



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE  
MORELOS**

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO ELECTRÓNICO PARA LA  
MEDICIÓN DE ACIDEZ (pH) EN SISTEMAS ATMOSFERICOS**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA**

**PRESENTA:**

ING. YAIR ALEJANDRO GUTIÉRREZ ALVAREZ

**ASESORES:**

DR. OUTMANE OUBRAM  
DR. ROY LÓPEZ SESENES



CUERNAVACA, MORELOS.

NOVIEMBRE 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA**  
Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT  
SGC certificado en la norma ISO 9001:2015

Secretaría de Investigación y Posgrado

FORMATO T-2  
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA  
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 4 de noviembre de 2021.

**Dr. Mario Limón Mendoza**  
**Dr. José Gerardo Vera Dimas**  
**Dr. Outmane Oubram**  
**Dr. Roy Lopez Sesenes**  
**Dra. María del Carmen Torres Salazar**  
**PROFESORES DE LA FCQEI**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta el Ing. Yair Alejandro Gutiérrez Álvarez titulada: “DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO ELECTRÓNICO PARA LA MEDICIÓN DE ACIDEZ (pH) EN SISTEMAS ATMOSFERICOS” realizada bajo la dirección del Dr. Outmane Oubram y Dr. Roy Lopez Sesenes en el Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

**A T E N T A M E N T E**  
*Por una humanidad culta*

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA DE LA FCQEI**

**D I C T A M E N**

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA DE LA FCQEI**

**P R E S E N T E**

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:.

**D I C T A M E N**

<b>NOMBRE</b>	<b>VOTO</b>	<b>FIRMA</b>
Dr. Mario Limón Mendoza		
Dr. José Gerardo Vera Dimas		
Dr. Outmane Oubram		
Dr. Roy Lopez Sesenes		
Dra. María del Carmen Torres Salazar		

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209,  
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 3025, 4993/ investigación.fcqei@uaem.mx



*Una universidad de excelencia*

RECTORÍA  
2017-2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

#### Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2021-11-05 21:39:41 | Firmante

CeKijkOomVhn4kWD+391s1A1bbtGHLax3IF1+kcwrWwWyW1jy1O2sgl8WVSBGIVeJWVDUV5ukx8mbRP1i0dDan4rcQVNeChpSU3RmNW+59mKkKTWHLkQJIUNriJMBKl0kw4tt22308FpbowKutg/qvdxqgh28m0j6BFMrZKrupNkU43QJjhMV7egLTFoHyb7L BgQN4zPixJnewKopPYSPONSKKhUPGQ4SO/3x4wPY110IUYXY9rYPJUt1GwGpUwAIKEUZxZcM0qbNefNKBle2Y3KTQnxMd2xplwdzb39B0jvmSn3CsL0MTIGQK7vs2piwZ1dxsCylIREH6Y2fIU0Q==



Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

[KkzMRXBpU](#)

<https://etirma.uaem.mx/noRepudio/B6DdKzA01n5iKajSvSox35Zk4lhJz8u>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**OUTMANE OUBRAM** | Fecha:2021-11-08 10:38:20 | Firmante

IPJai6T8654J+vsNvajdYMHBJGGK1zspymNymtSzAYQBYKlhmsUylFwaBZ6K3eKasSB9TDXLh+nU7+LwPUNfmLbzLs67TB6GoNtendcq/AmDwl5xRHM77QOv3TaORDZZPA +OfwJ CZcy0XM0sVae2LD74X+LgGUpb0NwWbZQV8KC DvunKqFqGZiWOS9hiMmO2NEn8G++PuviD2fCvriI9DXbS2NmSefj36BwVjFV CZGbos498xeNFWGRsC5yH2VXDWSUcSYYYBhV1Amdjv5XsXesxZjMsBEs2u1BJ336WfJHXDXAgT75PDvubPHBEc283N4pEhmFOcPDxLM/g3w==

**ROY LOPEZ SESENE** | Fecha:2021-11-08 10:50:36 | Firmante

MbnPA28g1JgzE5sSSiKzziIkdiUllMb9sXYFWTOvRYFpAdbjT8i5rDalMWuOmDNtGhJUoXQ1Pac3hzLTDxhJKN+fXQ4VrOfbKfeN7uDFOQYOabxpzmqZaqy40cNx71H2hApFEq QpbB9yyQYdgNBf/3USus/eaQcAdB3hOOkIP2h91HjYQfZNYLrg6VbKSYRHBM8rOrizXBtva37klkNTP6FRWGTi4drVWlGDzFo4n+6YkMPlbbs3KH5eQFd6GGcLk5lcTU8xH/EPG2SKeHnG/mUV/7aFFqQrll5FSVChtrK+R2JfA+CPXMOXsm7+MzIObuUCTIBAS0mRSLXQ==

**MARIO LIMON MENDOZA** | Fecha:2021-11-08 10:56:18 | Firmante

OeprJYb7nl+Mtgf5mh202PMKR/MZz0KKh1lInw8OKgbt+BB3/D5IBb3fUQ5mK8l2pYe9cVDaZco9wtML6BAstodK+NcQbW8x0YtyhXL4jrowVqF0Ma/qv6nSsYzUX8vZsXmEv6XA WSMem2gnkoe68GYI06QpPaYt2EFBv56lLTU7PkLrqf6kWL4gldN97zUVgcXMnzSt22P0KF5gG+9s7BQ5l8+lvveSEqMjnsFafJwvvn2qJPEFFnhvYDs4arsTPOrid6x9Sq0eYts O5yxOnRix+vDL25GZxS7cT34a9Qp6mQlsRHX8d6lxNp+KTGyS+hiFJ0vMjL8EAwRQ==

**JOSE GERARDO VERA DIMAS** | Fecha:2021-11-08 11:09:37 | Firmante

agKaeEHlkBNtdabqazc5n0Qw3UVY9EYfhQjddtlcDzCgW9Qwq4B1/rq7YyayEXzmtzNYPcy14fnrNaAxsyKJ1e0UB4vESyJfFpslAXA84AdtCZNC5lGkbi5XPgW071tYzb/FJtq3fQv J3NasFnApYw57mHyCA+n+2oJClO7aUwdAVyD46FIHr+4Axpooi0apH0Fy9exvSoQr8bAscQFxl1HLDT9BCvOOOUJUUVSnENthU2c/fbwG5T3sANkgsaKNvdfQTeag7m3Guplm EJAx69qFbmElgk9kV1a6AVGZjfsFa3hUr9cEae0pnFIRN/PhITFVNsXvDsP+DzwJVYg==

**MARIA DEL CARMEN TORRES SALAZAR** | Fecha:2021-11-08 11:51:59 | Firmante

00Mup02sfv/URyjZYoSaoFYpSi+tbOv8gchPHN1KXkHUPruOAQObf2xw8YaNdv/C3xS8qhcDKsllnzlQLAjMZW4zjSH+Ueic0OicJZ/B6PEDpWvYTXd3slQ0eXVRNpm6mepv7oj XcAm1KhH1QDqoPs9Z74AndRyBb1FLPPWOOQSGeCmQajClhfn6CeqN9sbJnLswoJ3f2lwXrV1ul4Ssg9imvHMLxXPAb3GLLeq0l27xlE/e9Xk8BkpwXFA83lDy3dhx99UbrUVsc e9P2omQcMRq8eOIS3UzPEAWZM7qec9i4h/YDypEHqCk7DWM0rImFNMVl64v7PTmNCw==



Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

Jny3O4IA

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/fMKsBfrULZulHiSxgs19ddOytpYFuw9r>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi profundo agradecimiento a mis padres y seres queridos, quienes son mi inspiración, que, gracias a sus consejos, palabras de aliento y cariño me han ayudado a lograr mis metas.

A la facultad de ciencias químicas e ingeniería de la UAEM, por permitirme realizar la maestría y contribuir a mi preparación académica y profesional.

A mis profesores, quienes al compartir sus conocimientos me enriquecieron día a día para poder concluir esta etapa académica y profesional de mi vida.

Finalmente quiero agradecer al Dr. Outmane Oubram y al Dr. Roy López Sesenes asesores de esta tesis, quienes con su apoyo, conocimiento y experiencia se logro concluir este trabajo, gracias por su confianza, dedicación, conocimientos, y consejos.

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1 .....	10
1.1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.2. ANTECEDENTES .....	11
1.3. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.....	12
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	13
1.5. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	14
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.6. ALCANCE.....	14
CAPÍTULO 2 .....	15
2.1. MARCO TEÓRICO.....	15
2.2. ACIDEZ.....	15
2.3. TÉCNICAS HABITUALES DE MEDICIÓN DE pH.....	18
2.3.1. PAPEL INDICADOR UNIVERSAL.....	18
2.3.2. INDICADOR EN DISOLUCIÓN .....	19
2.3.3. SISTEMA DE ELECTRODO DE VIDRIO (pH-METRO).....	19
2.3.4. FUNCIONAMIENTO DEL ELECTRODO DE VIDRIO (pH-METRO) .....	21
2.4. PUNTO DE ROCÍO .....	23
2.5. SENSOR ISFET .....	24
2.6. PRINCIPIOS DE CALIBRACIÓN DE SENSOR.....	25
CAPITULO 3 .....	27
2.1 DEFINICIÓN DE TECNOLOGÍAS .....	27
2.2 SENSORES.....	27
3.2.1. DESCRIPTORES ESTÁTICOS DE UN SENSOR .....	27
3.2.2. DESCRIPTORES DINÁMICOS DE UN SENSOR .....	28
3.2.3. SENSOR DTH11 .....	29
3.2.4. SENSOR DS18B20 .....	33
3.3. ARDUINO .....	36
3.3.1. PLACA ARDUINO MEGA.....	37
3.3.2. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DEL ARDUINO MEGA .....	39
3.3.3. ENTRADAS Y SALIDAS DEL ARDUINO MEGA .....	40

3.3.4.	COMUNICACIÓN ARDUINO MEGA .....	41
3.4.	PLACA PELTIER.....	42
3.5.	CONTROLADOR PID (PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVATIVO).....	45
3.5.1.	ESTRUCTURAS ESTÁNDAR DE CONTROLADORES PID .....	46
CAPÍTULO 4	.....	47
4.1.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	47
4.2.	DISEÑO DE PROTOTIPO .....	47
4.3.	SISTEMA DE ENFRIAMIENTO .....	51
4.4.	ADQUISICIÓN DE DATOS E IMPLEMENTACIÓN DE LA ECUACIÓN PARA EL PUNTO DE ROCIÓ EN ARDUINO. ....	54
4.5.	PRUEBAS DE MEDICIÓN DEL SENSOR DE PH ISFET MO-PSF02 .....	63
CONCLUSIONES	.....	70
BIBLIOGRAFÍA	.....	71
ANEXO	.....	73
	PROGRAMA IMPLEMENTADO EN PLATAFORMA ARDUINO PARA EL MONITOREA DE TEMPERATURAS, HUMEDAD Y CÁLCULO DE PUNTO DE ROCIÓ .....	73
	EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DEL PROTOTIPO REALIZADO.....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Escala de Colorimetría para el pH.....	16
Figura 1.2. Papel indicador universal. ....	18
Figura 1.3. Estructura de pH-metro. ....	20
Figura 1.4. Comportamiento de iones de hidrogeno en pH-metro.....	20
Figura 1.5. Circuito simplificado de un pH-metro.....	25
Figura 2.1. Comportamiento dinámico de un sensor.....	29
Figura 2.2 Sensor DTH11.....	31
Figura 2.3. Pines de conexión del sensor DTH11 .....	31
Figura 2.4. Diagrama electrónico del sensor DTH11.....	32
Figura 2.5. Sensor DS18B20.....	34
Figura 2.6. Configuración de pines del sensor DS18B20.....	35
Figura 2.7. Placa Arduino mega .....	37
Figura 2.8. Estructura de placa Peltier. ....	42
Figura 2.9. Corte transversal de la celda Peltier donde se muestran los elementos semiconductores y las aletas disipadoras. ....	43
Figura 2.10. Compresión y enrarecimiento de portadores de carga cerca de la unión metal semiconductor en una celda Peltier.....	44
Figura 3.1. Bosquejo del prototipo.....	48
Figura 3.2. Sensor de temperatura de la celda Peltier. ....	49
Figura 3.3. Sensor de pH ISFET. ....	49
Figura 3.4. Diagrama electrónico del prototipo.....	50
Figura 3.5. Sistema de enfriamiento.....	51
Figura 3.6 Componentes del sistema de enfriamiento. ....	52
Figura 3.7. Adquisición de datos. ....	55
Figura 3.8. Diagrama electrónico de adquisición de datos del sensor de pH ISFET MO-PSF0. ....	63
Figura 3.9. Medición del pH 10.....	64
Figura 3.10. Medición del pH 7.....	64
Figura 3.11. Medición del pH 4.....	65



Figura 3.12. Adquisición de datos vía serial.....	65
Figura 6.1. Vista superior del prototipo.....	76
Figura 6.2. Sensor de pH isfet MO-PSF02.....	76
Figura 6.3. Adquisición de datos del sistema vía serial.....	77
Figura 6.4 Vista frontal del prototipo.....	77
Figura 6.5. Sistema de enfriamiento interno del sistema.....	78
Figura 6.6. Sensores instalados dentro del sistema.....	78

### ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1. Comportamiento de la temperatura de la celda Peltier.....	53
Gráfica 4.2. Comportamiento de la temperatura ambiente.....	58
Gráfica 4.3. Comportamiento de la humedad relativa .....	59
Gráfica 4.4. Comportamiento del sensor 1(Ts1).....	60
Gráfica 4.5. Comportamiento del sensor 2(Ts2).....	61
Gráfica 4.6. Temperatura promedio del sistema. ....	62
Gráfica 4.7. Mediciones del sensor pH isfet MO-PSF02 en pH 10.....	67
Gráfica 4.8. Mediciones del sensor pH isfet MO-PSF02 en pH 7.....	68
Gráfica 4.9. Mediciones del sensor pH isfet MO-PSF02 en pH 4.....	69

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ejemplos de escala pH aplicada a sustancias.....	17
Tabla 2.2. <i>Equivalencia de diferencial de potencial respecto a ph</i> .....	22
Tabla 3.1. <i>Especificaciones técnicas de la placa Arduino mega</i> . ....	38
Tabla 4.1. Caculo de error de mediciones obtenidas del sensor pH isfet MO-PSF02. .....	69

# CAPÍTULO 1

## 1.1. INTRODUCCIÓN

La importancia de la medición del pH radica en los valores y cambios del pH, así como en la generación de lluvia acida, debido a la contaminación ambiental.

