

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN INSTRUMENTO ELECTRÓNICO DE MEDIDA
DE pH PARA TERRENO AGRÍCOLA**

YEISON EDWARD VALDERRAMA LUGO

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director del proyecto

NOEL JAIR ZAMBRANO SANCHEZ

Ingeniero electrónico

ESCUELAS DE CIENCIAS BÁSICAS, TECNOLOGÍA E INGENIERÍA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

IBAGUÉ – TOLIMA

2017

DEDICATORIA

Dedicado especialmente a mi amado Padre celestial, quien me ha dado la vida, salud y demás requerimientos para realizar cada uno de mis proyectos.

A mis padres por el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A mis compañeros del semillero de investigación SIART.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a Dios por su respaldo en la realización de este proyecto, y en general a la culminación de mi carrera como ingeniero en electrónica. Cada asunto grande o pequeño fue superado sólo por Su gracia y favor.

En segundo lugar mi agradecimiento va para el equipo humano de la universidad nacional abierta y a distancia que me acompañaron y contribuyeron no sólo al desarrollo del presente proyecto sino a todo mi proceso estudiantil de pregrado, especialmente a los ingenieros Noel Zambrano y Elber Camelo cuya asesoría fue muy acertada en la puesta en marcha de esta tesis de grado; y a mis compañeros de estudio que trabajaron en el semillero SIART, sus aportes fueron valiosos.

“Intenta no volverte un hombre de éxito, sino volverte un hombre de valor”.

Albert Einstein

“Un hombre sólo tiene derecho de mirar a otro hacia abajo, cuando ha de ayudarlo a levantarse”.

Gabriel García Márquez

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
2. JUSTIFICACIÓN.....	15
3. OBJETIVOS.....	16
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
5. MARCO TEÓRICO.....	18
5.1 ANTECEDENTES.....	18
5.1.1 Dispositivo para monitoreo de temperatura, humedad y pH en lombricultura....	18
5.1.2 AGRO-SENSE: agricultura de precisión utilizando redes de malla inalámbrica.	18
5.1.3 Sistema de riego automatizado.....	19
5.2 FUNDAMENTOS.....	20
5.2.1 El pH.....	20
5.2.1.1 Disociación del agua.....	20
5.2.1.2 Fórmula del pH.....	21
5.3.1.3 Escala del pH.....	21
5.2.2 El pH en el suelo.....	22
5.2.3 Medición del pH.....	23
5.2.3.1 Indicador.....	23
5.2.3.2 Papel tornasol.....	24
5.2.3.3 Potenciómetro o pH-metro.....	24
5.2.4 Electrodo de pH.....	25
5.2.4.1 Electrodo de vidrio.....	25
5.2.4.2 Electrodo ISFET.....	26

5.2.4.2.1 Principales características.....	27
5.2.4.2.2 Disponibilidad comercial.....	28
5.2.4.3 Sensores de fibra óptica.....	28
5.2.4.3.1 Principales características.....	29
5.2.4.3.2 Disponibilidad comercial.....	31
5.2.5 Impedancia.....	31
5.2.6 CAS.....	32
5.2.6.1 Amplificador operacional.....	33
5.2.7 Microcontrolador.....	34
5.2.7.1 Tipos de microcontroladores.....	35
5.2.7.1.1 Microcontrolador PIC de Microchip.....	36
5.2.8 Lenguaje C.....	37
5.2.9 Pantalla (display) LCD 16x2.....	38
6. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO.....	41
6.1 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS.....	41
6.1.1 Elección del sensor (o electrodo) de pH.....	41
6.1.2 Elección del microcontrolador.....	42
6.2 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO.....	44
6.2.1 Descripción general y diseño del instrumento de medición de pH.....	44
6.2.1.1 Módulo alimentación.....	46
6.2.1.2 Módulo de procesamiento.....	47
6.2.1.3 Módulo de visualización.....	48
6.2.2 Diseño de algoritmo y software	48
7. PRUEBAS Y RESULTADOS.....	51
7.1 SIMULACIÓN DE CIRCUITOS CON EL PROGRAMA PROTEUS.....	51
7.1.1 Simulación de una medición sustancia ácida.....	51
7.1.2 Simulación de una medición sustancia neutra.....	52
7.1.3 Simulación de una medición sustancia básica o alcalina.....	54
7.2 PRUEBAS COMPARATIVAS EN EL LABORATORIO.....	55
7.2.1 Primera prueba de laboratorio.....	56
7.2.1 Segunda prueba de laboratorio.....	56

7.2.3 Tercera prueba de laboratorio.....	57
7.3 PRUEBAS COMPARATIVAS EN TERRENO	58
8. IMPACTO SOCIAL, ECONÓMICO Y AMBIENTAL DEL PROYECTO.....	66
8.1 BENEFICIOS A LA COMUNIDAD E IMPACTO SOCIAL	66
8.2 IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO.....	66
8.3 COSTOS DEL PROYECTO.....	67
9. CONCLUSIONES.....	68
REFERENCIAS.....	69
ANEXOS.....	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa entre los sensores de pH.....	41
Tabla 2. Características del PIC16F877A.....	42
Tabla 3. Conversión y escalización de Voltajes.....	50
Tabla 4. Valores primera práctica de laboratorio.....	56
Tabla 5. Valores segunda práctica de laboratorio.....	56
Tabla 6. Valores tercera práctica de laboratorio.....	58
Tabla 7. Resumen de resultados pruebas en terreno.....	63
Tabla 8. Costos del proyecto.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Obtención del ion H ⁺	21
Figura 2. Escala de pH.....	22
Figura 3. Indicadores en solución.....	23
Figura 4. Papel de Merck.....	24
Figura 5. pH-metro combinado.....	25
Figura 6. Diferencias y similitudes entre a) MOSFET y b) ISFET.....	26
Figura 7. Esquema de un sensor óptico.....	29
Figura 8. Conexión no invertida.....	33
Figura 9. Conexión inversora.....	34
Figura 10. Partes internas de un microcontrolador.....	35
Figura 11. Microcontrolador PIC16F877A.....	36
Figura 12. Ejemplo de un programa en lenguaje C.....	38
Figura 13. LCD 16x2 distribución de pines.....	39
Figura 14. Arquitectura interna del PIC16F877A.....	43
Figura 15. Diagrama esquemático del dispositivo.....	45
Figura 16. Diagrama de bloques del instrumento de medición de pH.....	45
Figura 17. Módulo alimentación.....	46
Figura 18. Módulo de procesamiento.....	47
Figura 19. Módulo visualización.....	48
Figura 20. Diagrama de flujo de la programación.....	49

Figura 21. Simulación 1 módulo procesamiento	51
Figura 22. Simulación 1 módulo visualización	52
Figura 23. Simulación 2 módulo procesamiento	53
Figura 24. Simulación 2 módulo visualización	53
Figura 25. Simulación 3 módulo procesamiento	54
Figura 26. Simulación 3 módulo visualización	55
Figura 27. Gráfica de resultados segunda práctica	57
Figura 28. Primera prueba de terreno	59
Figura 29. Segunda prueba de terreno.....	59
Figura 30. Tercera prueba de terreno.....	60
Figura 31. Cuarta prueba de terreno.....	61
Figura 32. Prueba de terreno Rovira.....	62
Figura 33. Gráfica resumen de pruebas.....	64
Figura 34. Gráfica correlación de pruebas.....	64

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Programa del microcontrolador PIC16F877A.....	73
Anexo 2. Primera práctica de laboratorio.....	76
Anexo 3. Segunda práctica de laboratorio.....	79
Anexo 4. Tercera práctica de laboratorio.....	84
Anexo 5. Encuentro Expotech.....	86
Anexo 6. Pruebas de campo.....	88
Anexo 7. Galería de fotos del proyecto.....	91

RESUMEN

El presente documento trata sobre el proyecto de grado “diseño e implementación de un instrumento electrónico de medida de pH para terreno agrícola”. Dicho instrumento le brindará al agricultor información valiosa sobre el pH del suelo donde está llevando a cabo su(s) cultivo(s).

Este proyecto es de carácter instrumentista con aplicación en el área electrónica y herramientas lógicas, que se podrá aplicar a la vida real dándole un valor agregado a los instrumentos de medida de pH que ya existen, se aplicarán conocimientos teórico-prácticos viables, de precisión y mayor simplicidad.

Usar un instrumento digital para la medida del pH el cual a su vez use un electrodo (también conocido como sonda) adecuado para terreno agrícola logrará una mayor vida útil de este instrumento en comparación a los de características análogas, la interfaz gráfica facilitará la lectura de la medida y la calibración del instrumento, el uso de batería de litio también permitirá que el instrumento sea recargable sin necesidad de reemplazarlas.

Este proyecto también presenta una característica importante, podrá ser agregado a un sistema automatizado para recolectar información sobre el estado del pH en terreno agrícola, con este dato importante el agricultor podrá evaluar la situación de su terreno en cualquier estado del proceso y tomar las decisiones pertinentes, esto es con respecto al uso o variación de fertilizantes, agua, abono, entre otros.

ABSTRACT

This document deals with the draft degree "design and implementation of a electronic pH measurement instrument for agricultural land". This instrument will give the farmer valuable information about the pH of the soil where he is carrying out his crops.

This project is instrumentalist character with application in the electronics area and logical tools that can be applied to real life giving added value to instruments average pH existing, viable theoretical and practical knowledge will be applied, precision and simplicity.

Using a digital instrument for measuring pH which in turn use an electrode (also known as a probe) suitable for agricultural land will achieve a longer life of the instrument compared to those of similar characteristics, the graphical interface easier to read measurement and calibration of the instrument, the use of lithium will also allow the instrument is rechargeable without replacing them.

This project also presents a unique advantage, it can be added to an automated system to collect information on the status of pH on farmland or in other scenarios, with this important fact the farmer can assess the status of their land in any stage of the process and take appropriate decisions, namely regarding the use or variation of fertilizers, water, fertilizer, among others.

INTRODUCCIÓN

En los cultivos agrícolas se deben tener en cuenta varios aspectos como son: el tipo de terreno, los fertilizantes apropiados, el abono idóneo, nivel de humedad adecuado, entre otros; uno de los más importantes es el control de pH, se sabe que es un valor que oscila entre 0 y 14, lo cual indica el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia. El control propicio del pH ayuda a prevenir reacciones químicas de fertilizantes, y asegura una mejor asimilabilidad de los diferentes nutrientes propios del suelo.

El pH afecta los cultivos de dos maneras, en primer lugar la disponibilidad de los nutrientes en el suelo, para que la planta pueda absorberlos éstos tendrán que estar disueltos, los valores extremos de pH pueden provocar precipitación de ciertos nutrientes y por tanto presentarse en forma no disponible para la planta; en segundo lugar el proceso de absorción por parte de las raíces de la planta, niveles extremos de pH la absorción puede ser excesiva llegando al punto de toxicidad, tal es el caso de elementos como el aluminio.

El presente documento detalla el proyecto de diseño e implementación de un instrumento digital que mida de manera precisa y confiable el pH del suelo, especialmente los terrenos agrícolas, ya se sabe que es importante conocer el nivel de pH en un cultivo por las razones anteriormente expuestas, por lo tanto es imperativo una medida exacta. Aquí es fundamental la electrónica en la instrumentación, con los conocimientos ingenieriles aplicados al proyecto se desarrollará dicho dispositivo para tal fin.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El departamento Tolima es rico en terrenos agrícolas, así lo describió el diario El Tiempo en una publicación de su sitio web titulada “El Tolima es líder en producción de arroz, café, maní y arracacha” el 7 de abril de 2009 (artículo basado en el Anuario Estadístico del Sector Agropecuario de ese mismo año), otros cultivos que se dan en esta región son el trigo, el cacao y diversos árboles frutales.

Cada planta necesita nutrientes tomados del suelo en diferentes cantidades y ésta es la razón por la que se requiere un rango particular de pH para optimizar el desarrollo. El nivel de pH en unos casos disminuirá la solubilidad, como ocurre en suelos alcalinos, con lo que las plantas no podrán absorber los elementos del suelo; en otros el aumento de la solubilidad debida al pH, propio de suelos ácidos, hará que para determinados elementos sea máxima, llegando al punto de toxicidad. Por lo cual es sumamente importante conocer el nivel de pH y para ello se emplean medidores de pH.

Actualmente el costo de un medidor de pH oscila entre \$800.000 y \$7'500.000, se encuentran mayormente para laboratorios donde la medición se realiza sobre soluciones líquidas. En Colombia, los instrumentos para medida de pH directa del suelo son pocos, de costos elevados y difíciles de conseguir, son criterios que muy probablemente impiden a la comunidad del sector agrícola la obtención de un producto como estos.

Teniendo en cuenta lo anterior, podemos determinar que es indispensable conocer el nivel preciso de pH en un cultivo dado, para que el agricultor evalúe la situación y aplique insumos y demás requerimientos de ser necesario.

2. JUSTIFICACIÓN

El artículo “Agricultura limpia” publicado el 6 de octubre de 2014 en la página web del fabricante de pH-metros Hanna Instruments indica que el pH del suelo/sustrato que rodea las raíces de un cultivo, juega un papel fundamental a la hora de valorar la cosecha que de él se espera; tanto es así que, si el pH del suelo/sustrato es inadecuado, la cosecha puede disminuir hasta tal punto que no sea interesante mantener el cultivo.

Todos los consumidores tienen derecho a adquirir productos y servicios de alta calidad, especialmente aquellos que provienen de la industria alimenticia o del sector agropecuario, de igual manera los productores deben estar en un constante mejoramiento de sus procesos aplicados para garantizar un excelente resultado.

Una información veraz en el control de calidad de este tipo de productos es una herramienta imprescindible al agricultor, pues sabrá qué tratamiento debe darle a su cultivo, todo esto con la misión de satisfacer el mercado con un producto nutritivo y saludable. Aquí es donde cobra importancia la medida del pH porque un instrumento electrónico que brinde una medida exacta le dará al agricultor opciones para implementar las acciones que le permitan mantener su cultivo en un suelo con un pH controlado y óptimo para su desarrollo.

Otro criterio muy importante es el costo del instrumento de medición de pH, un bajo costo permitirá que el agricultor, agrónomo o sencillamente un aficionado al agro pueda adquirir fácilmente y con poca inversión un medidor de pH idóneo para suelos.

Este proyecto pretende brindar al agricultor de nuestra región un instrumento de medición de pH directo al suelo de calidad, a bajo costo y con las características de un medidor de pH de las marcas más reconocidas.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un instrumento electrónico para medición de pH en los diferentes terrenos agrícolas cuyas características de precisión, confiabilidad, portabilidad y simplicidad sean de alto grado y especialmente de bajo costo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar la información precisa para la implementación de un sensor de pH.
- Seleccionar el electrodo de pH idóneo para la toma de muestras en terreno agrícola.
- Diseñar y simular por computadora el circuito electrónico del instrumento de medición de pH.
- Programar el microcontrolador con un software que sea capaz de tomar el valor análogo de la medición de pH y digitalizarla para luego ser visualizada.
- Implementar una pantalla LCD como visualizador de la medida realizada de acuerdo a la escala estándar de pH.
- Realizar el montaje de todos los componentes en la baquelita con el circuito diseñado junto con el electrodo, realizando pruebas, mediciones, calibración y ajustes.

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo al propósito de este proyecto la metodología es de tipo aplicada, procura brindar una solución a una necesidad agrícola mediante la aplicación de los conocimientos adquiridos en diferentes áreas de la ingeniería electrónica y la química, proponiendo el desarrollo de un instrumento de medición que permitirá al sector agrícola conocer el valor del pH del suelo en los que tiene sus cultivos, y con base en ello tomar acciones pertinentes.

La metodología de este proyecto se desarrollará en tres fases de acuerdo a los objetivos planteados. A continuación se describen las fases a realizar:

- Fase 1: Recolección de información primaria y secundaria

Consultas a expertos (agricultores, agrónomos, ingenieros electrónicos y profesionales químicos) y búsqueda en diferentes fuentes documentales para obtener un marco teórico muy completo con las teorías, experimentos y antecedentes que enriquezcan el presente proyecto.

- Fase 2: Diseño e implementación

Esta fase consta de dos etapas de acuerdo con el cronograma de actividades planteado más adelante:

Etapa 1. Diseño y simulación del circuito electrónico para procesar la medida tomada por el electrodo y visualizarla en un display lcd, todo esto se realiza con software especializado.

Etapa 2. Implementación de un electrodo idóneo para la medida de pH en terreno agrícola, montaje de componentes electrónicos en placa pcb y del display lcd; primeras pruebas.

- Fase 3: Análisis de pruebas y ajustes

Pruebas en el laboratorio y en campo agrícola, registro y análisis de los resultados obtenidos, ajustes a posibles errores, reingeniería y estadísticas.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 ANTECEDENTES

5.1.1 Dispositivo para monitoreo de temperatura, humedad y pH en sistemas de lombricultura

Según el artículo de Bernal, Chávez, Ospina y Gómez (2010) se presenta el diseño e implementación de un dispositivo electrónico para supervisar los sistemas de lombricultura, medir las variables pH, temperatura y humedad del ambiente durante un tiempo específico designado por el usuario, almacenándolas temporalmente para transferirlas por comunicación serial a una computadora, y luego convertirlas mediante un software diseñado para tal fin, en un archivo plano que puede manipularse en cualquier hoja de cálculo.

Con este producto tecnológico, se pretende mejorar los métodos de medición de variables y adquirir datos experimentales. El dispositivo está constituido por un sensor de temperatura resistivo de platino, un sensor de pH y conductividad integrada, y un sensor de humedad para exteriores, configurados en una tarjeta electrónica portátil que visualiza las variables anteriormente descritas, durante el tiempo de medición y además, permite al usuario programar el tiempo de medición.

