloque eran:

- Selección de los electrodos.
- Activación del apantallamiento de los electrodos.
- Manejo del conversor digital-analógico para la eliminación del nivel DC.
- Manejo del potenciómetro digital para la amplificación.
- Control del conversor analógico-digital.
- Transmisión de datos y recepción de órdenes desde el computador.

Se seleccionó el microcontrolador PIC16F876A debido a que su arquitectura interna y cantidad de pines eran suficientes, como se muestra en la Figura 12.

Para cumplir con sus tareas, el microcontrolador selecciona los electrodos controlando el multiplexor interno del sensor MC33794, activa el apantallamiento de los electrodos por medio de una señal digital, controla el funcionamiento del conversor digital-analógico utilizando el protocolo SPI, por medio del protocolo I2C controla el potenciómetro digital, utilizando señales digitales maneja el funcionamiento del conversor analógico-digital y se comunica con el computador por medio del protocolo UART.

Figura 12. Diagrama del microcontrolador.



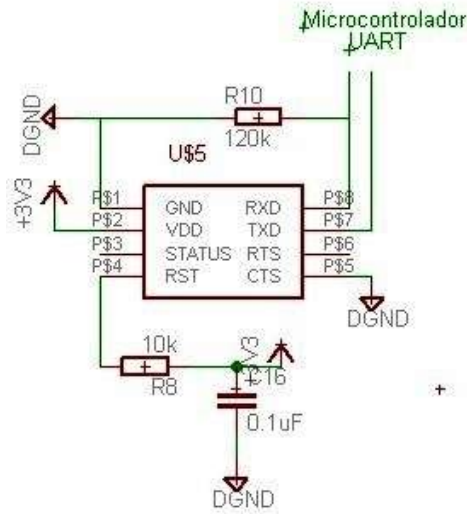
Fuente: Autora.

3.4.5 Bloque de comunicación con el computador.

La comunicación bidireccional entre el modelo electrónico funcional y el computador se realiza de forma inalámbrica utilizando la interfaz *Bluetooth* v1.2, debido a que permite la conexión entre dos dispositivos sin necesidad de utilizar cables, ni de manipular el sistema de medición. Además, permitiría que un solo computador se comunique con varios equipos de medición de crecimiento vegetal.

El dispositivo seleccionado para utilizar la interfaz *Bluetooth* fue el Parani ESD-200, que permite manejar el protocolo UART (usado también por el microcontrolador), manipular un dispositivo a una distancia máxima de 30 m, configuración por comandos AT (generados desde el microcontrolador) y consumo menor a 140 mW [24]. En la Figura 13 se muestra el diagrama de conexión.

Figura 13. Diagrama de conexión de comunicación Bluetooth.



Fuente: Autora.

3.4.6 Fuente de alimentación.

La fuente de alimentación para el *hardware* consta de valores de tensión de 12 V, -12 V, 10 V, 5 V y 3,3 V. La selección de los reguladores de tensión requeridos se realizó analizando el consumo de corriente de cada uno de los elementos que componen el modelo electrónico funcional, como se muestra en la Tabla 2.

Para las tensiones de 3,3 V y 5 V se seleccionó el LP2950-33 y el LP2950-50 respectivamente, debido a que permiten manejar corriente de salida de 100 mA, tienen empaquetado TO-92 de tres pines y están diseñados para minimizar errores en la tensión de salida [33].

La tensión de referencia de 10 V se generó con el REF01, este integrado se utiliza para tensiones de precisión, tiene bajo consumo de corriente y ruido en la tensión de salida de 30 μ Vpp en el rango de 0,1 Hz a 10 Hz [6].

Tabla 2. Consumo de corriente de los elementos del modelo electrónico funcional.

3,3 V		5 V		-12 V		12 V	
Elemento	Consumo de corriente	Elemento	Consumo de corriente	Elemento	Consumo de corriente	Elemento	Consumo de corriente
ESD-200 [24].	40 mA	AD5620 [4].	1 mA max.	OPA209 [88].	2,5 mA max	MC33794 [31].	7 mA
		AD5161 [4].	8 μ A max.	AD627A [6].	85 μ A	Led	9.6 mA
		PIC16F876A cristal de 20 MHz [18].	15 mA max	AD677 [3].	24 mA max	REF01 [7].	1,6 mA max.
		AD677 [2].	5 mA max			OPA209 [88].	2,5 mA max.
		LP2950-33	40 mA			AD627A [6].	85 μ A
						AD677 [3].	24 mA max
						LT1054 [87].	35 mA
						LP2950-50	61 mA.
Total :	40 mA		61 mA		26,6 mA		141 mA

Fuente: Autora.

Con el LT1054 se generó la tensión de -12 V, en la configuración de inversor de tensión, este integrado genera corriente de salida hasta 100 mA y tiene una pérdida de tensión de máximo 1,6 V a máxima corriente de salida [31].

El uA78M12 se utilizó para generar la tensión de 12 V, este integrado maneja corriente de salida hasta 500 mA, no requiere componentes externos y la tensión de ruido a la salida es de 75 μ V en el rango de 10 Hz a 100 kHz [34].

Para asegurar estos valores de tensión, se energizó el equipo con un adaptador de 12 Vdc y 500 mA. La corriente y la potencia consumida por el *hardware* son 100 mA y 1,2 W respectivamente.

Además se manejaron dos planos de tierras, la analógica y la digital, para evitar interferencia electromagnética. El plano de tierra analógica para las tensiones de

12 V, -12 V y 10 V y el digital para las tensiones de 5 V y 3,3 V, según los dispositivos conectados a cada tensión. La unión de los planos de tierras se realizó con una resistencia de 0Ω , para asegurar una diferencia de potencial de cero entre las tierras [35].

3.4.7 Ruido generado por los componentes.

Cualquier perturbación indeseada que altera la señal que se desea procesar se conoce como ruido. Se tienen dos tipos de ruido: el interno o inherente, que se genera en los dispositivos electrónicos como consecuencia de su naturaleza física. Y el externo o interferencias, generado en un punto del sistema como consecuencia del acoplamiento eléctrico o magnético con otro punto del propio sistema o con otros sistemas. A continuación se analiza el ruido generado por cada uno de los componentes del modelo electrónico funcional, según sus hojas de datos.

- **Regulador de 12 V.**

La fuente de 12 V alimenta todos los reguladores de la fuente de alimentación, por lo tanto cualquier variación en la tensión de salida de este regulador puede afectar el comportamiento de la fuente de alimentación y el funcionamiento del sensor de campo eléctrico. Según su hoja de datos, el regulador uA78M12 presenta ruido en la tensión de salida de $75 \mu\text{V}$, en la banda de 10 Hz a 10 kHz y regula hasta 120 mV la tensión de salida para corrientes de salida de hasta 200mA.

- **Regulador de 5 V.**

Las variaciones presentes en la tensión de salida de esta fuente afectan directamente el funcionamiento de los conversores digital-analógico y analógico-

digital. Según su hoja de datos, el regulador LP2950-50 presenta ruido en la tensión de salida de $430 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$ en la banda de 10 Hz a 10 kHz para C_L (capacitor conectado del pin de salida a tierra) de $1\mu\text{F}$ y muestra una variación en la tensión de salida de 1 mV para una tensión de entrada de 12 V. De esta manera se obtiene una variación máxima total en la salida de 1,61 mV aproximadamente.

- **Regulador de 10 V.**

Este valor de tensión es la referencia del convertor analógico-digital, por lo tanto las variaciones en esta fuente tienen un efecto directo en la conversión digital de la señal de interés. El regulador REF01 según su hoja de datos tiene una precisión de $\pm 100 \text{ mV}$, un ruido en la tensión de salida de $30 \mu\text{Vpp}$ en la banda de 0,1 Hz a 10 Hz y presenta una variación máxima de salida de 180 ppm/V en respuesta a las variaciones de la tensión de entrada. Por lo tanto, se tiene una variación máxima total en la salida de 200 mV aproximadamente, que no afecta el funcionamiento del convertor AD677, como se muestra en el análisis del convertor analógico-digital.

- **Convertor digital-analógico.**

El AD5620 es un convertor de 12 bits con una resolución de 0,61 mV y referencia de 2,5 V, un ruido en la tensión de salida de $45 \mu\text{Vpp}$ en la banda de 0,1 Hz a 10 Hz, un error de offset máximo de $\pm 10 \text{ mV}$, esto es la diferencia entre el valor de salida real y el ideal, no linealidad integral (INL) máxima de $\pm 6 \text{ LSB}$, es decir la máxima desviación de la recta que une los dos extremos de la curva de transferencia, no linealidad diferencial (DNL) máxima de $\pm 0,25 \text{ LSB}$, esto es la diferencia entre el cambio medido y el ideal entre dos código adyacentes. Por lo tanto, el número de bits efectivos de precisión absoluta se calcula con el error de offset máximo de 10 mV, dando como resultado 8,97 bits efectivos absolutos.

$$\frac{2 * 2,5}{2^{N_{eff}}} = 10mV \rightarrow N_{eff} = 8,97 \text{ bits}$$

Y el número de bits efectivos de precisión relativa se calcula con una INL máxima de 6 LSB que corresponden a 3,66 mV, teniendo 10,42 bits efectivos relativos.

$$\frac{2 * 2,5}{2^{N_{eff}}} = 3,66mV \rightarrow N_{eff} = 10,42 \text{ bits}$$

Además, se tiene que la referencia del conversor tiene una variación de 10 mV, dando como resultado una variación en la tensión de salida de 4,88 μ V.

$$\frac{2 * 10mV}{2^{12}} = 4,88\mu V$$

Esta variación en la tensión de salida no distorsiona la resolución de 0,61 mV del conversor digital-analógico.

- **Potenciómetro digital.**

El AD5161 tiene 256 posiciones, una resistencia total de 100 k Ω , una resolución de 99 Ω y se energiza a 5 V, según su hoja de datos este integrado maneja un error de posición de resistencia no lineal (R-INL) máxima de +0,4 LSB, esto es la desviación del dato ideal con el real del valor seleccionado en el potenciómetro y una no linealidad diferencial del resistor (R-DNL) máxima de +0,1 LSB, esto es la variación relativa entre dos posiciones sucesivas. Es decir, se tiene una variación máxima de 39,6 Ω en el valor seleccionado del potenciómetro.

- **Amplificador de instrumentación.**

El AD627A tienen un rango de ganancia de 5 V/V a 1000 V/V y está energizado de forma dual a ± 12 V. Para una ganancia 100 V/V se tiene un máximo error de ganancia de 0,35 %, una no linealidad máxima de 100 ppm y un ruido RTI (error referenciado a la entrada) de 0,56 μVpp en el rango de 0,1 Hz a 10 Hz. Una relación de rechazo en modo común de 90 dB y una tensión máxima de offset a la entrada de 200 μV .

- **Convertor analógico-digital.**

El AD677 es un convertor de 16 bits con una resolución de 0,153 mV y referencia de 10 V, tiene no linealidad integral (INL) máxima de ± 2 LSB, no linealidad diferencial (DNL) de cero, error por la variación de hasta el 10% de las fuentes de tensión de $\pm 0,5$ LSB, una relación de señal a ruido y distorsión (S/(N+D)) de 92 dB con la referencia utilizada. Por lo tanto, el número de bits efectivo (ENOB) es:

$$ENOB = \frac{[92dB - 1,76dB]}{6,02} = 14,99bits$$

Se tiene que una variación de 200 mV en la referencia del convertor, puede afectar la conversión de la señal de interés de la siguiente forma:

$$\frac{200mV}{2^{16} - 1} = 3,05\mu V$$

Se tiene que una variación de 3,05 μV no distorsiona la resolución de 0,153 mV del convertor analógico-digital.

3.4.8 Placa de circuito impreso (PCB).

Para diseñar el PCB que contiene el *hardware* se tienen en cuenta algunas recomendaciones dadas por los fabricantes de los circuitos integrados utilizados y por expertos en el diseño de tarjetas impresas [35].

- El uso de condensadores cerámicos de *bypass* entre la tensión de alimentación (12 V) y tierra, para filtrar el ruido de alta frecuencia de la alimentación.
- Separar los caminos de datos digitales de los datos analógicos.
- Aislar las etapas mediante planos de tierra, para evitar interferencia electromagnética.
- Aislar las tierras digitales de las analógicas por medio de inductancias del orden de los microhenrios con resistencia interna de miliohms o con una resistencia de miliohms, para filtrar las señales de alta frecuencia producida por la conmutación de la etapa digital.

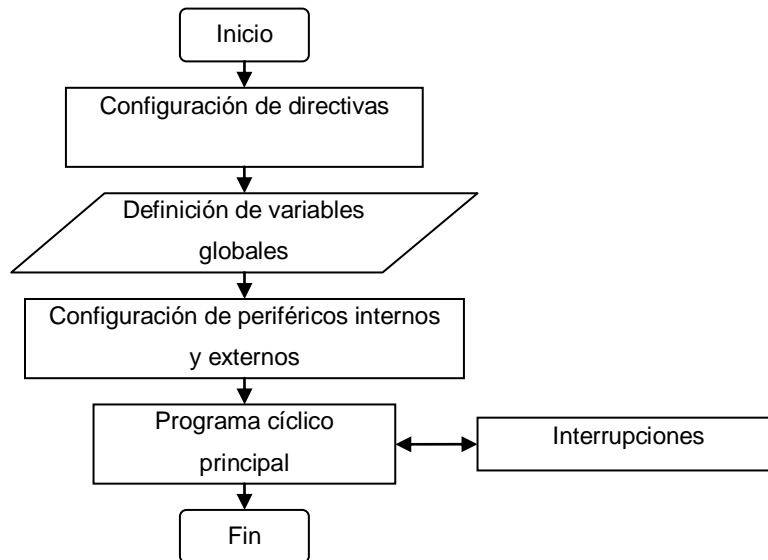
3.5 COMPONENTE SOFTWARE

El componente *software* consta de dos partes: el *software* embebido en el microcontrolador y el *software* desarrollado en el computador para visualizar y analizar los datos.

3.5.1 Software del microcontrolador.

En la Figura 14, se muestra el diagrama de flujo del programa que se ejecuta en el microcontrolador, cada vez que se enciende el equipo o se genera un reinicio del sistema.

Figura 14. Diagrama de flujo del programa en el PIC.



Fuente: Autora.

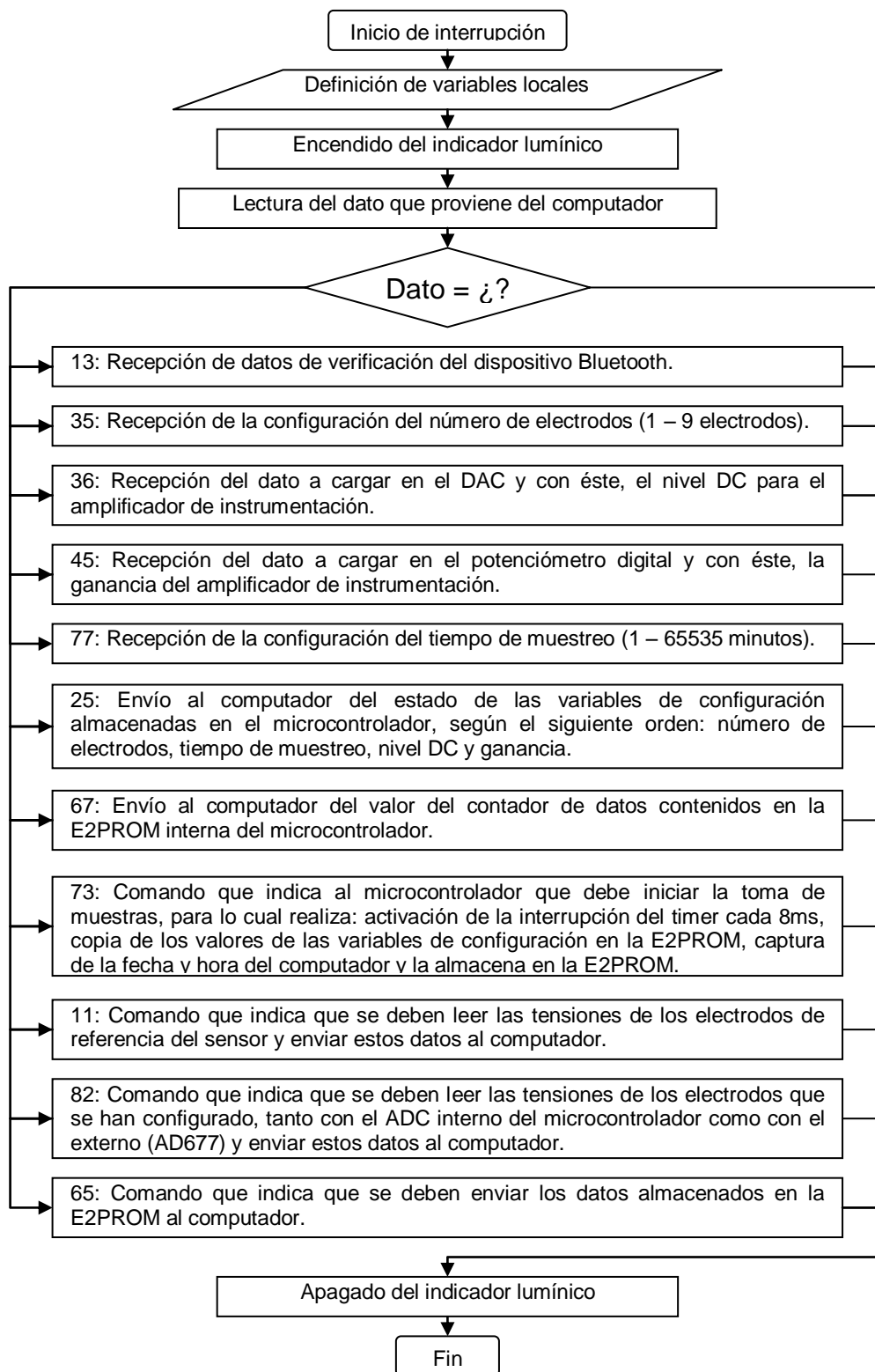
1. Configuración de directivas: se realiza la configuración de la palabra interna del microcontrolador, donde se define que tendrá conectado un oscilador de 20 MHz, no se usará el perro guardián, no se usará el sistema de programación a bajo tensión (porque se tendría que asignar un pin dedicado), entre otros. Además se definen los dispositivos de comunicación interna: UART con las características (baud=9600, parity=N, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7, bits=8) e I2C con las características (master, sda=PIN_C4, scl=PIN_C3, fast=10000).
2. Definición de variables globales: se define el formato de las variables que se usarán en los diferentes subprogramas y el valor inicial que se les asigna por defecto. Como por ejemplo *int8 ELEC=2*, es la variable que contiene el número de electrodos iniciales.
3. Configuración de periféricos: se definen las características que tendrán los diferentes periféricos del microcontrolador, tanto internos como externos. El orden en el cual se configuran y sus propiedades son:

- a. Configuración de puertos: se definen los pines que se usarán como entradas y salidas digitales.
- b. Configuración del ADC interno: se usa un solo canal del conversor analógico a digital interno del microcontrolador designado al pin RA0 y se utilizan los 10 bits disponibles para la conversión.
- c. Configuración del temporizador 2: a este temporizador se le ingresan los valores de ajuste de tal forma que interrumpe cada 8 ms. Se usa para controlar de forma adecuada el tiempo de muestreo.
- d. Calibración del ADC externo: se generan señales digitales para el proceso de calibración del conversor analógico a digital externo AD677, siguiendo las recomendaciones de la hoja de datos del circuito integrado.
- e. Activación del blindaje: se genera un uno lógico en el pin de activación de blindaje del sensor, esto permite que ingrese menos ruido por los cables que se conectan a los electrodos.
- f. Asignación de valor por defecto al DAC: usando el protocolo de comunicación SPI recomendado en la hoja de datos del DAC5620, se carga el valor por defecto del nivel de offset que será comparado con la señal del sensor.
- g. Asignación de valor por defecto al potenciómetro digital: usando el protocolo de comunicación I2C de acuerdo a la hoja de datos del AD5161, se carga el valor por defecto del valor de resistencia que se quiere asignar para definir la ganancia del amplificador de instrumentación.
- h. Habilitación de interrupción por UART: se habilita la comunicación por el puerto UART interno del microcontrolador, que está conectado con el dispositivo de comunicación Bluetooth y por medio de éste al computador.
- i. Configuración del Bluetooth: se realiza la configuración del dispositivo de comunicación Bluetooth PARANI ESD200, por medio de los comandos AT que recomienda el fabricante. Se establece como esclavo y se le asigna un código de autenticación.