En el presente trabajo se realizó el análisis de pH empleando un dispositivo electrónico cuya finalidad fue medir el valor anteriormente mencionado en gases. Con base en lo anterior se realizó una investigación de forma exhaustiva con respecto a las tecnologías existentes para su medición. De lo anterior se encontró que existen dispositivos para la medición de pH en sólidos y líquidos principalmente, sin embargo, para la medición en gases suspendidos en la atmosfera se encuentran pocos estudios, así como elementos de medición que permitan cuantificar dicho valor. Actualmente no existe una tecnología capaz de medir el pH en tiempo real en sistemas atmosféricos.

Algunos efectos de la lluvia acida son los siguientes:

Efectos sobre edificaciones: Los químicos de la lluvia ácida son corrosivos, dañando la superficie de los objetos. Además, al disolver el carbonato de calcio, deteriora rápidamente todos los monumentos y edificaciones construidos con mármol o piedra caliza.

Efectos en lagos, ríos y océanos: La lluvia ácida cambia la composición del suelo y desplaza los metales pesados hacia las aguas subterráneas, aumentando su toxicidad e imposibilitando su consumo. Además, los ácidos disminuyen el pH de los acuíferos dulces lo que afecta al desarrollo de la fauna acuática.

Efectos sobre la vegetación: El movimiento de aluminio y metales pesados del suelo, impide que la vegetación absorba el agua y los nutrientes correctamente. Esto hace que los árboles y plantas se debiliten.

Efectos en los seres humanos: Al afectar la lluvia ácida a los diferentes agentes medioambientales (aire, agua, tierra, animales) esto provoca que el ser humano sufra efectos en su salud.

Con base en lo anterior es importante desarrollar una tecnología capaz de medir el pH en sistemas atmosféricos para estudios futuros.

## **1.2. ANTECEDENTES**

El pH está siempre presente en la vida cotidiana de la humanidad, desde en los ríos, como en la sangre de los seres humanos, en el aire que respiramos diariamente.

El concepto de pH fue introducido por el bioquímico danés Soren Peter Lauritz Sorensen (1868-1939) en 1909 Sorensen estaba investigando el uso de un electrodo de hidrógeno normal, para medir la acidez de las soluciones. Al investigar el efecto de la concentración de los iones sobre las proteínas creó en 1909 una forma simple de expresar la concentración de iones de hidrógeno en una solución: la escala de pH (potencial de hidrógeno).

Actualmente se carece de estudios relacionados con la medición de pH en sistemas atmosféricos ya que la acidez (pH) de medio ambiente es un parámetro muy difícil de medir, ya que los procedimientos de medición convencionales no están diseñados para determinar el valor de pH en sistemas gaseosos. Los electrodos convencionales, el papel universal permiten medir el pH en sistemas líquidos como soluciones y semisólidos como alimentos, suelos etc. Y no así en la medición de pH ambiental.

Cuando se produce contaminación el aire por diferentes tipos de gases y en presencia de humedad relativa alta se genera el fenómeno conocido como lluvia

ácida. La lluvia ácida consiste en la combinación química de uno o varios gases de características ácidas con la lluvia o humedad del medio ambiente, al precipitarse la lluvia ácida sobre construcciones, flora y fauna, tiene grandes afectaciones por lo cual es de suma importancia desarrollar un equipo capaz de medir la acidez en sistemas gaseosos.

En la actualidad la única investigación realizada para el estudio de pH en sistemas atmosféricos es la que se llevó a cabo por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en la Universidad Politécnica de Madrid, España. La investigación y patente llevan por nombre sistema para la determinación de acidez ambiental y método que hace uso del mismo. No de publicación: es2373138 A1 (31.01.2012).

En la patente anterior como su nombre lo menciona se describe un sistema para la determinación de acidez ambiental basado en sensores que cambian de color en función del pH ambiental. El dispositivo objeto de la invención permite determinar el pH del medio ambiente mediante unas unidades lectoras que hacen pasar una radiación por el sensor cuando este ha modificado sus características ópticas a consecuencia del pH del lugar donde se encuentre ubicado [14].

Este trabajo se realizará el estudio pertinente para el desarrollo de un dispositivo capaz de medir el pH en sistemas gaseosos. Las investigaciones en México acerca de la medición de pH en sistemas gaseosos son nulas, por lo cual la Universidad Autónoma del Estado de Morelos será pionera en el estudio de dicho problema.

### **1.3. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO**

El problema que existe actualmente en el mundo por la contaminación ambiental ocasionado por la humanidad, especialmente por la quema de combustibles fósiles, la cual ha provocado la contaminación atmosférica y fenómenos como la lluvia ácida las cuales afectan a la variación de pH en el medio ambiente han sido las principales motivaciones para el desarrollo del presente proyecto. En este sentido, es importante mencionar que el pH de la lluvia cambia al combinarse con el ácido sulfúrico y el ácido nítrico, por lo que cuando precipita, esta tiende a perturbar los

valores de pH del subsuelo, así como de las aguas contenidas en ríos poniendo en riesgo el equilibrio del ecosistema. Lo anterior es conocido como acidificación del medio ambiente, un fenómeno que tiene graves efectos.

Por lo cual se ha detectado la necesidad de diseñar un dispositivo electrónico capaz de medir el pH en ambientes atmosféricos ya que actualmente no existe algún dispositivo capaz de medir el pH en sistemas gaseosos. Y así poder monitorear los cambios que esté presente para poder determinar su afectación en monumentos históricos, plantas, edificios entre otros.

Las técnicas habituales de medición de pH solo son idóneas en sistemas líquidos y semisólidos.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN**

Es bien sabido que los valores de pH son de suma importancia debido a que de ellos depende la buena conservación y aseguramiento de procesos. En la actualidad se cuentan con una gran cantidad de dispositivos para su medición en líquidos y sólidos, del estudio de la técnica realizado a través de diferentes fuentes electrónicas se observó solo dos estudios enfocados en la determinación del pH en sistemas gaseosos. Esto debido a que el pH cambia con factores tales como la temperatura, la humedad y la presión generando con ello la adquisición de datos erróneos cuando las muestras no son manipuladas adecuadamente.

Con el aumento de la contaminación atmosférica, la comunidad estudiantil, científica e ingenieril busca desarrollar sistemas que permitan la medición de acidez (pH) bajo estas condiciones para estudiar su afectación en los diferentes procesos que dependen de este valor.

## **1.5. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.5.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar y diseñar un prototipo electrónico capaz de medir el pH en ambientes atmosféricos.

### **1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Analizar el estado del arte referente a los principios que rigen el comportamiento del pH y pH-metros convencionales.
2. Calcular el punto de rocío para alcanzar el punto de condensación del gas y realizar la estimación de los valores de pH.
3. Desarrollar el dispositivo electrónico (pH-metro) capaz de medir el pH en gases mediante condensación.
4. Realizar pruebas de funcionamiento y comparaciones con pH-metros convencionales.

## **1.6. ALCANCE**

En el presente trabajo de investigación se limitará a la construcción de un prototipo capaz de medir humedad, temperatura y el pH en gases empleando sensores tipo ISFET y válvulas de apertura y cierre, así como sistemas de enfriamiento con la finalidad de generar el punto de rocío requerido para la condensación del gas, permitiendo además la adquisición de datos para estudios futuros.

## CAPÍTULO 2

### 2.1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan los conceptos básicos aplicables en el presente proyecto, para una mejor comprensión de dichos conceptos.

### 2.2. ACIDEZ

El pH es una de las medidas de laboratorio más habituales porque muchos procesos químicos y biológicos dependen del pH. La variación del pH influye de diferentes maneras en distintos procesos, por ejemplo: Si el pH de la sangre humana cambia tan solo en 0,03 unidades de pH o menos, el funcionamiento del cuerpo se verá muy afectado. Los valores de pH de los lagos, ríos y océanos difieren y dependen de los tipos de animales y plantas que viven allí. El pH del suelo afecta la habitabilidad de las plantas [1].

Además, el pH es fundamental para el control de reacciones químicas, se lleva a cabo en casi todas las industrias: Desde el agua potable, la alimentación, medicamentos, plásticos, semiconductores, cementos, vidrio o textiles.

El término pH se deriva de una combinación de "p" para la palabra potencia y "H" para el símbolo del elemento hidrógeno.

En solución acuosa, existe el siguiente equilibrio entre el agua ( $H_2O$ ), el ácido ( $H^+$ ) y el alcalino ( $OH$ ). Un valor de pH se define como el logaritmo negativo de la actividad de los iones de hidrógeno mediante la siguiente ecuación:

$$pH = -\log [H^+] \quad (1)$$

El pH se utiliza para especificar el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa a una temperatura determinada. El término actividad se utiliza porque el pH

refleja la cantidad de iones de hidrógeno disponibles, no la concentración de iones de hidrógeno.

En la Figura 1.1 se observa la escala de colorimetría de pH por mediante de un papel universal, donde se observa que tendrá en color en tendencia rojo mientras más ácido sea y un color con tendencia a azul mientras más alcalino(base) sea, respecto a un pH neutro (pH=7) se presentará de un color blanco y en la Tabla 1.1 se observan ejemplos de diversas sustancias y su valor de acidez.

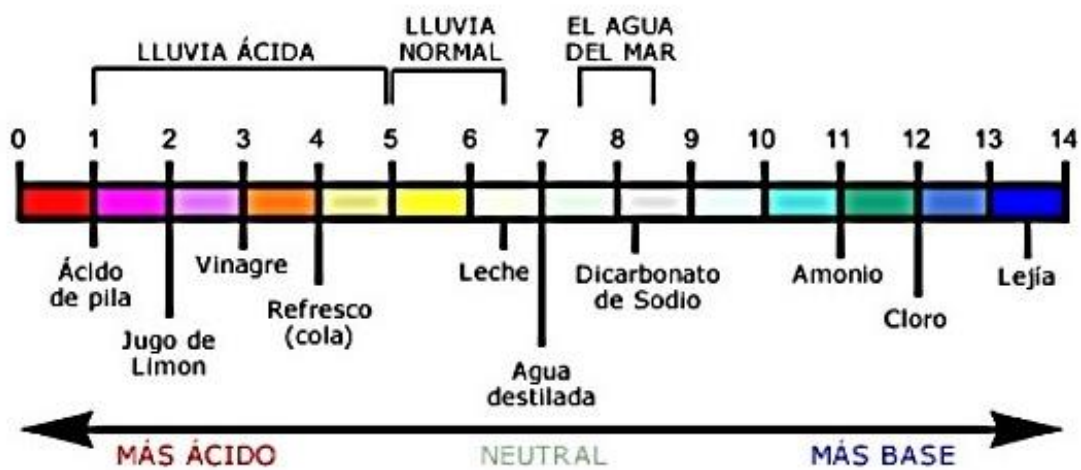


Figura 1.1. Escala de Colorimetría para el pH.