5.1.2 AGRO-SENSE: agricultura de precisión utilizando redes de malla inalámbrica basadas en sensores

En el artículo de Anurag, Siuli, y Somprakash (2015) se menciona un proyecto muy interesante sobre la construcción de una red inalámbrica de sensores para medición de pH del suelo, la conductividad eléctrica del suelo, la temperatura y la humedad del suelo, que consiste en 286 nodos y 12 sub nodos colocados en diferentes lugares en un campo de cultivo en el que pretenden capturar estas características del suelo o de la atmosfera de forma coordinada, comunicándose por medio de radiodifusión digital de bajo consumo basada en un microcontrolador como el chipcon CC2420 y desarrollando un nuevo

algoritmo de enrutamiento estático adecuado para la aplicación de detección y transporte de los datos de los sensores a la estación central por multi-saltos, para ampliar la distancia de comunicación de la radiodifusión de bajo consumo.

En este trabajo se ha desarrollado la arquitectura de precisión, agricultura basada en redes de sensores inalámbricos. La arquitectura se compone de tres componentes distintos: (a) nodos inteligentes con sensores/actuadores; (b) la conexión inalámbrica malla de red para la comunicación y el diseño de un nuevo enrutamiento algorítmico y; (c) el control y accionamiento. El diseño del sensor se realiza con base en los parámetros para ser detectados para los tipos más comunes de los cultivos. Hemos incluido cuatro parámetros, el pH del suelo, la conductividad eléctrica del suelo, la temperatura y la humedad del suelo.

5.1.3 Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro

El objetivo del trabajo registrado en el artículo de Castro, Águila, Quevedo, Kleisinger, Tijerina y Mejía (2008) fue desarrollar un sistema de riego automatizado en tiempo real para determinar el momento oportuno y cantidad de riego, monitoreado por medio de tecnologías de información (TI). El estudio se realizó en el Colegio de Postgraduados del Campus Montecillo, del 10 de junio al 11 de septiembre de 2006. El sistema se compone de un programa de cómputo y un dispositivo de control (datalogger CR10X Campbell Scientific).

El sistema considera tres estrategias de riego las cuales fueron probadas. En la primera estrategia de riego se utilizó un lisímetro de pesada, en la segunda el contenido volumétrico del agua en el suelo fue medido con un sensor TRIME TDR y para la tercera se usó el método del balance hídrico climático con base en la evapotranspiración de referencia (ET_o) (PenmanMonteith).

Se evaluó el funcionamiento general del sistema de riego y se monitoreo a través de internet y dispositivos móviles por medio de una computadora central configurada como servidor (Web y WAP). Se calculó el rendimiento del cultivo de prueba calabaza 'zucchini grey' (cucurbita spp.), el consumo de agua de cada estrategia de riego y

productividad de agua. Los resultados obtenidos mostraron que es posible automatizar y controlar la aplicación del agua de acuerdo a las estrategias de riego considerando un programa de riego, una unidad de control y usando tecnologías de información

5.2 FUNDAMENTOS

5.2.1 El pH

El pH es utilizado en todo el mundo para referenciar la fórmula del *potencial de Hidrógeno* (H^+), es decir la cantidad del ion hidrógeno que existe en una solución. Las diferentes sustancias que están a nuestro alrededor poseen un nivel de pH diferenciado que los caracteriza y que los hace útiles o beneficiosos para determinados casos. (Importancia, 2016).

La escala del pH se establece en torno a lo que se supone es el nivel medio, es decir el *agua pura*. Este recurso natural se considera como el punto medio entre los dos extremos, por un lado el extremo ácido y por el otro extremo alcalino. Para comprender el pH se debe estudiar primeramente las propiedades y estructura molecular del agua en su estado puro.

5.2.1.1 Disociación del agua

El agua tiene bajo grado de ionización, es decir que la mayor parte de sus moléculas no están disociadas o disgregadas. Sólo un reducido número de moléculas sufre disociación, generando iones positivos (H^+) e iones negativos (OH^-).

En agua pura a $25^{\circ}C$ sólo 1 (una) molécula de cada 10'000.000 está disociada (ver figura 1), por lo tanto la concentración de H^+ es de 10^{-7} . Por esto, el pH del agua pura es igual a 7, esto tiene que ver con la escala estándar, punto a tratar posteriormente.

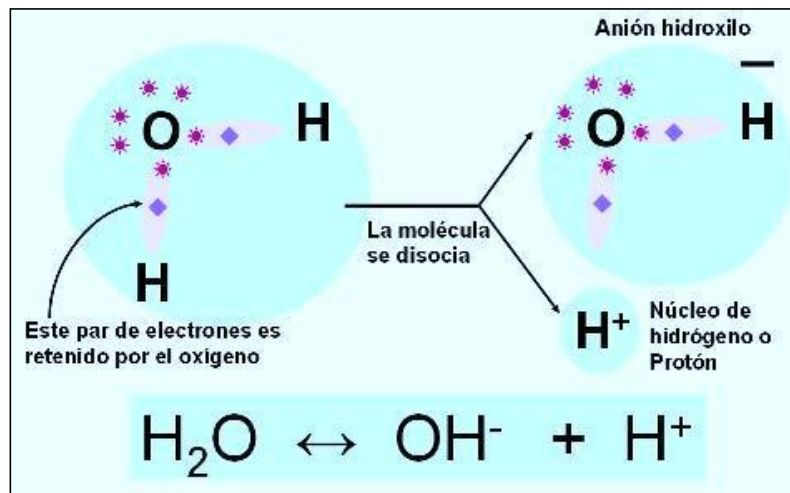


Figura 1. Obtención del ion H^+ (Nysolutionsltd, 2016)

5.2.1.2 Fórmula del pH

El químico danés Søren Peter Lauritz Sørensen (Havrebjerg, 9 de enero de 1868-Charlottenlund, 12 de febrero de 1939) originalmente definió el pH como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno, es decir: (Wikipedia, 2016)

5.2.1.3 Escala del pH

El estándar internacional propone la escala de 0 a 14, donde el 7 es el punto neutro, los extremos se caracterizan por esto:

- Inferior a 7 son sustancias ácidas, ceden electrones (H^+). Sabor agrio, como el jugo de limón y el vinagre, producen irritación a la piel causando sensaciones punzantes. En el ámbito biológico son centrales para el metabolismo de las proteínas. Cambian el papel tornasol de azul a rojo. Disuelven o reaccionan con los metales y neutralizan las bases.

- Superior a 7 son sustancias básicas o alcalinas, capta electrones (e^-). Tienen sabor amargo, son deslizantes al tacto. Las bases fuertes son cáusticas a la piel y las proteínas, tal es el caso de la soda cáustica. Cambian el papel tornasol de rojo a azul y neutralizan los ácidos. (Educando, 2016).



Figura 2. Escala de pH (Educando, 2016)

5.2.2 El pH en el suelo

El pH interviene directamente en el desarrollo vegetal, de él depende la disponibilidad y solubilidad de los nutrientes y materia orgánica encontrados en el suelo. Cada planta necesita elementos en diferentes cantidades y esta es la razón por la que requiere un rango particular de pH para optimizar su crecimiento. En los casos donde

disminuya la solubilidad, las plantas no podrán absorber los elementos del suelo; en los otros, el aumento de la solubilidad debida al pH, hará que para determinados elementos sea máxima, llegando al punto de toxicidad. (Madridmasd, 2007).

5.2.3 Medición del pH

En la actualidad hay varias maneras de medir el nivel de pH: dependiendo del propósito, del ambiente (esto es, en un laboratorio, en sólidos, en disolventes, directamente en el suelo, etc.) y de la disponibilidad de recursos. Teniendo en cuenta lo anterior se puede escoger el método o herramienta más conveniente. Algunas maneras de medir el pH son:

5.2.3.1 Indicador

La más simple consiste en emplear un indicador ácido-base, una sustancia que presenta coloraciones bien definidas dependiendo de la acidez de la solución. (Documentslide, 2015).



Figura 3. Indicadores en solución (Photobucket, 2016)

5.2.3.2 Papel Tornasol

También se utilizan indicadores como papel tornasol azul y rojo y dependiendo la coloración que se adquiera, se puede clasificar a una sustancia como ácido o base. Dentro de este grupo se encuentran las tiras de papel pH, de Merck, Mallinckrodt, Fisher, éstas indican los pH a partir de 1 hasta 14, comparando el resultado de la tira contra el patrón de pH que tiene el recipiente de cada marca.



Figura 4. Papel de Merck (Ehu, 2016)

5.2.3.3 Potenciómetro o pH-metro

Un pH-metro mide la diferencia de voltaje en una disolución, es un voltímetro que junto con los electrodos, al ser sumergidos en una sustancia, generan una corriente eléctrica, esta corriente eléctrica dependerá de la concentración de iones de hidrógeno que presente la solución. La parte más importante del sistema es el electrodo, cuyo potencial depende del pH. (Gabsystem, 2016)



Figura 5. pH-metro combinado (Gabsystem, 2016)

5.2.4 Electrodo de pH

Básicamente se encuentran tres tipos de electrodos en el comercio: el electrodo combinado de vidrio, el tipo ISFET y los de sensor óptico. A continuación una descripción de cada uno.

5.2.4.1 Electrodo de vidrio

También llamado electrodo combinado, mide la diferencia de potenciales entre los dos lados del bulbo de vidrio, para medir estos potenciales debe existir un circuito cerrado, el cual se cierra a través de soluciones internas del electrodo y la solución externa que se mide, y es dirigida al medidor de pH. Cuando el electrodo se sumerge en la solución de prueba, la bombilla de vidrio detecta los iones de hidrógeno como milivoltios, debido a la carga positiva de los iones de hidrógeno. El electrolito o la solución interna captan la señal en milivoltios de la bombilla de vidrio. Esa señal luego pasa al electrodo interno. El alambre de Ag/AgCl (por ejemplo) transmite esa señal al cable del electrodo que va al medidor.

El electrodo de referencia que contiene el electrolito o la solución de llenado genera un bajo voltaje constante, que se transfiere al alambre de Ag/AgCl. Luego, el

alambre transmite la señal, que puede ser considerada un "control" medido para el cable del electrodo. El circuito se cierra con una cantidad diminuta de solución interna del electrodo de referencia que pasa a través de una membrana porosa hecha de mechas de cerámica. Esta membrana o empalme, como se lo denomina, se encuentra en el cuerpo del electrodo. El medidor de pH mide la diferencia entre el electrodo interno y el electrodo de referencia en milivoltios de corriente directa. Esta lectura de milivoltios luego es leída por el medidor y se muestra en unidades de pH. (Wikipedia, 2016).

5.2.4.2 Electrodo ISFET

El ISFET fue propuesto por primera vez en 1970. Su principio de operación es similar al de transistor MOS. A diferencia de éste, el ISFET no posee una compuerta metálica y el dieléctrico de esta misma región se expone directamente al analito. Es decir, utilizan como principio de medida la modulación del canal del transistor mediante la diferencia de tensión que se establece entre el analito y la puerta del dispositivo. La tensión de salida del transistor es función del pH de la disolución. (Docplayer, 2006).

El transistor NMOS tiene un sustrato tipo p (bulk) y dos regiones tipo n (source y drain). Esta estructura es cubierta con capa aislante de óxido de silicio (SiO_2), la cual a su vez se conecta a una compuerta metálica:

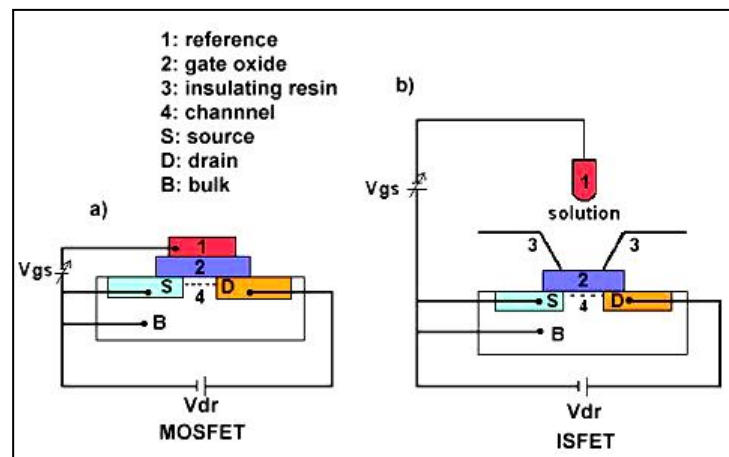


Figura 6. Diferencias y similitudes entre a) MOSFET y b) ISFET (Docplayer, 2006)

Si un voltaje positivo (respecto al Bulk) es aplicado al gate ($V_{GS} > 0$), los electrones (que son portadores minoritarios en el sustrato) son atraídos a la superficie del semiconductor. En consecuencia, se crea un canal de conducción entre source y el drain. La conductividad de este canal puede ser modulada ajustando el valor del campo eléctrico mediante V_{GS} . Al mismo tiempo un voltaje V_{ds} puede ser aplicado, lo cual redundará en una corriente de Drain (I_D) entre drain y el source.

En el caso del ISFET, el gate es reemplazado por el analito y la capa de SiO_2 entra en contacto directo con el analito. La parte metálica del electrodo de referencia puede ser considerada con la puerta del MOSFET.

En los ISFETs, la corriente I_D fluye a través del canal, la resistencia del canal depende del campo eléctrico perpendicular a la dirección de la corriente. También depende del voltaje a través de la capa de SiO_2 . Por lo tanto la corriente I_D depende del potencial de interfaz que se desarrolla entre el óxido y el analito.

El SiO_2 , utilizado como aislante en la construcción del MOSFET, no es la mejor elección cuando se trata de ISFET ya que parte de su funcionamiento depende de la respuesta del SiO_2 al pH; en este caso se utilizan Al_2O_3 , Si_3N_4 y Ta_2O_5 cuyas propiedades químicas en lo que a ello refiere resultan más convenientes. (Docplayer, 2006).

5.2.4.2.1 Principales Características

- El sensor de ISFET en contraposición con el de vidrio es mucho más pequeño (algunos pocos mm^2).
- Son sensibles a la luz. Este fenómeno está vinculado a la ausencia de un metal sobre el dieléctrico de la puerta del ISFET, y también, al hecho de que a la hora de encapsularlo se deja al descubierto tanto parte de las difusiones como la puerta selectiva a iones que esté en contacto con la solución a analizar.
- Los ISFETs presentan una inestabilidad térmica que se traslada a las medidas. Generalmente es necesario que el sensor funcione a temperatura constante para lograr resultados confiables. En se explican otras técnicas para independizarse de estos problemas.

- Uno de los problemas importantes que afectan a los ISFETs es el de la deriva temporal de la señal de respuesta. Si bien se han realizado trabajos para estimarla y corregirla sigue siendo un problema abierto.
- El proceso de encapsulación y aislamiento de los contactos eléctricos es el más crítico de la fabricación del sensor ya que de él depende el buen aislamiento eléctrico del dispositivo y su tiempo de vida. Una de las causas más importantes de la degradación del sensor es la filtración de la solución líquida, provocando corrientes de fuga entre los contactos y se podría provocar un cortocircuito. (Docplayer, 2006).

5.2.4.2 Disponibilidad Comercial

Si bien el sensor de ISFET se conoce desde hace más 30 años, recién en la última década empezaron a aparecer a nivel comercial y su desarrollo es todavía incipiente. Los ISFETs se comercializan como parte de un electrodo que tienen un tamaño y una presentación similar a los sensores de vidrio. Las empresas que comercializan ISFETs son: Beckman Coulter, Belswan, Bioanalytical Systems, Delta TRAK, Elf Aquitaine, Elec, Fisher, Honeywell, Horiba, Lazar Res. Labs., Mettler Toledo, Nisso, Orion, Denver, Radiometer, Sanwa Tsusho, Sentron, Sera, Spectrum y Team Labs. Si bien no se realizó una búsqueda exhaustiva no todos estos fabricantes continuaban a la fecha comercializando estos sensores y en aquellos que se encontraron precio, éste era muy superior a los de vidrio (mayor de 500 dólares). (Docplayer, 2006).

5.2.4.3 Sensores de Fibra Óptica

Los sensores de fibra óptica consisten en un indicador inmovilizado, cuyas propiedades ópticas se modifican en función de la concentración de analito presente en la muestra. La señal óptica así generada es conducida a continuación a través de una fibra óptica hasta un detector, para más tarde ser amplificada y procesada convenientemente: (Docplayer, 2006).

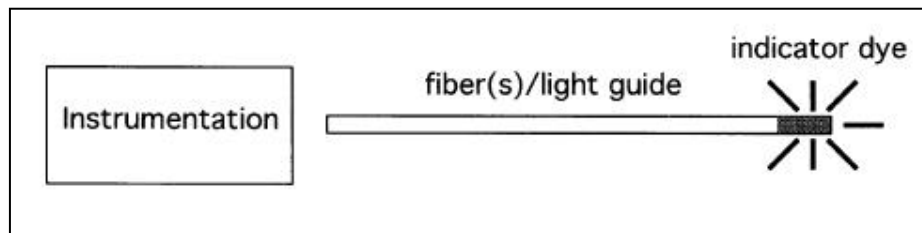


Figura 7. Esquema de un sensor óptico (Docplayer, 2006)

Los sensores que funcionan por absorbancia se rigen por la ley de Lambert-Beer, que establece una relación de proporcionalidad directa entre la concentración de sustancia absorbente y la cantidad de luz absorbida por ésta, para una determinada longitud de onda:

$$A_{\lambda} = \log \frac{I_0}{I_T} = \varepsilon_{\lambda} l c$$

Donde A es la absorbancia de la muestra (adimensionado), I_T e I_0 son los flujos fotónicos transmitido e incidente, respectivamente, l es el paso óptico (espesor atravesado por el haz de luz, en cm), c es la concentración de la sustancia absorbente (en mol.L⁻¹) y ε_{λ} es el coeficiente de absorción molar, característico para cada longitud de onda (en mol⁻¹.L cm⁻¹). (Docplayer, 2006).