4. Interrupciones: se usan dos tipos de interrupciones.
 - a. Desbordamiento del temporizador 2: se produce cuando el registro interno del temporizador dos del microcontrolador cambia de su valor máximo a cero. Este temporizador se configuró para que interrumpa cada 8ms, al colocar un contador interno se puede determinar cuándo ha transcurrido un segundo y también un minuto. Esta propiedad se usa para controlar el tiempo de muestreo de la lectura de datos de los electrodos.
 - b. Recepción de datos por UART: esta interrupción se produce cuando el microcontrolador recibe un dato enviado por el computador a través del protocolo *Bluetooth*. Dependiendo del dato recibido, se ejecutan líneas de comando específicas que cumplen una función. En la Figura 15, se muestra el diagrama de flujo de este tipo de interrupción.

5. Programa cíclico principal: es el programa que se ejecuta constantemente dentro del microcontrolador y que es interrumpido de acuerdo a la interrupción que se encuentre habilitada. Dentro de este ciclo se toman las muestras de los electrodos configurados y se guardan en la E2PROM interna, de acuerdo al tiempo de muestreo que se ha programado. En la Figura 16, se muestra el diagrama de la secuencia de comandos que se ejecutan en el programa principal.

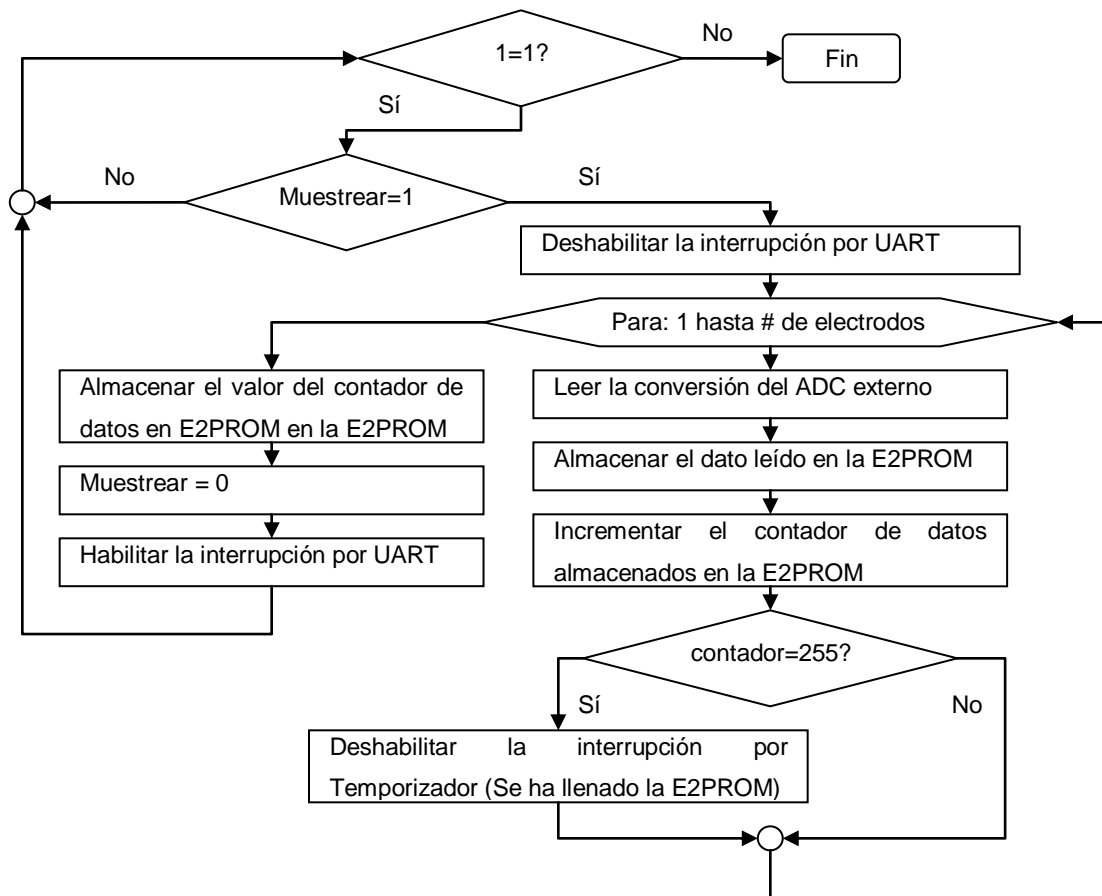
Figura 15. Diagrama de flujo de la interrupción por UART.



Fuente: Autora.

Es de aclarar, que a la variable muestrear se le asigna el valor de 1 cada vez que se cumple el tiempo de muestreo, dentro de la rutina de interrupción del temporizador.

Figura 16. Diagrama de flujo del programa cíclico principal.



Fuente: Autora.

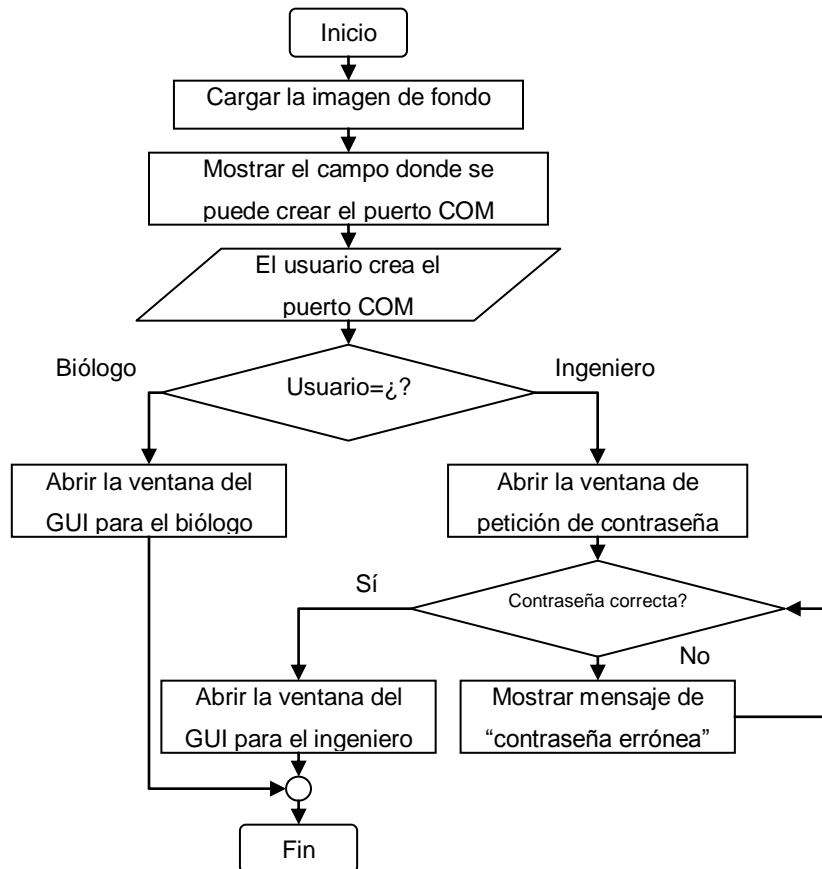
3.5.2 Software del computador.

A continuación se muestra el diagrama de flujo de cada una de las ventanas que componen la aplicación “Vegetal” creada en Matlab ®.

1. Ventana principal: en la Figura 17, se muestra el diagrama de flujo de la ventana que se despliega cuando se ejecuta la aplicación “Vegetal”, en ella se configura el puerto de comunicación con el dispositivo hardware y se

selecciona el tipo de usuario. Tiene una ayuda donde se puede abrir el manual de usuario y la información de los autores. Al cerrar esta ventana, se cierra el puerto de comunicación.

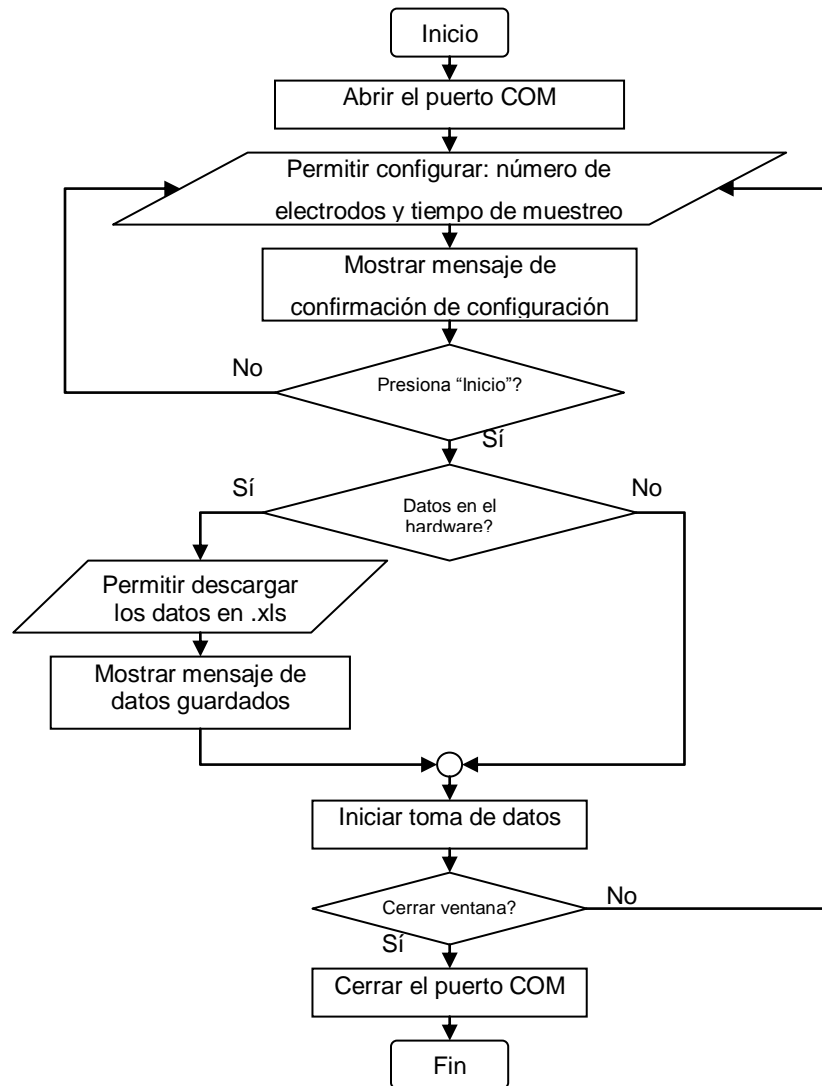
Figura 17. Diagrama de flujo de ventana principal.



Fuente: Autora.

2. Ventana para el biólogo: ventana que permite configurar el tiempo de muestreo y el número de electrodos del hardware, para la toma de datos. Si existen datos en la memoria E2PROM del microcontrolador, se pueden descargar en el computador con extensión .xls, con el nombre que el usuario deseé. Se tiene una ayuda donde se puede abrir el manual de usuario y la información de los autores. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 18.

Figura 18. Diagrama de flujo de ventana para el biólogo.

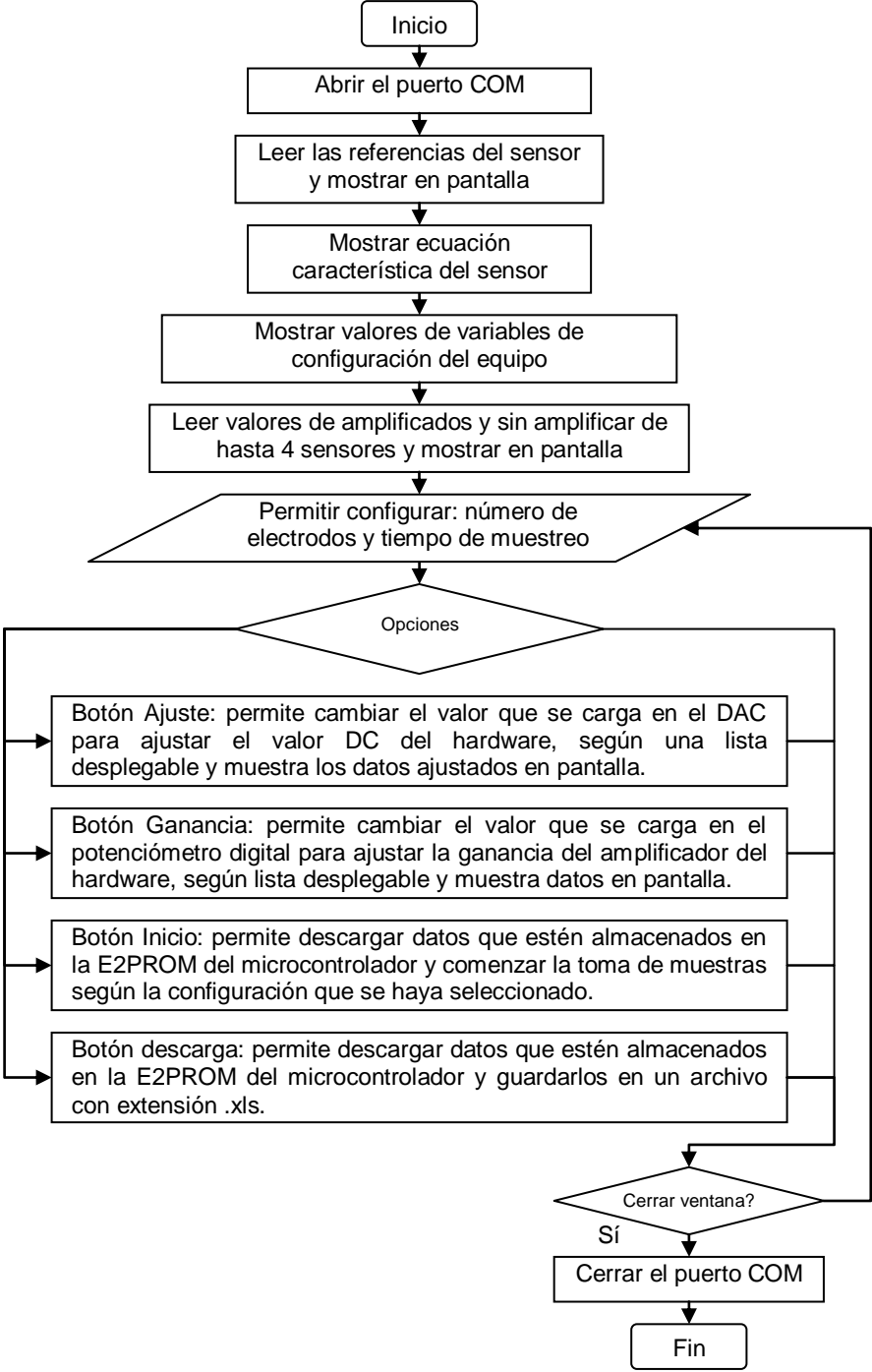


Fuente: Autora.

3. Ventana para el ingeniero: ventana que permite la configuración del hardware para la toma de datos, se puede configurar el tiempo de muestreo, el número de electrodos, el valor de ganancia y del nivel DC del hardware, si se sobrepasa el rango del equipo se muestra un mensaje de error y no se realizan los cambios. Cuando existen datos en la memoria E2PROM del microcontrolador, se pueden descargar en el computador con extensión .xls con el nombre que el usuario deseé. Además, tiene una ayuda donde se puede

abrir el manual de usuario y la información de los autores. En la Figura 19, se muestra el diagrama de flujo de esta ventana.

Figura 19. Diagrama de flujo de ventana para el ingeniero.



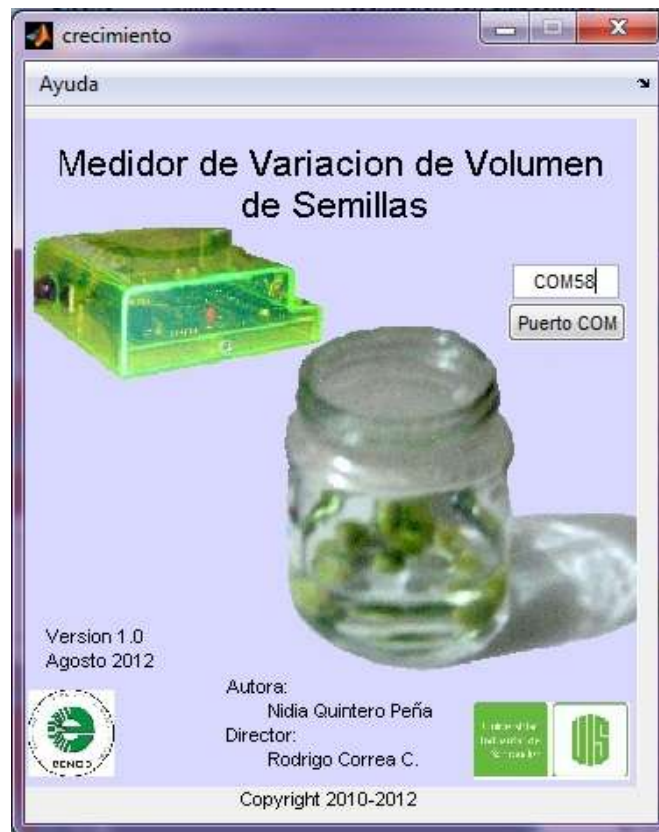
Fuente: Autora.