**Tabla 1.1.** Ejemplos de escala pH aplicada a sustancias.

<b>Ejemplo</b>	<b>pH</b>	<b>[H<sup>+</sup>]</b>	<b>P[OH<sup>-</sup>]</b>
<b>Acido de batería</b>	1	14	1X10 <sup>-14</sup>
<b>Jugo gástrico</b>	1X10 <sup>-1</sup>	13	1X10 <sup>-13</sup>
<b>Jugo de limón</b>	1X10 <sup>-2</sup>	12	1X10 <sup>-12</sup>
<b>Bebida de cola</b>	1X10 <sup>-3</sup>	11	1X10 <sup>-11</sup>
<b>Jugo de tomate</b>	1X10 <sup>-4</sup>	10	1X10 <sup>-10</sup>
<b>Café</b>	1X10 <sup>-5</sup>	9	1X10 <sup>-9</sup>
<b>Lluvia</b>	1X10 <sup>-6</sup>	8	1X10 <sup>-8</sup>
<b>Agua destilada</b>	1X10 <sup>-7</sup>	7	1X10 <sup>-7</sup>
<b>Agua de mar</b>	1X10 <sup>-8</sup>	6	1X10 <sup>-6</sup>
<b>Leche de magnesio</b>	1X10 <sup>-9</sup>	5	1X10 <sup>-5</sup>
<b>Jabón líquido</b>	1X10 <sup>-10</sup>	4	1X10 <sup>-4</sup>
<b>Agua de cal</b>	1X10 <sup>-11</sup>	3	1X10 <sup>-3</sup>
<b>Amoniaco</b>	1X10 <sup>-12</sup>	2	1X10 <sup>-2</sup>
<b>Hidróxido de sodio</b>	1X10 <sup>-13</sup>	1	1X10 <sup>-1</sup>
<b>Sosa caustica</b>	1X10 <sup>-14</sup>	0	1

## 2.3. TÉCNICAS HABITUALES DE MEDICIÓN DE pH

A continuación, se presentan las técnicas habituales de medición de pH en la actualidad los cuales se dividen aproximadamente en cuatro categorías: Reactivos indicadores, tiras reactivas de pH, métodos de electrodo metálico (electrodo de hidrógeno, electrodo de quinhidrona y método de electrodo de antimonio) y métodos de electrodo de vidrio.

### 2.3.1. PAPEL INDICADOR UNIVERSAL

El indicador universal es una tira de papel impregnada de una mezcla de indicadores que dan como resultado un color preciso para ciertos valores de pH, por lo que se puede medir en una disolución sin más que comparar el color obtenido al añadir una gota de disolución con el de referencia, como la que se observa en la Figura 1.2. Papel indicador universal.[2].



Figura 1.2. Papel indicador universal.

### **2.3.2. INDICADOR EN DISOLUCIÓN**

Los indicadores suelen ser ácidos o bases débiles que se caracterizan porque su molécula neutra tiene un color diferente al de la forma iónica. Por lo general, este cambio de color obedece a que la pérdida o ganancia de un  $H^+$  por parte del indicador provoca una reorganización interna de los enlaces.

En medio ácido, el equilibrio está desplazado hacia la izquierda, ya que el indicador capta los  $H^+$  en exceso, con lo cual predomina la forma incolora. En medio alcalino, los  $OH^-$  libres consumen los  $H^+$  y el equilibrio se desplaza hacia la derecha con lo cual aparecerá la forma coloreada del indicador [2].

### **2.3.3. SISTEMA DE ELECTRODO DE VIDRIO (pH-METRO)**

El electrodo de vidrio consiste en un tubo de vidrio cerrado en su parte inferior con una membrana de vidrio sensible a los iones de hidrogeno ( $H^+$ ). Al interior de esta membrana se encuentra una solución de pH constante dentro de la cual está inmerso un hilo de plata recubierto de  $AgCl$  (cloruro de plata). Al introducir este electrodo en la solución, se genera un potencial relacionado con  $H^+$ . Para medir dicho potencial en el electrodo es necesario disponer en la solución de un electrodo de referencia, además de cerrar el circuito, suministra un potencial constante que sirve de referencia para medir el diferencial de potencial entre ambos electrodos [3]. El electrodo de referencia contiene una membrana interna formada por un hilo de plata recubierto con  $AgCl$  en contacto con un electrodo de  $KCl$ .

Este electrodo pasa por la solución de muestra a través de una unión líquida, de este modo, la membrana del electrodo permanece en contacto con la solución que no varía de concentración y por lo tanto proporciona una referencia estable de potencial. En la Figura 1.3 se observa la composición de un pH-metro. Y en la Figura

1.4c podemos observar el comportamiento de los iones de  $H^+$  dependiendo si es acido, base o neutral [3].

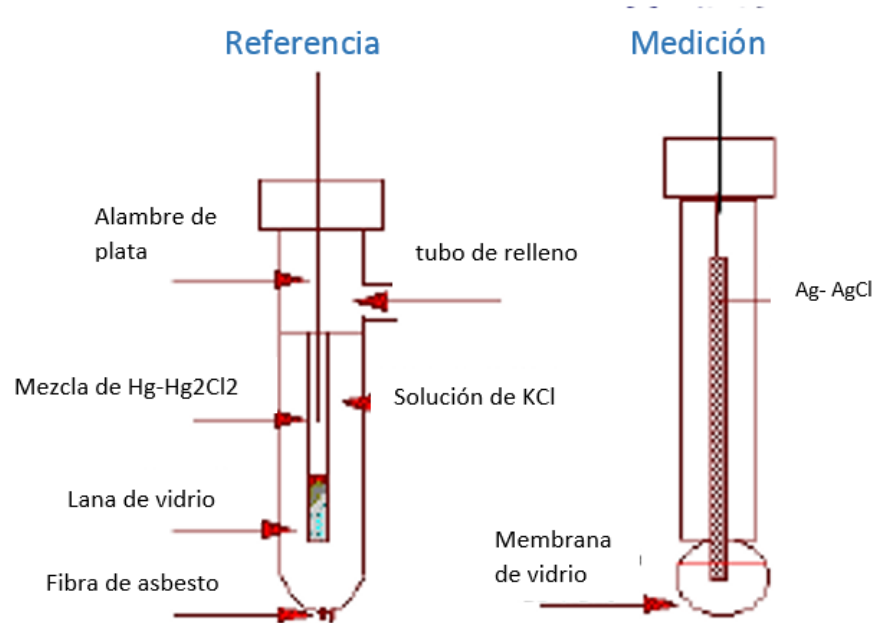


Figura 1.3. Estructura de pH-metro.

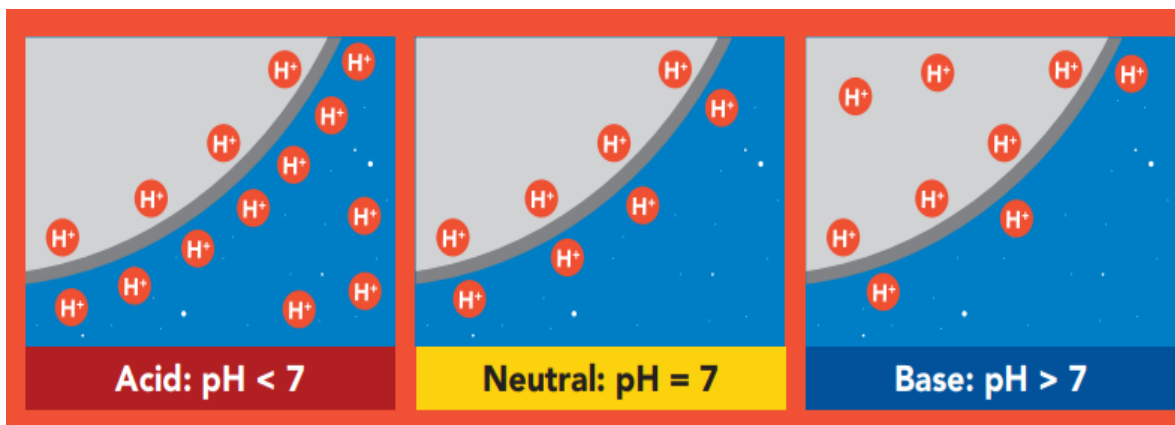


Figura 1.4. Comportamiento de iones de hidrogeno en pH-metro.

### 2.3.4. FUNCIONAMIENTO DEL ELECTRODO DE VIDRIO (pH-METRO)

El método determina el pH midiendo el potencial generado (en milivolts) por un electrodo, este potencial se compara contra un electrodo de referencia, que genera un potencial constante e independiente del pH. El electrodo de referencia que se utiliza es el de calomel saturado con cloruro de potasio, el cual sirve como puente salino que permite el paso de los milivolts generados hacia al circuito de medición. La diferencia de potencial será dada por la ecuación de Nernst.

La ecuación de Nerst (2) de la fuerza electromotriz (fem), desarrollada en el electrodo de referencia.

$$E = \frac{RT}{F} \ln \frac{[H^+]_{\text{exterior del electrodo}}}{[H^+]_{\text{interior del electrodo}}} \quad (2)$$

$$E = \frac{RT}{F} pH \quad (3)$$

Donde:

$E$ : Potencial

$R$ : Constante de gases ideales

$F$ : Número de Faraday

$T$ : Temperatura

$[H^+]$ : Concentración de iones de hidrógeno

Este potencial cambia con la temperatura (54.2 mV a 0°C a 74 mV a 100°C) por unidad de pH. En la Tabla 1.2 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

se muestra la Equivalencia de diferencial de potencial respecto a pH a una temperatura de 25°C [4].

**Tabla 1.2.** Equivalencia de diferencial de potencial respecto a pH.

pH	Potencial (mV)
0	414.1
1	354.9
2	295.8
3	236.6
4	177.5
5	118.3
6	59.2
7	0.00
8	-59.2
9	-118.3
10	-177.5
11	-236.6
12	-295.8
13	-354.9
14	-414.1

## 2.4. PUNTO DE ROCÍO

El Punto de rocío se define como la temperatura a la cual un gas comienza a condensarse en forma visible. Es una representación precisa de la cantidad de humedad en el aire [4].

La temperatura de punto de rocío ( $T_d$ ) es aquella temperatura a la cual el vapor de agua presente en una mezcla de gases se condensa (o solidifica) cuando la mezcla se enfría a presión constante. La definición anterior establece dos condiciones necesarias para la determinación de  $T_d$  a) la temperatura se alcanza cuando se presenta un cambio de fase del vapor de agua a líquido (o a sólido), y b) el enfriamiento se lleva a cabo a presión constante [5].

La temperatura de punto de rocío se calcula a partir de la ecuación 4, cuando se conoce la presión parcial de vapor de agua ( $e$ ) y la presión saturada del vapor de agua ( $E$ ) [6].

$$T_d = T + 35 \log \left( \frac{e}{E} \right) \quad (4)$$

donde:

- $T_d$ : Punto de rocío en °C
- $T$ : Temperatura del aire en °C
- $e$ : Presión parcial de vapor en el agua
- $E$ : Presión saturada del vapor en el agua

De manera que si se conoce la humedad relativa ( $HR$ ) la ecuación que utilizara sería la ecuación 5.

$$T_d = T + 35 \log \left( \frac{HR}{100} \right) \quad (5)$$

## 2.5. SENSOR ISFET

El ISFET es una variante del transistor de efecto de campo de metal y óxido conocido en microelectrónica como MOSFET.

Los sensores que se basan en transistores de efecto de campo sensibles a iones (ISFET) ofrecen una alternativa interesante. Los primeros dispositivos de este tipo fueron desarrollados por Piet Bergveld en 1970. Su trabajo pionero mostró las potencialidades de los chips de silicio para actuar como sensores de procesos bioquímicos, lo cual ha devenido en el concepto moderno de integración analítica conocido como “*lab on a chip*”. El ISFET fue presentado por Bergveld como un nuevo dispositivo que combinaba las propiedades químicamente sensibles de las membranas de vidrio con las características de conversión de impedancias de los MOSFET's [7].

Los ISFET funcionan con una técnica potenciométrica que tiene muchas características favorables, que incluyen alta velocidad, alta sensibilidad, SNR mejorado, escalabilidad inherente, bajo costo, miniaturización y compatibilidad con CMOS [8].

El ISFET es similar a un MOSFET con un terminal de puerta separado conocido como electrodo de referencia. El electrodo de referencia está en contacto con la solución y se utiliza para suministrar voltaje para modular la corriente del canal.

El sensor de pH es muy importante en una amplia gama de industrias, incluido el sector biomédico [1]. Los sensores de pH convencionales utilizan un electrodo de bulbo de vidrio que es a la vez delicado y pesado [1]. Las capas de pasivación nativas de los procesos CMOS son sensibles al pH; y la realización en el proceso CMOS estándar se ha avanzado en la última década para proporcionar sistemas de control de productos químicos baratos, prescindibles y de baja potencia.



## 2.6. PRINCIPIOS DE CALIBRACIÓN DE SENSOR

El circuito básico de un pH-metro o medidor de voltaje se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** El funcionamiento se puede describir de la siguiente manera: La celda, constituida por el electrodo indicador y el de referencia, está conectada al amplificador seguidor de voltaje que tiene una alta impedancia  $10^{12} \Omega$  [15]. La función de este amplificador es amplificar la potencia y tiene grandes corrientes de salida; se le denomina buffer, porque el voltaje  $V_i$  permanece inalterable. El diseño del segundo amplificador permite amplificar el voltaje, produciendo un voltaje  $V_o$  de salida mucho mayor que el de entrada  $V_i$ . La resistencia  $R2 > R1$  y dado que el amplificador es inversor, la ganancia es la razón negativa [15] de  $R2$  con respecto a  $R1$ , es decir  $G = -R2/R1$ . Por tanto, el voltaje de salida  $V_o$  tiene un valor amplificado de  $V_i$  en un factor  $G$ .