5.2.4.3.1 Principales Características

- Los sensores de fibra óptica no requieren señal de referencia, esto aumenta la estabilidad de la medida y reduce los costos de fabricación.
- La utilización de fibras ópticas de baja pérdida como guías de luz posibilita la medida a grandes distancias. Además, pueden transmitir mucha más información que los cables eléctricos, debido a su mayor ancho de banda.
- La flexibilidad de las guías de luz, junto a la separación física que éstas introducen entre el terminal sensible y el transductor y el hecho de que soportan medios hostiles como la presencia de radiaciones electromagnéticas o ionizantes, condiciones extremas de temperatura o el ataque de ácidos o bases presentes en

las muestras, posibilitan la utilización de los optrodos en multitud de procesos industriales.

- A pesar de las ventajas que poseen los sensores ópticos, para poder optimizar un método basado en este tipo de medidas es necesario tener en cuenta una serie de factores limitantes:
- La señal óptica detectada por el equipo de medida debe proceder única y exclusivamente del indicador. Por este motivo, debe evitarse la exposición del terminal sensible a la luz ambiente, o bien modular la señal procedente del indicador con objeto de poder diferenciarla de la luz externa.
- La exposición durante horas del sensor a fuentes de luz puede provocar la fotodegradación de los indicadores. Por otro lado, éstos se encuentran generalmente inmovilizados en membranas o soportes poliméricos en los que, en algunas ocasiones, puede producirse lavado. Los avances introducidos en el campo de los sensores ópticos han subsanado estos dos inconvenientes introduciendo nuevos métodos de medida en los que la cantidad de analito presente en la muestra no depende de la cantidad de indicador inmovilizado en el terminal sensible. En el resto de métodos ópticos se evita, en la medida de lo posible, la influencia de estos factores mejorando los procedimientos de inmovilización, utilizando indicadores fotoestables o bien con la oportuna calibración del sensor.
- En algunos casos pueden presentar tiempos de respuesta elevados.
- La existencia de pocos procesos en los que la interacción analito-indicador sea completamente reversible condiciona el carácter desechable o de obligada regeneración del sensor.
- Una de las principales desventajas que presentan los optrodos, es que no miden actividad, sino concentración, siendo por ello su señal analítica fuertemente dependiente de la fuerza iónica del medio. (Docplayer, 2006).

5.2.4.3.2 Disponibilidad Comercial

Ocean Optics, Inc. es una de las pocas empresas que vende este tipo de sensores ópticos de pH sin embargo la información que presenta en su sitio web es corta. Su costo es mayor a los 1000 dólares y los indicadores cuestan 50 dólares (no establece el tiempo de vida de los mismos). Asimismo los rangos de medición varían entre 6,5 y 12 unidades de pH. (Docplayer, 2006).

5.2.5 Impedancia

El conocimiento de la impedancia eléctrica es a menudo imprescindible para diseñar componentes, sistemas y circuitos electrónicos. Por ejemplo, para diseñar un componente electrónico se debe saber la impedancia de los materiales de que está constituido; para diseñar un filtro hay que saber cómo se comporta cada componente en la banda de paso y en la banda rechazada; para aumentar el ancho de banda de un amplificador hay que conocer la impedancia de sus componentes pasivos a alta frecuencia, distinta de su impedancia a baja frecuencia. (Pallás, 2006).

La impedancia se simboliza con una Z , la diferencia de potencial es el voltaje V y el flujo es la corriente I , entonces $Z = V / I$

Cuando se trata de un circuito puramente resistivo, en donde no existe diferencia de fase entre tensión y corriente, esta relación no es más que la famosa *Ley de Ohm* y la impedancia es la resistencia eléctrica. Cuando un circuito tiene elementos reactivos y por él circula corriente alterna, la impedancia pasa a ser compleja, es decir, existe diferencia de fase entre la tensión y la corriente dependiente de la frecuencia. Además, el valor de la impedancia depende de la frecuencia. (Pallás, 2006).

La impedancia es sencillamente la oposición al paso de la corriente que incluye la resistencia y la reactancia (es el equivalente a la resistencia pero en los condensadores y las bobinas), esta última se puede representar en términos de vectores como la parte imaginaria. La impedancia puede representarse en forma binómica como la suma de una parte real y una parte imaginaria:

$$Z = R + jX$$

R es la parte resistiva o real de la impedancia y X es la parte reactiva o imaginaria de la impedancia. Básicamente hay dos clases o tipos de reactancias:

- Reactancia inductiva o X_L : Debida a la existencia de inductores.
- Reactancia capacitiva o X_C : Debida a la existencia de capacitores. (Pallás, 2006).

5.2.6 CAS

Un circuito acondicionador de señales (CAS) es un dispositivo que convierte un tipo de señal electrónica en otro tipo de señal. Su uso principal es convertir una señal que puede ser de difícil lectura mediante instrumentación convencional en un formato que se puede leer más fácilmente. Al ejecutar esta conversión ocurren numerosas funciones. Entre ellas: (Omega, 2016).

- Amplificación: Cuando una señal se amplifica, se incrementa la magnitud de la señal. La conversión de una señal de 0 - 10mV a una señal de 0 - 10V es un ejemplo de amplificación.
- Aislamiento eléctrico: El aislamiento eléctrico rompe la ruta galvánica entre la señal de entrada y la señal de salida. Esto es, no hay un cableado entre la entrada y la salida. La entrada normalmente se transfiere a la salida mediante su conversión en una señal óptica o magnética, luego se reconstruye en la salida. Al romper la ruta galvánica entre la entrada y la salida, se impide que las señales no deseadas de la línea de entrada pasen hasta la salida. Se requiere aislamiento cuando se debe hacer una medición en una superficie con un potencial de voltaje muy por encima del suelo. El aislamiento también se usa para evitar los ciclos de tierra.
- Linealidad: Convertir a una señal de entrada no lineal a una señal de salida lineal. Esto es común para señales de termopar.
- Compensación de unión fría: Se usa para termopares. La señal del termopar se ajusta para compensar las fluctuaciones a temperatura ambiente.

- Excitación: Muchos sensores requieren una forma de excitación para funcionar. Los calibradores de tensión y los RTD son dos ejemplos comunes. (Omega, 2016).

5.2.6.1 Amplificador operacional

Los amplificadores operacionales son circuitos integrados que sirven para amplificar señales de voltaje. La ganancia (grado de amplificación) de un amplificador operacional está determinada por una resistencia de retroalimentación que alimenta parte de la señal amplificada de la salida a la entrada invertida. Esto reduce la amplitud de la señal de salida, y con ello la ganancia. Mientras más pequeña es esta resistencia menor será la ganancia. (Ifent, 2016).

Estas son algunas conexiones Típicas de los Amplificadores Operacionales:

- Conexión no invertida

La figura 8 muestra la conexión típica de un amplificador operacional con la salida no invertida con respecto a la entrada. Se ha usado uno de los más populares el IC-741. (Ifent, 2016).

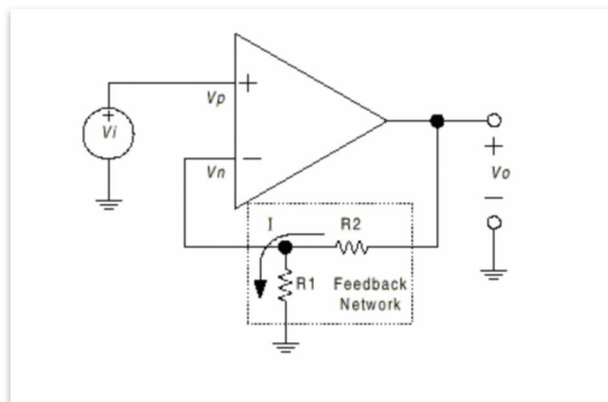


Figura 8. Conexión no invertida (Ifent, 2016).

- Conexión invertida

La figura 9 muestra la conexión típica de un amplificador operacional con la salida invertida con respecto a la entrada. Se ha usado uno de los más populares el IC-741. En este caso: (Ifent, 2016).

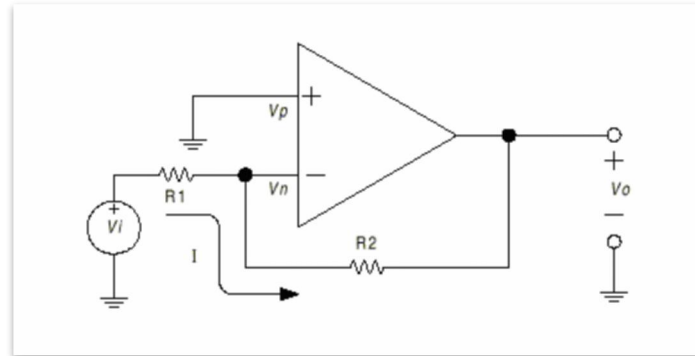


Figura 9. Conexión inversora (Ifent, 2016).

$$\text{Ganancia} = - (R2 / R1)$$

$$R3 = (R1 R2) / (R1 + R2)$$

Siendo el voltaje nominal de alimentación igual al de la figura 8.

5.2.7 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado que internamente contiene una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria (RAM y ROM), puertos de entrada y salida, y periféricos. Estas partes están conectadas entre sí en el interior del microcontrolador, y en conjunto forman lo que se conoce como microcomputadora. Un microcontrolador es por defecto una microcomputadora completa encapsulada en un circuito integrado. (Electronicaestudio, 2015).

Toda microcomputadora requiere de un programa o software para que realice una función específica, éste se almacena normalmente en la memoria ROM, por lo tanto sin un programa, los microcontroladores carecen de utilidad.

El propósito fundamental de los microcontroladores es el de leer y ejecutar los programas que el usuario desarrolle, es por esto que la programación es una actividad básica e indispensable cuando se diseñan circuitos y sistemas que los incluyan. El carácter programable de los microcontroladores simplifica el diseño de circuitos

electrónicos. Permiten modularidad y flexibilidad, por lo que un mismo circuito se puede utilizar para que realice diferentes funciones con sólo cambiar el programa del microcontrolador.

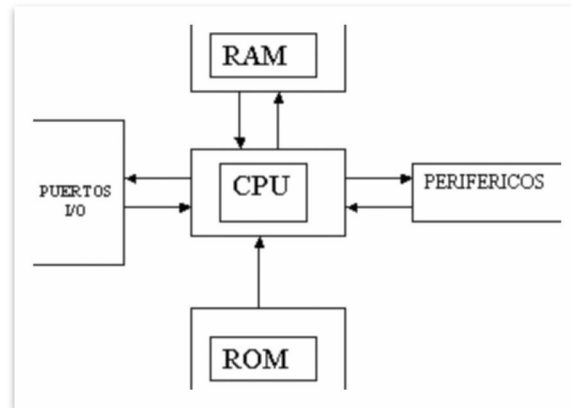


Figura 10. Partes internas de un microcontrolador (Electronicaestudio, 2015).

Las aplicaciones de los microcontroladores son bastante amplias, básicamente están limitadas por la imaginación del usuario. Es común encontrar microcontroladores en campos como la robótica y la automatización, en la industria del entretenimiento, en las telecomunicaciones, en la instrumentación, en el hogar, en la industria automotriz, etc. (Electronicaestudio, 2015).

5.2.7.1 Tipos de Microcontroladores

Existen varios fabricantes de microcontroladores tales como Texas Instruments, Motorola, Atmel, Intel, Microchip, Toshiba, Nacional, etc. Todos ofrecen microcontroladores con características relativamente similares, sin embargo, en términos generales todos sirven para lo mismo: leer y ejecutar los programas efectuados por el usuario. Algunos modelos tienen más capacidad que otros, en cuanto a memoria, velocidad, periféricos, etc. (Electronicaestudio, 2015).

Consideraciones al momento de escoger un microcontrolador:

- Disponibilidad de los microcontroladores en el mercado. Algunos microcontroladores son más comúnmente encontrados en las tiendas de electrónica que otros.
- Disponibilidad de información y herramientas de desarrollo. Actualmente la mayoría de los fabricantes de microcontroladores ofrecen información suficiente para entender la operación y funcionamiento de sus dispositivos.
- Precio. El precio resulta un punto a favor en la selección de un fabricante de microcontroladores.
- El modelo de microcontrolador específico que se debe elegir depende de la aplicación, aunque uno puede hacer un juicio sobre la capacidad de un microcontrolador tomando en cuenta su capacidad de memoria, la cantidad de puertos de entrada y salida, los periféricos, la velocidad a la cual ejecuta las instrucciones, etc.

5.2.7.1.1 Microcontroladores PIC de Microchip

Los PIC's de Microchip, son una opción más dentro del mercado de microcontroladores, la popularidad de éstos radica en su alta disponibilidad en el mercado y bajo costo.

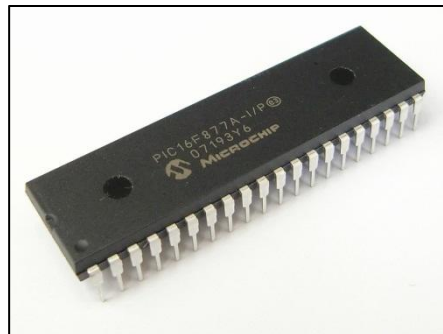


Figura 11. Microcontrolador PIC16F877A (Electronicaestudio, 2015).

El fabricante ha procurado una difusión exhaustiva de información relativa a sus productos, lo cual ha traído como consecuencia un proliferado uso de este tipo de microcontroladores. Por otro lado, se han desarrollado una serie de herramientas de bajo

costo por parte de terceros (empresas, profesionales y aficionados), como son programadores, software, etc., que facilitan el uso y programación de estos dispositivos.

Compiladores de C y Basic están disponibles para programar PIC's y de reciente aparición son los PICAXE, que es un sistema que permite al usuario implementar una función con microcontrolador PIC sin siquiera conocer las instrucciones ni la arquitectura propia del microcontrolador. (Electronicaestudio, 2015).

5.2.8 Lenguaje C

El lenguaje de programación C es un lenguaje de alto nivel que se caracteriza por los siguientes puntos: (Recursostic, 2009).

- Es de propósito general, esto significa que puede ser usado tanto para el desarrollo de sistemas operativos como para programas científicos, programas de aplicación o programas de educación y juegos.
- Posee alta transportabilidad ya que los programas escritos en C pueden ser llevados de un tipo de ordenador a otro y funcionarán. Los cambios que hay que realizar son mínimos.
- Como solo tiene 32 palabras reservadas se dice que es compacto.
- Los compiladores generan ejecutables más pequeños porque por norma general, los programas escritos en lenguaje C poseen menos líneas de código que otros lenguajes de programación de alto nivel.
- El lenguaje de programación C es un lenguaje imperativo o procedimental. Esto significa que indica secuencias de acciones con el fin de llegar a un objetivo. Generalmente los lenguajes imperativos o procedimentales contienen una parte declarativa. El lenguaje C da órdenes a la máquina.
- Es un lenguaje estructurado ya que los programas escritos con él se pueden organizar en módulos.

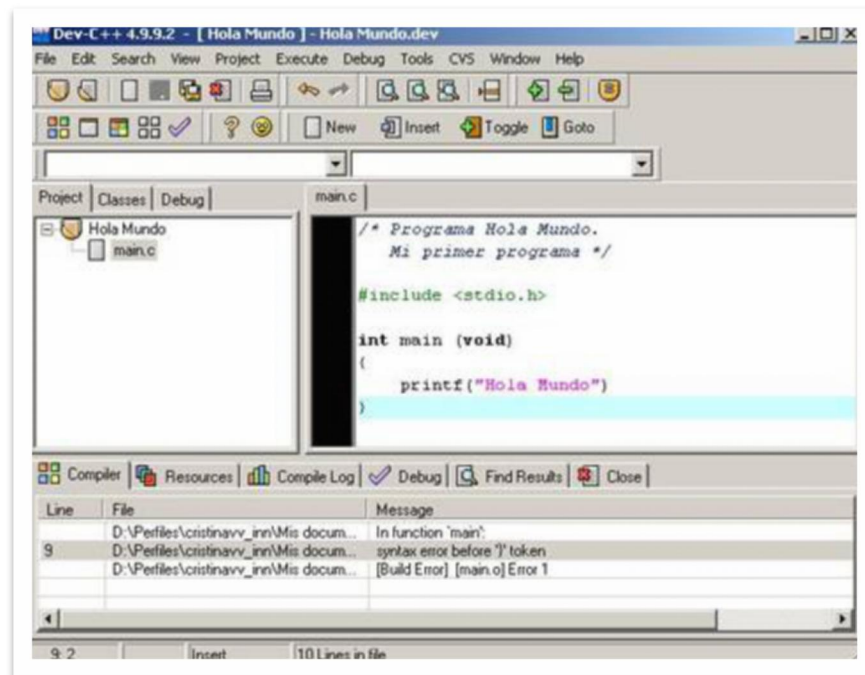


Figura 12. Ejemplo de un programa en lenguaje C (Recursostic, 2009).

Su principal desventaja es que un programa puede estar escrito con tal brevedad y concisión que se vuelven casi ilegibles. Esto es debido a su versatilidad. El compilador C trata las letras mayúsculas y minúsculas como caracteres diferentes. (Recursostic, 2009).