3.6 INTERFAZ DE USUARIO

Este componente permite la configuración, puesta en marcha y descarga de datos del *hardware*. Se desarrolló utilizando la aplicación Guide de Matlab, debido a que es un lenguaje sencillo, realiza la depuración en forma rápida y genera ejecutables, permitiendo utilizar la aplicación en cualquier computador aunque no esté instalado el programa Matlab.

La interfaz crea y manipula el puerto COM necesario para la comunicación *Bluetooth* con el prototipo y tiene la posibilidad de trabajar como dos tipos de usuarios: el biólogo y el ingeniero, como se muestra en la Figura 20.

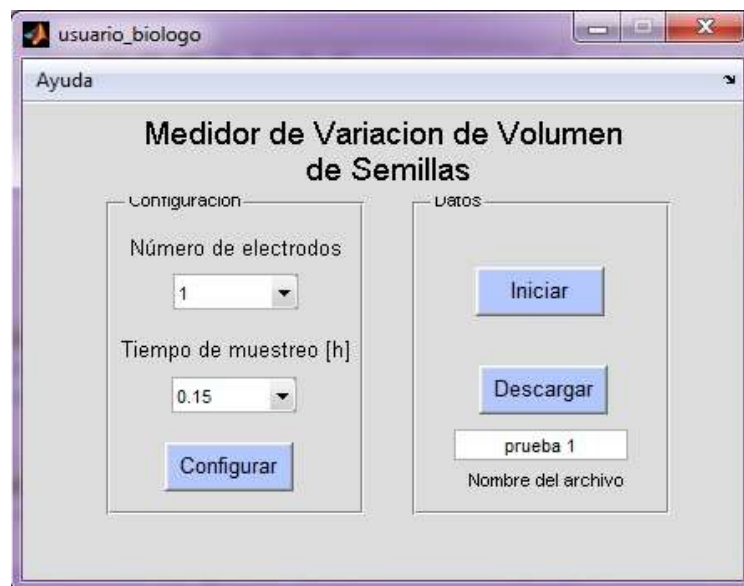
Figura 20. Ventana principal de la interfaz de usuario.



Fuente: Autora.

El usuario biólogo puede configurar el *hardware* modificando la cantidad de electrodos que utilizará en el experimento y el tiempo de muestreo requerido para tomar las muestras del sistema vegetal en crecimiento, da inicio a la toma de datos y puede descargarlos dando un nombre al archivo cuya extensión es xls, como se observa en la Figura 21.

Figura 21. Ventana del usuario biólogo de la interfaz de usuario.



Fuente: Autora.

El usuario ingeniero tiene las mismas opciones del biólogo y además tiene la lectura de los valores iniciales del *hardware*, de las referencias internas del sensor de campo eléctrico, de cuatro electrodos acondicionados y no acondicionados, además, puede modificar el valor de nivel DC y la ganancia del *hardware* y observar los cambios en forma directa, como se muestra en la Figura 22.

En cada una de las ventanas se encuentra el acceso al manual de usuario y a los créditos de desarrollo, a través del menú superior que se despliega al hacer clic en la opción Ayuda.

Figura 22. Ventana de usuario ingeniero de la interfaz de usuario.

The image shows a software window titled 'usuario_ingeniero' with a standard Windows-style title bar. The main content area is titled 'Medidor de Variacion de Volumen de Semillas' and contains several sections for data entry and control:

- Datos iniciales:** A vertical column of four 'Edit Text' buttons for 'Numero de electrodos', 'Tiempo de muestreo [h]', 'Nivel DC [V]', and 'Ganancia [VV]'. Each button is positioned below its corresponding label.
- Valores sin ajustar (V):** A vertical column of four 'Edit Text' buttons labeled 'Placa 1', 'Placa 2', 'Placa 3', and 'Placa 4'.
- Valores ajustados (V):** A vertical column of four 'Edit Text' buttons labeled 'Placa 1', 'Placa 2', 'Placa 3', and 'Placa 4'.
- Referencias Internas del Equipo:** Two 'Edit Text' buttons labeled 'Referencia A [V]' and 'Referencia B [V]'.
- Configuración:** Four dropdown menus with labels below them: 'Electrodos' (set to 1), 'Tiempo [h]' (empty), 'Nivel DC' (set to 3.5 V), and 'Ganancia' (set to 10 VV).
- Datos:** Three buttons: 'Iniciar', 'Descargar', and a button labeled 'prueba 1' with the text 'Nombre del archivo' underneath it.

Fuente: Autora.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ELECTRÓNICO FUNCIONAL

Durante el desarrollo del proyecto se construyeron dos versiones del *hardware* del modelo electrónico funcional. La primera versión contenía los bloques mostrados en la Figura 4, excepto el bloque del filtro pasa-bajos y la comunicación con el computador se hacía por medio del protocolo RS232 utilizando el conector DB9.

Luego de realizar pruebas con la primera versión, se rediseñó y construyó la segunda versión. En ésta se utilizaron componentes electrónicos superficiales para reducir el tamaño de la tarjeta impresa y el consumo de potencia, se implementó el filtro pasa-bajos para disminuir las interferencias de alta frecuencia y se utilizó la interfaz *Bluetooth* v1.2, para realizar la comunicación con el computador de forma inalámbrica, con esto se eliminó el uso de cables para la transferencia de datos y se actualizó el prototipo debido a que los conectores DB9 ya no se encuentran implementados en la mayoría de los computadores actuales.

En este capítulo se muestran las pruebas realizadas al sensor de campo eléctrico, con ellas se observó su rango de trabajo y se construyó su curva característica. Además, se analizó la resolución y repetibilidad del modelo electrónico funcional.

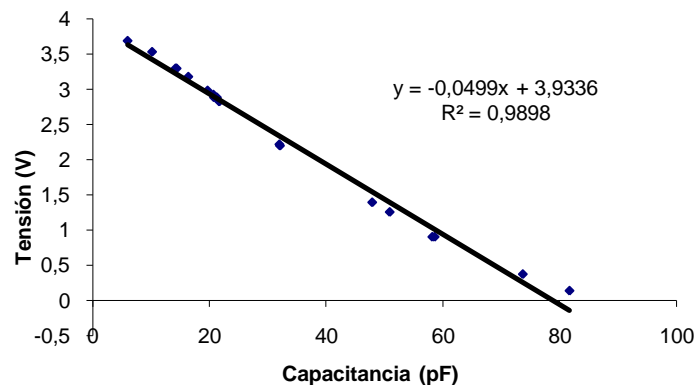
4.1 CURVA CARACTERÍSTICA DEL SENSOR

El sensor de campo eléctrico MC33794 tiene un comportamiento casi lineal a una frecuencia de 120 kHz, en el rango de 1 pF a 100 pF, según su hoja de datos [11]. Con esta prueba se deseaba observar y comprobar esta característica.

En la primera versión del modelo electrónico funcional se conectaron condensadores de valores conocidos en las entradas E1, E2, E3 y E4 del sensor,

los valores de tensión obtenidos no se acondicionaron, es decir no se restó un valor de nivel DC, ni se amplificaron; se convirtieron los valores analógicos a digitales con el microcontrolador PIC16F876A con una resolución de 8 bits y los datos se enviaron al computador utilizando el puerto serial. Los datos y la curva del sensor obtenida se muestran en la Figura 23.

Figura 23. Curva característica del sensor de la primera versión del prototipo.

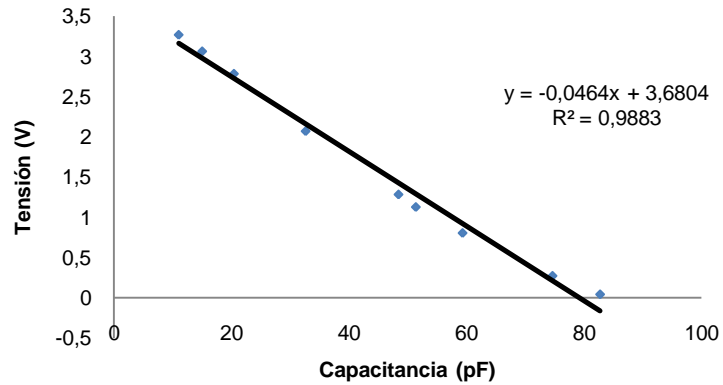


Fuente: Autora.

En la gráfica se observa que el *hardware* detecta valores de capacitancia en el rango de 5 pF a 80 pF con una tendencia lineal, la ecuación que se ajusta a los datos es $V = -0,0499C + 3,9336$ (V), donde C tiene unidades de picofaradios. El coeficiente de determinación es 0,9898, lo cual indica que los datos se ajustan a la recta obtenida.

En la segunda versión se conectaron nueve capacitores de valores conocidos en los terminales E1 a E9 del sensor, las tensiones obtenidas no se acondicionaron y se utilizó el microcontrolador con una resolución de 10 bits para convertirlos de analógicos a digital, luego se enviaron al computador por *Bluetooth*. La curva del sensor se muestra en la Figura 24, se observa la tendencia lineal del sensor y su ecuación característica, similar a la obtenida con la primera versión.

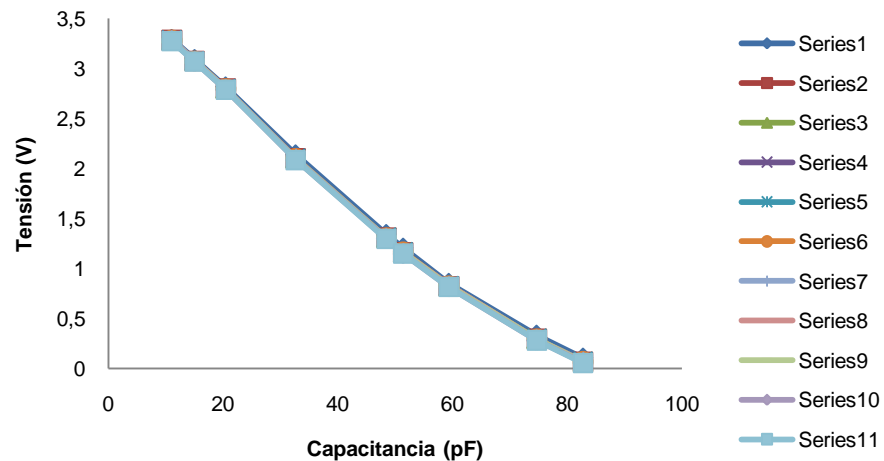
Figura 24. Curva característica del sensor de la segunda versión del prototipo.



Fuente: Autora.

Para verificar la repetibilidad del modelo electrónico funcional, se realizaron once lecturas de los condensadores, durante 20 horas igualmente espaciadas, en la Figura 25 se puede observar la tendencia lineal de los once conjuntos de datos, que se encuentran superpuestos dada la buena repetibilidad del equipo. En la Tabla 3 se muestran las regresiones lineales de cada conjunto de datos y su coeficiente de determinación.

Figura 25. Curva característica del modelo electrónico funcional.



Fuente: Autora.

Tabla 3. Regresiones lineales del modelo electrónico funcional.

Conjunto de Datos	Regresión Lineal	Coefficiente de Determinación
Serie 1	$y = -0,0459x + 3,7097$	0,9895
Serie 2	$y = -0,0463x + 3,6962$	0,9888
Serie 3	$y = -0,0463x + 3,6962$	0,9888
Serie 4	$y = -0,0463x + 3,6959$	0,9887
Serie 5	$y = -0,0462x + 3,6951$	0,9889
Serie 6	$y = -0,0462x + 3,6954$	0,9889
Serie 7	$y = -0,0463x + 3,697$	0,9887
Serie 8	$y = -0,0463x + 3,6938$	0,9889
Serie 9	$y = -0,0463x + 3,6913$	0,9889
Serie 10	$y = -0,0463x + 3,6878$	0,9886
Serie 11	$y = -0,0463x + 3,6866$	0,9888
Ecuación Promedio:	$y = -0,0462x + 3,695$	0,9889

Fuente: Autora.

La ecuación promedio del conjunto de datos, representa la curva característica del modelo electrónico funcional dado que el coeficiente de determinación es 0,9889, comprobando la linealidad del sensor de campo eléctrico. Se evaluó la desviación estándar de la pendiente y del corte de las ecuaciones, obteniendo 0,0001214 y 0,006012 respectivamente, con esto se demuestra la repetibilidad en las lecturas del equipo.

4.2 MEDICIÓN DEL RUIDO

La señal de tensión que evidencia las variaciones de las semillas es del orden de los milivoltios, por lo tanto el ruido generado por los elementos del *hardware* y el ruido externo pueden degradarla. Se realizó la medición del ruido a diferentes rangos de frecuencia, frecuencia extremadamente baja (ELF) de 3 Hz a 3 kHz, frecuencia muy baja (VLF) de 3 kHz a 30 kHz y baja frecuencia (LF) de 30 kHz a

300 kHz; para observar el funcionamiento de los reguladores de tensión, el sensor de campo eléctrico, el amplificador de instrumentación y el filtro analógico.

4.2.1 Reguladores de tensión.

El regulador de 12 V tiene una tensión de salida de 11,8 V, con variaciones a ELF de 1 Vpp, una componente fundamental de ruido a 40 Hz y unas pequeñas componentes a frecuencias menores de 2 Hz. A VLF el ruido es de 400 mVpp con una componente fundamental de 100 Hz aproximadamente. Y a LF se tiene una componente de ruido de 100 mVpp a 35 kHz aproximadamente.

El regulador de 5 V tiene una tensión de salida de 4,99 V, con variaciones a ELF de 30 mV, a VLF de 20 mV con componentes de ruido a 1 kHz y a LF de 20 mV con una pequeña componente a 1 kHz aproximadamente.

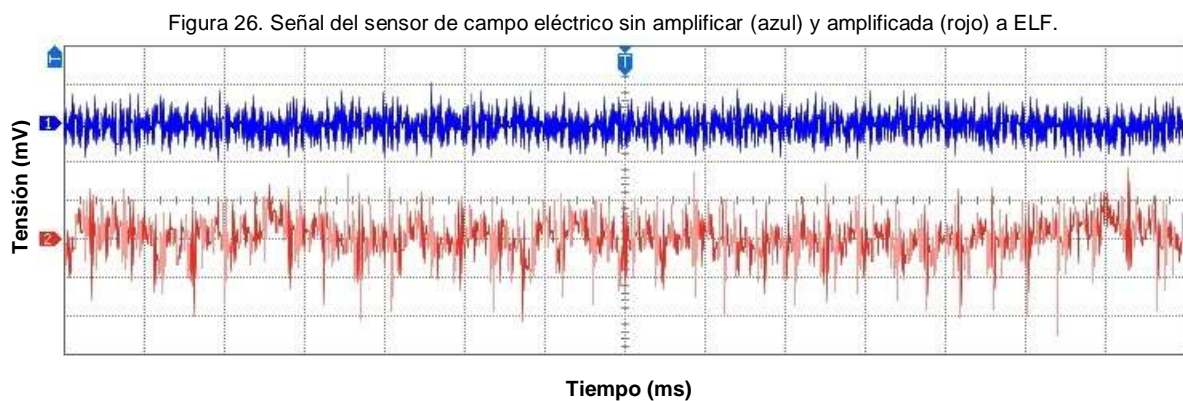
El regulador de 10 V tiene una tensión de salida de 9,1 V. A ELF el ruido es de 1 Vpp con una componente fundamental a 40 Hz y unas pequeñas componentes a frecuencias menores de 2 Hz. A VLF el ruido es de 400 mVpp con una componente fundamental de 100 Hz aproximadamente y a LF es de 100 mVpp con una componente a 35 kHz.

El regulador de -12 V tiene tensión de salida de -11,4 V, a ELF el ruido es de 800 mVpp con una componente fundamental a 40 Hz, a VLF es de 200 mVpp con una pequeña componente a 100 Hz y a LF es de 50 mVpp.

4.2.2 Sensor de campo eléctrico sin electrodos.

Se observó el funcionamiento del sensor de campo eléctrico sin electrodos, para ello se seleccionó el canal 1, con un valor de nivel DC de 3,9 V y ganancia de

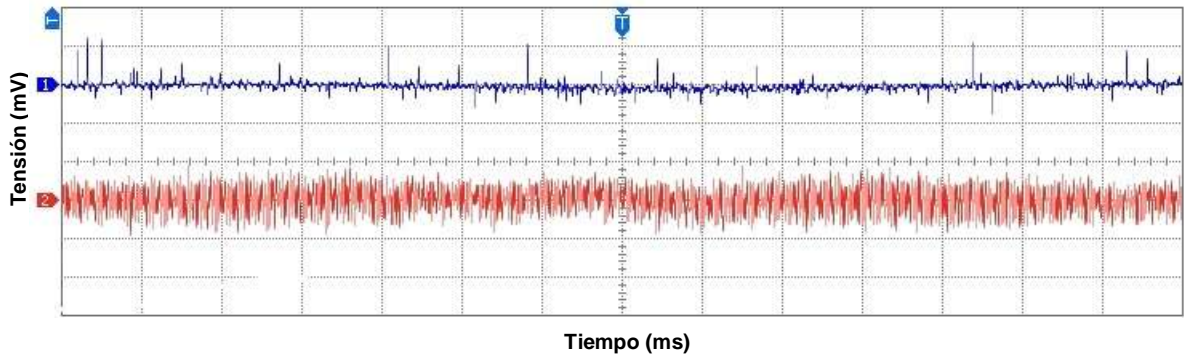
aproximadamente 10 V/V. El valor de tensión continua de la señal sin amplificar es de 3,7 V y de la señal amplificada es de 2 V aproximadamente, las variaciones en alterna a frecuencias ELF se muestran en la Figura 26. La línea azul es la señal sin amplificar que tiene amplitud de 16 mVpp y una componente fundamental de 2,2 kHz, la línea roja es la señal amplificada con una amplitud de 70 mVpp aproximadamente, componentes de ruido a frecuencias menores de 20 Hz y una componente fundamental a 120 Hz.



Fuente: autora.