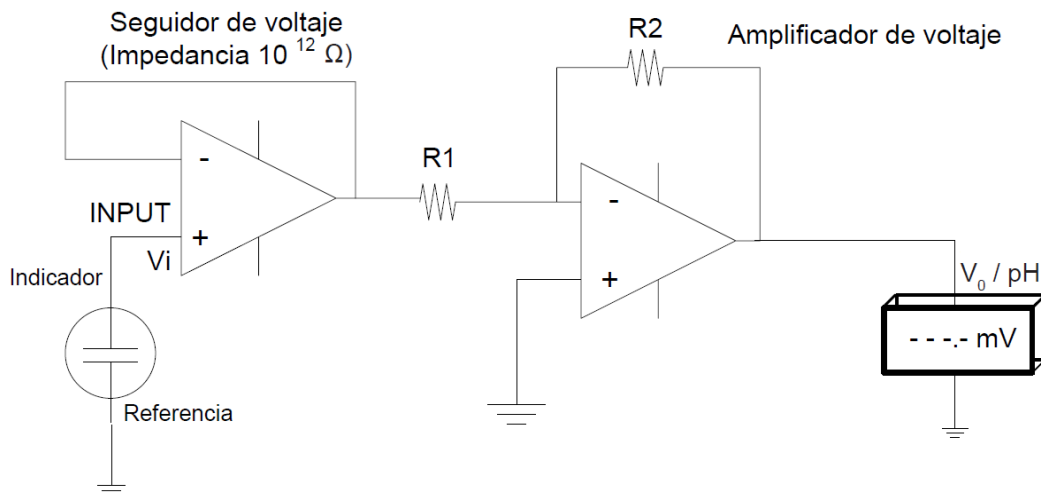


Figura 1.5. Circuito simplificado de un pH-metro.

Todo instrumento de medición debe estar calibrado antes de su utilización [10]. Esto significa que es necesario verificar las especificaciones de un pH-metro de acuerdo a lo declarado por el fabricante en el manual del usuario. Existen dos pruebas básicas para verificar las especificaciones [11]:

- 1) Cortocircuitar la entrada (INPUT) del electrodo indicador y de referencia el valor de pH debe ser 7 y el potencial 000.0 mV
- 2) Proporcionar un valor de potencial de  $\pm 89$  mV en las entradas de la celda con un calibrador, el pH registrado por el pH-metro debe ser de 5.5 y 8.5.

El pH-metro está diseñado para registrar un valor de potencial de cero voltios a pH 7. Los electrodos de vidrio y de referencia son también diseñados para obtener el mismo potencial cuando los electrodos se sumergen en una solución buffer de pH 7 [16]. El modelo matemático que explica este principio se expresa en la ecuación (6).

$$E_V = -\frac{RT}{F} (1000) \ln(10) (pH - 7) \quad (6)$$

$E_V$ : es el potencial medido en milivoltios  $V_0$ .

$R= 8.31441 \text{ J mol}^{-1} \text{ k}^{-1}$

$F= 96 484.56 \text{ C mol}^{-1}$

$T= (273.15 + t \text{ } ^\circ\text{C}) \text{ K}$

De acuerdo a la ecuación 6, a 25 °C se tiene una pendiente de -59.16 mV/pH y un intercepto de 414.1 mV. Por tanto, cuando se calibra el sistema potenciométrico (pH metro + electrodos) se debe verificar la eficiencia de la respuesta del electrodo comparando el valor de la pendiente obtenida para las lecturas de pH de diferentes soluciones de referencias certificadas (o tampones trazables a patrones primarios) con respecto al valor teórico a 25 °C.

## CAPITULO 3

### 2.1 DEFINICIÓN DE TECNOLOGÍAS

En el siguiente capítulo se describe la tecnología que se utilizó en este proyecto, tales como sensores, tipo de programación, adquisición de datos.

### 2.2 SENSORES

Un sensor es un dispositivo eléctrico y/o mecánico que convierte magnitudes físicas (luz, magnetismo, presión, etc.) en valores medibles de dicha magnitud.

Esto se realiza en tres fases:

- Un fenómeno físico a ser medido es captado por un sensor, y muestra en su salida una señal eléctrica dependiente del valor de la variable física.
- La señal eléctrica es modificada por un sistema de acondicionamiento de señal, cuya salida es un voltaje.
- El sensor dispone de una circuitería que transforma y/o amplifica la tensión de salida, la cual pasa a un conversor A/D, conectado a un PC. El convertidor A/D transforma la señal de tensión continua en una señal discreta.

#### 3.2.1. DESCRIPTORES ESTÁTICOS DE UN SENSOR

Los descriptores estáticos definen el comportamiento en régimen permanente del sensor.

**Rango:** Valores máximos y mínimos para las variables de entrada y salida de un sensor.

**Exactitud:** Es la desviación de la lectura de un sistema de medida respecto a una entrada conocida. El mayor error esperado entre las señales medida e ideal.

**Repetitividad:** Es la capacidad de reproducir una lectura con una precisión dada.

**Reproducibilidad:** Tiene el mismo sentido que la repetitividad excepto que se utiliza cuando se toman medidas distintas bajo condiciones diferentes.

**Resolución:** Es la cantidad de medida más pequeña que se pueda detectar.

**Error:** Es la diferencia entre el valor medido y el valor real.

**No linealidades:** Es la desviación de la medida de su valor real, suponiendo que la respuesta del sensor es lineal.

**No linealidades típicas:** Saturación, zona muerta e histéresis.

**Sensibilidad:** Es la razón de cambio de la salida frente a cambios en la entrada:

**Excitación:** Es la cantidad de corriente o voltaje requerida para el funcionamiento del sensor.

**Estabilidad:** Es una medida de la posibilidad de un sensor de mostrar la misma salida en un rango en que la entrada permanece constante.

### 3.2.2. DESCRIPTORES DINÁMICOS DE UN SENSOR

Las características dinámicas se refieren al comportamiento entre el momento en que cambia el valor de entrada y el tiempo en que el valor dado por el transductor logra su valor de estado estable, en la Figura 2.1 se observa el comportamiento dinámico de un sensor.

**Tiempo de retardo:**  $t_d$ , es el tiempo que tarda la salida del sensor en alcanzar el 50% de su valor final.

**Tiempo de subida:**  $t_r$ , es el tiempo que tarda la salida del sensor hasta alcanzar su valor final. => Velocidad del sensor, es decir, lo rápido que responde ante una entrada.

**Tiempo de pico:**  $t_p$ , es el tiempo que tarda la salida del sensor en alcanzar el pico máximo de su sobre oscilación

**Pico de sobre oscilación:**  $M_p$ , expresa cuanto se eleva la evolución temporal de la salida del sensor respecto de su valor final.

**Tiempo de establecimiento:**  $t_s$ , el tiempo que tarda la salida del sensor en entrar en la banda del 5% alrededor del valor final y ya no vuelve a salir de ella [12].

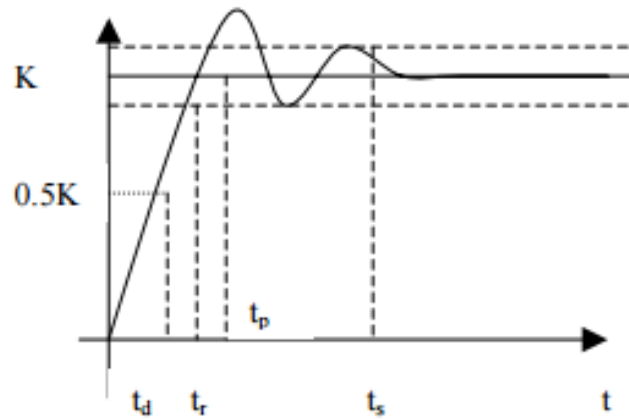


Figura 2.1. Comportamiento dinámico de un sensor

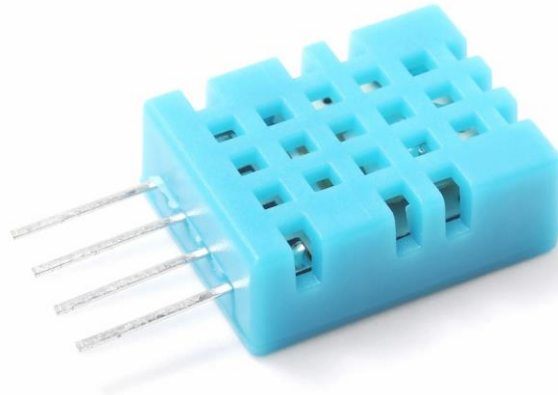
### 3.2.3. SENSOR DTH11

Aplica una técnica exclusiva de recolección de señales digitales y tecnología de detección de humedad, lo que garantiza su confiabilidad y estabilidad. Sus elementos de detección están conectados con una computadora de un solo chip de 8 bits. Cada sensor de este modelo tiene compensación de temperatura y calibrado en una cámara de calibración precisa y el coeficiente de calibración se guarda en el tipo de programa en la memoria OTP, cuando el sensor está detectando, citará el coeficiente de la memoria. El tamaño pequeño, el bajo consumo y la larga distancia de transmisión (100 m) permiten que el DTH11 se adapte a todo tipo de aplicaciones difíciles. Empaquetado de una sola fila con cuatro pines, lo que hace que la conexión sea muy conveniente

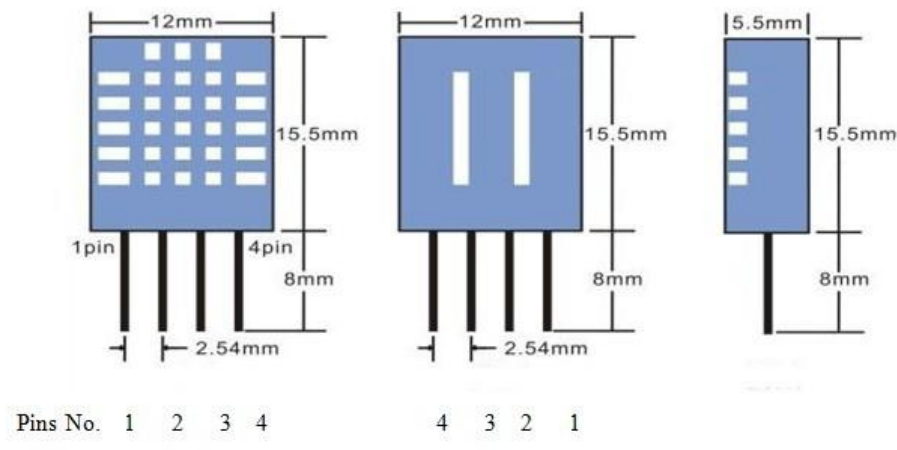
## Especificaciones:

- Fuente de alimentación: 3.3-5.5V DC
- Señal de salida señal digital a través del bus de 1 cable
- Elemento sensor Resistencia de humedad de polímero
- Humedad del rango de funcionamiento: 20-90% RH
- Rango de funcionamiento de temperatura: 0 ~ 50°C
- Precisión de humedad: +/- 5% RH
- Precisión de temperatura +/- 2 Celsius
- Resolución o sensibilidad humedad 1% RH
- Resolución o sensibilidad temperatura 1Celsius
- Histéresis de humedad: +/-1% RH
- Estabilidad a largo plazo: +/-1% RH / año

El voltaje de alimentación debe ser de 3.3-5.5 V CC. Cuando se suministra energía al sensor, no envíe ninguna instrucción al sensor dentro de un segundo para pasar el estado inestable. Se puede agregar un capacitor de 100nF entre VDD y GND para filtrado de ondas. En la Figura 2.2 se observa el sensor DTH11, en la Figura 2.3 se observan sus pines de conexión y en la Figura 2.4 el diagrama electrónico de dicho sensor.



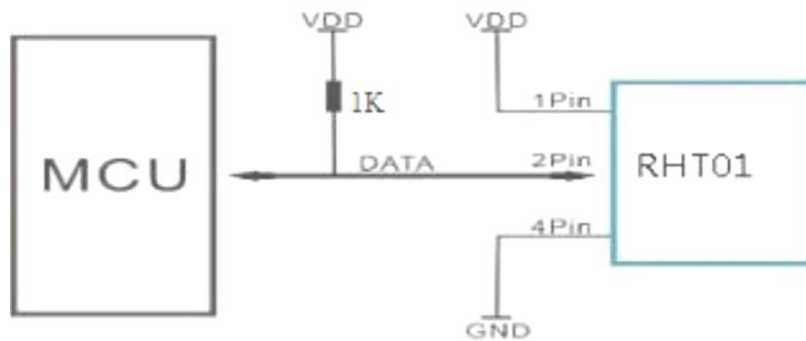
**Figura 2.2** Sensor DTH11



**Figura 2.3.** Pines de conexión del sensor DTH11

Donde:

- 1: VCC
- 2: DATA
- 3: NC
- 4: GND



**Figura 2.4.** Diagrama electrónico del sensor DHT11

Algunas de sus características son las siguientes;

- Buena precisión
- Tipo resistivo
- Temperatura de rango completo compensada
- Medición de temperatura y humedad relativa
- Señal digital calibrada
- Excelente estabilidad a largo plazo
- Componentes adicionales no necesarios
- Larga distancia de transmisión, hasta 100 metros.
- Bajo consumo de energía



### **3.2.4. SENSOR DS18B20**

El sensor digital DS18B20 proporciona mediciones de temperatura Celsius de 9 bits a 12 bits y tiene una función de alarma con puntos de activación superiores e inferiores no volátiles programables por el usuario.