5.2.9 Pantalla (display) LCD

Una pantalla de cristal líquido (*Liquid Crystal Display* - LCD) es un dispositivo controlado de visualización gráfica para la representación de caracteres y símbolos. Dispone de 2 filas de 16 caracteres cada una, éstos cuentan con una matriz de 5x7 puntos o píxeles. Cada LCD está gobernado por un microcontrolador. (Todoelectrodo, 2013).

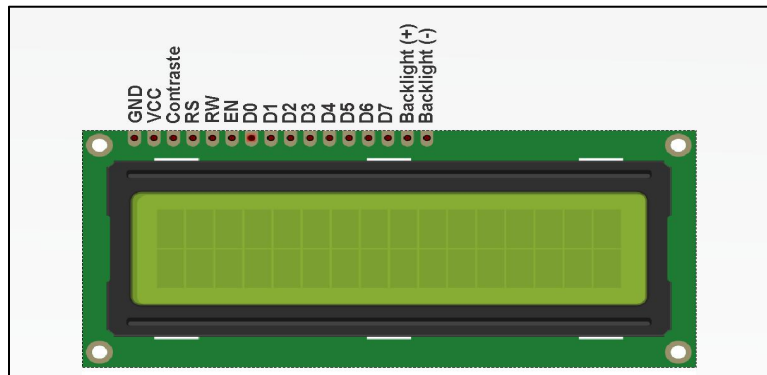


Figura 13. LCD 16x2 distribución de pines. (Botboss, 2015).

- Pines de alimentación:
- Vss: Gnd
 - Vdd: +5 voltios
 - Vee: corresponde al pin de contraste, lo regularemos con un potenciómetro de 10K conectado a Vdd.
- Pines de control:
- RS: Corresponde al pin de selección de registro de control de datos (0) o registro de datos (1). Es decir el pin RS funciona paralelamente a los pines del bus de datos. Cuando RS es 0 el dato presente en el bus pertenece a un registro de control/instrucción, y cuando RS es 1 el dato presente en el bus de datos pertenece a un registro de datos o un carácter.
 - RW: Corresponde al pin de Escritura (0) o de Lectura (1). Nos permite escribir un dato en la pantalla o leer un dato desde la pantalla.
 - E: Corresponde al pin Enable o de habilitación. Si E(0) esto quiere decir que el LCD no está activado para recibir datos, pero si E(1) se encuentra activo y podemos escribir o leer desde el LCD.

Pines de Bus de datos: - El Bus de datos bidireccional comprende desde los pines D0 a D7. Para realizar la comunicación con el LCD podemos hacerlo utilizando los 8 bits del bus de datos (D0 a D7) o empleando los 4 bits más significativos del bus de datos (D4 a D7).

6. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

6.1 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

6.1.1 Elección del sensor (o electrodo) de pH

Un sensor es un dispositivo capacitado para medir magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: fuerza, humedad, pH, etc. (Docplayer, 2006).

En las páginas 22 al 27 del presente documento se halla la descripción de tres tipos de sensores o electrodos para medir el pH, teniendo en cuenta dicha información se presenta el siguiente cuadro comparativo con el cual se podrá escoger e implementar el más adecuado para el proyecto.

Tabla 1. Comparativa entre los sensores de pH (Docplayer, 2006).

	Omega PHE-7353	Fraunhofer	Ocean Optics
Tipo de sensor	Vidrio	ISFET	Fibra Óptica
Rango pH	0 a 14	1 a 12	6,5 a 12
Rango temperatura (°C)	0 a 80	-10 a 75	0 a 220
Rango presión (psi)	0 a 100	7 a 145	0 a 100
Precisión	0,1% sobre fondo de escala	0,02	s/d
Impedancia de salida	150M	s/d	s/d
Tiempo de respuesta (s)	10	60	s/d
Deriva (uV/hora)	12	80	s/d
Dimensiones (mm)	152(L) x 22(D)	3,5 x 3,5	108(L) x 3(D)
Compensación de temperatura	Pt100	Pt1000	NC
Mantenimiento	Húmedo	Seco	Seco
Costo (U\$D)	150	s/d	990

Debido a los requisitos de este proyecto de ahora en adelante se centrará en un tipo de sensor, el sensor o electrodo de pH.

Se optó por un electrodo de encapsulamiento metálico porque son los más adecuados para mediciones de pH directa al suelo; tiene características muy similares al tipo ISFET, con un rango de tensión entre 800mV a -800mV aproximadamente, siendo los valores más próximos a 0V los que indican nivel de pH 7. Las tensiones negativas indican algún grado de acidez, mientras que las tensiones positivas alcalinidad.

6.1.2 Elección del microcontrolador

Teniendo en cuenta la relación funcionalidad y disponibilidad comercial se optó por el PIC16F877A de Microchip. Cuenta con memoria de programa tipo FLASH, lo que representa gran facilidad en el desarrollo de prototipos y en su aprendizaje ya que permite reprogramarlo nuevamente sin ser borrado con anterioridad. A continuación las características más significativas de este microcontrolador:

Tabla 2. Características del PIC16F877A (Electronicaestudio, 2015).

Key Features	PIC16F877A
Operating Frequency	DC – 20 MHz
Resets (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)
Flash Program Memory (14-bit words)	8K
Data Memory (bytes)	368
EEPROM Data Memory (bytes)	256
Interrupts	15
I/O Ports	Ports A, B, C, D, E
Timers	3
Capture/Compare/PWM modules	2
Serial Communications	MSSP, USART
Parallel Communications	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	8 input channels
Analog Comparators	2
Instruction Set	35 Instructions
Packages	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP 44-pin QFN

El PIC16F877 es un microcontrolador fabricado en tecnología CMOS, su consumo de potencia es muy bajo y además es completamente estático, esto quiere decir que el reloj puede detenerse y los datos de la memoria no se pierden. El encapsulado más común para este microcontrolador es el DIP (Dual In-line Pin) de 40 pines, propio para usarlo en experimentación. (*Electronicaestudio, 2015*).

En la siguiente figura se aprecia la arquitectura interna del PIC16F877A:

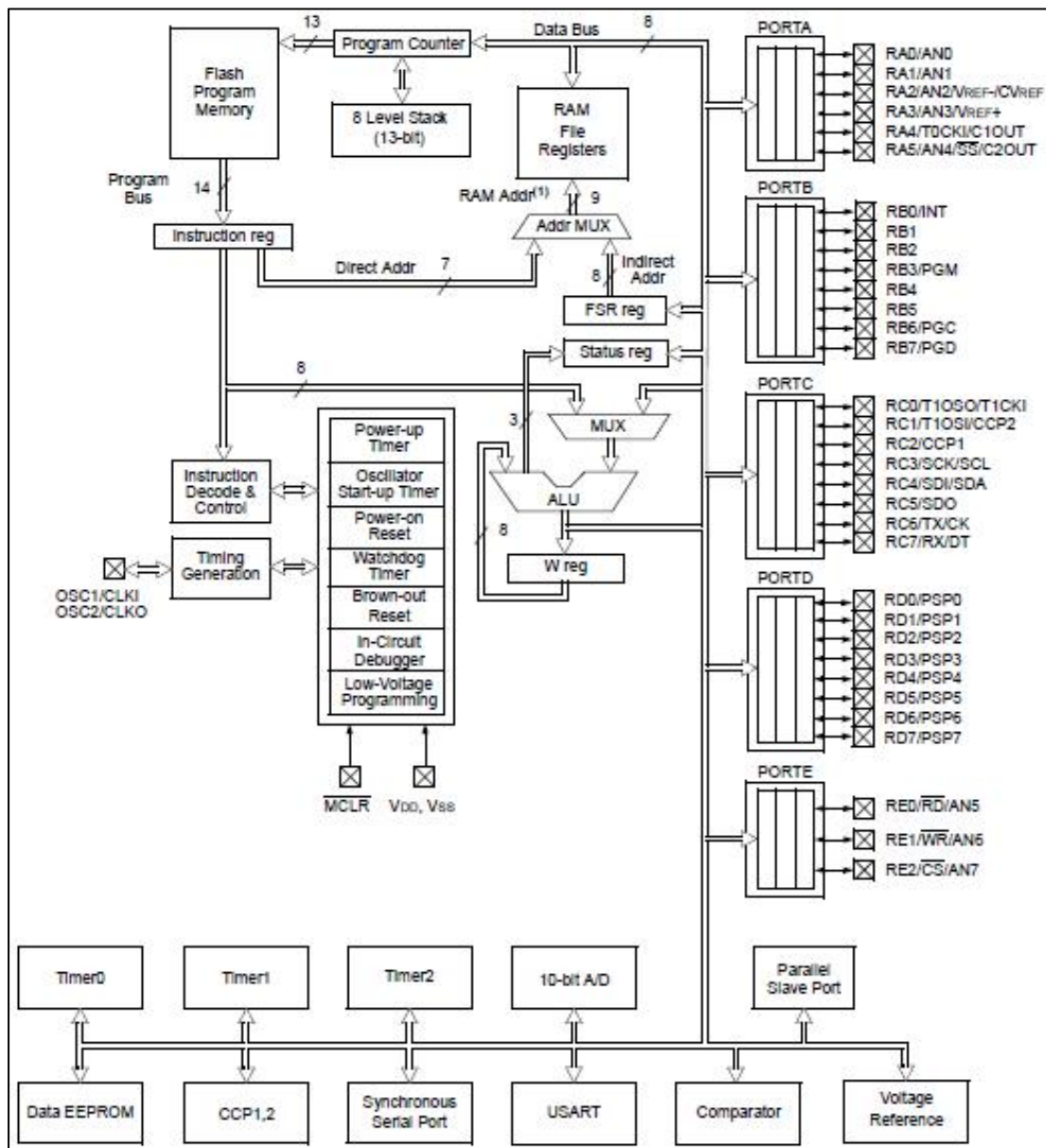


Figura 14. Arquitectura interna del PIC16F877A (*Electronicaestudio, 2015*).

6.2 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Es importante establecer ciertas características que el instrumento de medición de pH debe tener, por tal motivo en la etapa de diseño esto debe quedar bien explicado.

El dispositivo debe cumplir satisfactoriamente a los siguientes criterios:

- Medición altamente precisa del nivel de pH en el suelo.
- Funcionamiento autónomo, es decir sin estar conectado a una toma eléctrica; trabajará con baterías recargables, esto indica portabilidad.
- Manipulación sencilla por parte del usuario.
- Robustez debido a que la medición puede llegar desplegarse a ambientes hostiles y terrenos en condiciones adversas.

6.2.1 Descripción general y diseño del instrumento de medición de pH

El dispositivo lo componen tres módulos:

- Alimentación,
- Procesamiento y
- Visualización.

El primer módulo básicamente supe de energía eléctrica continua a todo el circuito; el segundo módulo mencionado capta la señal análoga proveniente del sensor o electrodo de pH, realiza el procesamiento de escalización; y luego en el tercer módulo se lleva a cabo su respectiva visualización en tiempo real.

El siguiente diagrama ilustra el conducto regular de operación:

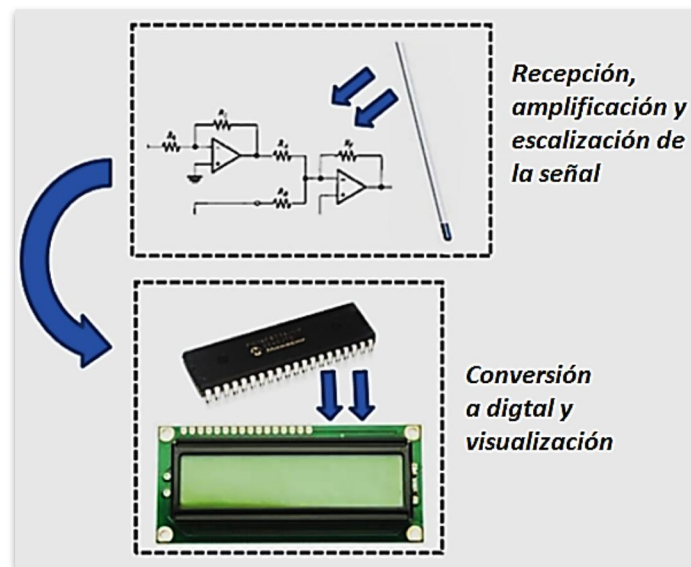


Figura 15. Diagrama esquemático del dispositivo.

El siguiente es el diagrama de bloques del instrumento:

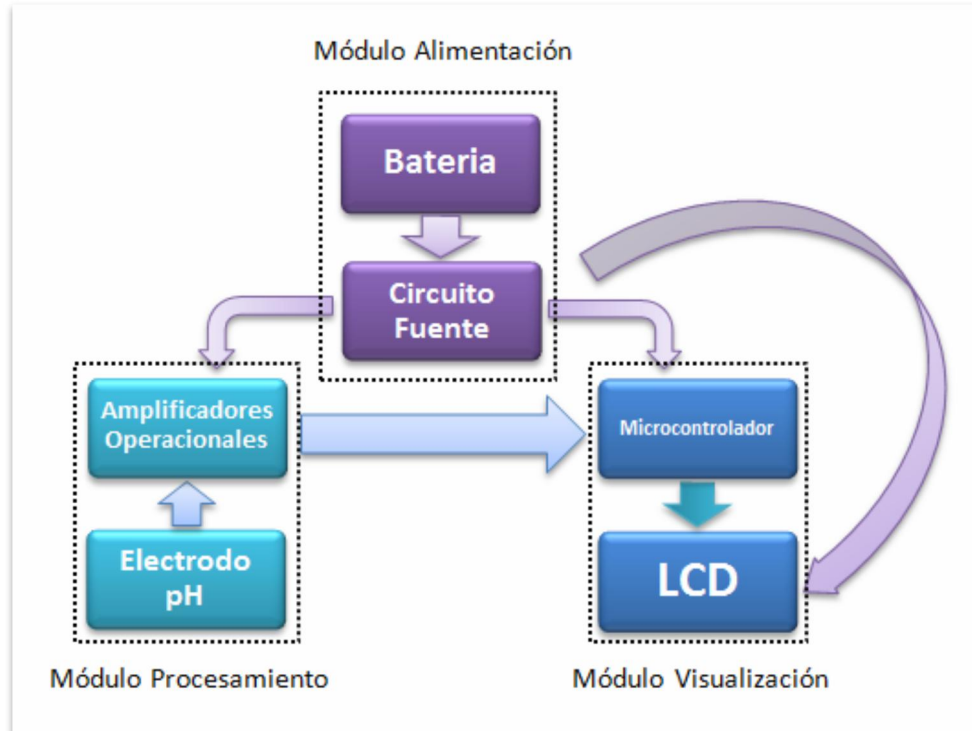


Figura 16. Diagrama de bloques del instrumento de medición de pH.

6.2.1.1 Módulo de alimentación

La fuente de alimentación es un complejo circuito a base de baterías de litio, es decir el instrumento será portátil y recargable con un cargador de 9 o 12 voltios. Esta fuente entregará al resto del circuito dos tensiones, una de 5 voltios positivos y la otra de 5 voltios negativos.

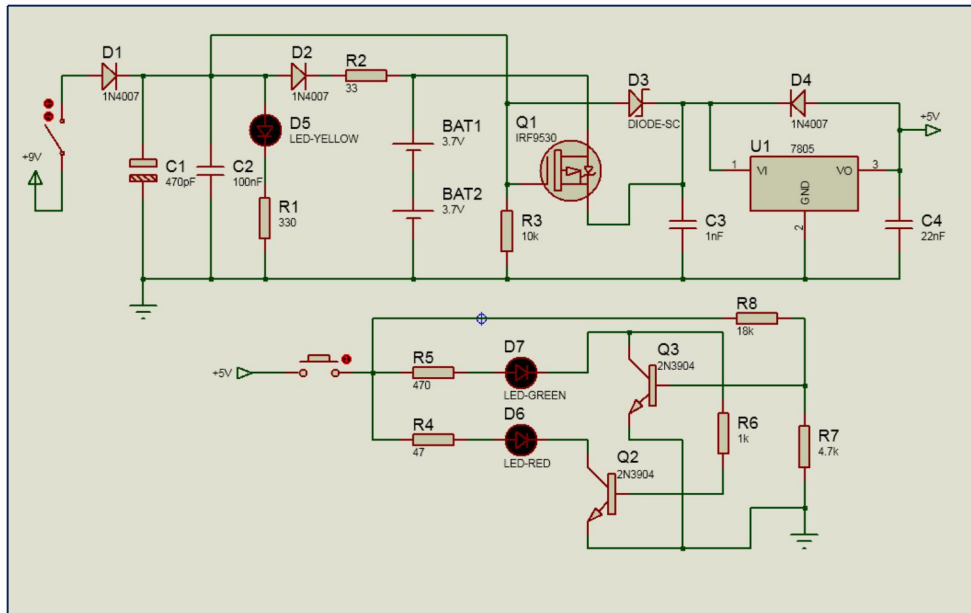


Figura 17. Módulo alimentación.

Este tipo de circuito también es conocido como fuente de voltaje con carga compartida, es decir mientras el dispositivo recarga la batería puede seguir suministrando voltaje a los demás circuitos.

La tensión recibida del cargador, que puede ser 12 o 9 voltios, llega al regulador de voltaje LM317 el cual baja la tensión a unos 8.5 voltios, apropiados para recargar la batería de litio y una corriente de 2 amperios. Los capacitores cerámicos al igual que los electrolíticos cumplen con la función de filtrar y estabilizar la tensión.

El otro regulador de voltaje es un 7805, éste también recibe la tensión del cargador para regularlo a 5 voltios, con este voltaje trabajará la mayoría de componentes del circuito, por ejemplo el microcontrolador, la pantalla LCD, y parte de los amplificadores operacionales.