En la Figura 27 se observa el funcionamiento del filtro analógico, la línea roja es la señal sin amplificar, con una amplitud de 16 mVpp igual que la línea azul de la grafica anterior. La línea azul es la señal luego de la amplificación y el filtrado, con una amplitud de 8 mV aproximadamente y pequeñas componentes de ruido menores a 2 Hz, lo que demuestra que el filtro analógico elimina componentes de ruido por encima de 5 Hz.

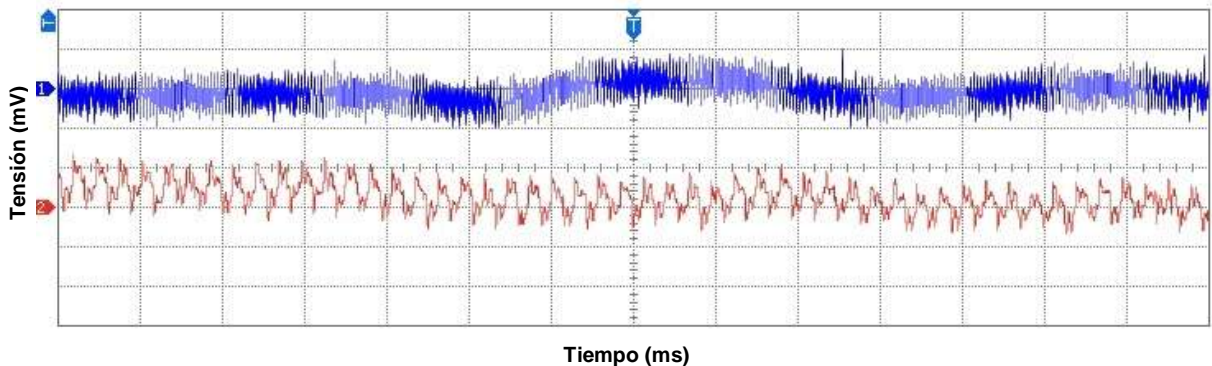
Figura 27. Señal filtrada (azul) y sin amplificar (rojo) a ELF.



Fuente: autora.

Se muestra el ruido de las señales sin amplificar y amplificada a frecuencias bajas en la Figura 28. La amplitud de la señal sin amplificar (azul) es de 20 mVpp, la señal amplificada (rojo) tiene amplitud de 30 mVpp con una componente fundamental a 36 kHz y otra a 110 kHz.

Figura 28. Señal del sensor de campo eléctrico sin amplificar (azul) y amplificada (rojo) a LF.



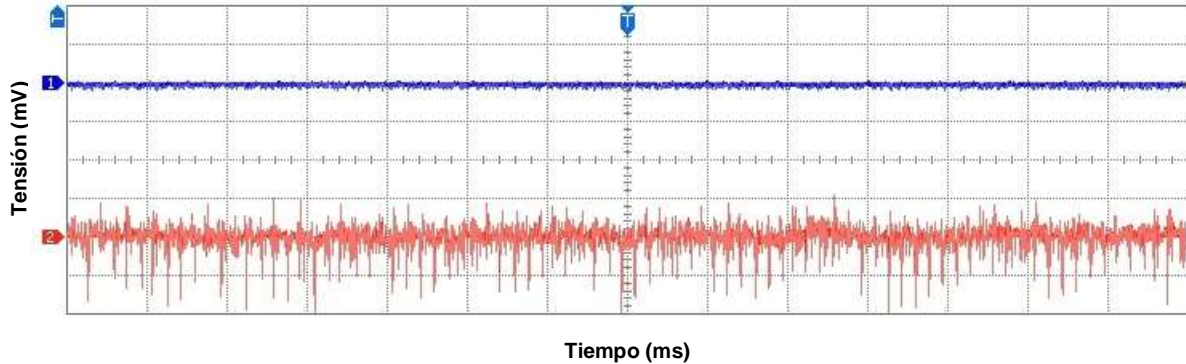
Fuente: autora.

4.2.3 Sensor de campo eléctrico con electrodo tipo FEF.

Se ubicó un electrodo tipo FEF de tamaño 5 cm x 5 cm en el canal 1 del sensor, teniendo en cuenta el valor del electrodo sin amplificar. Se utilizó un valor de nivel DC de 1,2 V y una ganancia es de 10 V/V aproximadamente. La señal de salida del sensor es de 0,8 V y la señal a la salida del amplificador es de 3,68 V. Las

variaciones de las señales en alterna para frecuencias ELF se muestran en la Figura 29, la señal de ruido a la salida del sensor es la línea azul con una amplitud de 10 mV aproximadamente, el valor de ruido amplificado es la línea roja con amplitud de 100 mV y pequeñas componentes a 40 Hz, 120 Hz y 360 Hz.

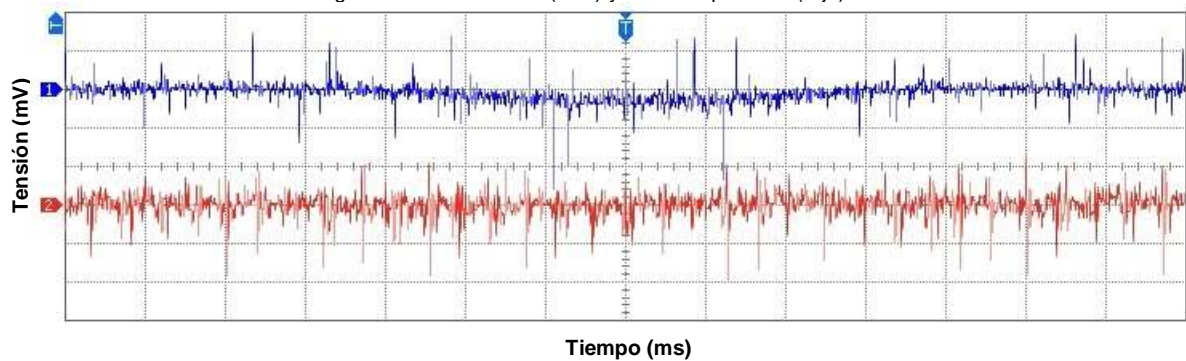
Figura 29. Señal sin amplificar (azul) y amplificada (rojo) a ELF.



Fuente: autora.

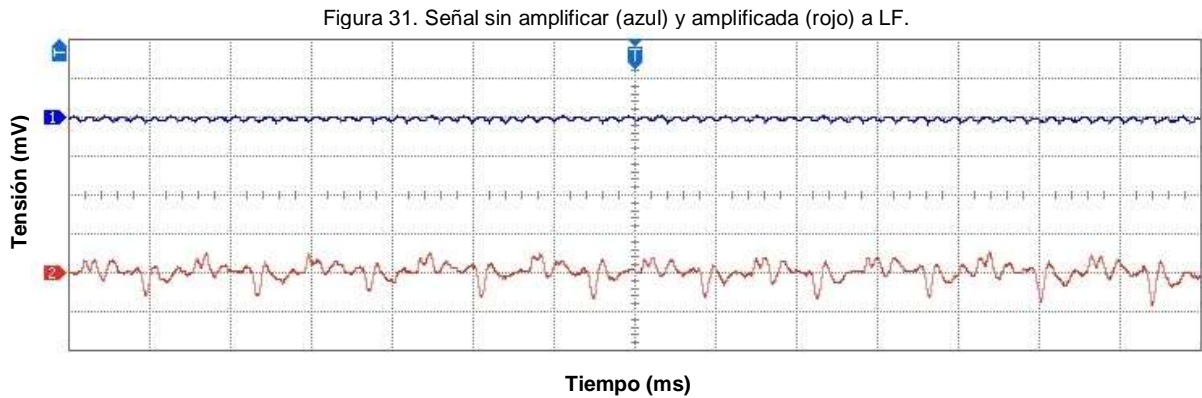
La señal amplificada es filtrada para disminuir las interferencias como se observa en la Figura 30, donde se muestran las variaciones en alterna para frecuencias ELF. La línea roja es la señal a la salida del amplificador con amplitud de 130 mV y componentes de ruido a 120 Hz, 310 Hz, 550 Hz y 670 Hz. La línea azul es la señal filtrada, con una amplitud de 26 mV y pequeñas componentes de ruido a frecuencias menores de 5 Hz.

Figura 30. Señal filtrada (azul) y señal amplificada (rojo) a ELF.



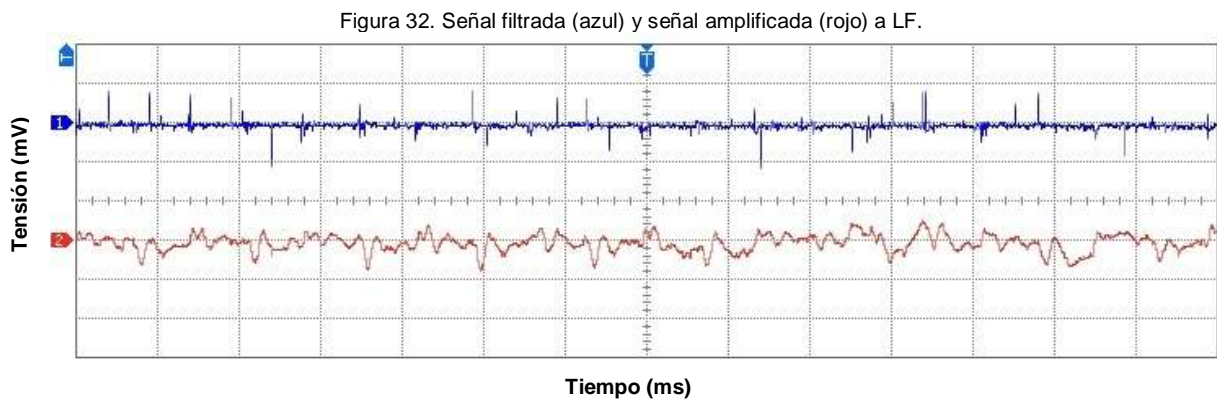
Fuente: autora.

En la Figura 31 se muestra el ruido de las señales sin amplificar y amplificadas a frecuencias bajas, la línea azul es la señal sin amplificar con amplitud de 10 mV y la señal amplificada, línea roja, tiene una amplitud de 50 mV con una componente fundamental a 36 kHz y los tercer, quinto, sexto, séptimo, octavo y décimo armónico.



Fuente: autora.

La señal amplificada, línea roja de la Figura 32, se filtra y se obtiene la línea azul de la misma figura, con amplitud de 20 mV y sin componentes de ruido.

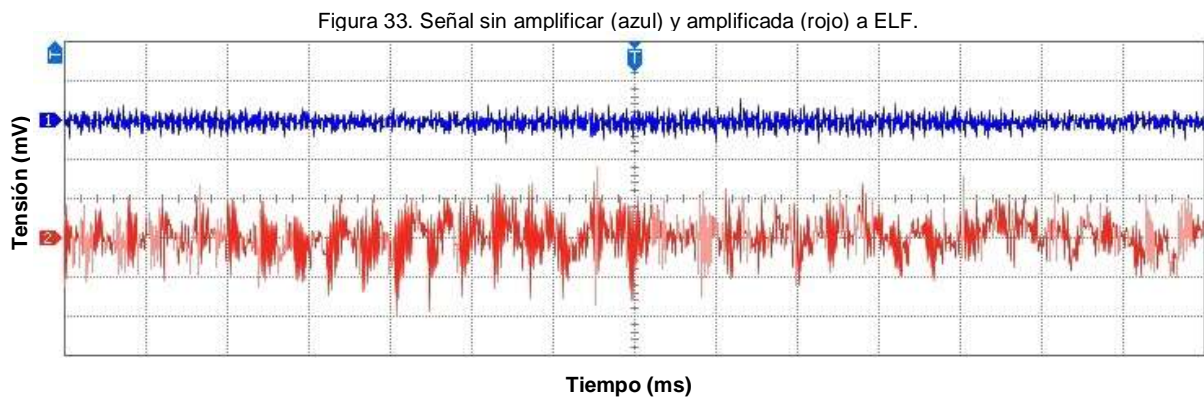


Fuente: autora.

4.2.4 Sensor de campo eléctrico con electrodo tipo placas planas paralelas.

Se seleccionó el canal 1 del sensor y se colocó en él un electrodo conformado por placas planas paralelas de 10 cm x 10 cm con un petri de 9 cm de diámetro entre las placas. El nivel DC aplicado con este tipo de electrodo es de 2,5 V y la ganancia utilizada es de 10 V/V aproximadamente, la señal de salida del sensor es de 2,85 V y la señal amplificada es de -3,3 V.

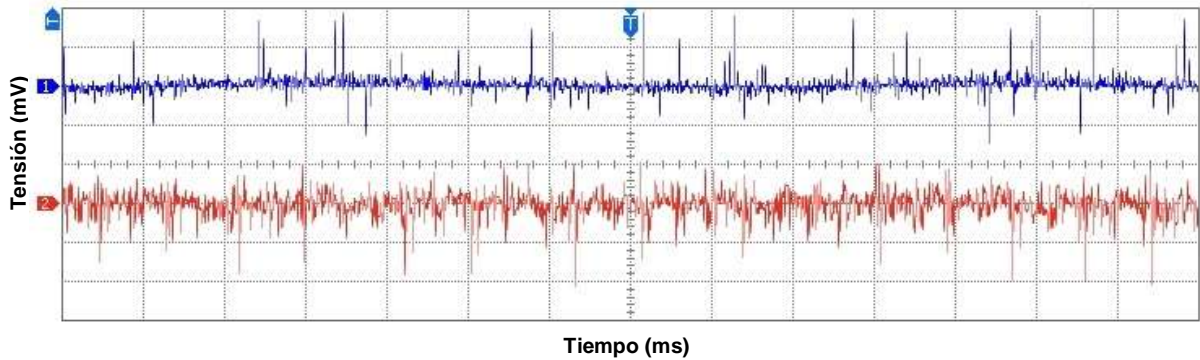
Las variaciones de las señales en alterna para frecuencias ELF se muestran en la Figura 33, la señal sin amplificar es la azul con una amplitud de 16 mV y una pequeña componente de ruido a 2,1 kHz, la señal a la salida del amplificador es la roja con una amplitud de 60 mV y pequeñas componentes a 120 Hz y 1,2 kHz.



Fuente: autora.

Esta señal se introduce al filtro analógico, obteniendo la gráfica mostrada en la Figura 34. La señal amplificada, roja, tiene amplitud de 130 mV y componentes de ruido a 120 Hz, 140 Hz, 200 Hz, 380 Hz, 500 Hz, 550 Hz, 600 Hz y 1 kHz. La señal filtrada, azul, tiene amplitud de 20 mV con una pequeña componente de ruido a menos de 5 Hz.

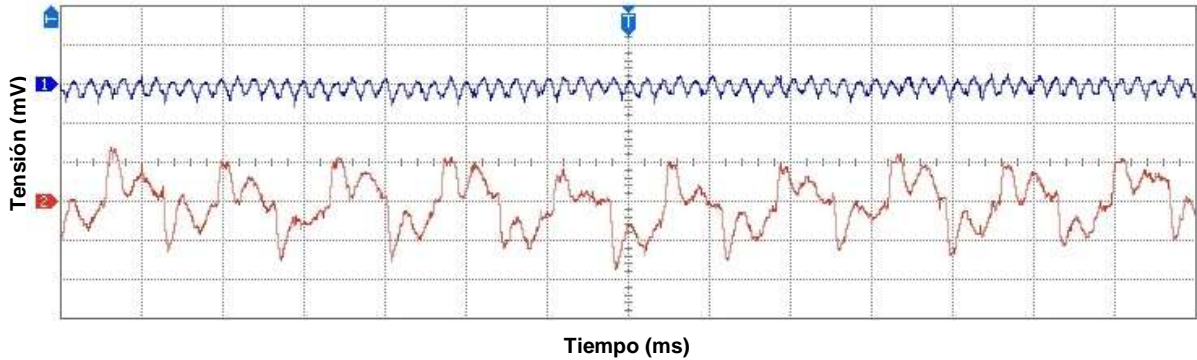
Figura 34. Señal filtrada (azul) y señal amplificada (rojo) a ELF.



Fuente: autora.

A bajas frecuencias (LF) el ruido presente en las señales se muestra en la Figura 35, la amplitud de la señal sin amplificar, azul, es de 12 mV con una pequeña componente a 250 kHz, la señal amplificada, rojo, tiene amplitud de 50 mV con una componente fundamental a 36 kHz y pequeñas componentes a 110 kHz y 180 kHz.

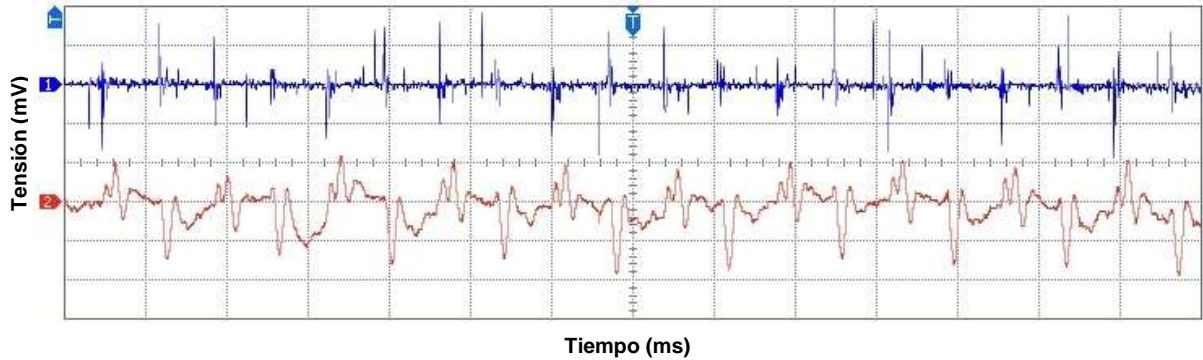
Figura 35. Señal sin amplificar (azul) y amplificada (rojo) a LF.



Fuente: autora.

Luego de filtrar la señal del electrodo se tiene la Figura 36. La señal amplificada, roja, tiene amplitud de 130 mV, una componente fundamental a 36 kHz y una pequeña componente a 180 kHz. La señal filtrada, azul, tiene amplitud de 20 mV.

Figura 36. Señal filtrada (azul) y señal amplificada (rojo) a LF.



Fuente: autora.

Las pruebas realizadas al modelo electrónico funcional permitieron:

- Comprobar la tendencia lineal del sensor de campo eléctrico y su rango de trabajo.
- Verificar la repetibilidad en las mediciones del equipo.
- Determinar que las variaciones en las tensiones de salida de los reguladores de tensión, debidas al ruido a baja, muy baja y extremadamente baja frecuencia, no afectan las señales de interés medidas con el equipo.
- Validar el funcionamiento del bloque de acondicionamiento de señal y del filtro analógico, cuando el equipo trabaja sin electrodos, con electrodos tipo FEF y con electrodos de placas planas paralelas.