El DS18B20 se comunica a través de un bus de 1 cable que, por definición, requiere solo una línea de datos (y tierra) para comunicarse con un microprocesador central. Tiene un rango de temperatura de funcionamiento de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$  y tiene una precisión de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  en el rango de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$ . Además, el DS18B20 puede obtener energía directamente de la línea de datos ("energía parásita"), eliminando la necesidad de una fuente de alimentación externa. Cada DS18B20 tiene un código de serie único de 64 bits, que permite que varios DS18B20 funcionen en el mismo bus de 1 cable.

Por lo tanto, es simple usar un microprocesador para controlar muchos DS18B20 distribuidos en un área grande. Las aplicaciones que pueden beneficiarse de esta característica incluyen controles ambientales de HVAC, sistemas de monitoreo de temperatura dentro de edificios, equipos o maquinaria, y sistemas de control y monitoreo de procesos, en la Figura 2.5 observamos el sensor DS18B20 y en la Figura 2.6 la configuración de pines.

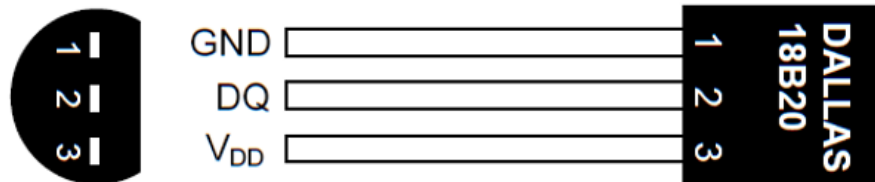


**Figura 2.5.** Sensor DS18B20

- La interfaz única de 1 cable requiere solo un Pin de puerto para comunicación
- Cada dispositivo tiene un código de serie único de 64 bits
- Almacenado en una ROM incorporada
- La capacidad multipunto simplifica la distribución
- Aplicaciones de detección de temperatura
- No requiere componentes externos
- Se puede alimentar desde la línea de datos, fuente de alimentación
- El rango es de 3,0 V a 5,5 V
- Mide temperaturas de -55° C a + 125° C
- Su rango de funcionamiento es de -10° C a + 85° C (-67° F a + 257° F), con un error de  $\pm 0,5^{\circ}$  C

Las aplicaciones incluyen controles termostáticos, Sistemas industriales, Productos de consumo, Termómetros, o cualquier termómetro sensible.

Su configuración de pines es la siguiente:



**Figura 2.6.** Configuración de pines del sensor DS18B20

Donde:

El **V<sub>DD</sub>** debe estar conectado a tierra para funcionar en modo de energía parasitaria.

El **DQ** es la Entrada / Salida de datos. Pin de interfaz de 1 cable de drenaje abierto.

También proporciona energía al dispositivo cuando se usa en energía parasitaria.

El **GND** es Tierra física.

### 3.3. ARDUINO

Es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (*open-source*) basada en *hardware* y *software* flexibles y fáciles de usar.

Está pensado para diseñadores y cualquier interesado en desarrollar nuevas tecnologías y entornos educativos. Arduino también simplifica el proceso de trabajo con microcontroladores, pero ofrece algunas ventajas para profesores, estudiantes y a aficionados interesados sobre otros sistemas:

**Barato:** Las placas Arduino son relativamente baratas comparadas con otras plataformas microcontroladoras. La versión menos cara del módulo Arduino puede ser ensamblada a mano.

**Multiplataforma:** El *software* de Arduino se ejecuta en sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y GNU/Linux. La mayoría de los sistemas microcontroladores están limitados a Windows.

**Entorno de programación simple y claro:** El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes, pero suficientemente flexible para que usuarios avanzados puedan aprovecharlo también. Para profesores, está convenientemente basado en el entorno de programación *Processing*, de manera que estudiantes aprendiendo a programar en ese entorno estarán familiarizados con el aspecto y la imagen de Arduino.

**Código abierto y *software* extensible:** El *software* Arduino está publicado como herramientas de código abierto, disponible para extensión por programadores experimentados. El lenguaje puede ser expandido mediante librerías C++, y la gente que quiera entender los detalles técnicos pueden hacer el salto desde Arduino a la programación en lenguaje AVR C en el cual está basado. De forma similar, puedes añadir código AVR-C directamente en tus programas Arduino si quieres.

**Código abierto y *hardware* extensible:** El Arduino está basado en microcontroladores ATMEGA8 y ATMEGA168 de Atmel. Los planos para los módulos están publicados bajo licencia *Creative Commons*, por lo que diseñadores experimentados de circuitos pueden hacer su propia versión del módulo,

extendiéndolo y mejorándolo. Incluso usuarios relativamente inexpertos pueden construir la versión de la placa del módulo para entender cómo funciona y ahorrar dinero [17].

### 3.3.1. PLACA ARDUINO MEGA

La placa Arduino Mega 2560 es una placa electrónica basada en el Atmega2560. Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de *hardware*), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un conector ICSP, y un botón de *Reset*.

Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador; basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o a la corriente con un adaptador de C.A. a C.C. o una batería para empezar. La placa Mega 2560 es compatible con la mayoría de los *Shield*, en la Figura 2.7 se observa la placa Arduino Mega.

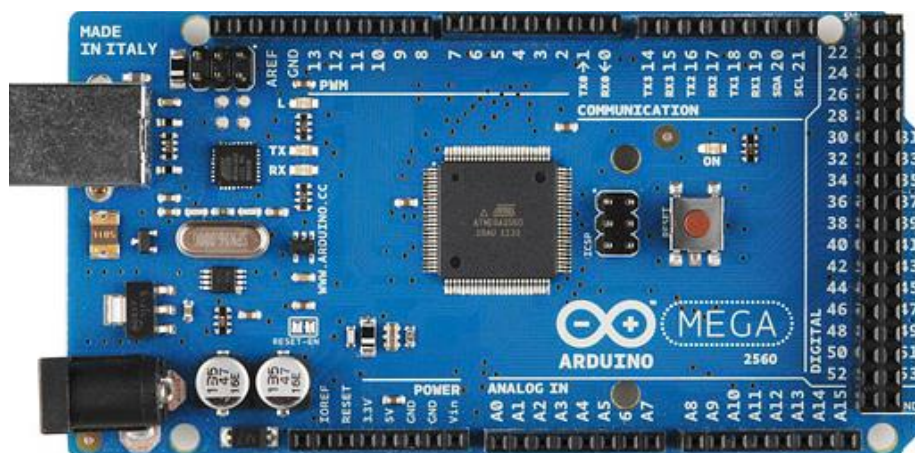


Figura 2.7. Placa Arduino mega

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan las especificaciones técnicas de la placa Arduino mega

**Tabla 2.1.** Especificaciones técnicas de la placa Arduino mega.

<b>Microcontrolador</b>	<b><u>ATmega2560</u></b>
Tensión de trabajo	5V
Tensión de entrada (recomendada)	7-12V
Tensión de entrada (límite)	6-20V
Pines Digitales I/O	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
Pines de entradas Analógicas	16
DC Corriente por Pin I/O	20 mA
DC Corriente por Pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB de los cuales 8 KB se usan por el Bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad del reloj	16 MHz
Largo	101.52 mm
ancho	53.3 mm
Peso	37 g

### 3.3.2. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DEL ARDUINO MEGA

El Arduino Mega 2560 puede ser alimentado a través de la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. La fuente de alimentación se selecciona automáticamente.

La alimentación externa (no USB) puede venir de un adaptador de C.A. a C.C. o de una batería. El adaptador se puede conectar al enchufe de 2,1 mm de centro-positivo en la clavija de alimentación de la placa. Los cables desde una batería pueden ser insertados en GND y en el pin  $V_{in}$  del conector de alimentación.

La tarjeta puede funcionar con un suministro externo de 6 a 20 voltios. Si se alimenta con menos de 7 V, sin embargo, el pin de 5V puede suministrar menos de cinco voltios y la placa se puede volver inestable. Si se utiliza más de 12 V, el regulador de voltaje se puede sobrecalentar y dañar la placa. El rango recomendado es de 7 a 12 voltios.

Los pines de alimentación son los siguientes:

**$V_{in}$ :** La tensión de entrada a la placa cuando se utiliza una fuente de alimentación externa (en contraposición a 5 voltios de la conexión USB o de otra fuente de alimentación regulada). Se puede suministrar tensión a través de este pin, o, si el suministro de tensión es a través de la toma de alimentación, acceder a él a través de este pin.

**5V:** Este pin es una salida de 5 V regulada del regulador de la placa. La placa puede ser alimentada ya sea desde el conector de alimentación de C.C. (7 - 12 V), por el conector USB (5 V), o por el pin  $V_{in}$  de la placa (7-12V). El suministro de tensión a través de los pines de 5 V o 3.3 V no pasa por el regulador, y puede dañar la placa. No es aconsejable.

**3.3V:** Un suministro de 3,3 voltios generado por el regulador de la placa.

**IOREF:** Este pin en la placa proporciona la referencia de tensión con la que opera el microcontrolador. Un escudo bien configurado puede leer la tensión del pin IOREF

y seleccionar la fuente de alimentación adecuada o habilitar traductores de tensión en las salidas para trabajar con el 5 V o 3.3 V.

### 3.3.3. ENTRADAS Y SALIDAS DEL ARDUINO MEGA

Cada uno de los 54 pines digitales de la Mega se puede utilizar como una entrada o como una salida, utilizando las funciones `pinMode()`, `digitalWrite()` y `digitalRead()`. Operan a 5 voltios. Cada pin puede proporcionar o recibir 20 mA como condición de funcionamiento recomendada y tiene una resistencia de *pull-up* (desconectada por defecto) de 20-50 kilo ohmios. Un máximo de 40 mA es el valor que no debe superarse para evitar daños permanentes en el microcontrolador.

Además, algunos pines tienen funciones especializadas:

Serie: 0 (RX) y 1 (TX); Serie 1: 19 (RX) y 18 (TX); Serie 2: 17 (RX) y 16 (TX); Serie 3: 15 (RX) y 14 (TX). Se utiliza para recibir (RX) y transmitir datos serie (TX) TTL.

PWM: 2 a 13 y 44 a 46. proporcionan una salida PWM de 8 bits con la función `analogWrite()`.

SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS). Estos pines soportan la comunicación SPI utilizando la biblioteca SPI

LED 13: Hay un LED incorporado conectado al pin digital 13. Cuando el pin está a nivel HIGH, el LED está encendido, cuando el pin está a nivel LOW, está apagado.

TWI: 20 (SDA) y 21 (SCL). TWI soporte de comunicación utilizando la biblioteca Wire.

El Mega 2560 tiene 16 entradas analógicas, cada una de las cuales proporcionan 10 bits de resolución (es decir, 1024 valores diferentes). Por defecto se miden de masa a 5 voltios, aunque es posible cambiar el extremo superior de su rango usando la función `analogReference()` y el pin AREF.

Hay un par de pines en la placa:



AREF: Tensión de referencia para las entradas analógicas. Se utiliza con `analogReference()`.

*Reset*: Llevar esta línea a nivel LOW para reiniciar el microcontrolador.

### **3.3.4. COMUNICACIÓN ARDUINO MEGA**

La placa Mega 2560 tiene una serie de facilidades para la comunicación con un ordenador, otra placa, u otros microcontroladores. El Atmega2560 ofrece cuatro UART *hardware* para TTL (5 V) para la comunicación serie. Una ATmega16U2 (ATmega 8U2 revisión 1 y 2) tiene canales que uno de ellos a través de USB y proporciona un puerto COM virtual para el *software* en el equipo (en las máquinas Windows necesitará un archivo.inf, pero las máquinas OSX y Linux reconocen la placa como un puerto COM automáticamente).

El *software* de Arduino (IDE) incluye un monitor serie que permite que los datos de texto simples puedan ser enviados hacia y desde la placa. Los LEDs RX y TX de la placa parpadean cuando se están transmitiendo datos a través de la ATmega8U2 / ATmega16U2 chip y conexión USB al ordenador (pero no para la comunicación serie en los pines 0 y 1) [15].