Los amplificadores operacionales del módulo de procesamiento trabajan con voltaje positivo y voltaje negativo, por tal motivo el circuito de alimentación cuenta con un convertidor de voltaje a negativo, se trata del ICL7660. Este integrado realiza la conversión de la tensión de alimentación de positivo a negativo para un rango de entrada de 1.5V a 12V, lo que resulta en tensiones de salida complementarias de -1.5V a -12V. Sólo se necesitan 2 condensadores externos que no son críticas para la cargar funciones depósito de la bomba y de carga.

6.2.1.2 Módulo de procesamiento

En este circuito se realiza la toma de la lectura de pH hecha por el electrodo, el cual como se ha tratado anteriormente, genera una diferencia de potencial por el orden de los 400 mili-voltios, gracias a la alta impedancia de este circuito el voltaje es amplificado y posteriormente se ajusta para convertirlo en una escala de 0 a 5 voltios, con lo cual podrá trabajar el microcontrolador en el próximo módulo. El uso de potenciómetros permitirá la calibración del circuito y por lo tanto del instrumento.

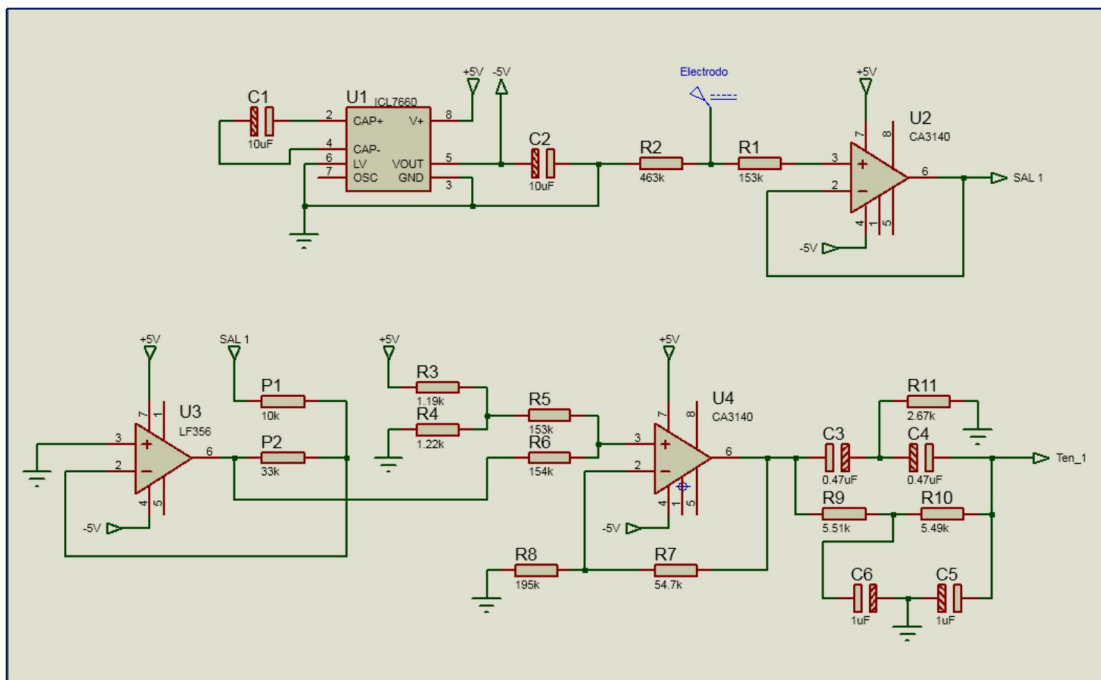


Figura 18. Módulo de procesamiento.

6.2.1.3 Módulo de visualización

En este punto encontramos el microcontrolador PIC16F877A que trabaja a una frecuencia de 4MHz. La tensión escalizada de 0 a 5 voltios llega al pin 2, ésta es la señal procesada por los amplificadores operacionales del módulo visto anteriormente, viene acomodada en valores que el PIC puede trabajar, el programa compilado en el PIC traduce la escala de tensión de la señal de entrada en la escala de pH, es decir de 0 a 14. Por último, envía los datos al controlador interno de la pantalla LCD 16x2 y así poder visualizar el resultado de la medición de pH.

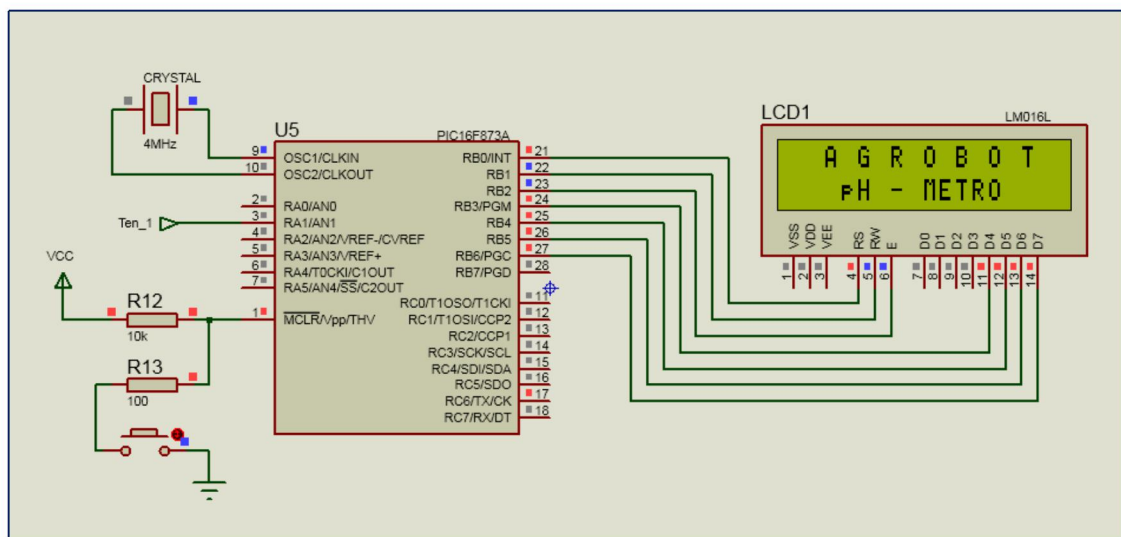


Figura 19. Módulo visualización.

6.2.2. Diseño de algoritmo y software

El programa que lleva el microcontrolador fue realizado en lenguaje C, de fácil comprensión; lo que hace es configurar el PIC para recibir la tensión escalizada de 0 a 5 voltios por el pin 3, ésta es la señal ya procesada por los amplificadores operacionales del módulo visto anteriormente, y ajustada en valores que el PIC puede trabajar, el programa traduce la escala de voltaje en la escala de nivel de pH, es decir de 0 a 14. Por último, envía los datos al controlador interno de la pantalla LCD 16x2 y así poder visualizar el resultado de la medición de pH.

A continuación se puede apreciar el diagrama de flujo de la programación:

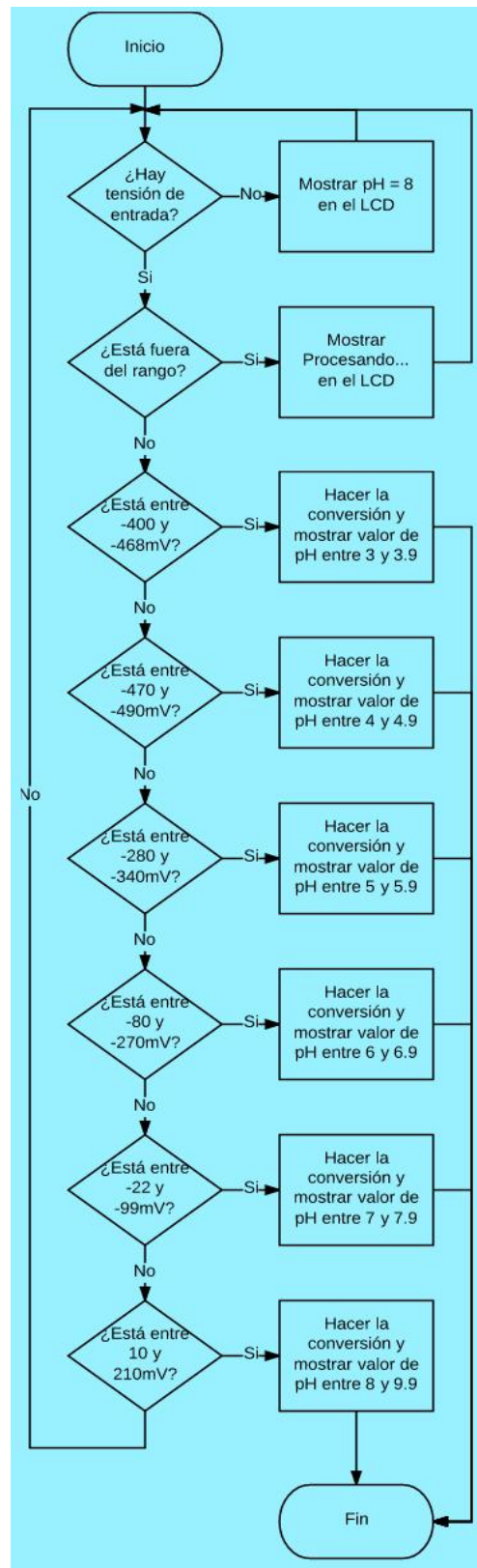


Figura 20. Diagrama de flujo de la programación.

Una de las características más notables del microcontrolador PIC16F877A es la función de conversor análogo a digital (A/D), esto quiere decir que la señal de entrada en el pin 3 es convertida en un número entero con el cual se desarrolla una serie de ecuaciones lineales de acuerdo al rango en el que se encuentre la tensión recibida, el resultado de estas ecuaciones es el nivel de pH que luego es visualizado en la pantalla LCD 16x2.

Nota: La línea de códigos del software se haya en el anexo 1, página 69.

De acuerdo al comportamiento del electrodo durante las pruebas realizadas en el laboratorio, se definió una tabla de voltajes desde el mismo momento en que se toma la medición con el electrodo hasta su equivalencia con la escala de pH.

Tabla 3. Conversión y escalización de Voltajes.

Tensión del electrodo (milivoltios)	Tensión al PIC (voltios)	Equivalencia en pH (nivel)
-400 a -468	2,47 a 2,62	Entre 3 y 3,99
-470 a -490	2,63 a 2,67	Entre 4 y 4,99
-280 a -340	2,21 a 2,35	Entre 5 y 5,99
-80 a -270	1,87 a 2,2	Entre 6 y 6,99
-22 a -99	1,68 a 1,84	Entre 7 y 7,99
10 a 210	1,19 a 1,61	Entre 8 y 9,99

7. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 SIMULACIÓN DE CIRCUITOS CON EL PROGRAMA PROTEUS

7.1.1 Simulación de una medición sustancia ácida

La primera simulación se realiza a lo que puede llegar a ser una sustancia con un valor de pH cercano a 3, es decir ácidos como el zumo de limón.

- Tensión generada por el electrodo: -450mV
- Tensión al PIC: 2,58V
- Nivel de pH: 3,77

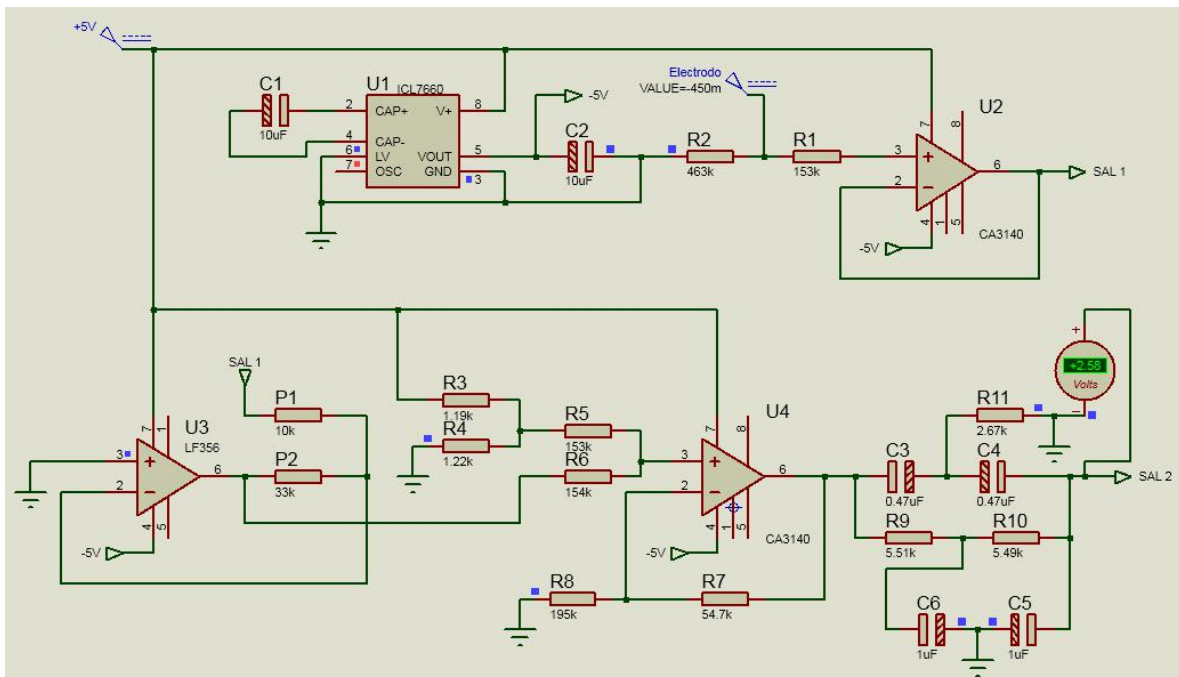


Figura 21. Simulación 1 módulo procesamiento.

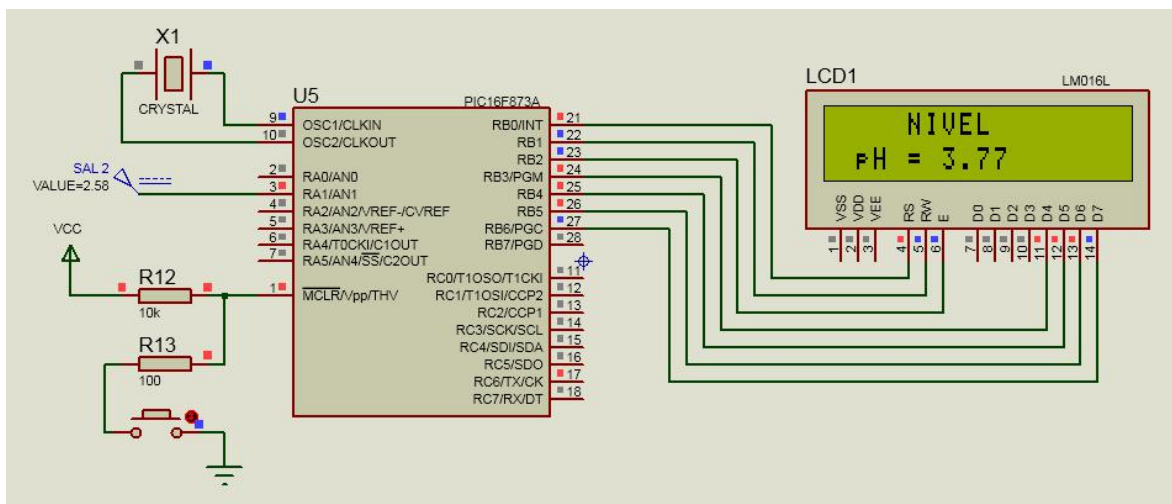


Figura 22. Simulación 1 módulo visualización.

7.1.2 Simulación de una medición sustancia neutra

Ahora la simulación se realiza a lo que puede llegar a ser una sustancia con un valor de pH cercano a 7, es decir agua pura.

- Tensión generada por el electrodo: -50mV
- Tensión al PIC: 1,74V
- Nivel de pH: 7,33

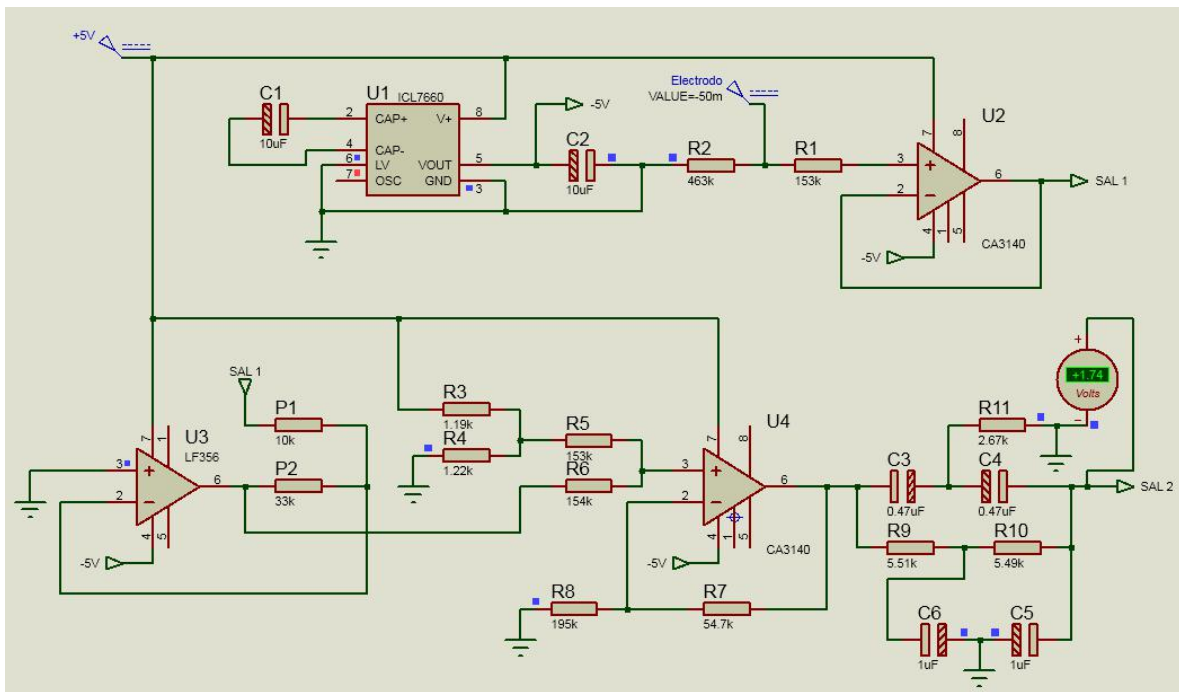


Figura 23. Simulación 2 módulo procesamiento.