5 MEDICIÓN DE LA VARIACIÓN DE VOLUMEN EN SEMILLAS CON EL MODELO ELECTRÓNICO FUNCIONAL Vs EL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

En este capítulo se presentan las pruebas, los resultados y una comparación de la medición de variación de volumen en semillas utilizando el modelo electrónico funcional y la técnica manual del principio de Arquímedes. En la Tabla 4 se muestra el tipo de prueba, el objetivo y la descripción de cada una.

Tabla 4. Pruebas de medición de variación de volumen en semillas.

TIPO DE PRUEBA	OBJETIVO DE LA PRUEBA	DESCRIPCIÓN
1. Detección de cambios en semillas de frijol.	Observar variaciones en la señal de los electrodos debido a las variaciones de las semillas.	Con el modelo electrónico funcional se detectaron variaciones en semillas de frijol en la etapa de imbibición.
2. Detección de cambios en semillas de arveja.	Observar variaciones en la señal de los electrodos debido a las variaciones de las semillas.	Con el modelo electrónico funcional se detectaron las variaciones en semillas de arveja en las etapas de imbibición y germinación.
3. Comparación de métodos de medición del crecimiento de semillas de arveja.	Comparar la medición del crecimiento de semillas de arveja utilizando el modelo electrónico funcional y el principio de Arquímedes.	Se utilizó el principio de Arquímedes y el modelo electrónico funcional, con dos tipos de electrodos, para medir los cambios presentados en semillas de arveja debido a su germinación. Además, se remojaron las semillas en agua con una enzima de crecimiento para observar las variaciones de germinación acelerada.
4. Detección de muerte de semillas de arveja y frijol.	Observar variaciones en la señal de los electrodos cuando las semillas se remojan en agua saturada con sal.	Con el modelo electrónico funcional se detectaron las variaciones en las semillas de arveja y frijol, en la etapa de imbibición en agua saturada con sal.

Fuente: autora.

5.1 DETECCIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN DE SEMILLAS DE FRIJOL

5.1.1 Materiales y método.

Se realizó el remojo de semillas de frijol durante 5 horas, como uno de los primeros experimentos con el modelo electrónico funcional, para determinar si el equipo mostraba variaciones en la tensión de salida debido a las variaciones volumétricas de las semillas.

El experimento se realizó usando cinco semillas de frijol que tenían un volumen de 3 ml, remojadas en 10 ml de agua y colocadas dentro de un campo eléctrico de 10 V/m, generado por dos placas planas paralelas de 9 cm de ancho x 5 cm de alto.

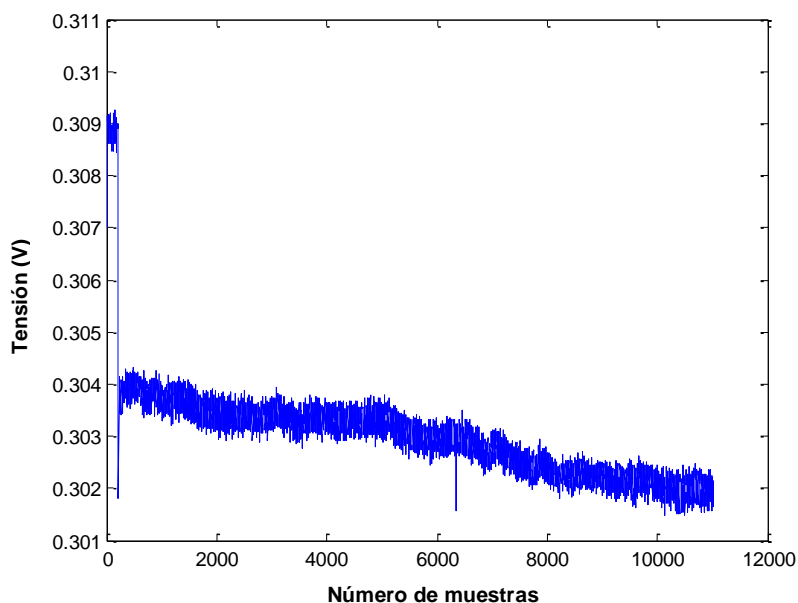
Se tomaron los datos del equipo sin realizar la eliminación del nivel DC ni la amplificación.

5.1.2 Resultados.

Se inició la lectura de los datos con el electrodo tipo placas planas paralelas sin recipiente, observando un valor de tensión estable. Al introducir el recipiente con las semillas dentro del electrodo, se presenta una caída abrupta de tensión, debido al cambio en el valor de la capacitancia del electrodo, como se muestra en la Figura 37.

En la grafica se observa que la tensión de salida del equipo disminuye con el tiempo, debido a que aumenta el valor de la capacitancia del sistema de medida (recipiente con agua y semillas), lo cual corresponde con la ecuación característica del sensor de campo eléctrico descrita en la sección 4.1.

Figura 37. Semillas de frijol en remojo.



Fuente: autora.

5.2 DETECCIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN DE SEMILLAS DE ARVEJA

5.2.1 Materiales y método.

Se utilizaron dos semillas de arveja en condiciones de remojo, dentro de un recipiente con 10 ml de agua. Se ubicó el recipiente dentro de un campo eléctrico de 10 V/m, generado por dos placas planas paralelas de 9 cm de ancho x 5 cm de alto.

Para la etapa de germinación se utilizaron cinco semillas de arveja. Luego de someterlas a 24 horas de remojo se llevan a las condiciones de germinación, dentro de un recipiente con una base de algodón remojada con 2 ml de agua.

Se tomaron los datos del equipo sin realizar la eliminación del nivel DC ni la amplificación.

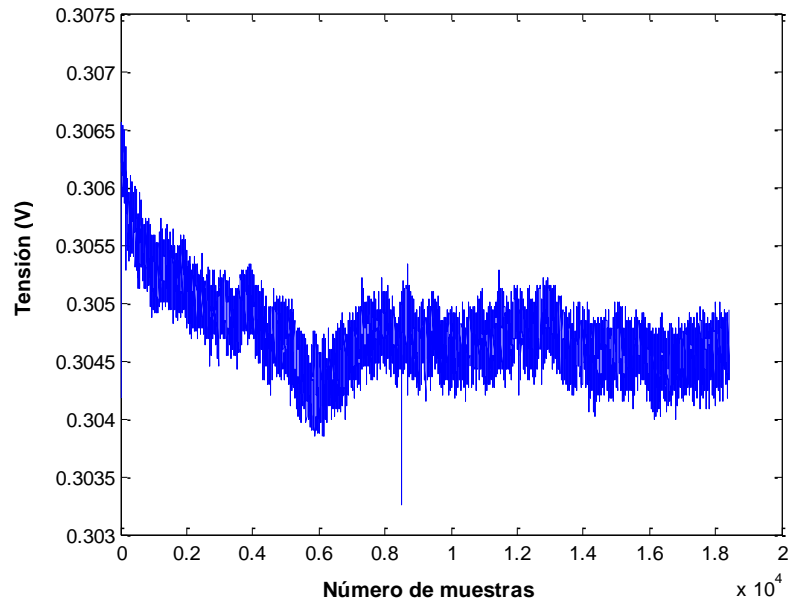
5.2.2 Resultados.

En la Figura 38, se muestra el comportamiento de las semillas de arveja durante 8 horas en remojo. Se observa en la gráfica que hay una disminución en el valor de la tensión de salida del prototipo, relacionado con el incremento en el valor de la capacitancia formada por las placas planas paralelas, el recipiente con agua y las semillas, lo cual corresponde con la ecuación característica del sensor de campo eléctrico descrita en la sección 4.1.

El sistema de medida (las placas planas paralelas, el recipiente con agua y semillas) se mantiene constante, es decir, no hay variaciones en la posición de las placas ni se manipula el recipiente con agua durante la realización de la prueba, por tal razón las variaciones en la capacitancia se deben a las variaciones de tamaño presentadas en las semillas y a las condiciones ambientales.

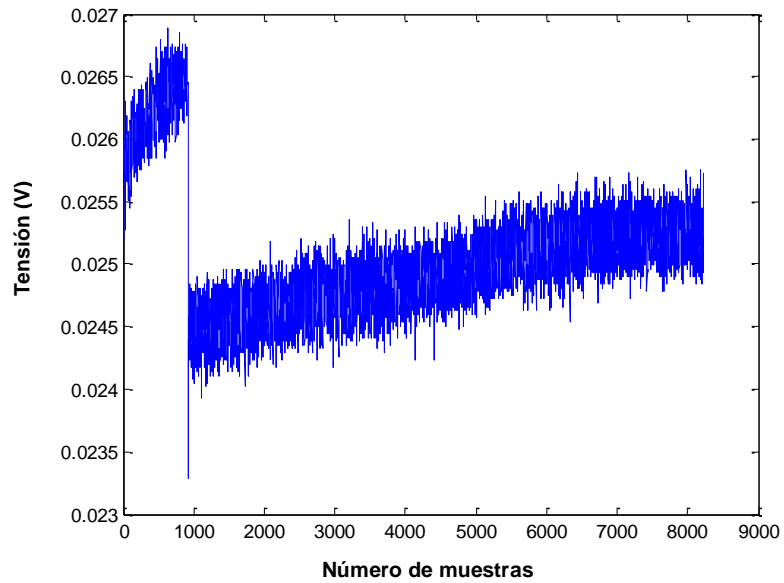
El comportamiento de las semillas en la etapa de germinación se muestra en la Figura 39; el cambio brusco que se observa es debido a que al inicio de la toma de datos, no se encontraba el recipiente dentro de las placas planas paralelas y luego (en 1000 datos) se colocó el recipiente con las semillas. Se observa un incremento en la tensión con respecto al tiempo, debido a que el valor de capacitancia del sistema de medida disminuye en el proceso de germinación, porque las semillas disminuyen su volumen al perder agua.

Figura 38. Semillas de arveja en remojo.



Fuente: autora.

Figura 39. Semillas de arveja en germinación.



Fuente: autora.

Con esta prueba se muestra que el modelo electrónico funcional detecta las variaciones fisicoquímicas de las semillas y las muestra en forma de cambio en la tensión de salida.

5.3 COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN DE SEMILLAS DE ARVEJA

5.3.1 Materiales y método.

Se midió la variación de volumen de semillas de arveja utilizando dos métodos: i) Forma manual, con el método del principio de Arquímedes y ii) Con el modelo electrónico funcional. Se compararon los resultados obtenidos para verificar que con el modelo electrónico se puede detectar las variaciones de las semillas.

El experimento se realizó con 30 semillas de arveja (*Pisum sativum*). Diez (10) de ellas se denominaron semillas de control, debido a que tenían iguales condiciones de imbibición y germinación, pero no se encontraban afectadas por el campo eléctrico producido por los electrodos. Las semillas se colocaron en grupos de 10 dentro de frascos de vidrio.

Se utilizaron dos tipos de electrodos para observar la respuesta de cada uno cuando se presenta la germinación de las semillas: i) Tipo placas planas paralelas, que se ubicaron a cada lado del frasco de vidrio y ii) tipo FEF, que se colocó debajo del frasco de vidrio.

Se empleó un electrodo de referencia, esto es, un electrodo con un frasco de vidrio sin semillas, para disminuir interferencias externas. Este último, se ubicó a 10 cm del sistema de medida (electrodo + frasco de vidrio + semillas).

Se conectaron dos electrodos de placas planas paralelas de 10 cm x 10 cm en las entradas 1 y 2 del modelo electrónico funcional, y en las entradas 3 y 4 dos electrodos tipo FEF de 5 cm x 5 cm. Los electrodos 1 y 3 son de referencia y los electrodos 2 y 4, son de medida del sistema vegetal.

El proceso de germinación de las semillas se mejora cuando se someten a un periodo de remojo (imbibición). Por esta razón el experimento se realizó en dos etapas: la primera, la etapa de imbibición y la segunda, la etapa de germinación. Los datos obtenidos se graficaron para mostrar su tendencia en función del tiempo.

Además, para observar las variaciones de volumen en las semillas de forma acelerada, se remojaron durante 8 horas en agua con un regulador de crecimiento (ácido giberélico), tomando los datos en forma manual y con el modelo electrónico funcional.

5.3.2 Resultados.

El experimento se realizó para 10 semillas de arveja fresca, debido a que en la literatura estudiada [26], [27], este valor es la cantidad más utilizada para realizar análisis de imbibición y germinación.

- **Etapas de imbibición.**

Método del principio de Arquímedes.

Se inició el experimento midiendo el volumen de 10 semillas de arveja fresca (semillas de control), para ello se colocaron 20 ml de agua en una probeta de 50 ml y luego se introdujeron las semillas. El volumen de las semillas se determinó como el aumento de volumen observado en la probeta.

El siguiente paso fue colocar las semillas en un frasco de vidrio con 20 ml de agua para mantenerlas en remojo, a una temperatura ambiente de 25°C. Éste se ubicó

en la misma habitación donde se encuentran las otras semillas pero lejos del campo eléctrico creado por los electrodos.

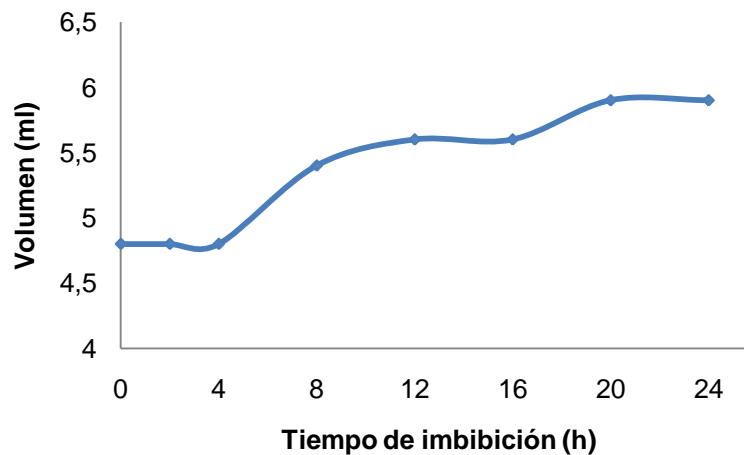
Se midió el cambio de volumen de las semillas de control a las 2, 4, 8, 12, 16, 20 y 24 horas de imbibición, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5. La gráfica de la tasa de imbibición de las semillas se observa en la Figura 40.

Tabla 5. Datos manuales de imbibición.

Volumen de las semillas (ml)	Tiempo de imbibición (h)
4,8	0 (inicial)
4,8	2
4,8	4
5,4	8
5,6	12
5,6	16
5,9	20
5,9	24

Fuente: autora.

Figura 40. Tasa de imbibición de las semillas de arveja.



Fuente: autora.

Se observa en la gráfica, la tendencia sigmoide de la tasa de imbibición de las diez semillas de arveja fresca, obtenida en forma manual. En las primeras 4 horas,

se muestra un descenso en el volumen de las semillas; entre las 4 y las 8 horas se presenta aumento de volumen, de las 8 a las 16 horas se estabiliza la entrada de agua a la semilla y no se muestra aumento de volumen; entre las 16 y las 20 horas se vuelve a tener un aumento de volumen y finalmente de las 20 a las 24 horas se estabiliza nuevamente el volumen. Este comportamiento concuerda con lo revisado en la literatura (ver capítulo 2).

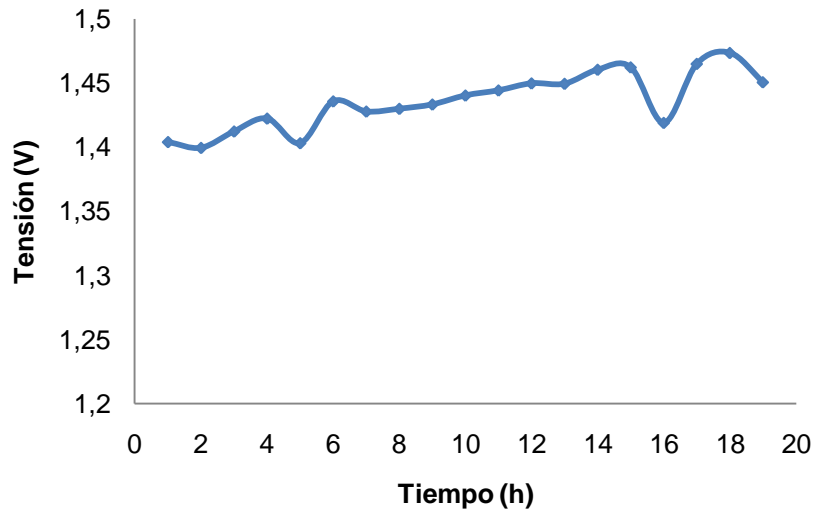
Método con el modelo electrónico funcional.

En dos frascos de vidrio con 20 ml de agua se colocaron las semillas de arveja fresca (10 en cada uno) para mantenerlas en remojo, a una temperatura ambiente de 25°C. Uno de los frascos se ubicó dentro del electrodo 2 y el otro encima del electrodo 4. En los electrodos 1 y 3 se colocaron frascos de vidrio con 20 ml de agua únicamente.

Los datos que muestran el comportamiento de las semillas, se obtienen restando los valores de los electrodos de medición (electrodo 2 y 4) y los valores de los electrodos de referencia (electrodo 1 y 3), respectivamente.

Se configuró el equipo para cada tipo de electrodo (nivel DC diferente), con una ganancia de 10 V/V aproximadamente y con tiempo de toma de datos de 1 hora. Se tomaron datos hasta las 19 horas después de iniciar la imbibición. En las Figura 41 y Figura 42 se muestra el comportamiento de las semillas, medido con los dos tipos de electrodos utilizados.

Figura 41. Electrodo tipo placas planas paralelas.

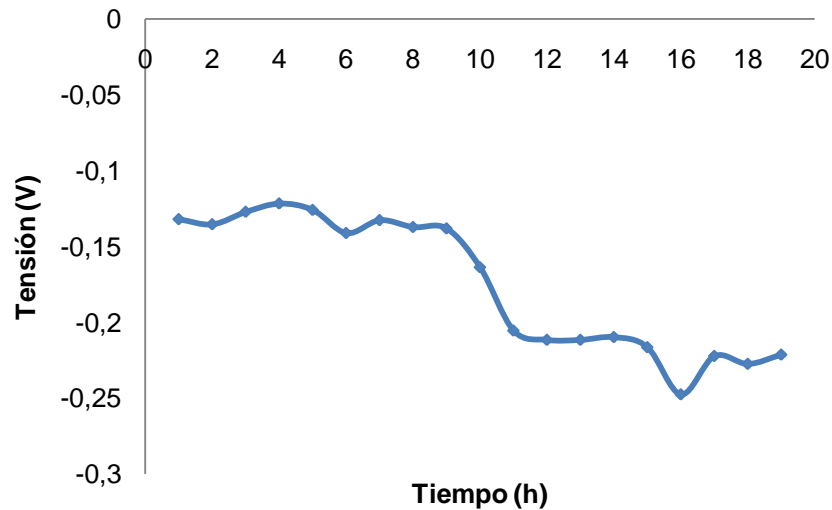


Fuente: autora.