### 3.4. PLACA PELTIER

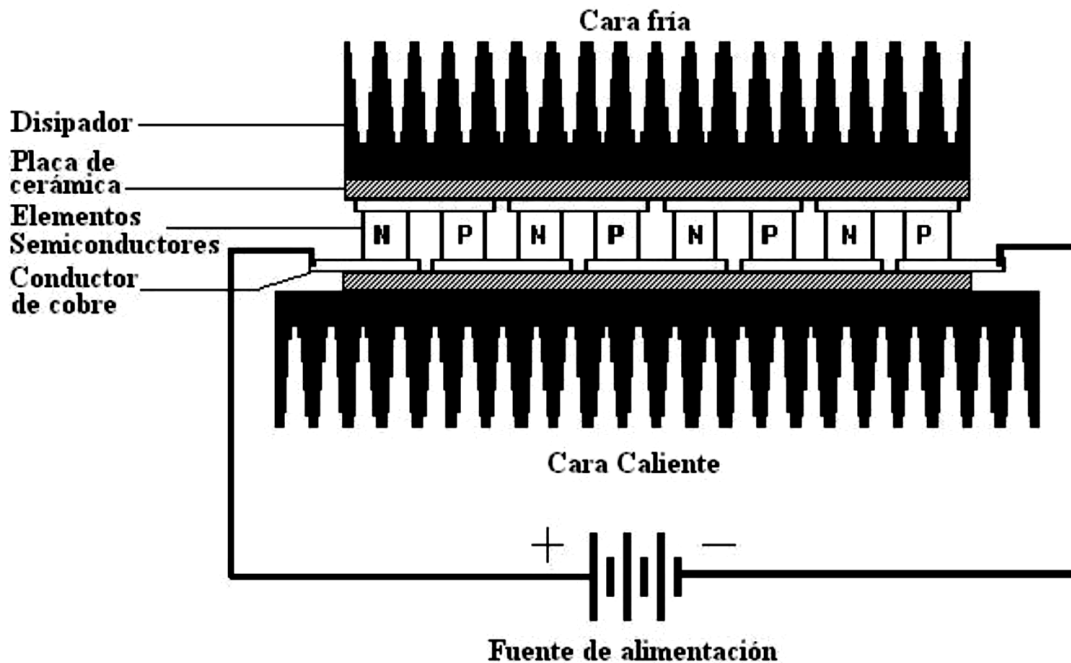
Desde 1834 es conocido el efecto Peltier; no obstante, su aplicación práctica necesitó del desarrollo de los materiales semiconductores. El efecto Peltier se caracteriza por la aparición de una diferencia de temperaturas entre las dos caras de un semiconductor cuando por él circula una corriente. Por lo general dichas celdas están fabricadas con Bismuto para la cara del semiconductor tipo P y Telurio para la cara tipo N.

El efecto Peltier se caracteriza por la aparición de una diferencia de temperaturas entre las dos caras de un semiconductor cuando por él circula una corriente. Una celda Peltier está conformada por dos materiales semiconductores uno tipo P y otro tipo N en un arreglo como el que se muestra en la Figura 2.8, produciéndose internamente el así llamado efecto termoeléctrico de Peltier.



Figura 2.8. Estructura de placa Peltier.

Internamente la celda Peltier posee elementos semiconductores altamente impurificados y dispuestos eléctricamente en serie mediante conductores de cobre. Para aislar los conductores de cobre del disipador se añade entre ellos una placa de cerámica que funciona como aislante. (Figura 2.8)



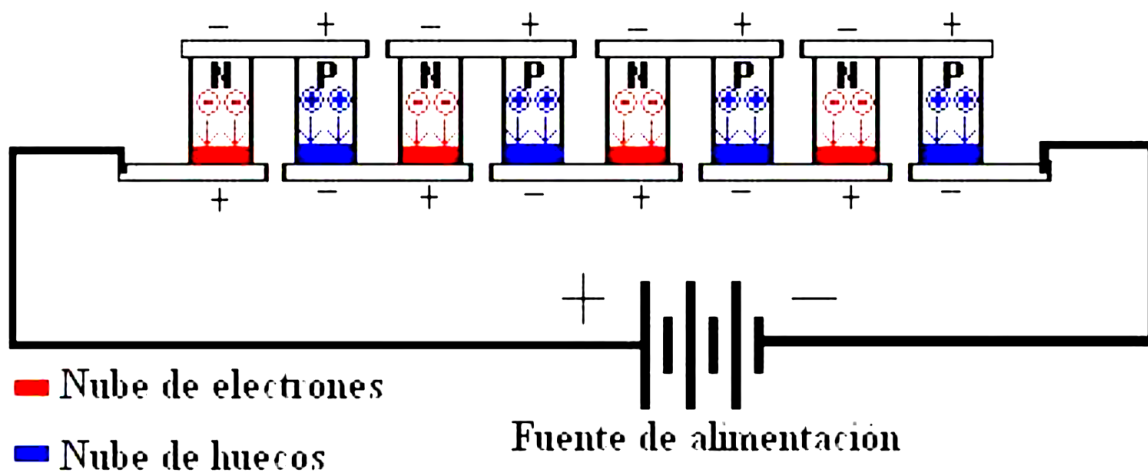
**Figura 2.9.** Corte transversal de la celda Peltier donde se muestran los elementos semiconductores y las aletas disipadoras.

Una polarización como la mostrada en la Figura 2.9, se distribuye a lo largo de cada elemento semiconductor de la celda, es decir, cada elemento semiconductor posee una diferencia de potencial proporcional a la polarización de entrada. Por esta razón, los portadores mayoritarios, electrones débilmente ligados, emigran hacia el lado positivo de cada uno de sus extremos en los elementos semiconductores tipo N, debido a la atracción de cargas de diferente signo. Mientras que los portadores mayoritarios, huecos de los elementos semiconductores P, emigran hacia la terminal negativa que se localiza en cada uno de sus extremos. Esta ausencia de cargas en cada elemento semiconductor cerca de la unión metal-semiconductor

provoca un enrarecimiento de cargas y el consecuente descenso de temperatura en el área circundante [9-10].

Por otro lado, la compresión o acumulación de portadores cerca de la unión metal semiconductor en la parte baja de los elementos semiconductores en la Figura 2.10, provoca un ascenso de temperatura.

Este comportamiento nos permite afirmar que, si invertimos la polaridad de la fuente de alimentación, la cara fría ahora calentará y la cara caliente sufrirá un descenso de temperatura [11].



**Figura 2.10.** Compresión y enrarecimiento de portadores de carga cerca de la unión metal semiconductor en una celda Peltier.

### 3.5. CONTROLADOR PID (PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVATIVO)

El controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es un controlador realimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de la acción integral. Además, el controlador tiene la capacidad de anticiparse a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

La sintonización de los controladores PID, consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros ( $K_c$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño establecido. Para poder realizar la sintonización de los controladores, primero debe identificarse la dinámica del proceso, y a partir de ésta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado [12].

### 3.5.1. ESTRUCTURAS ESTÁNDAR DE CONTROLADORES PID

#### 3.5.1.1 ESTRUCTURA PARALELA Y FUNCIONALIDAD DE TRES TÉRMINOS

La función de transferencia de un controlador PID a menudo se expresa en la forma ideal

$$G_{\text{PID}}(s) = \frac{U_s}{E_s} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_{IS}} + T_{DS} \right) \quad (7)$$

Donde  $U(s)$  es la señal de control que actúa sobre la señal de error  $E(s)$ ,  $K_P$  es la ganancia proporcional,  $T_I$  es la constante de tiempo integral,  $T_D$  es la constante de tiempo derivada y  $s$  es el argumento de la transformada de Laplace. La señal de control también se puede expresar en tres términos como:

$$U(s) = K_P E(s) + K_I \frac{1}{s} E(s) + K_D s E(s) = U_p(s) + U_I(s) + U_D(s) \quad (8)$$

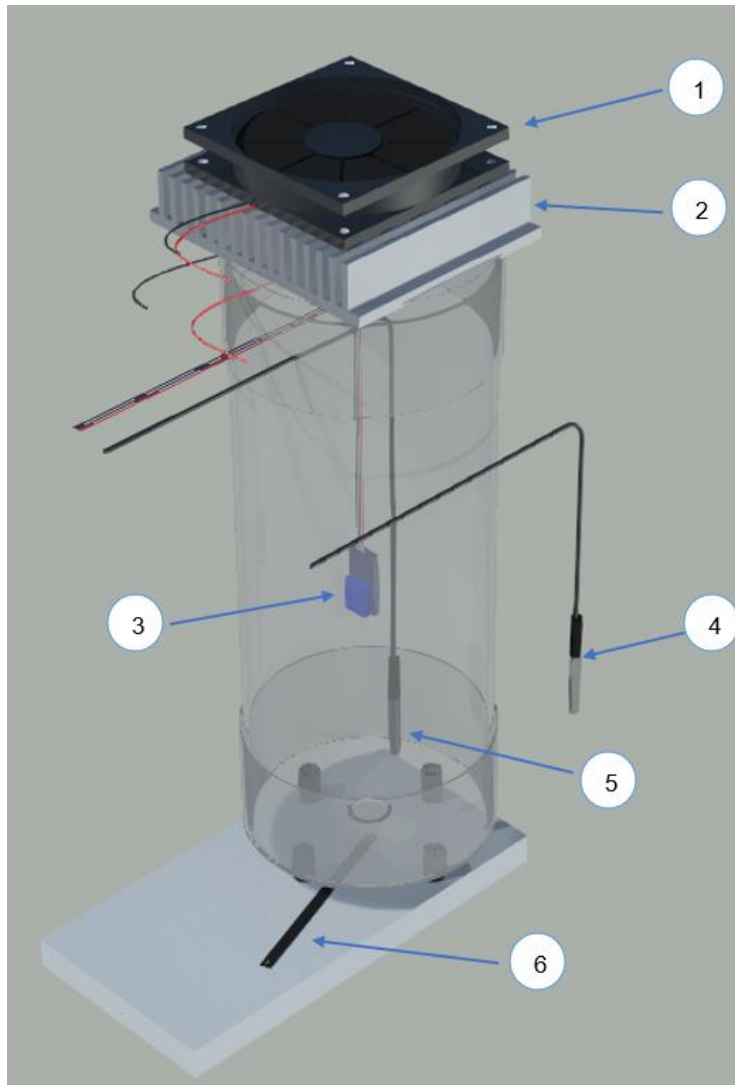
## **CAPÍTULO 4**

### **4.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

En este trabajo se realizó un prototipo para la generación del punto de rocío adquisición de datos y mediciones del pH. El cual consta de sistema de enfriamiento el cual se realizó por medio de celdas Peltier, sistemas de adquisición de datos por medio de sensores de humedad, temperatura y una tarjeta Arduino mega.

### **4.2. DISEÑO DE PROTOTIPO**

Es este trabajo se realizó el diseño de un prototipo para la generación del punto de rocío dentro de un sistema controlado, el cual consta de dos partes principales, una es el sistema de enfriamiento y el otro la adquisición de datos, en la Figura 3.1 se observa el bosquejo del prototipo realizado.



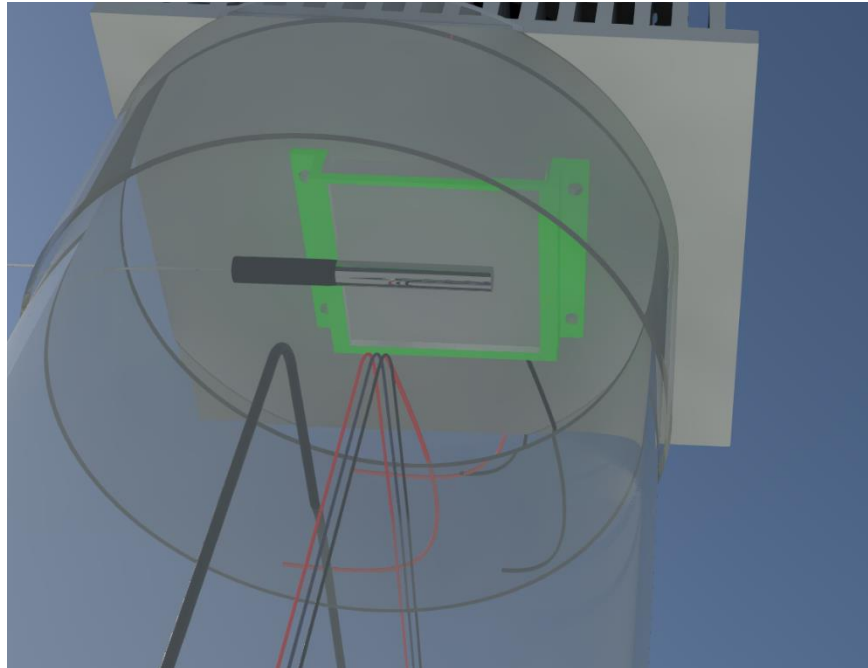
**Figura 3.1.** Bosquejo del prototipo.