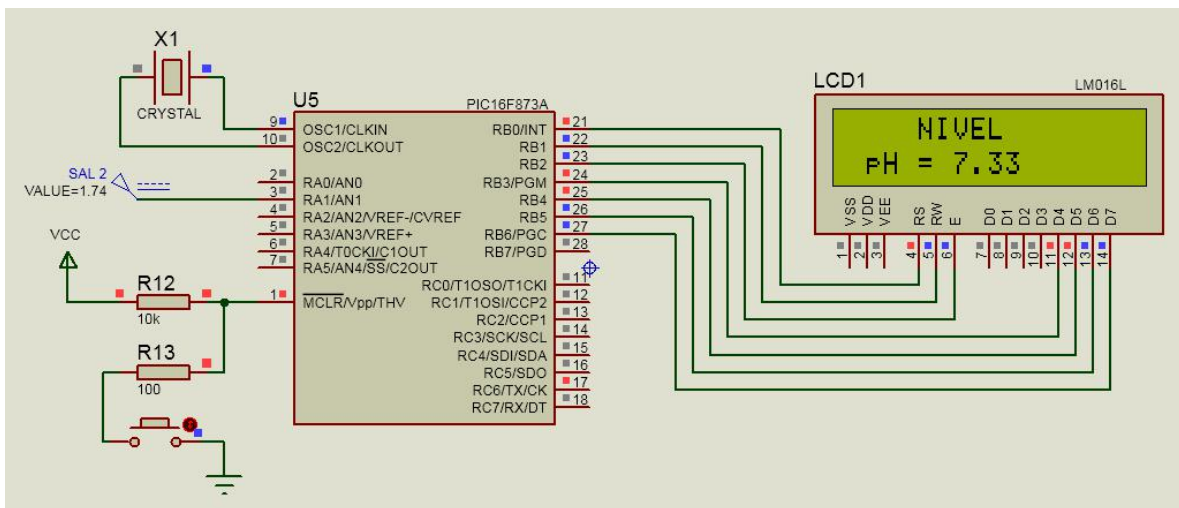


Figura 24. Simulación 2 módulo visualización.

7.1.3 Simulación de una medición sustancia básica o alcalina

Ahora la simulación se realiza a lo que puede llegar a ser una sustancia con un valor de pH cercano a 7, es decir agua pura.

- Tensión generada por el electrodo: 210mV
- Tensión al PIC: 1,19V
- Nivel de pH: 8,90

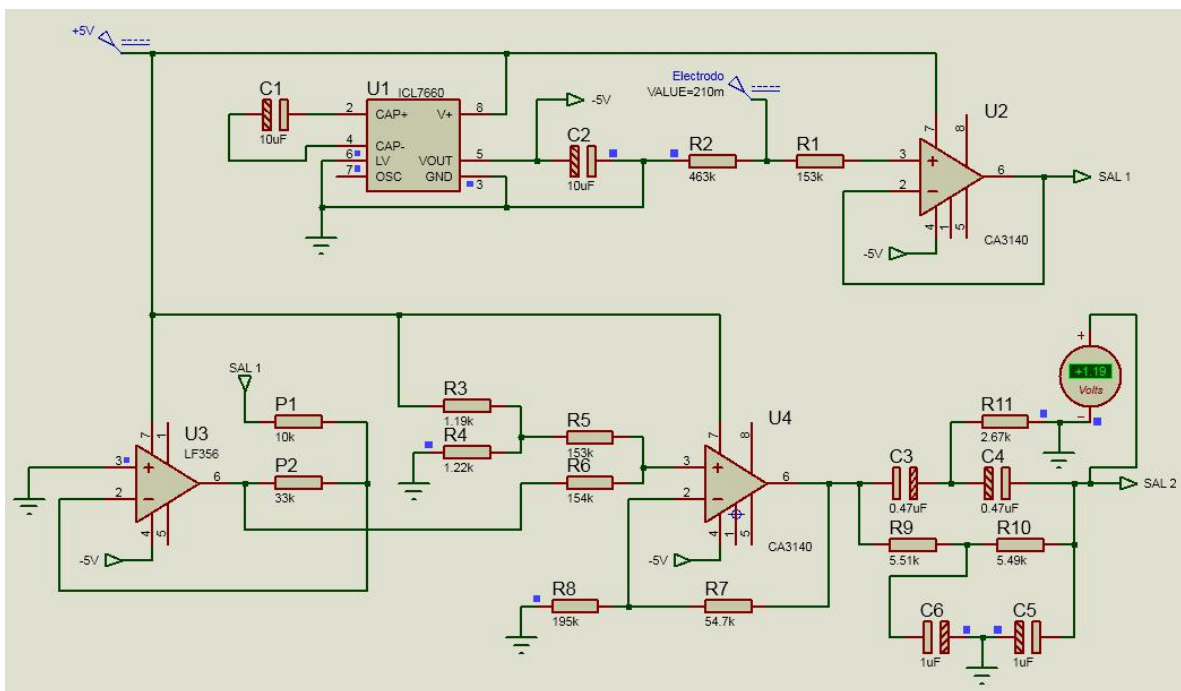


Figura 25. Simulación 3 módulo procesamiento.

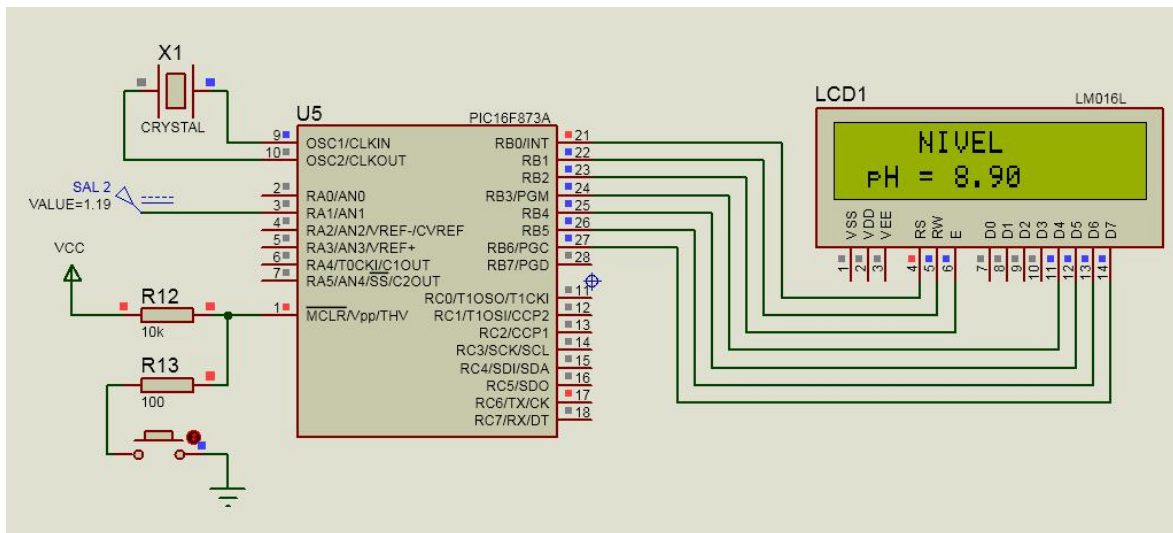


Figura 26. Simulación 3 módulo visualización.

7.2 PRUEBAS COMPARATIVAS EN EL LABORATORIO

A continuación se registran tres prácticas desarrolladas en el laboratorio de biología de la universidad UNAD en el CEAD de Ibagué.

Lo realizado allí es una medición de pH con un pH-metro profesional de laboratorio marca Hanna a distintos tipos de sustancias, los resultados obtenidos son puestos en la tabla de valores. Luego se realiza la medición de las mismas sustancias con el electrodo escogido para el proyecto, los resultados también irán a la tabla de valores a manera de comparación.

Se requiere medir varias sustancias de rangos pH variado, es decir desde las sustancias ácidas como el zumo de limón (pH 3), pasando por el agua destilada (pH 5 a 7) hasta sustancias básicas o alcalinas como la leche de magnesia (pH 11).

El propósito de estas prácticas es analizar el comportamiento del electrodo y con base en ello desarrollar el software adecuado para el procesamiento de las mediciones.

7.2.1 Primera prueba de laboratorio

En el anexo 2 de la página 72 se encuentra el informe completo de esta práctica. A continuación se ilustra solamente los valores medidos y la conclusión de lo hecho en el laboratorio.

Tabla 4. Tabla de valores primera práctica de laboratorio.

SUSTANCIAS	pH-METRO HANNA (Nivel de pH)	ELECTRODO (milivoltios)
<i>Zumo de limón</i>	3.30	440 ... 449
<i>Buffer 7.01</i>	7.72	-150 ... -200
<i>Bicarbonato</i>	9.17	-421 ... -436
<i>Jabón detergente</i>	11.45	-45 ... -112

Conclusiones de la práctica: El electrodo no tiene una respuesta lineal de acuerdo a la escala de pH, sin embargo fueron pocas las sustancias analizadas en esta prueba, se determina con los ingenieros que se debe ampliar el número de sustancias y con pH variado dentro del rango 3 a 9 en la escala de pH.

7.2.2 Segunda prueba de laboratorio

En el anexo 3 de la página 75 se encuentra el informe completo de esta práctica. A continuación se ilustra solamente los valores medidos y la conclusión de lo hecho en el laboratorio.

Tabla 5. Tabla de valores segunda práctica de laboratorio.

SUSTANCIAS	pH-METRO HANNA (Nivel de pH)	ELECTRODO (milivoltios)
<i>Zumo de limón</i>	3.30	-380
<i>Café</i>	4.63	-230 ... -279
<i>Buffer 4.0</i>	4.85	-550 ... -572
<i>Leche</i>	6.27	-192 ... -185
<i>Buffer 7.01</i>	7.80	-425
<i>Bicarbonato</i>	9.18	-487
<i>Leche de magnesia</i>	10.58	365

La gráfica obtenida de la diferencia de potencial en las siete (7) sustancias analizadas es:

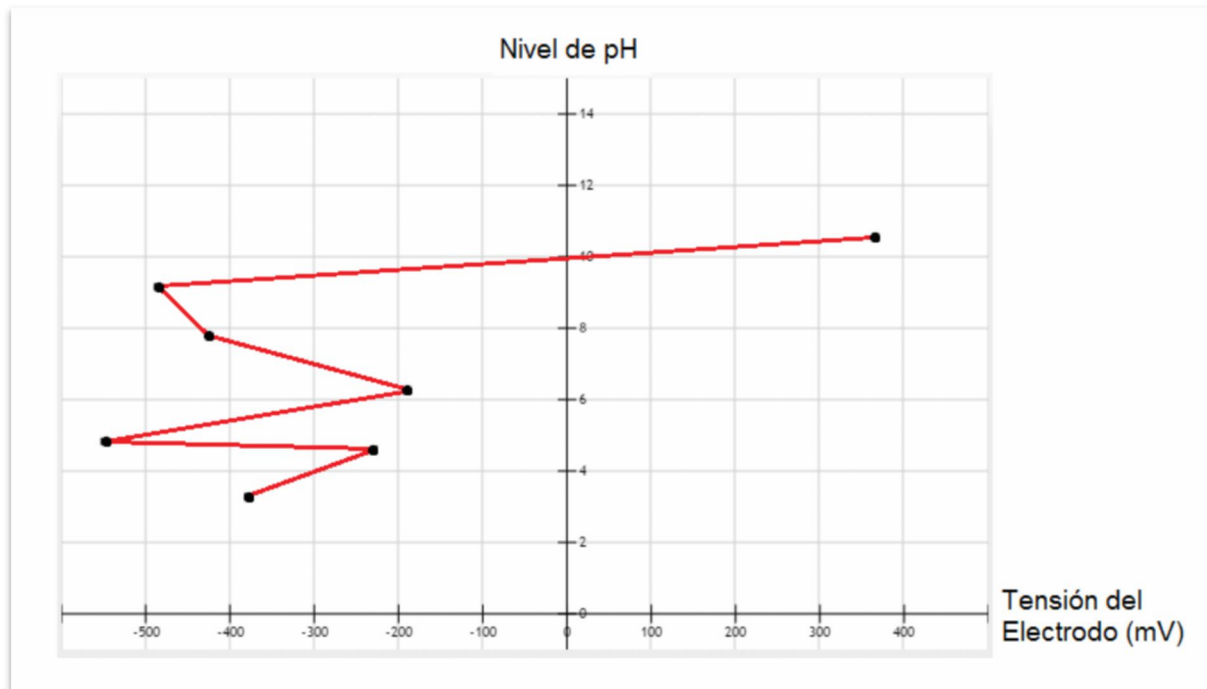


Figura 27. Gráfica de resultados segunda práctica.

Conclusiones de la práctica: El electrodo no tiene una respuesta lineal de acuerdo a la escala de pH, confirmado en esta segunda práctica de laboratorio. Se determina con los ingenieros que se debe realizar un programa para el microcontrolador ajustado a los resultados obtenidos en esta práctica, es decir que para cada nivel de pH el programa deberá contener una subrutina condicional y así ajustarnos al comportamiento funcional del electrodo implementado en el proyecto. Seguimos enfocados en la lectura de pH dentro del rango 3 a 9 en la escala de pH, especial para mediciones directas al suelo.

7.2.3 Tercera prueba de laboratorio

En el anexo 4 de la página 80 se encuentra el informe completo de esta práctica. A continuación se ilustra solamente los valores medidos con el prototipo programado de acuerdo con los resultados obtenidos en las anteriores prácticas, y la conclusión de lo hecho en el laboratorio.

Tabla 6. Tabla de valores tercera práctica de laboratorio.

SUSTANCIAS	Prototipo (nivel pH)
<i>Zumo de limón</i>	3,12
<i>Zumo de tomate</i>	5,77
<i>Leche</i>	6,00

Conclusiones: el prototipo realiza de manera óptima las mediciones de estas sustancias, las cuales están en el rango de pH acordado con los ingenieros (3 a 9) y se encuentra listo para realizar lecturas de pH directa del suelo, es decir pruebas en terreno.

7.3 PRUEBAS COMPARATIVAS EN TERRENO

Las pruebas en terreno son aquellas mediciones realizadas a porciones de tierra o directamente al suelo. Se realizaron más de diez mediciones en los jardines de la universidad y en suelos fuera de la ciudad de Ibagué. Estas pruebas se denominan comparativas porque se realizarán junto con el pH-metro profesional marca Hanna. Cabe resaltar que dicho pH-metro es de uso para laboratorios y no es el más indicado para realizar mediciones directas del suelo por su bulbo de vidrio, por lo tanto se debe realizar un hoyo en la tierra, verter agua destilada y luego efectuar la medición. Luego de cada muestra se debe limpiar adecuadamente los electrodos y esperar un tiempo prudencial de compensación antes de continuar con la siguiente medición.

- En primer lugar se realizaron dos mediciones a una fracción de tierra con abono orgánico (del vivero Ambalá) con el pH-metro marca Hanna, para ello es necesario abrir un pequeño hoyo en la tierra y depositar en él agua destilada, inmediatamente se introduce el electrodo del pH-metro para registrar fotográficamente el valor. Luego se introduce el electrodo del prototipo para realizar la fotografía correspondiente. Estos son los resultados comparativos:

<i>pH-metro Hanna</i>	<i>Prototipo</i>
3,42	3,51
3,28	3,51



Figura 28. Primera prueba de terreno.

- La segunda prueba fue realizada en el jardín de la universidad UNAD (CEAD Ibagué), dos mediciones. Es abierto un hoyo en el suelo, se llena de agua destilada y se introduce el electrodo del pH-metro marca Hanna y se toma la evidencia fotográfica, posteriormente se introduce el electrodo del prototipo y se registra fotográficamente así:

<i>pH-metro Hanna</i>	<i>Prototipo</i>
5,21	6,21
5,63	5,81



Figura 29. Segunda prueba de terreno.

- Al igual que en la prueba anterior se mantiene el orden en la medición, primero el pH-metro marca Hanna y luego el prototipo. En la tercera prueba en terreno se buscó alterar el pH del suelo con una sustancia ácida, como lo es el jugo de naranja, pero la medición no fue satisfactoria. Muy probablemente el hoyo en el suelo se saturó con el agua destilada y luego con el jugo de naranja. Estos son los resultados:

<i>pH-metro Hanna</i>	<i>Prototipo</i>
4,98	5,77



Figura 30. Tercera prueba de terreno.

- En la cuarta y última prueba del día se determinó iniciar la medición con el prototipo y luego con el pH-metro marca Hanna. Fue sin duda el más aproximado.