En la Figura 41 se observa la variación en la tensión de salida con respecto al tiempo de imbibición utilizando placas planas paralelas. La tensión aumenta con respecto al tiempo de imbibición, esto es debido a que, según la configuración del equipo, cuando la capacitancia de los electrodos aumenta, la tensión de salida también aumenta.

En electrodos planos paralelos, el valor de la capacitancia varía directamente proporcional con la variación del dieléctrico (constante dieléctrica, ϵ_r) que conforma el capacitor; en este caso las semillas en germinación aumentan el valor de la permitividad del dieléctrico (ϵ_r) y por tanto aumenta la capacitancia detectada por el sensor.

Figura 42. Electrodo tipo FEF.



Fuente: autora.

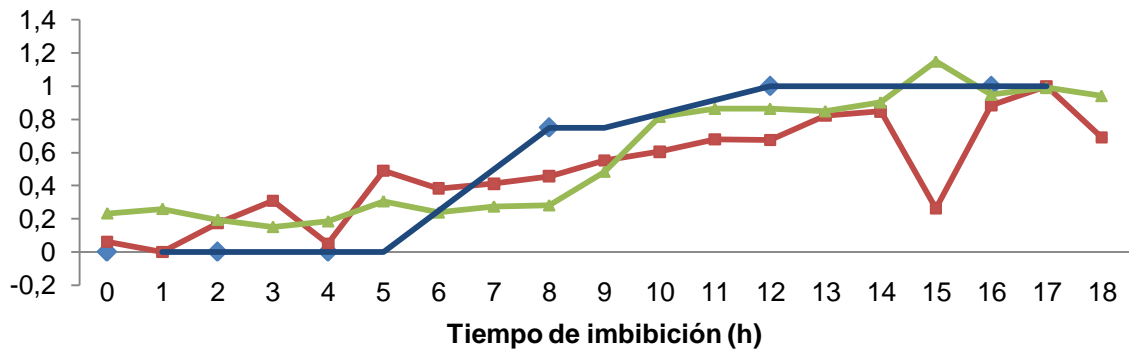
Con los electrodos tipo FEF se observa una disminución en la tensión de salida del equipo cuando aumenta el tiempo de imbibición, esto es debido a que la capacitancia de los electrodos disminuye cuando aumenta el valor del dieléctrico (ϵ_r) que conforma el capacitor [28].

En la Figura 43, se muestran las gráficas de los tres métodos usados para medir la variación de volumen de semillas de arveja, así: la línea azul corresponde a los datos manuales, la roja al electrodo tipo placas planas paralelas y la verde al inverso de los datos de los tipo FEF.

Los datos se normalizaron entre 0 y 1, de tal forma que se puedan comparar las mediciones obtenidas de los diferentes métodos, para ello se utilizó la fórmula.

$$x(\text{normalizado}) = \frac{x(\text{original}) - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

Figura 43. Comparación de datos de imbibición de arveja.



Fuente: autora.

Se observa que la tendencia de los datos tomados con los electrodos FEF se aproxima mejor a la tendencia de variación de volumen obtenida en forma manual, comparada con la tendencia de los electrodos de placas planas paralelas. Además, la línea verde tiene una forma sigmoïdal similar a la línea azul, que no se observa en la línea roja.

- **Etapas de germinación.**

Luego de 24 horas de imbibición, se inició la etapa de germinación. Para ello se colocó una base de papel absorbente en cada frasco de vidrio, remojándolos con 5 ml de agua, tres de ellos con 10 semillas cada uno y dos frascos sin semillas.

Uno de los frascos con semillas es el de control y los otros dos frascos se ubicaron en los electrodos 2 y 4; en los electrodos 1 y 3 se colocaron los frascos sin semillas.

Método del principio de Arquímedes.

Se midió el volumen de las semillas de control (10 semillas) al inicio de esta etapa y luego cada cuatro horas, hasta las 24 horas de germinación. Los datos

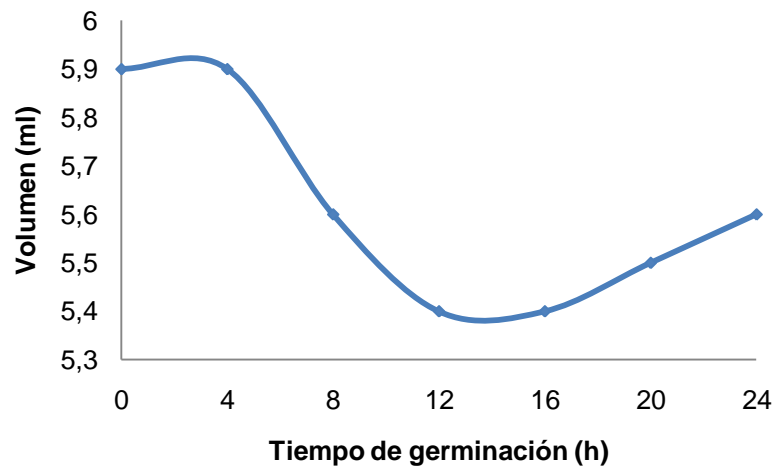
obtenidos se muestran en la Tabla 6, el comportamiento de las semillas se observa en la Figura 44.

Tabla 6. Datos manuales de germinación.

Volumen de las semillas(ml)	Tiempo de germinación (h)
5,9	0 (inicial)
5,9	4
5,6	8
5,4	12
5,4	16
5,5	20
5,6	24

Fuente: autora.

Figura 44. Comportamiento de las semillas de arveja en la etapa de germinación.



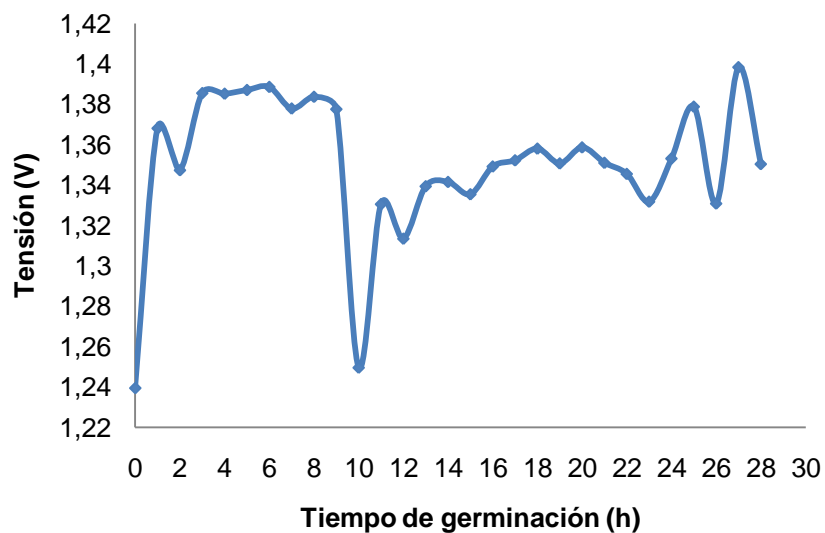
Fuente: autora.

Los datos obtenidos en forma manual, en la etapa de germinación muestran una disminución en el volumen de las semillas con respecto al tiempo debido a la pérdida de humedad, que después se ve compensada por el rompimiento de la testa de la semilla lo cual genera una pendiente positiva después de las 16 horas.

Método con el modelo electrónico funcional.

Se energizó el equipo y se configuró nuevamente para cada tipo de electrodo con un tiempo de toma de datos de 1 hora. Se tomaron datos hasta las 28 horas después de iniciar la germinación, el comportamiento de los datos se muestra en la Figura 45 y Figura 46, para cada tipo de electrodos.

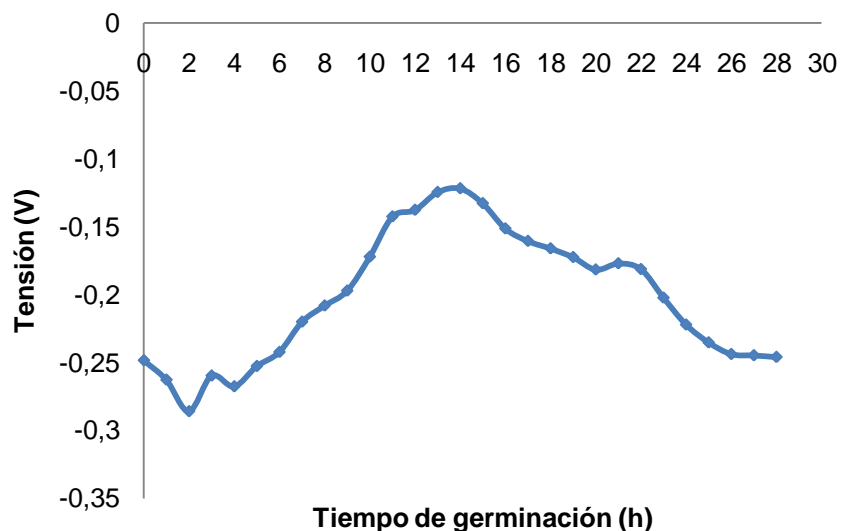
Figura 45. Etapa de germinación con electrodos planos paralelos.



Fuente: autora.

Utilizando el modelo electrónico funcional, se tiene que para electrodos tipo placas planas paralelas, la tensión aumenta durante la mayoría del tiempo de germinación. Por otro lado, con electrodos tipo FEF la tendencia de la tensión es de forma inversa a lo obtenido manualmente, como se muestra en la Figura 46.

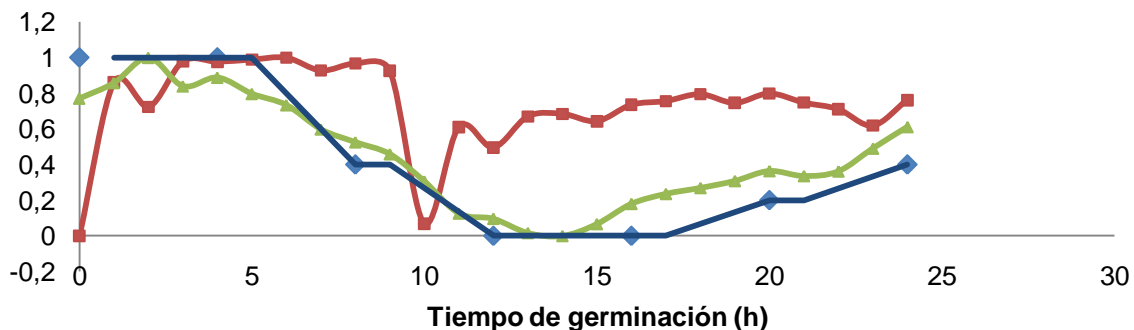
Figura 46. Etapa de germinación con electrodos FEF.



Fuente: autora.

En la Figura 47, se muestran las gráficas de los tres métodos usados para medir la etapa de germinación de semillas de arveja, así: la línea azul corresponde a los datos manuales, la roja al electrodo tipo placas planas paralelas y la verde al inverso de los datos de los tipo FEF.

Figura 47. Comparación de datos de germinación de arvejas.



Fuente: autora.

Con el eje vertical normalizado entre 0 y 1, se puede observar que las 3 tendencias comienzan similares entre sí, pero después de las 5 horas solo los electrodos FEF siguen los datos del método manual, mostrando que son los más

apropiados para medir los cambios en el volumen de las semillas. Las pequeñas diferencias entre las líneas verde y azul corresponden al error intrínseco en el método de medición manual y las semillas de control retrasan su proceso dado que se mide su cambio volumétrico con agua y esto les permite absorber más agua que las que están en interacción con el electrodo FEF.

- **Variación de volumen acelerado utilizando un regulador de crecimiento.**

Para medir la variación de volumen acelerado en la etapa de imbibición en semillas de arveja, se utilizó un regulador de crecimiento, manteniendo las semillas en remojo durante 8 horas en agua con ácido giberélico.

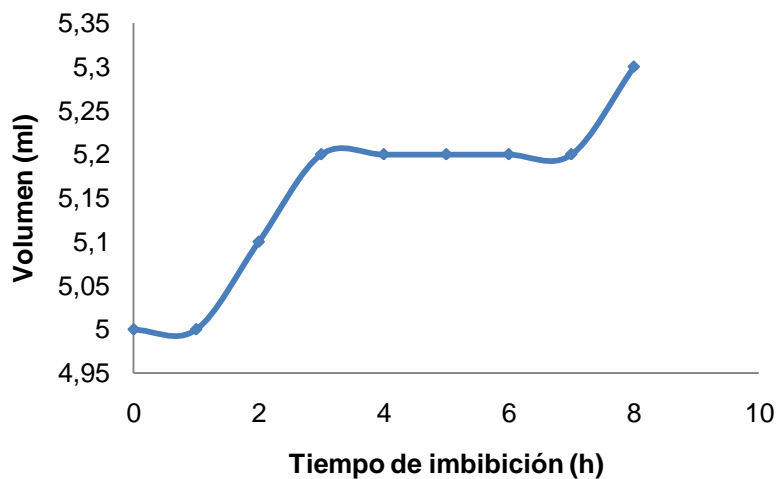
Con el método del Principio de Arquímedes se realizaron las mediciones de variación de volumen acelerado de 10 semillas de arveja en forma manual. Midiendo el cambio de volumen de las semillas de control cada hora durante 8 horas de imbibición. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 7 y en la Figura 48 se observa el comportamiento sigmoideal de la tasa de imbibición, que ocurre en menor tiempo que cuando se utiliza agua sin el regulador de crecimiento.

Tabla 7. Variación de volumen acelerado de semillas de arveja.

Volumen de las semillas(ml)	Tiempo de imbibición (h)
5	0 (inicial)
5	1
5,1	2
5,2	3
5,2	4
5,2	5
5,2	6
5,2	7
5,3	8

Fuente: autora.

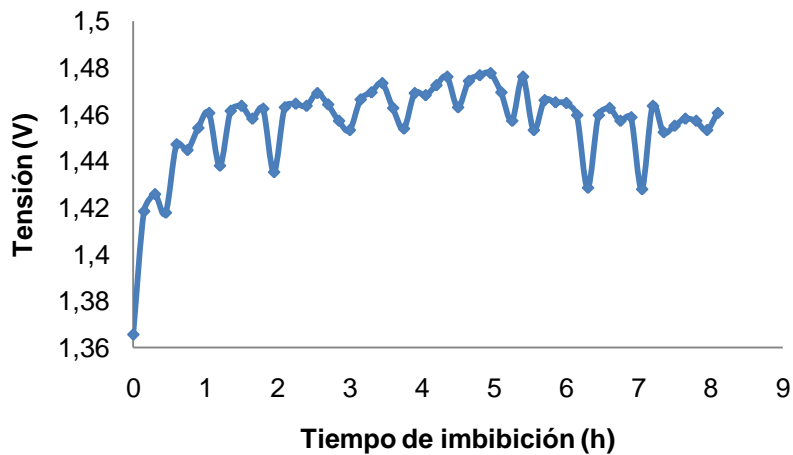
Figura 48. Tasa de imbibición de semillas de arveja con el regulador de crecimiento.



Fuente: autora.

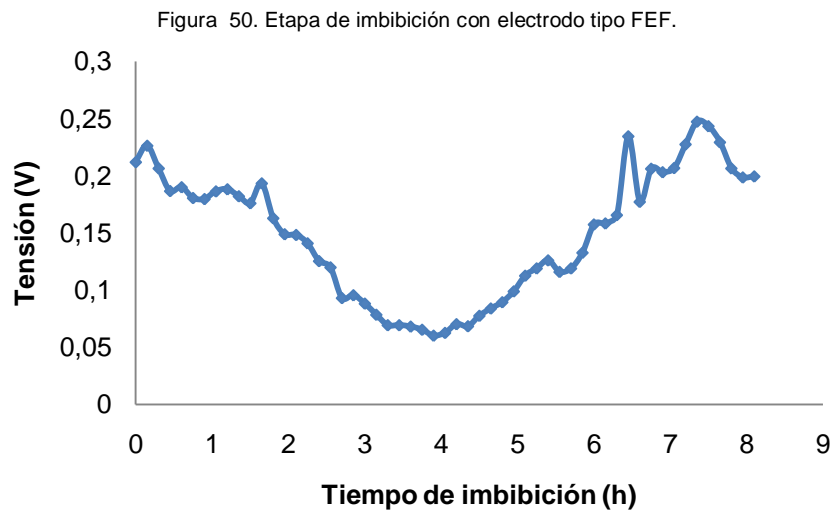
Se utilizó el modelo electrónico funcional para medir la variación de volumen acelerado de 10 semillas de arveja, con cada tipo de electrodo. Se configuró el equipo para tomar datos cada 9 minutos y se tomaron datos hasta 8 horas después de iniciar la imbibición. El comportamiento de las semillas se muestra en la Figura 49 y Figura 50.

Figura 49. Etapa de imbibición con electrodo placas planas paralelas.



Fuente: autora.

En la Figura 49, se observa que la tensión de salida del equipo incrementa con respecto al tiempo, pero no muestra una tendencia sigmoideal, como la presentada por el método manual.

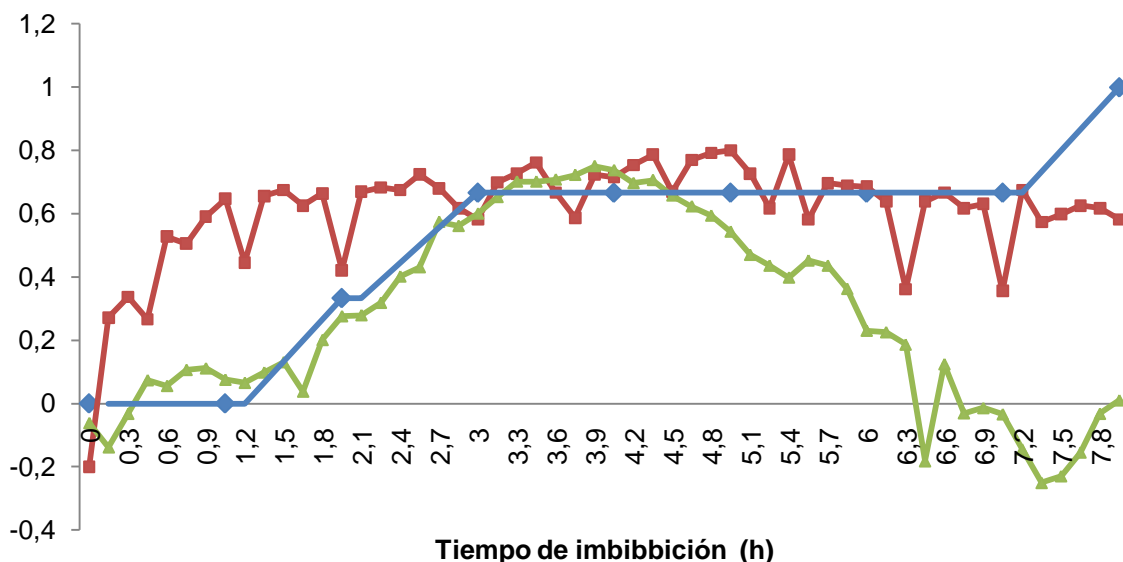


Fuente: autora.