Donde:

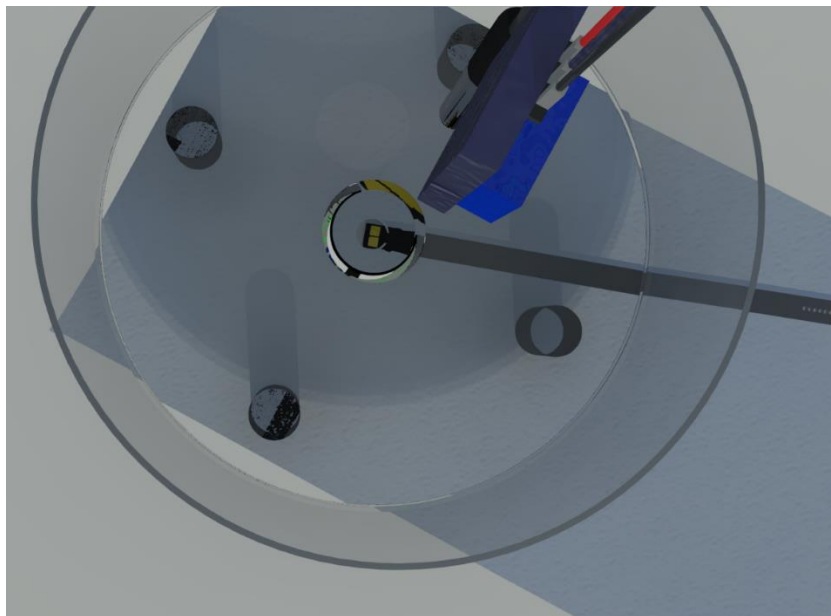
1. Ventilador C.D.
2. Disipador de aluminio
3. Sensor de humedad y temperatura dentro del sistema ( $T_{S2}$ )
4. Sensor de temperatura DS18B20( $T_{S1}$ )
5. Sensor de temperatura DS18B20( $T_{AMB}$ )
6. Sensor de pH ISFET



En la Figura 3.2 se observa el sensor de temperatura correspondiente a la celda Peltier y en la Figura 3.3 observamos el sensor de pH ISFET.



**Figura 3.2.** Sensor de temperatura de la celda Peltier.



**Figura 3.3.** Sensor de pH ISFET.

En la Figura 3.4 se observa el diagrama electrónico del prototipo.

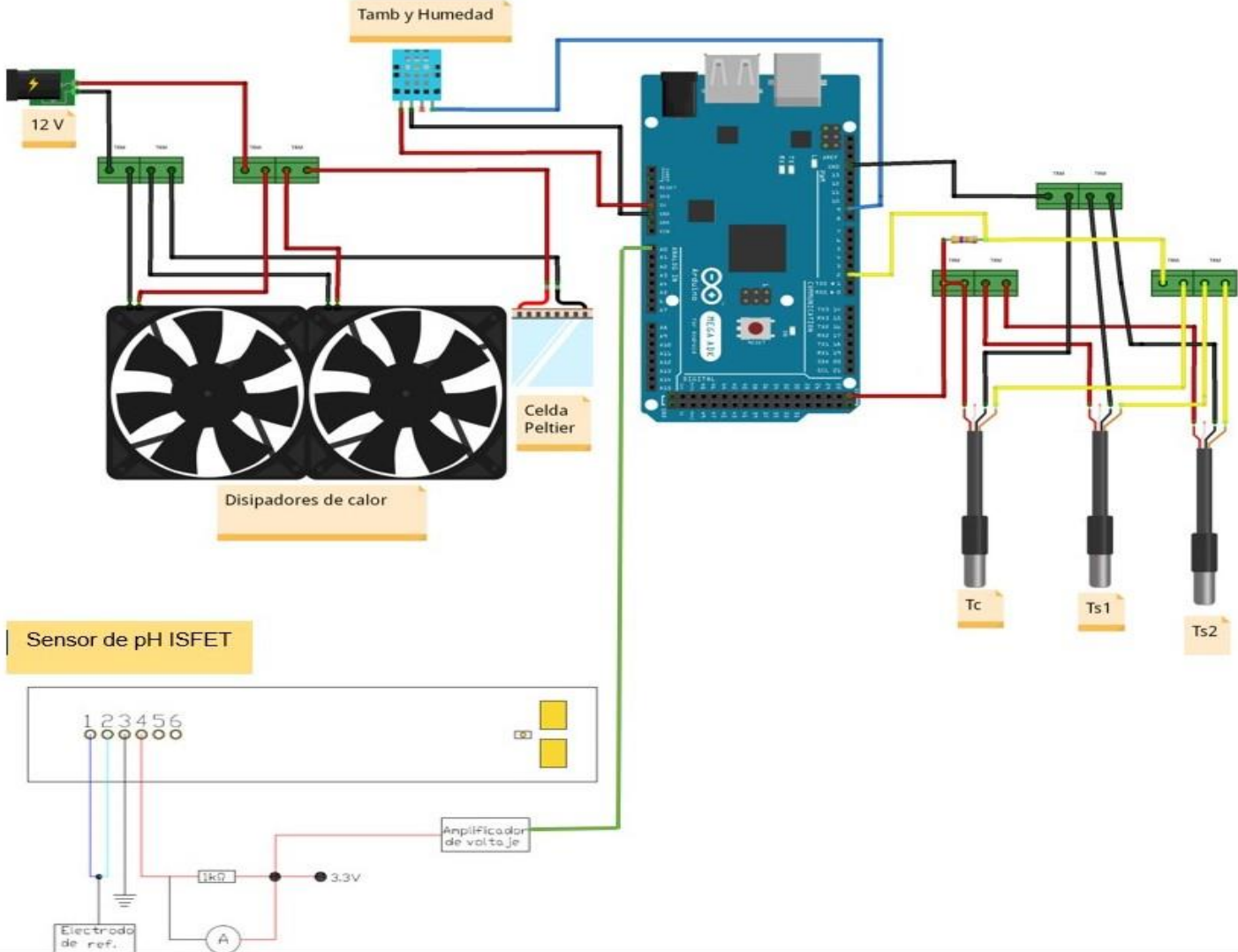


Figura 3.4. Diagrama electrónico del prototipo.

### 4.3. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

El sistema de enfriamiento para el sistema de generación de punto de rocío constará de una celda Peltier modelo: TEC1-12706 la cual será la encargada de disminuir la temperatura del sistema, un disipador de aluminio y un ventilador para la disipación del calor generado por la parte caliente de la celda Peltier en la Figura 3.5 se observa el sistema de enfriamiento,

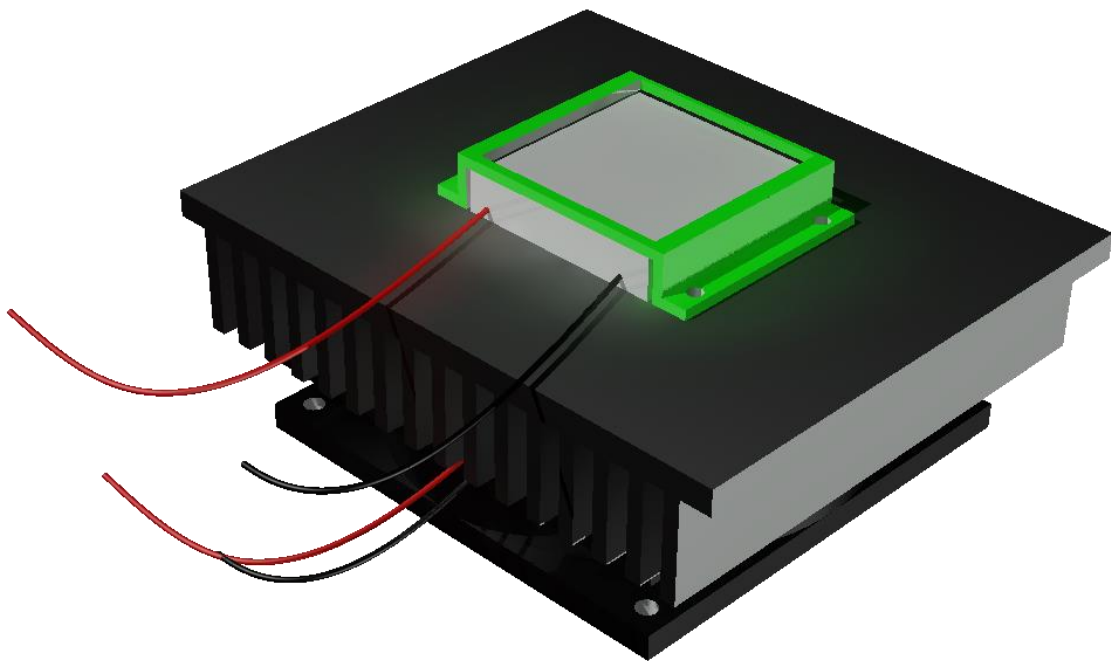
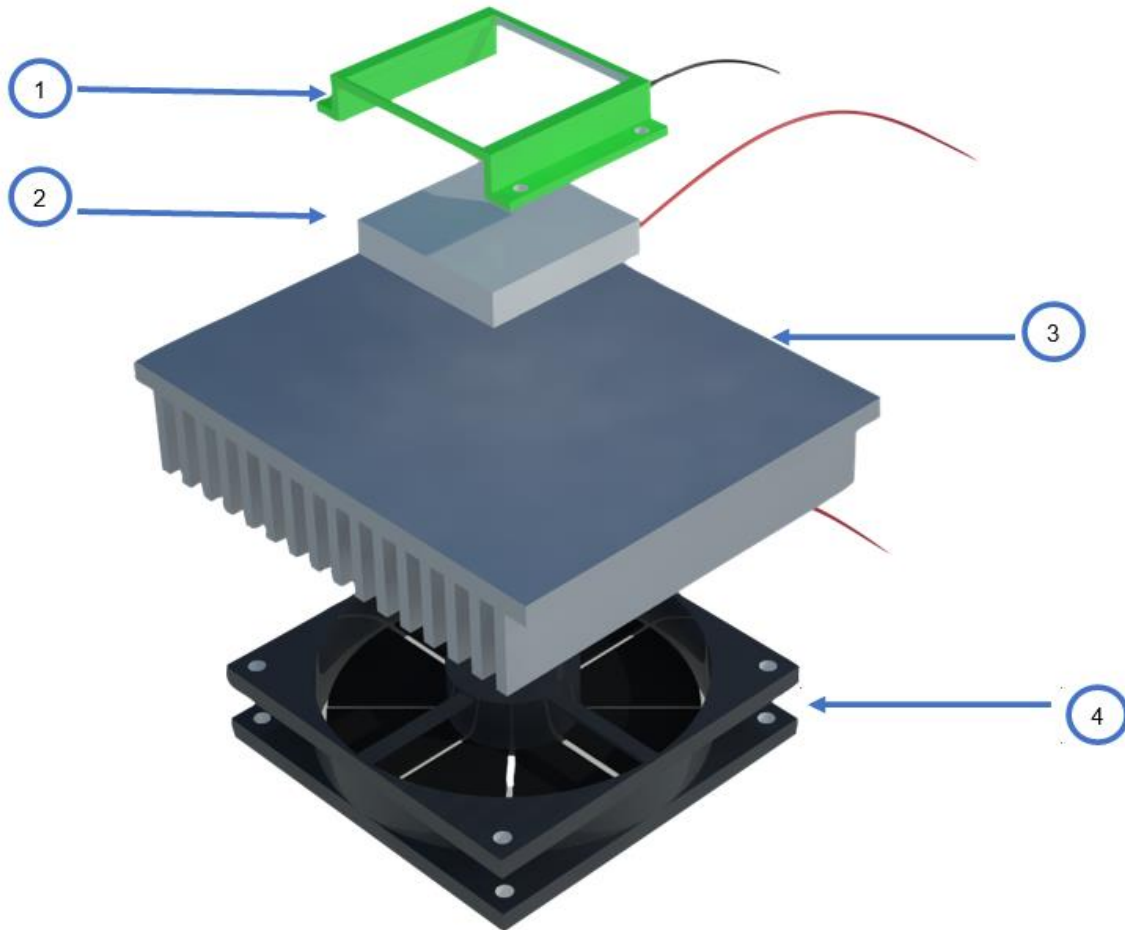


Figura 3.5. Sistema de enfriamiento.