<i>pH-metro Hanna</i>	<i>Prototipo</i>
5,38	5,34

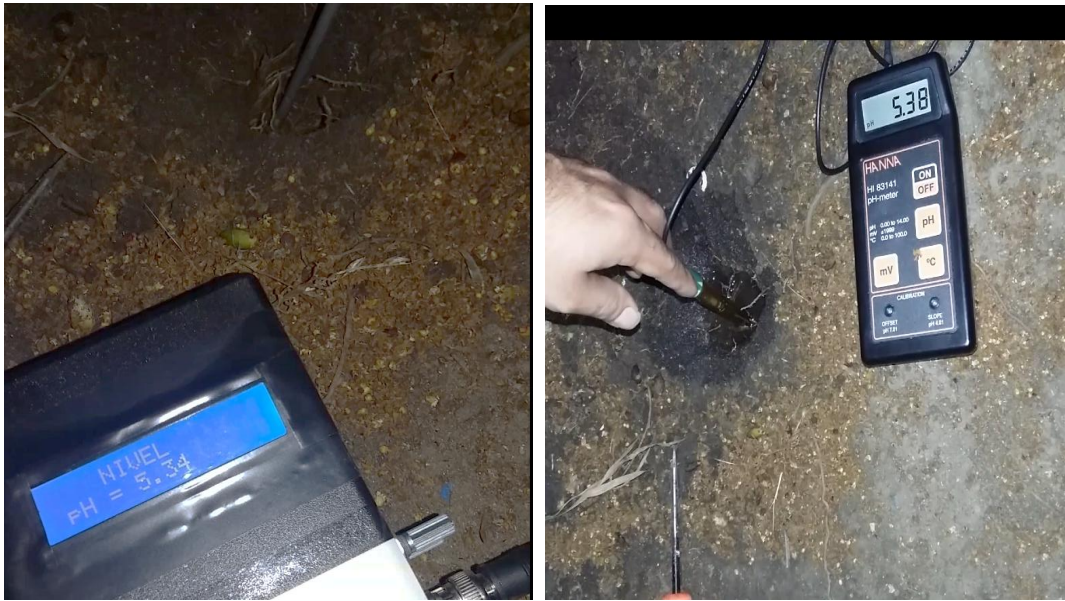


Figura 31. Cuarta prueba de terreno.

- Las pruebas quinta a novena fueron realizadas en la ladrillera Colombia LTDA en Rovira, Tolima. Se determinó iniciar la medición con el prototipo y luego con el pH-metro marca Hanna.

<i>pH-metro Hanna</i>	<i>Prototipo</i>
5,78	7,60
6,35	6,37
6,21	6,21
5,97	6,47
6,41	6,42



Figura 32. Prueba de terreno Rovira.

- Las pruebas décima y onceava fueron realizadas en la finca cafetera “La Esperanza” en Líbano, Tolima. Se determinó iniciar la medición con el prototipo y luego con el pH-metro marca Hanna.

<i>pH-metro Hanna</i>	<i>Prototipo</i>
6,17	6,10
6,26	6,20
5,92	6,10
5,92	6,10

Tabla 7. Resumen de resultados pruebas en terreno.

<i>Práctica en terreno</i>	<i>pH-metro marca Hanna</i>	<i>Prototipo</i>
Primera A	3,42	3,51
Primera B	3,28	3,51
Segunda A	5,21	6,21
Segunda B	5,63	5,81
Tercera	4,98	5,77
Cuarta	5,38	5,34
Quinta	5,78	7,60
Sexta	6,35	6,37
Séptima	6,21	6,21
Octava	5,97	6,47
Novena	6,41	6,42
Décima	6,17	6,10
Onceava	6,26	6,20
Doceava	5,92	6,10
Treceava	5,92	6,10

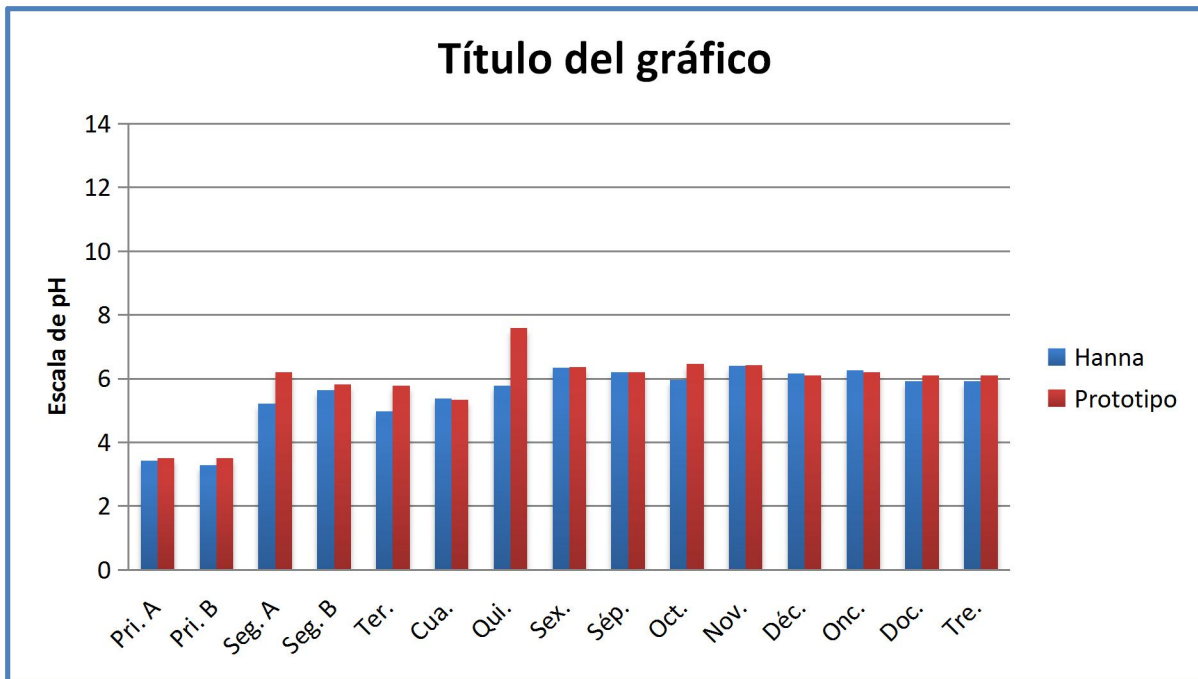


Figura 33. Gráfica resumen de pruebas.

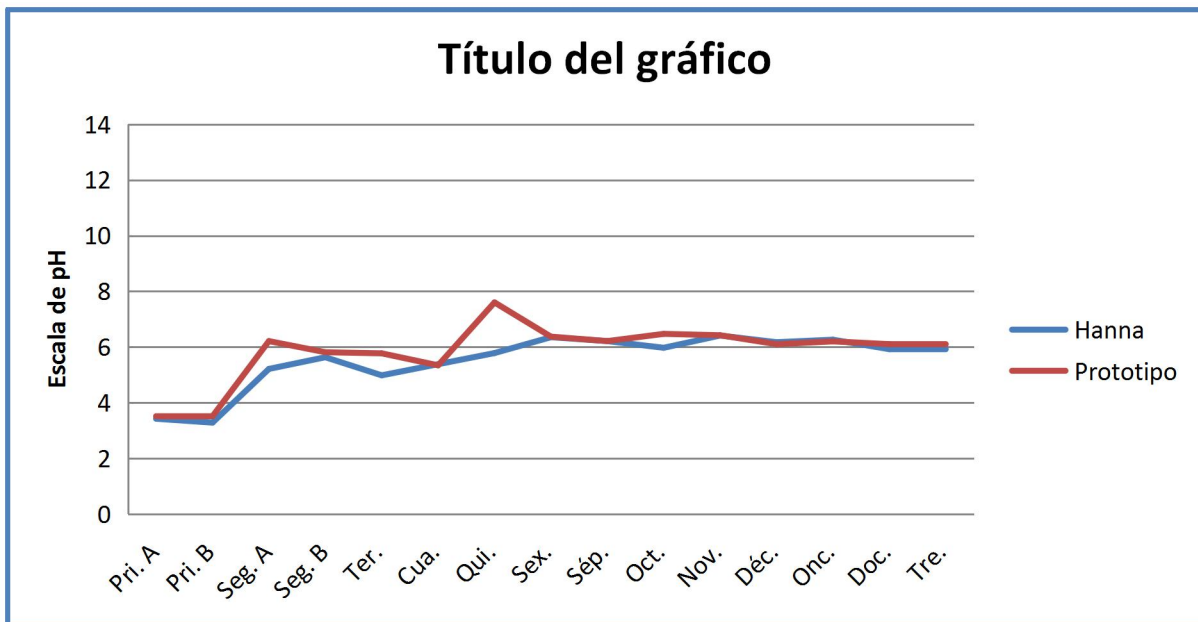


Figura 34. Gráfica correlación de pruebas.

Estos resultados permiten apreciar lo cerca que está el prototipo de igualar las mediciones de un pH-metro profesional de laboratorio. Sin embargo las variables relacionadas con el uso de un electrodo de bulbo de vidrio son determinantes en la diferencias de las mediciones ambos instrumentos, es decir, el uso de agua destilada, el hecho de que el electrodo de vidrio no puede hacer contacto con la tierra por su delicada forma, la temperatura, entre otros, varía la precisión de la medida.

Nota: En el anexo 6, página 84 se encuentran más evidencias de pruebas realizadas directamente del suelo.

8. IMPACTO SOCIAL, ECONÓMICO Y AMBIENTAL DEL PROYECTO

8.1 BENEFICIOS A LA COMUNIDAD E IMPACTO SOCIAL

El instrumento de medición de pH será una herramienta de gran valor para el agricultor, conocer el nivel de acidez, alcalinidad o neutralidad del suelo de sus cultivos le resultará beneficioso porque teniendo tal información veraz y si aplica el proceso adecuado de acuerdo con la medición de pH obtenida, podrá tener cosechas de alta calidad.

Los potenciales usos de este versátil instrumento de medición corresponde a cada una de las personas que trabajan la agricultura como lo son los agrónomos, ingenieros agro-forestales, campesinos, amantes de la jardinería o sencillamente la persona que desee conocer el valor del pH de la tierra que alberga alguna planta.

Otro de los beneficios que traerá este proyecto a la comunidad en general y muy especialmente a los agricultores o amantes de las plantas es que podrán adquirir este medidor de pH a bajo costo.

8.2 IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO

De acuerdo a la norma técnica colombiana NTC 5264, los suelos para cultivo deben tener un rango de pH determinado, el desconocimiento de los niveles de pH en los suelos de cultivos es un problema considerable. El uso inadecuado de fertilizantes, químicos y riego dañan la tierra haciendo que a mediano y largo plazo pierda su fertilidad y se transforme en aridez, de igual manera es un problema de salud nutricional aquellos productos del campo con índices desproporcionados de pH, es una amenaza directa a la población una fruta o una verdura con alto grado de acidez o alcalinidad.

Por tal motivo es completamente benéfico para el medio ambiente la realización de este proyecto, puesto que la finalidad es entregar información confiable y precisa sobre el nivel de pH en los suelos de los cultivos al agrónomo, se presume que éste implementará los tratamientos correctivos cuando los niveles de pH estén fuera del estándar saludable,

en consecuencia habrán productos agrícolas de mayor calidad y terrenos bien tratados y bien aprovechados.

8.3 COSTOS DEL PROYECTO

Tabla 8. Costos del proyecto (Autor).

Recurso	Descripción	Presupuesto
Equipo humano	Tres compañeros ECBTI-Cead Ibagué. Autor del proyecto.	\$ 4'000.000
Equipos y software	Computador portátil con paquete office, simulador de circuitos electrónicos y programador de microcontroladores.	\$ 200.000
Viajes y salidas de campo	Desplazamientos. Visitas técnicas dentro y fuera de la ciudad.	\$ 550.000
Materiales y suministros	Electrodo de pH, componentes electrónicos, display lcd 16x2, baquela, batería litio.	\$ 300.000
Bibliografía	Varios.	\$ 200.000
Total		\$ 5'250.000

9. CONCLUSIONES

- El prototipo responde satisfactoriamente a las mediciones en un 80% según el análisis efectuado a la gráfica “correlación de pruebas” realizadas directamente al suelo, teniendo en cuenta la repetibilidad y precisión con respecto al medidor patrón, el pH-metro marca Hanna.
- Se debe manejar un tiempo de 5 a 10 minutos de compensación para el electrodo entre una medición y otra, con el fin de evitar saturación y por ende una medición poco precisa.
- La temperatura es inversamente proporcional al pH, afecta ligeramente la medición, por lo tanto es recomendable realizar las mediciones en temperatura cercana a los 25°C.
- La limpieza adecuada del electrodo cada vez que realice una medición es muy importante para que no afecte la siguiente medición, para esto se requiere agua destilada y pañitos de papel, con los cuales quitamos los residuos y secamos el electrodo antes de su próximo uso.
- A pesar de contar con buenas herramientas computacionales como Proteus, es difícil llevar a cabo la simulación de una medida directa del suelo con el electrodo de pH a través de uno de los puertos del computador (Hyperterminal).
- Los mejores electrodos de pH para el sector agrícola son los de tipo ISFET, éstos son de encapsulamiento metálico, lo que indica mayor eficacia, duración y maniobrabilidad en mediciones directas del suelo.

REFERENCIAS

Bernal, O., Chávez, Á., Ospina, E. y Gómez, W. (2010, 2 de diciembre). Dispositivo para monitoreo de temperatura, humedad y pH en sistemas de lombricultura. Revista gestión integral en ingeniería neogranadina. Recuperado de http://www.umng.edu.co/documents/10162/745279/V2N2_4.pdf

Botboss (2015). *PANTALLA LCD 16x2*. Puebla, México. Recuperado el 8 de agosto de 2016, de <https://botboss.wordpress.com/2015/07/16/libreria-lcd-con-python/>

CALDERÓN-VIELMA, Jesús A, 2006, *Fundamentos De Las Mediciones Eléctricas Teoría Y Prácticas De Laboratorio*. 2006. Recuperado el 10 de agosto de 2016, de <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/damarquezg/LIBFUND1.pdf>

Creussole, A. (1998). Instrumentación Industrial 6º Edición. Alfa omega-Rama.

Documentslide (2015). *Informe pH*. Estados Unidos. Recuperado el 10 de agosto de 2016, de <http://documentslide.com/documents/informe-ph.html>

Docplayer (2006). *Métodos de medida del pH para estudios invasivos prolongados: ISFET y fibra óptica*. Montevideo, Uruguay. Recuperado el 15 de agosto de 2016, de <http://docplayer.es/4570718-Metodos-de-medida-del-ph-para-estudios-invasivos-prolongados-isfet-y-fibra-optica.html>

E-ducativa (2016). *El electrodo estándar de hidrógeno*. Aragon, España. Recuperado el 15 de agosto de 2016, de <http://e->

educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4861/html/21_el_electrodo_estandar_de_hidrogeno.html

El Tolima es líder en producción de arroz, café, maní y arracacha. (7 de abril de 2009). El Tiempo. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-4954546>

Electronicaestudio (2015). *Microcontrolador*. México D.F. Recuperado el 20 de agosto de 2016, de <http://www.electronicaestudio.com/microcontrolador.htm>

ENERGIZER HOLDINGS, INC, 2005, *Energizer Holdings, Inc.* 2005. Recuperado el 25 de agosto de 2016, de: <http://data.energizer.com/PDFs/522.pdf>

Ifent (2016). *Amplificadores operacionales*. Valencia, España. Recuperado el 15 de agosto de 2016, de http://www.ifent.org/temas/amplificadores_operacionales.asp

Importancia (2016). *Importancia del pH*. Argentina. Recuperado el 15 de agosto de 2016, de <https://www.importancia.org/ph.php>

La Guía (2010). *Electrodo de referencia*. Recuperado el 11 de agosto de 2016, de <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/electrodo-de-referencia>

MAYNÉ, Jordi, 2003, Sensores, acondicionadores y procesadores de señal. *Silica*. 2003. Recuperado el 15 de septiembre de 2016, de: http://www.bairesrobotics.com.ar/data/sensores_2003.pdf

Madridmasd (2007). *Un universo invisible bajo nuestros pies*. Madrid, España. Recuperado el 25 de septiembre de 2016, de <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/05/09/65262>

Omega (2016). *Introducción a los acondicionadores de señales*. Nuevo León, México. Recuperado el 9 de septiembre de 2016, de <http://mx.omega.com/prodinfo/acondicionadores-de-senales.html>

PALLÁS, R. A., 2003, *Sensores y acondicionadores de señal*. Cuarta edición. Barcelona, España. Marcombo. ISBN 8426713440.

PALLÁS, R. A., 2006, *Instrumentos electrónicos básicos*. Primera edición. Barcelona, España. Marcombo. ISBN 8426713904.

Recursostic (2009). *Introducción a la programación con lenguaje C*. Madrid, España. Recuperado el 10 de noviembre de 2016, de <http://recursostic.educacion.es/observatorio/web/ca/software/programacion/745-introduccion-a-la-programacion-con-el-lenguaje-c>

QUAN, Vu Minh, GUPTA, Gourab Sen and MUKHOPADHYAY, Subhas, 2011, *Review of sensors for greenhouse climate monitoring*. In: *Sensors Applications Symposium (SAS), 2011 IEEE*. 2011. p. 112–118. Recuperado el 11 de noviembre de 2016, de: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5739816

RAMOS LARA, Rafael, LÓPEZ GARCÍA, Mariano y CANTÓ-NAVARRO, Enrique, 2009, *Entorno Didáctico para Sistemas Digitales de Instrumentación y Control*. 2009.

Recuperado el 15 de noviembre de 2016, de:
http://petrus.upc.es/emys/jcra09_rramos_2.pdf

RUIZ-GARCIA, Luis, LUNADEI, Loredana, BARREIRO, Pilar and ROBLA, Ignacio, 2009, *A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry: State of the Art and Current Trends*. *Sensors*. 2009. Vol. 9, no. 6, p. 4728–4750. DOI 10.3390/s90604728.