Para el caso de los datos obtenidos con los electrodos tipo FEF, se observa una caída de tensión durante las primeras cuatro horas, que indican un aumento en la capacitancia del sistema medido (semillas, recipiente con agua y regulador de crecimiento), pero después de las 4 horas de imbibición se presenta un aumento inesperado de la tensión, dado que debía haber seguido una forma sigmoideal inversa.

Se realizó la normalización de los datos entre 0 y 1, obtenidos con cada método, para comparar el comportamiento de las señales, como se muestra en la Figura 51. La línea azul representa los datos tomados manualmente, la roja corresponde a los datos de las placas planas paralelas y la verde a los datos invertidos de los FEF.

Figura 51. Comparación de datos de imbibición de arvejas.



Fuente: autora.

Se observa que durante las primeras cuatro horas la línea verde tiene una tendencia similar a la línea azul, pero después de esto, las dos líneas cambian su tendencia de forma opuesta. Esto último, es provocado por los cambios fisicoquímicos presentados en el sistema medido que son debido al comportamiento del regulador de crecimiento adicionado al agua (que no estaba presente en la prueba de imbibición con agua, ver Figura 43).

Por otro lado, la línea roja no muestra una tendencia sigmoideal pero si una tendencia de crecimiento durante las primeras cinco horas, similar a lo que sucede en la prueba de imbibición con agua (Figura 43). Sin embargo, después de las cinco horas, la línea presenta una tendencia opuesta que muestra el efecto del regulador de crecimiento, de forma similar a lo sucedido con la línea verde.

5.4 DETECCIÓN DE MUERTE DE SEMILLAS DE ARVEJA Y FRIJOL.

5.4.1 Materiales y método.

Se utilizaron 30 semillas de arveja y 30 de frijol para realizar este experimento, se dividieron en 3 grupos de 10 semillas, según la especie, así: un grupo de control para realizar las mediciones en forma manual, un grupo para medir los cambios en la señal del electrodo tipo placas planas paralelas y otro para el tipo FEF.

Se utilizó el método del principio de Arquímedes y el modelo electrónico funcional para realizar las medidas de las variaciones en las semillas, similar a lo hecho en el experimento descrito en el numeral 5.3. Las semillas se sumergieron en 30 ml de agua saturada con sal, para observar el efecto que este componente tiene en la variación de volumen de las semillas en etapa de imbibición.

5.4.2 Resultados.

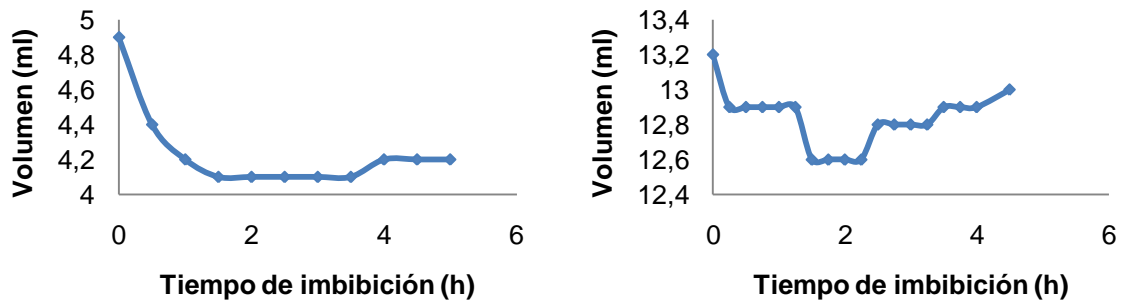
Método del principio de Arquímedes.

Se tomaron datos durante cinco horas a partir del momento en que se introducen las semillas en la solución salina, las variaciones de volumen se midieron utilizando una probeta con agua saturada en sal, para mantener las características experimentales similares en todas las semillas.

En la Figura 52 se muestra la tendencia de decrecimiento de los datos para cada tipo de semilla, durante las primeras horas de imbibición; este es el efecto negativo que tiene el agua saturada con sal en el volumen, lo que se ha denominado muerte de las semillas en la etapa de imbibición. Luego de un periodo

de tiempo, 4 horas para las arvejas y 2,5 horas para los frijoles, se presentó para cada tipo de semilla un incremento en el volumen.

Figura 52. Tasas de imbibición en solución salina, de arvejas (izquierda) y frijoles (derecha) en forma manual.



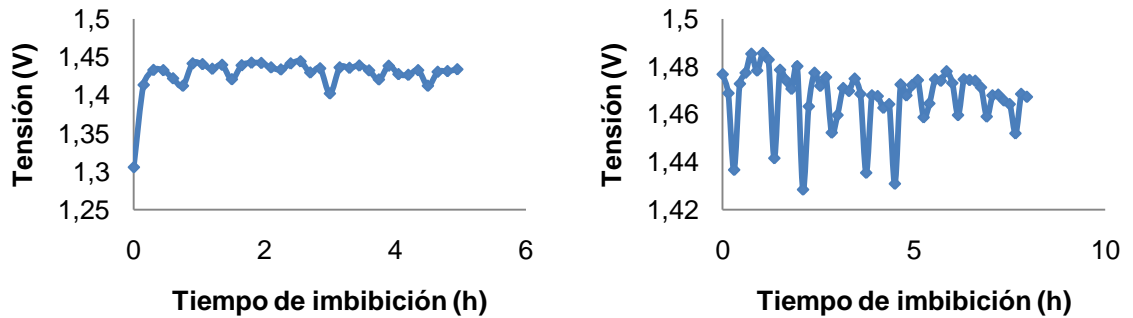
Fuente: autora.

Método del modelo electrónico funcional.

Se programó el equipo para tomar datos cada 9 minutos durante las 5 horas del experimento y se utilizaron los dos tipos de electrodos. Para el caso de los electrodos de placas planas paralelas, se observa en la Figura 53 el comportamiento de las dos clases de semillas, mostrando una tendencia negativa con respecto al tiempo, aunque, con variaciones abruptas en el caso de las semillas de frijol.

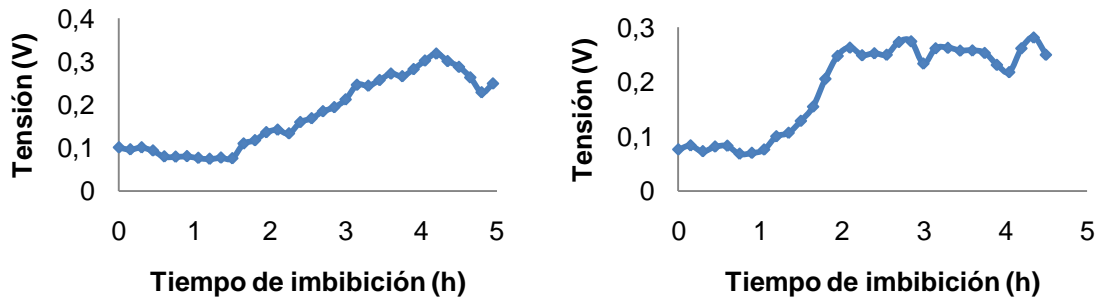
En la Figura 54 se muestra el comportamiento de las semillas utilizando electrodos tipo FEF, durante las primeras horas del experimento se observa en las gráficas una caída en la tensión que corresponde a un aumento en la capacitancia del sistema medido, después de este tiempo se tiene una tendencia de aumento de tensión debido a la disminución en la capacitancia del sistema medido y finalmente se presenta una disminución en la tensión. En el caso de los frijoles se observa un periodo de tiempo casi estable durante las 2 a las 4 horas, aproximadamente.

Figura 53. Etapa de imbibición en solución salina de arvejas (izquierda) y frijol (derecha) usando electrodo tipo placas planas paralelas.



Fuente: Autora.

Figura 54. Etapa de imbibición en solución salina de arvejas (izquierda) y frijol (derecha) usando electrodo tipo FEF.

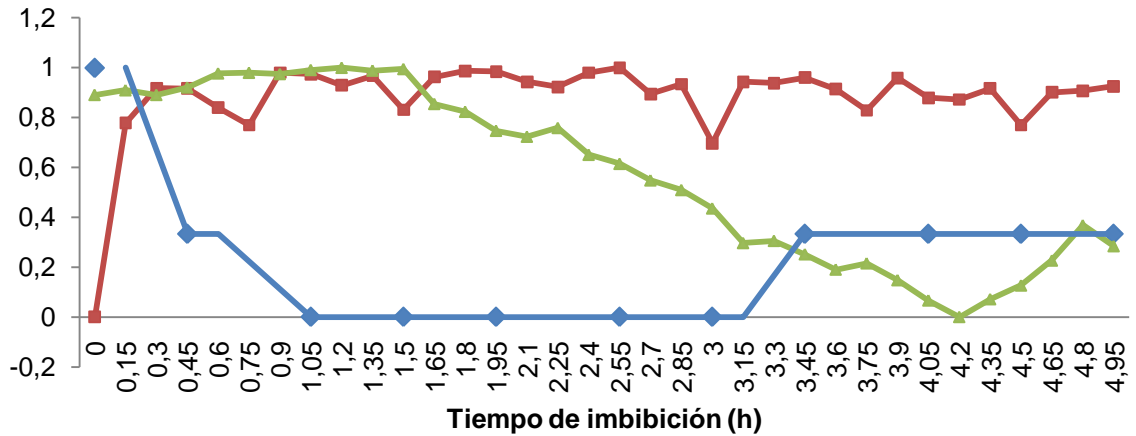


Fuente: Autora.

Se normalizaron los datos, entre 0 y 1, obtenidos con cada método y cada tipo de semillas, para comparar el comportamiento de las señales, como se muestra en la Figura 55 y Figura 56. La línea azul representa los datos tomados manualmente, la roja corresponde a los datos de las placas planas paralelas y la verde a los datos invertidos de los FEF.

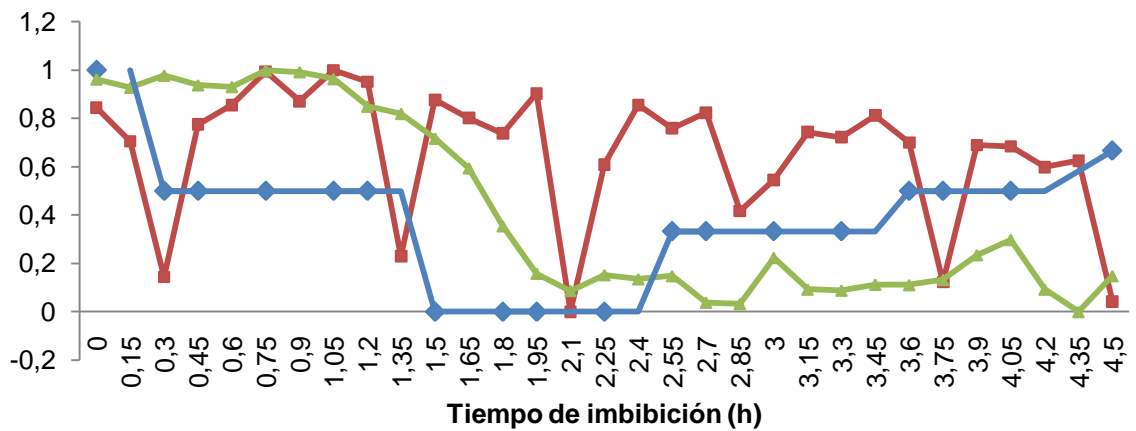
Para los dos tipos de semillas, la línea verde presenta una caída y luego tiende a crecer, mostrando un comportamiento similar a la línea azul pero con un retardo de tiempo. Sin embargo, la línea roja muestra una tendencia negativa pero no es comparable con la tendencia de la línea azul.

Figura 55. Comparación de datos de imbibición de arvejas en sal.



Fuente: Autora.

Figura 56. Comparación de datos de imbibición de frijoles en sal.



Fuente: autora.

Este comportamiento se debe a los cambios fisicoquímicos presentados en el sistema medido que son debido a la reacción de la sal, en grandes cantidades, adicionada al agua (que no estaba presente en la prueba de imbibición con agua), generando que el sistema de medición electrónico no pueda seguir la tendencia de crecimiento, como sí lo hace cuando no está presente esta sustancia (Ver Figura 43).

Por lo tanto, los datos obtenidos por el modelo electrónico funcional cuando se realiza imbibición utilizando agua saturada con sal, muestran un seguimiento retardado en la tendencia sigmoïdal de las semillas.

Al comparar la curva obtenida en forma manual y con el modelo electrónico funcional, utilizando electrodos tipo FEF, se observa que tienen tendencia similar pero en forma inversa. Sin embargo, con los electrodos tipo placas planas paralelas, se observan las variaciones presentadas por las semillas pero la tendencia no es comparable con la obtenida en forma manual. Por esta razón se recomienda utilizar electrodos tipo FEF.

El equipo construido en este proyecto se puede utilizar para detectar las variaciones de volumen de las semillas en la etapa de imbibición y germinación. Sin embargo las tendencias de las señales se ven afectadas cuando se utilizan reguladores de crecimiento o una sustancia que retarde el crecimiento (sal), debido a que se presentan variaciones fisicoquímicas del sistema en el que se encuentra imbibidas las semillas.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Se diseñó un sistema electrónico y de cómputo que permite detectar la variación de volumen en semillas, sin destruirla, sin modificar las condiciones en que se desarrolla y que toma los datos en forma automática.

Se seleccionaron los componentes electrónicos (sensor de campo eléctrico, microcontrolador, protocolo de comunicación, entre otros) necesarios para construir un equipo de medición de variación de volumen de semillas, utilizando un campo eléctrico de baja frecuencia y baja intensidad, teniendo como criterios: un bajo consumo de potencia, un equipo pequeño y portable, una comunicación inalámbrica con el computador y la medición de varios sistemas vegetales al mismo tiempo.

Se construyó un equipo que utiliza campos eléctricos de baja frecuencia (120 kHz), debido a que no se encontró evidencia sobre algún efecto de éste en la germinación y crecimiento de un sistema vegetal; y mide la variación de volumen de semillas almacenando los datos en la memoria interna del equipo.

El equipo implementado muestra repetibilidad al encontrarse la misma curva característica en diferentes momentos de experimentación (ver Figura 25), las pequeñas variaciones en la fuente de alimentación son compensadas al utilizar un filtro analógico, cables blindados, circuitos integrados de bajo ruido y un electrodo de referencia ubicado a 10 cm del electrodo de medida.

Al realizar la comparación de medición con el principio de Arquímedes, utilizando arveja fresca, se obtuvo que el equipo permite medir la variación de volumen de

semillas en la etapa de imbibición y germinación, obteniendo los mejores resultados al utilizar electrodos tipo FEF en comparación con los electrodos de placas planas paralelas.

6.2 RECOMENDACIONES

Para trabajos futuros se puede: realizar pruebas con otro tipo de semillas siguiendo la misma metodología descrita en este trabajo, comparar las mediciones del equipo con un método más preciso que el manual.

Una potencial aplicación del prototipo desarrollado en este trabajo es la detección de la variación de biomasa en plántulas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Álvarez R., Fisiología vegetal, experimentos de laboratorio. Ediciones UIS, departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Bucaramanga, Colombia. Capitulo 7.
- [2] Analog Devices (1993). 16-Bit 100 kSPS Sampling ADC. AD677. Norwood, USA. Rev A.
- [3] Analog Devices. (2003). 256-Position SPI/I2C Selectable Digital Potentiometer. AD5161. Norwood, USA. Rev A.
- [4] Analog Devices. (2005). Single, 12-/14-/16-Bit nanoDAC with 5 ppm/°C On-Chip Reference in SOT-23. AD5620/AD5640/AD5660. Norwood, USA. Rev E.
- [5] Analog Devices. (2007). Micropower, Single- and Dual-Supply, Rail-to-Rail Instrumentation Amplifier. AD627. Norwood, USA. Rev D.
- [6] Analog Devices. (2010). Precision 2.5 V, 5.0 V and 10.0 V Voltage References. REF01/REF02/REF03. Norwood, USA. Rev K.
- [7] Ariza, J. (2005). Sistema prototipo de instrumentación basado en la acción de un campo eléctrico. Trabajo de grado en Ingeniería. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Área de instrumentación. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 102p.
- [8] Azcón-Bieto, J. y Talón, M. (1993). Fisiología y Bioquímica Vegetal. McGraw-Hill/Interamericana. Barcelona, España. pp.581.
- [9] Curtis, H. & Barnes, NS. (2001). Biología (6° edición). Ed. Médica Panamericana. Argentina.
- [10] Fernández, G. y Johnston, M. (2006). Fisiología Vegetal. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile. Capitulo XX.
- [11] Freescale Semiconductor, Inc (2006). Technical Data of Electric Field Imaging Device. MC33794. Denver USA: Motorola, Rev 9.0.
- [12] Galejev, B. & Termen, L. (1991). Faustus of the Twentieth Century, 24 (5), 573–579.
- [13] Jovanić, B., Belča, I. & Kasalica, B. (2001). Effect of a high DC electric field on plant leaves reflectivity. International Journal of Environmental Studies, 1029-0400, 58 (3), 357–363.
- [14] Karcz, W. & Burdach, Z. (1995). The effects of electric field on the growth in intact seedlings and coleoptile segments of *Zea mays* L. BIOLOGIA PLANTARUM Poland, 37 (3), 391-397.
- [15] Kurinobu, S. and Okazaki, Y. (1995). Dielectric Constant and Conductivity of One Seed in Germination Process. Annual Conference Record of IEEE/IAS. pp. 1329–1334.