SLADE, Mel, JONES, Mark Hedley and SCOTT, Jonathan B., 2011, *Choosing the right microcontroller: A comparison of 8-bit Atmel, Microchip and Freescale MCUs*. Faculty of Engineering, The University of Waikato. Recuperado el 8 de noviembre de 2016, de:
<http://researchcommons.waikato.ac.nz/handle/10289/5938>

TANGIRALA, Phani, 2005, *Development and validation of a special purpose sensor and processor system to calculate equilibrium moisture content of wood*. 2005. Recuperado el 1 de noviembre de 2016, de: http://uknowledge.uky.edu/gradschool_theses/256/

UVA.ES, 2010, *SENSORES: fundamento y características*. 2010. Recuperado el 18 de noviembre de 2016, de: http://www.ele.uva.es/~lourdes/docencia/Master_IE/Sensores.pdf

Wikipedia (2016). *Electrodo de vidrio*. Florida, Estados Unidos. Recuperado el 15 de noviembre de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/Electrodo_de_vidrio

Wikipedia (2016). *Pantalla de cristal líquido*. Florida, Estados Unidos. Recuperado el 11 de noviembre de 2016, de https://es.wikipedia.org/wiki/Pantalla_de_cristal_l%C3%ADquido

Wikipedia (2016). *S.P.L. Sorensen*. Florida, Estados Unidos. Recuperado el 13 de noviembre de 2016, de [https://es.wikipedia.org/wiki/S. P. L. S%C3%B8rensen](https://es.wikipedia.org/wiki/S._P._L._S%C3%B8rensen)

WILEY, J. and Sons, 2001. *Señales y Sistemas*. Primera edición. Balderas, México, ISBN 9681859146.

(Gabsystem, 2016). Recuperado el 10 de noviembre de 2016, de http://shop.gabsystem.com/data/productos/d_gph73_xs-ph7.jpg

(Nysolutionsltd, 2016). Recuperado el 16 de noviembre de 2016, de www.nysolutionsltd.es/dibujopH.jpg

(Photobucket, 2016). Recuperado el 18 de noviembre de 2016, de <http://i11069.photobucket.com/albums/u476/GerAnPer/>

(Ehu, 2016). Recuperado el 15 de noviembre de 2016, de <http://www.ehu.eus/biomoleculas/ph/jpg/strip.jpg>

(Todoelectrodo, 2013). Recuperado el 24 de mayo de 2017, de <http://todoelectrodo.blogspot.com.co/2013/02/lcd-16x2.html>

ANEXOS

ANEXO 1 – PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR PIC16F877A

```
#include "C:\Users\jason\Documents\CCS C Projects\reformado1.h"

#fuses XT, NOWDT, NOPROTECT, NOLVP, PUT, BROWNOUT, NOCPD, NOWRT
#use delay(clock=4000000)

#define ADC_ON      1

#define LCD_RS_PIN  PIN_B0
#define LCD_RW_PIN  PIN_B1
#define LCD_ENABLE_PIN PIN_B2
#define LCD_DATA4   PIN_B3
#define LCD_DATA5   PIN_B4
#define LCD_DATA6   PIN_B5
#define LCD_DATA7   PIN_B6

#include<lcd.c>

void main()
{
    int16 valorDigital;          //Variable de 16 bits, contendrá el valor del conversor A/D
    float valorAnalogico;       //Variable tipo float, contendrá el valor del pH medido

    lcd_init();                 //Inicializamos la librería flex_lcd.c

    printf(lcd_putc,"  U N A D\n"); //Mensajes por el LCD
    printf(lcd_putc,"ING. ELECTRONICA "); //Mensajes por el LCD
    delay_ms(2000);
    printf(lcd_putc,"\f");
    printf(lcd_putc,"  A G R O B O T\n"); //Mensajes por el LCD
    printf(lcd_putc,"  pH - METRO"); //Mensajes por el LCD
    delay_ms(3000);
    printf(lcd_putc,"\f");

    Setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); //Configuramos el ADC para que funcione con un
    //oscilador interno RC
    Setup_adc_Ports(AN0_AN1_AN3); //Configuramos el pin RA1 como entrada analógica de la
    //medición de pH

    delay_us (2000);
}
```

```

while(true)
{
printf(lcd_putc," PROCESANDO..."); //Mensajes por el LCD
delay_ms(3000);
printf(lcd_putc,"\f");
Set_adc_channel(1);           //Seleccionamos el canal '1' para hacer la lectura del valor analógico
                               //el canal '1' corresponde a "AN1"
delay_ms(200);                //Esperamos un tiempo prudente para la toma del valor analógico

valorDigital=read_adc();      //Hacemos la lectura del canal seleccionado anteriormente (canal '1')
delay_ms(200);                //ADC tiene un valor de 168 para pH 0, y de 0 para pH 14 (ver LCD)
                               //Almacenamos el valor digital en una variable entera de 16 bits

if(valorDigital>=126 && valorDigital<=133) //para pH 3 y 3.9
{
valorAnalogico=(valorDigital*0.12857143 - 13.2000002); //Convertimos el valorDigital a un dato
                                                         //analógico gracias a la ecuación de la recta

lcd_gotoxy(1,1);
printf(lcd_putc," NIVEL ");
printf(lcd_putc,"\n pH = %f",valorAnalogico);
delay_ms(120000);
printf(lcd_putc,"\f");
}

if(valorDigital>=134 && valorDigital<=137) //para pH 4 y 4.9
{
valorAnalogico=(valorDigital*0.45 - 56.3); //Convertimos el valorDigital a un dato analógico
                                             //gracias a la ecuación de la recta

lcd_gotoxy(1,1);
printf(lcd_putc," NIVEL ");
printf(lcd_putc,"\n pH = %f",valorAnalogico);
delay_ms(120000);
printf(lcd_putc,"\f");
}

if(valorDigital>=113 && valorDigital<=120) //para pH 5 y 5.9
{
valorAnalogico=(valorDigital*0.12857143 - 9.5285); //Convertimos el valorDigital a un dato
                                                         //analógico gracias a la ecuación de la recta

lcd_gotoxy(1,1);
printf(lcd_putc," NIVEL ");
printf(lcd_putc,"\n pH = %f",valorAnalogico);
delay_ms(120000);
printf(lcd_putc,"\f");
}

if(valorDigital>=95 && valorDigital<=112) //para pH 6 y 6.9

```

```

{
valorAnalogico=(valorDigital*0.05294118 + 0.9705879); //Convertimos el valorDigital a un dato
//analógico gracias a la ecuación de la recta

lcd_gotoxy(1,1);
printf(lcd_putc," NIVEL ");
printf(lcd_putc,"\n pH = %f",valorAnalogico);
delay_ms(120000);
printf(lcd_putc,"\f");
}

if(valorDigital>=86 && valorDigital<=94) // para pH 7 y 7.9
{
valorAnalogico=(valorDigital*0.1125 - 2.675); //Convertimos el valorDigital a un dato analógico
//gracias a la ecuación de la recta

lcd_gotoxy(1,1);
printf(lcd_putc," NIVEL ");
printf(lcd_putc,"\n pH = %f",valorAnalogico);
delay_ms(120000);
printf(lcd_putc,"\f");
}

if(valorDigital>=60 && valorDigital<=82) // para pH 8 y 9.9
{
valorAnalogico=(11.3545454 - valorDigital*0.04090909); //Convertimos el valorDigital a un dato
//analógico gracias a la ecuación de la recta

lcd_gotoxy(1,1);
printf(lcd_putc," NIVEL ");
printf(lcd_putc,"\n pH = %f",valorAnalogico);
delay_ms(120000);
printf(lcd_putc,"\f");
}
}
}
}

```

ANEXO 2 - PRIMERA PRÁCTICA DE LABORATORIO

Fecha y lugar: Agosto 27 de 2016, laboratorio de biología CEAD Ibagué

Participantes: Valentina Milord
Carlos Mario Benítez
Yeison Valderrama
Fernando Camelo (ingeniero)
Noel Zambrano (ingeniero)

Metodología: Practica de laboratorio. Se usará instrumentos de laboratorio para la medición de pH, es decir pH-metro, agua destilada, paños de papel, mezclador de vidrio, vasos de vidrio, probetas y balanza.

La primera prueba de laboratorio se llevó a cabo dos etapas. En la primera tomamos mediciones de pH a cuatro (4) sustancias con un pH-metro de laboratorio modelo HI 83141 del fabricante Hanna. En la segunda etapa medimos la diferencia de potencial en el electrodo implementado en el proyecto y será registrado en un cuadro comparativo.

1º Etapa. Las sustancias y mediciones son las siguientes:

- Zumo de limón. pH: 3.30



- Buffer 7.01. pH: 7.72



- Bicarbonato de sodio. pH: 9.17



- Jabón detergente. pH: 11.45



2º Etapa. Los resultados obtenidos se plasman en una tabla de mediciones del electrodo implementado en el proyecto vs pH-metro Hanna.

Cuadro comparativo de mediciones

SUSTANCIAS	pH-METRO HANNA	ELECTRODO (mv)
<i>Zumo de limón</i>	3.30	440 ... 449
<i>Buffer 7.01</i>	7.72	-150 ... -200
<i>Bicarbonato</i>	9.17	-421 ... -436
<i>Jabón detergente</i>	11.45	-45 ... -112

Conclusiones: El electrodo no tiene una respuesta lineal de acuerdo a la escala de pH, sin embargo fueron pocas las sustancias analizadas en esta prueba, se determina con los ingenieros que se debe ampliar el número de sustancias y con pH variado dentro del rango 3 a 9 en la escala de pH.

ANEXO 3 - SEGUNDA PRÁCTICA DE LABORATORIO

Fecha y lugar: Septiembre 14 de 2016, laboratorio de biología CEAD Ibagué

Participantes: Valentina Milord
Leidy Montero
Juan David Salcedo
Yeison Valderrama
Fernando Camelo (ingeniero)
Noel Zambrano (ingeniero)

Metodología: Practica de laboratorio. Se usará instrumentos de laboratorio para la medición de pH, es decir pH-metro, agua destilada, paños de papel, mezclador de vidrio, vasos de vidrio, probetas y balanza.

La segunda prueba de laboratorio se llevó a cabo dos etapas tal como se hizo en la anterior prueba de laboratorio. En la primera etapa tomamos mediciones de pH a siete (7) sustancias entre el rango 3 a 10 con un pH-metro de laboratorio modelo HI 83141 del fabricante Hanna. En la segunda etapa medimos la diferencia de potencial en el electrodo implementado en el proyecto y lo registramos en un cuadro comparativo.

1º Etapa. Las sustancias y mediciones son las siguientes:

- Zumo de limón. pH: 3.64



- Café. pH: 4.63



- Buffer 4.0. pH: 4.85



- Leche. pH: 6.27



- Buffer 7.01. pH: 7.80



- Leche de magnesia. pH: 10.58

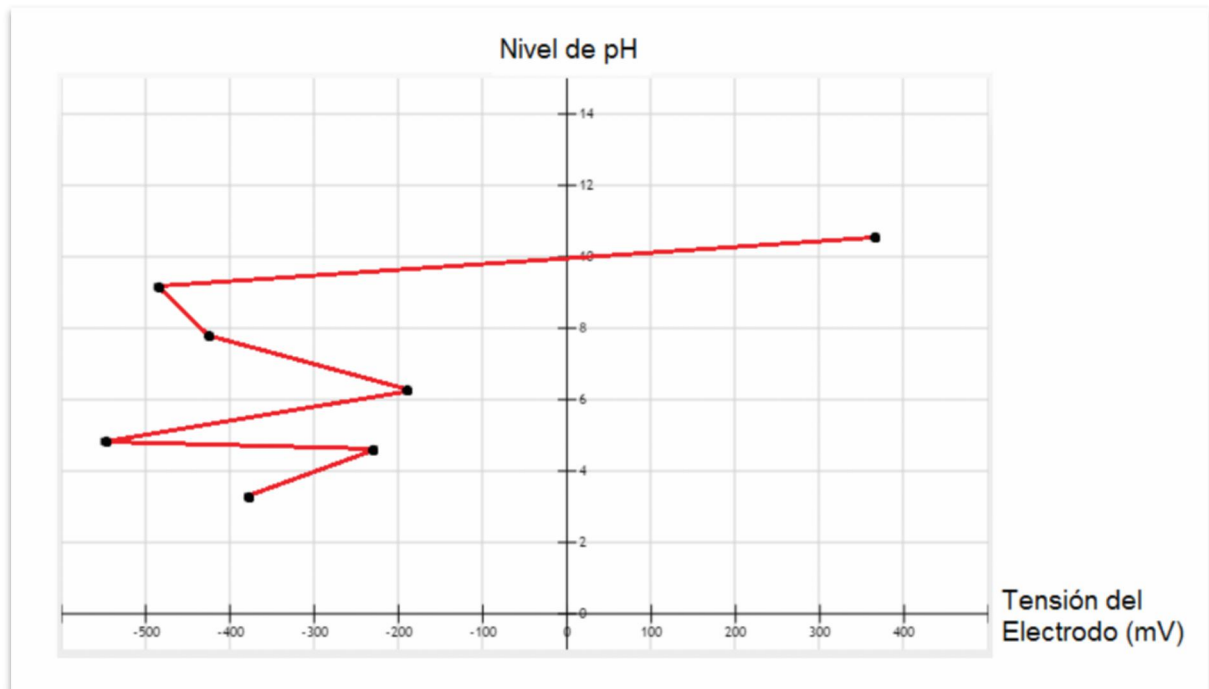


2º Etapa. Los resultados obtenidos se plasman en una tabla de mediciones del electrodo implementado en el proyecto vs pH-metro Hanna.

Cuadro comparativo de mediciones

SUSTANCIAS	pH-METRO HANNA	ELECTRODO (mv)
<i>Zumo de limón</i>	3.30	-380
<i>Café</i>	4.63	-230 ... -279
<i>Buffer 4.0</i>	4.85	-550 ... -572
<i>Leche</i>	6.27	-192 ... -185
<i>Buffer 7.01</i>	7.80	-425
<i>Bicarbonato</i>	9.18	-487
<i>Leche de magnesia</i>	10.58	365

Gráfica de la diferencia de potencial en las siete (7) sustancias analizadas.



Conclusiones: El electrodo no tiene una respuesta lineal de acuerdo a la escala de pH, confirmado en esta segunda práctica de laboratorio. Se determina con los ingenieros que se debe realizar un programa para el microcontrolador ajustado a los resultados obtenidos en esta práctica, es decir que para cada nivel de pH el programa deberá contener una subrutina condicional y así ajustarnos al comportamiento funcional del electrodo implementado en el proyecto. Seguimos enfocados en la lectura de pH dentro del rango 3 a 9 en la escala de pH, especial para mediciones directas al suelo.

ANEXO 4 - TERCERA PRÁCTICA DE LABORATORIO

Fecha y lugar: Noviembre 30 de 2016, laboratorio de electrónica CEAD Ibagué

Participantes: Leidy Montero
Valentina Milord
Carlos Mario Benítez
Yeison Valderrama
Noel Zambrano (ingeniero)

Metodología: Practica de laboratorio. Uso de instrumentos de laboratorio para la medición de pH, es decir pH-metro, agua destilada, paños de papel, mezclador, bisturí, recipientes y el prototipo.

Esta prueba de laboratorio se realizó con el prototipo debidamente programado de acuerdo a las mediciones obtenidas en las anteriores prácticas de laboratorio, en esta ocasión se medirá tres tipos de sustancias: zumo de tomate, leche y zumo de limón.

- Zumo de limón, pH aproximado 3



- Zumo de tomate, pH aproximado 5



- Leche, pH aproximado 6



Tabla de resultados

SUSTANCIAS	Prototipo (nivel pH)
<i>Zumo de limón</i>	3,12
<i>Zumo de tomate</i>	5,77
<i>Leche</i>	6,00

Conclusiones: el prototipo realiza de manera óptima las mediciones de estas sustancias, las cuales están en el rango acordado con los ingenieros (3 a 9) y se encuentra listo para realizar lecturas de pH directa del suelo.

ANEXO 5 - ENCUENTRO EXPOTECH

El evento se llevó a cabo el día 2 de diciembre de 2016 en la sede nacional José Celestino Mutis de la universidad nacional abierta y a distancia UNAD, Bogotá D.C. (Tomado de: <https://academia.unad.edu.co/expotech>).

Misión. Expotech es un encuentro científico que permite la divulgación y proyección de los procesos y proyectos de investigación que se desarrollan al interior de la Universidad desde la cadena de formación ETR.

Visión. Expotech será un evento de reconocido prestigio internacional que reúna a los diferentes actores en el campo de la electrónica y telecomunicaciones, donde se compartirán sus avances, logros y proyecciones.



ANEXO 6 - PRUEBAS DE CAMPO

1. Práctica de campo comparativa realizada en los jardines de la universidad UNAD, se empleó el pH-metro marca Hanna y el prototipo:

<i>pH-metro Hanna</i>	<i>Prototipo</i>
7,18	7,11



2. Práctica de campo comparativa realizada en los jardines de la universidad UNAD, se empleó el pH-metro marca Hanna y el prototipo:

<i>pH-metro Hanna</i>	<i>Prototipo</i>
5,84	5,64



3. Práctica de campo comparativa realizada en los jardines de la universidad UNAD, se empleó el pH-metro marca Hanna y el prototipo:

<i>pH-metro Hanna</i>	<i>Prototipo</i>
6,01	6,47



4. Práctica de campo comparativa realizada en los jardines de la universidad UNAD, se empleó el pH-metro marca Hanna y el prototipo:

<i>pH-metro Hanna</i>	<i>Prototipo</i>
7,08	7,22



ANEXO 7 - GALERÍA DE FOTOS DEL PROYECTO