- [16] Li, X., Larson, S., Zyuzin, A. and Mamishev, A. (2004). Design of Multi-channel Fringing Electric Field Sensors for Imaging– Part I: General Design Principles. Conference Record of the 2004 WEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA.
- [17] Marino, A., Hart, F., & Reichmanis, M. (1983). Weak Electric Fields Affect Plant Development. IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, BME-30 (12).
- [18] Microchip Technology Inc. (2003). PIC16F87XA Data Sheet. 232.
- [19] Okumura, T., Muramoto, Y., & Shimizu, N. (2009). Influence of Electric Field on Plant Weight. 2009 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 15-18.
- [20] Peña J. (2010). Sistema Prototipo de Detección de Crecimiento de Cultivos Celulares. Trabajo de grado en Ingeniería. Escuela de Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- [21] Pozeliene, A. (2001). Influence of Electric Field on the Quality of Flaxseed. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript FP 00 022. III.
- [22] Quintero, N. y Correa C. R. (2011). Comparación de técnicas experimentales para la medición del crecimiento vegetal. Revista Memorias. vol. 9, núm. 15, 81-94.
- [23] Salisbury, F. B. y Ross, C. W. (2000). Fisiología de las plantas: Desarrollo de las plantas y fisiología ambiental. Paraninfo, Thomson Learning, España. 3, 529-546.
- [24] Sena Technologies, Inc. (2008). User Guide for the Parani-ESD100/110/200/210. Korea. Version 1.1.4.
- [25] Smith, J.R. (1996). Field mice: Extracting hand geometry from electric field measurements. IBM Systems Journal, 35, 587-608.
- [26] Soltani, M. and Alimardani, R. (2011). Moisture-Dependent Dielectric Properties of Pea and Black-Eyed Pea. Journal of American Science. 7(4), pp. 60-64.
- [27] Soltani, M. and Alimardani, R. (2011). Design, Development and Calibration of a Portable Capacitive Moisture Meter. Sensors & Transducers Journal, Vol. 129, Issue 6, pp. 24-32.
- [28] Sulaiman, S., Manut, A. and Nur Firdaus, A.R. (2009). Design, Fabrication and Testing of Fringing Electric Field Soil Moisture Sensor for Wireless Precision Agriculture Applications. International Conference on Information and Multimedia Technology. Malaysia, 513-516.
- [29] Taiz, L. and Zeiger, E. (2002). Plant physiology. 3Th edition. Chapter 16, 339-374. M.A., USA: Sinauer Associates Inc.

- [30] Takashima, S. and Asami, K. (1988). Determination of electrical admittance of biological cells. J. Electrostatics. vol. 21, pp. 225-244.
- [31] Texas Instruments Inc. (2004). Switched-Capacitor Voltage Converters with Regulators. LT1054. Dallas, USA. Revised 2004.
- [32] Texas Instruments Inc. (2008). 2.2nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, Low-Power, 36V, OPERATIONAL AMPLIFIER. OPA209, OPA2209, OPA4209. Dallas, USA. Revised 2010.
- [33] Texas Instruments Inc. (2009). Adjustable Micropower Voltage Regulators with Shutdown. LP2950. Dallas, USA. Revised 2009.
- [34] Texas Instruments Inc. (2010). Positive-Voltage Regulators. uA78M00 SERIES. Dallas, USA. Revised 2010.
- [35] Zumbahlen, H. (2008). Linear circuit design handbook. Editorial Elsevier. Capítulo 12.

ANEXO A

MANUAL DE USUARIO DEL EQUIPO

El sistema ha sido desarrollado para medir el proceso de crecimiento de un sistema vegetal vivo (semilla), por medio de un campo eléctrico de baja intensidad y baja frecuencia. El sistema consta de una parte *hardware* que se encarga de generar el campo eléctrico, tomar los datos por medio de electrodos, acondicionarlos y luego enviarlos al computador; el otro componente del sistema es *software* donde se puede configurar el sistema de medición, descargar los datos del *hardware* y almacenarlos en un documento de Excel.

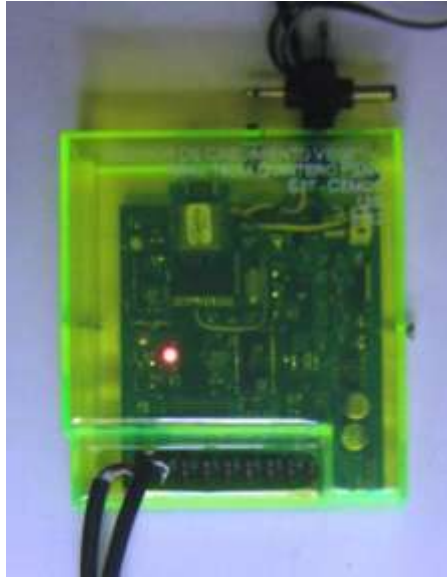
A.1. Hardware

En la Figura 57, se puede observar el equipo físico que consta de una tarjeta electrónica y una carcasa en acrílico transparente en la cual se tiene un interruptor para energizar o desenergizar el equipo, un conector hembra para el adaptador y nueve conectores para electrodos.

Los requerimientos para el buen funcionamiento del *hardware* son:

1. Usar un adaptador con salida de tensión de entre 15 y 25 VDC, y una corriente de mínimo 500 mA.
2. No exponer a temperaturas de más de 40°C.
3. Limpiar con un paño seco, dado que el exceso de humedad o el agua pueden dañar la electrónica.

Figura 57. *Hardware* del prototipo.

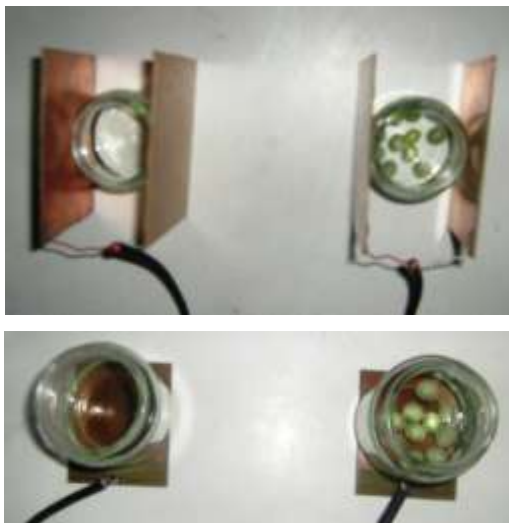


Fuente: autora.

Para comenzar a usar el *hardware*, realice los siguientes pasos:

1. Conectar los electrodos que se desee usar, en los espacios destinados para ello, empezando desde el espacio marcado como E1, continuando con el E2, luego en E3 y así sucesivamente. Puede colocar hasta nueve electrodos a funcionar en el mismo experimento.
2. Colocar los sistemas vegetales dentro del campo eléctrico de los electrodos como se muestra en la Figura 58.

Figura 58. Colocación de las semillas en los electrodos de placas planas paralelas (arriba) y FEF (abajo).



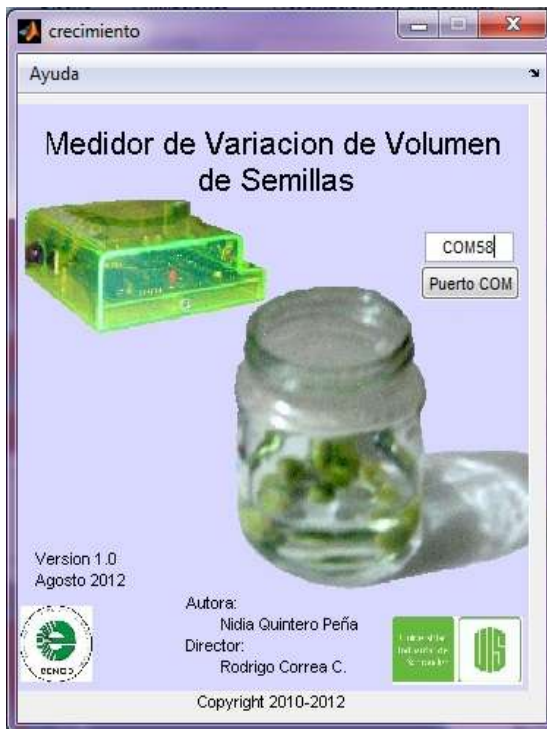
Fuente: autora.

3. Conectar el adaptador a la red eléctrica de 110 Vac y al equipo.
4. Mover el interruptor para energizar, debe iluminarse la luz roja que indica la correcta energización del sistema.

A.2. Software

Este componente permite la configuración, puesta en marcha y descarga de datos del *hardware*. La interfaz de usuario crea y manipula el puerto COM necesario para la comunicación *Bluetooth* con el prototipo y tiene la posibilidad de trabajar como dos tipos de usuarios: el biólogo y el ingeniero, como se muestra en la Figura 59.

Figura 59. Ventana principal de la interfaz de usuario.



Fuente: Autora.

Antes de comenzar a instalar el aplicativo, es importante verificar que se tienen los siguientes requerimientos mínimos:

1. Sistema operativo Windows XP, Vista o Siete.
2. 500 MB o más de espacio en el disco duro.
3. 1 GB o más de memoria RAM.
4. Procesador de 1,8 GHz o mejor.
5. Dispositivo de comunicación por bluetooth.

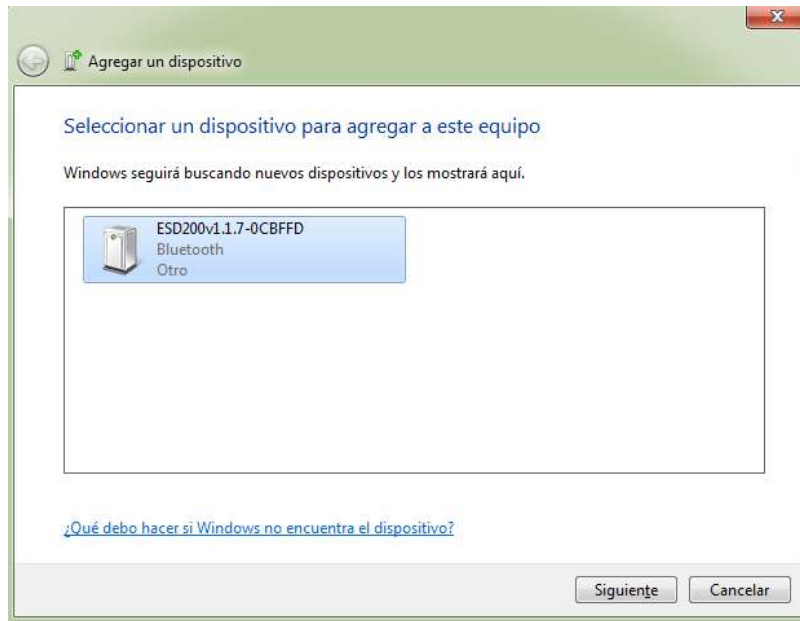
Los requerimientos se han determinado de acuerdo a las pruebas que se han realizado en algunos computadores, sin embargo es posible que funcione en un computador con características similares. Para realizar la instalación siga los siguientes pasos:

1. Ejecutar el archivo de instalación con el nombre “vegetal_pkg”.
2. Aparecerá una ventana de comandos de Windows ejecutando algunos comandos, luego se le pedirá agregar un componente de Matlab que es necesario para que funcione el programa.
3. Al finalizar la instalación, se crean los archivos vegetal.ctf y vegetal.exe en la misma carpeta donde está el instalador.

Antes de usar la aplicación *software*, debe configurar la comunicación inalámbrica así:

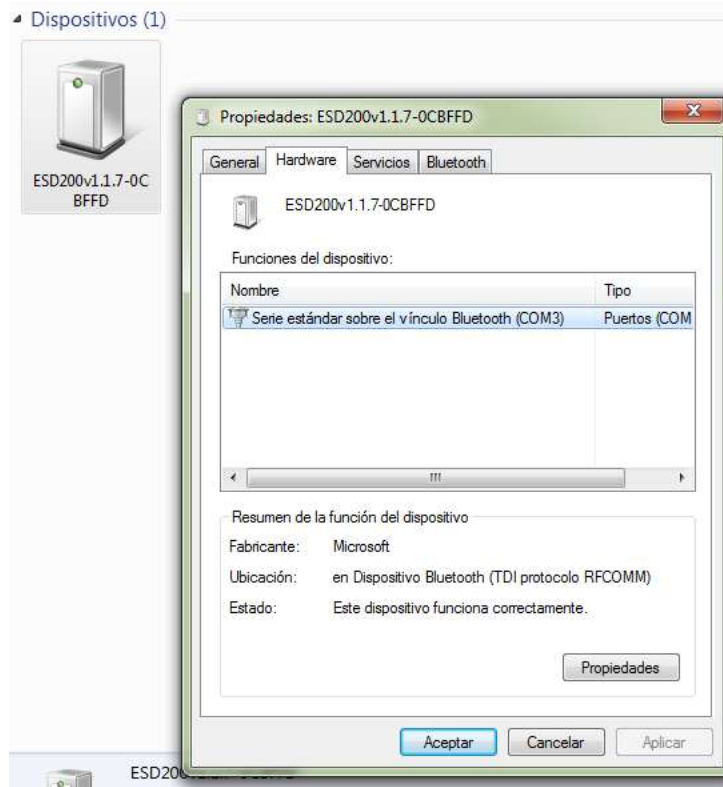
1. Energice el equipo físico como se explicó en la sección anterior.
2. Habilite la comunicación inalámbrica Bluetooth desde su computador. Debe aparecer el ícono de comunicación en la barra de tareas de su computador.
3. Haga doble clic en el ícono de Bluetooth, para que le aparezca la ventana de “Dispositivos e Impresoras”. Haga clic en la parte superior izquierda en la opción “Agregar un dispositivo”, el sistema operativo detectará el equipo y le generará la ventana que se muestra en la Figura 60.
4. Seleccione el ESD200v1.1.7, haga clic en el botón Siguiente, esto generará la aparición de una nueva ventana en la cual debe hacer clic en la opción de “Escribir código de emparejamiento del dispositivo”. El código es 1234.
5. Después de un par de minutos el reconocimiento se tiene establecido. Ahora es necesario conocer el número del puerto COM que se agrega al computador por la comunicación con el equipo físico, esto se puede saber en la ventana de “Dispositivos e Impresoras”; se hace doble clic en el dispositivo y luego en la pestaña de “Hardware”, como aparece en la Figura 61, en la cual el número del puerto es el 3.

Figura 60. Ventana donde se agrega el equipo de medición.



Fuente: Autora.

Figura 61. Ventana que muestra el puerto COM generado por el equipo.



Fuente: Autora.

Para comenzar a disfrutar del aplicativo haga lo siguiente:

1. Dar doble clic en el ejecutable vegetal.exe. Lo cual abrirá la ventana de la Figura 59.
2. En el espacio vacío, encima del botón que dice “Puerto COM”, escriba el nombre y número del puerto que observó en la configuración de la comunicación inalámbrica. Para el caso de este manual es el COM3 como aparece en la figura anterior.
3. Dar clic en el botón “Puerto COM” y esperar un minuto mientras se realizan procesos internos del programa, después aparecerán dos opciones de ingreso: como Biólogo o como Ingeniero (después de escoger una opción debe esperar alrededor de dos minutos para que se abra la comunicación con el hardware).
4. Para el usuario ‘biólogo’ aparece la ventana de la Figura 62, en la cual se puede configurar el hardware modificando la cantidad de electrodos que utilizará en el experimento (de 1 a 9) y el tiempo que se usará entre muestra y muestra del sistema vegetal en crecimiento (desde 0,5 hasta 48 horas). Después de hacer las selecciones debe dar clic en el botón de “Configurar”. Además, puede dar inicio a la toma de datos en el botón “Iniciar” y puede descargarlos dando un nombre al archivo cuya extensión es xls y luego clic en el botón “Descargar”. Al descargar los datos el aplicativo le genera un archivo de Excel dentro de la carpeta donde está el ejecutable.

Un ejemplo del archivo de informe que se genera en Excel, se puede observar en la Figura 63. Se almacena información de la fecha y hora del comienzo de la toma de datos, todos los parámetros de configuración y los datos organizados de forma matricial.

Figura 62. Ventana del usuario biólogo de la interfaz de usuario.



Fuente: Autora.

Figura 63. Ejemplo de informe de resultados en archivo de Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Detos del equipo Medidor de Crecimiento Vegetal								
2	Elaborado por: Mag. Nidia Quintero Peña								
3	UIS - 2012								
4									
5	Inicio de toma de datos								
6	Fecha	2012	7	29					
7	Hora	12	35						
8	Cantidad de electrodos	4							
9	Tiempo de muestreo [h]	0.5							
10									
11	Muestras								
12	Referencias	3,35288368	3,33777120	3,35288368	3,35288368	3,33777120	3,34799609	3,35288368	3,35288368
13		0,0342131	0,03910068	0,01905034	0,01905034	0,01905034	0,01466276	0,01466276	0,01466276
14	Electrodos	8,85799738	2,3388348	2,40852077	2,38135929	2,4857326	2,39387188	2,38591707	2,39478784
15		6,48396252	3,77880184	3,73577074	3,72905667	3,78246406	3,73973815	3,73821223	3,74340037
16		4,2976165	3,5728019	3,57768487	3,57737968	3,58378857	3,58256783	3,5831782	3,58287301
17		3,9945677	3,96100345	3,98572344	3,97351604	3,96039308	3,98724937	3,9845027	3,98633381

Fuente: Autora.

5. El usuario "ingeniero" tiene las mismas opciones del biólogo y además tiene la lectura de los valores iniciales del hardware, de las referencias del sensor de campo eléctrico, de cuatro electrodos acondicionados y no acondicionados. Además de poder modificar el valor de nivel DC y la ganancia del hardware y observar los cambios en forma directa, como se muestra en la Figura 64.
6. En cualquier caso, puede salir del aplicativo desde el símbolo de cerrar (x) que se encuentra en la esquina superior derecha de todas las ventanas.

Nota: después de configurar el sistema y enviar el comando de iniciar la toma de datos, el hardware debe permanecer energizado. El sistema almacenará hasta 124 datos incluyendo los valores de las referencias.

Figura 64. Ventana de usuario ingeniero de la interfaz de usuario.

usuario_ingeniero

Ayuda

Medidor de Variacion de Volumen de Semillas

Datos iniciales

Numero de electrodos
Edit Text

Tiempo de muestreo [h]
Edit Text

Nivel DC [V]
Edit Text

Ganancia [V/V]
Edit Text

Valores sin ajustar (V)

Placa 1
Edit Text

Placa 2
Edit Text

Placa 3
Edit Text

Placa 4
Edit Text

Valores ajustados (V)

Placa 1
Edit Text

Placa 2
Edit Text

Placa 3
Edit Text

Placa 4
Edit Text

Referencias Internas del Equipo

Referencia A [V]
Edit Text

Referencia B [V]
Edit Text

Configuración

1
Electrodos

Tiempo [h]

3.5 V
Nivel DC

10 V/V
Ganancia

Datos

Iniciar

Descargar

prueba 1
Nombre del archivo

Fuente: Autora.