En la Figura 3.6 observamos los diferentes componentes del sistema de enfriamiento

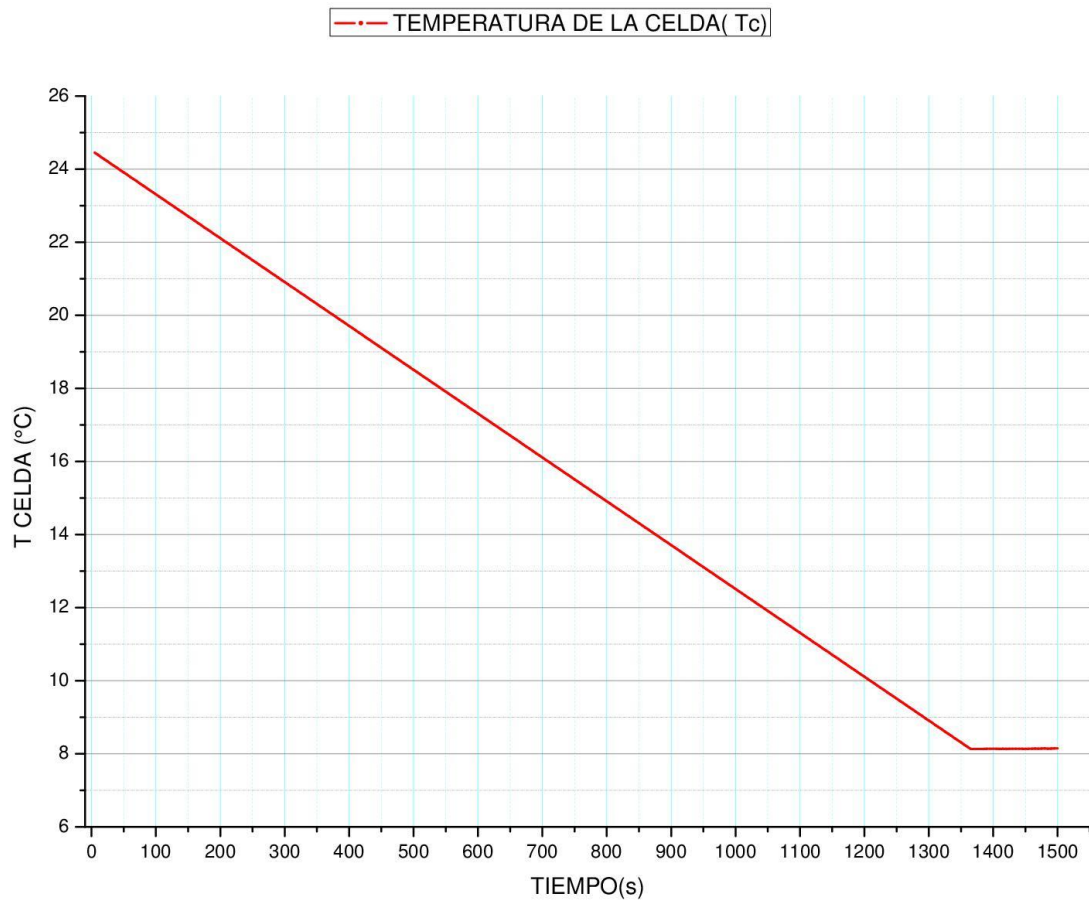


**Figura 3.6** Componentes del sistema de enfriamiento.

Donde:

1. Base de soporte de la celda Peltier
2. Celda Peltier
3. Disipador de calor de aluminio
4. Ventilador cd

El sistema de enfriamiento fue capaz de disminuir la temperatura de 24.45°C a 8.13°C en un tiempo de 18.33 minutos. En la Gráfica 3.1 observamos el comportamiento de la celda Peltier



**Gráfica 3.1.** Comportamiento de la temperatura de la celda Peltier.

#### 4.4. ADQUISICIÓN DE DATOS E IMPLEMENTACIÓN DE LA ECUACIÓN PARA EL PUNTO DE ROCÍO EN ARDUINO.

Obteniendo los valores de temperatura y húmeda se realizó el cálculo del promedio de temperaturas para sustituirla en la ecuación del cálculo del punto de rocío (ecuación 4). implementada en la tarjeta Arduino.

$$T_d = T + 35 \log \left( \frac{HR}{100} \right) \quad (4)$$

$$\langle T \rangle = \frac{T_{amb} + T_{S1} + T_{S2}}{3} \quad (5)$$

$$T_d = \langle T \rangle + 35 \log_{10}(h) \quad (6)$$

donde:

$T_d$ : Punto de rocío

$\langle T \rangle$ : Promedio de temperaturas

$T_{amb}$ : Temperatura ambiente de sistema

$T_c$ : Temperatura de la celda

$T_{S1}$ : Temperatura sensor 1

$T_{S2}$ : Temperatura sensor 2

$h$ : Resultado de dividir la humedad relativa sobre 100

Para el primer muestro de datos del prototipo se realizó por medio de 3 sensores de temperatura (DS18B20) y uno de humedad (DTH11), mediante la placa Arduino mega.

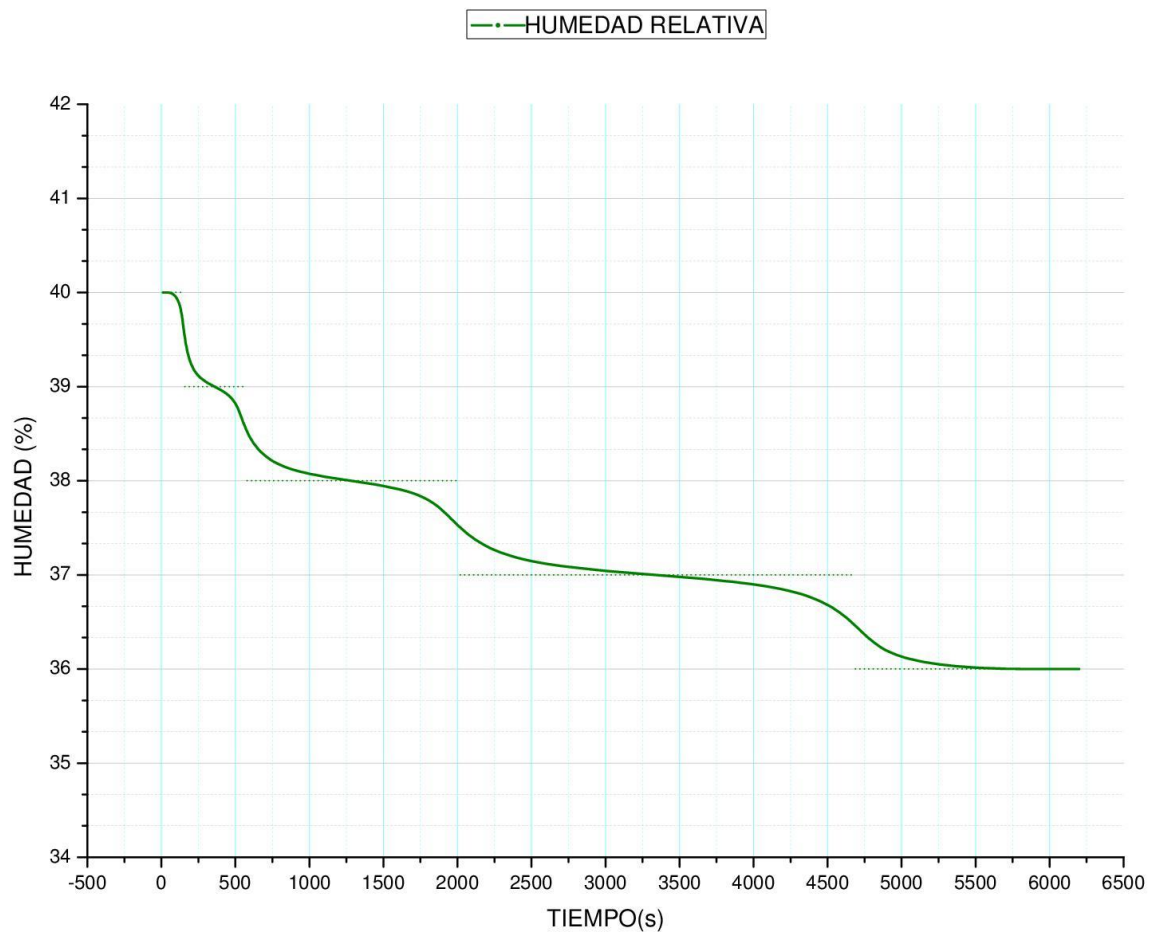
Se realizo una lectura de datos mediante puerto serial los cuales se observan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se obtuvieron la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), humedad ambiente(h), Temperatura de la celda Peltier ( $T_c$ ), temperatura sensor 1( $T_{S1}$ ), temperatura sensor 2 ( $T_{S2}$ ), temperatura promedio ( $\langle T \rangle$ ) y el cálculo de punto de rocío ( $T_d$ ).

COM4

Tamb:24.10	/H:42.00	/Tc = 23.94 C	/Ts1 = 24.50 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.20	/Td= 11.01
Tamb:24.10	/H:42.00	/Tc = 23.44 C	/Ts1 = 24.44 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.18	/Td= 10.99
Tamb:24.20	/H:42.00	/Tc = 22.81 C	/Ts1 = 24.50 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.23	/Td= 11.05
Tamb:24.20	/H:42.00	/Tc = 22.25 C	/Ts1 = 24.50 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.23	/Td= 11.05
Tamb:24.20	/H:42.00	/Tc = 21.69 C	/Ts1 = 24.50 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.23	/Td= 11.05
Tamb:24.20	/H:42.00	/Tc = 21.31 C	/Ts1 = 24.44 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.21	/Td= 11.03
Tamb:24.20	/H:42.00	/Tc = 21.00 C	/Ts1 = 24.50 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.23	/Td= 11.05
Tamb:24.20	/H:41.00	/Tc = 20.69 C	/Ts1 = 24.44 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.21	/Td= 10.66
Tamb:24.20	/H:41.00	/Tc = 20.44 C	/Ts1 = 24.44 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.21	/Td= 10.66
Tamb:24.20	/H:41.00	/Tc = 20.25 C	/Ts1 = 24.44 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.21	/Td= 10.66
Tamb:24.30	/H:41.00	/Tc = 20.12 C	/Ts1 = 24.44 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.25	/Td= 10.69
Tamb:24.30	/H:41.00	/Tc = 20.06 C	/Ts1 = 24.44 C	Ts2 = 24.00 C	/ $\langle T \rangle$ :24.25	/Td= 10.69

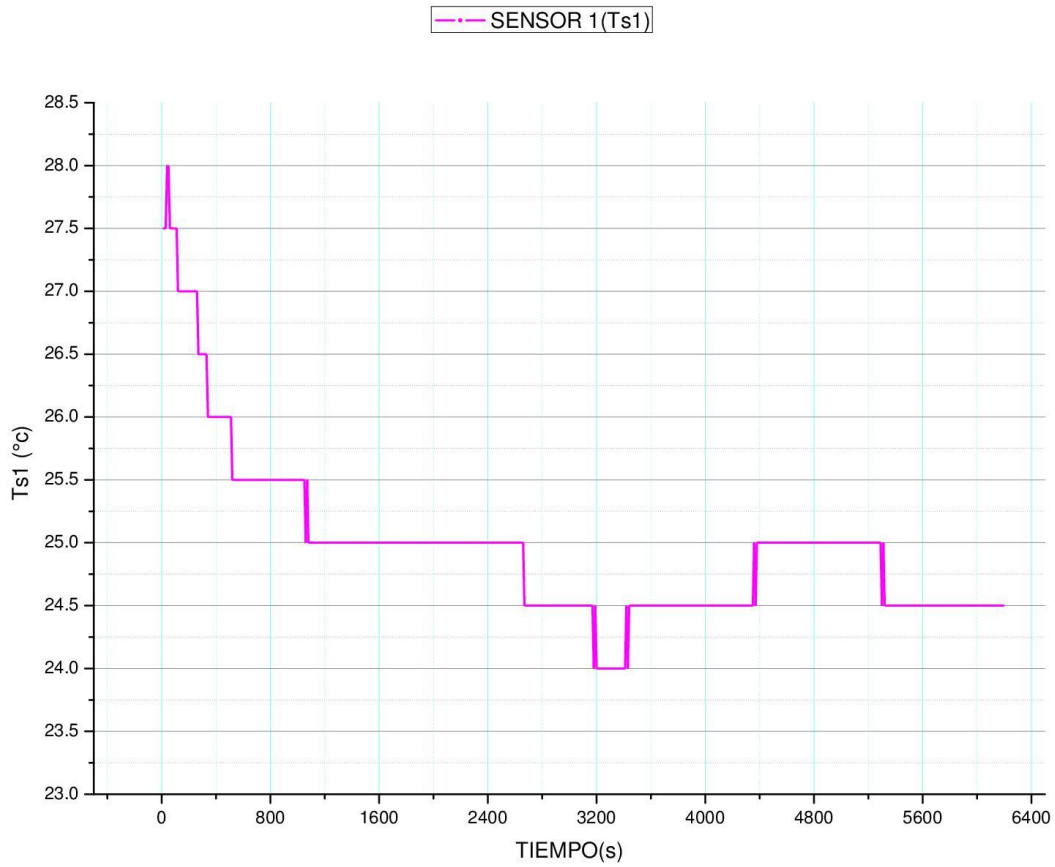
**Figura 3.7.** Adquisición de datos.

En las siguientes graficas se observan los diferentes tipos de comportamientos de los sensores utilizados para la adquisición de datos del sistema, los cuales son los siguientes, en la **Gráfica 3.2** el comportamiento de la temperatura ambiente, en la

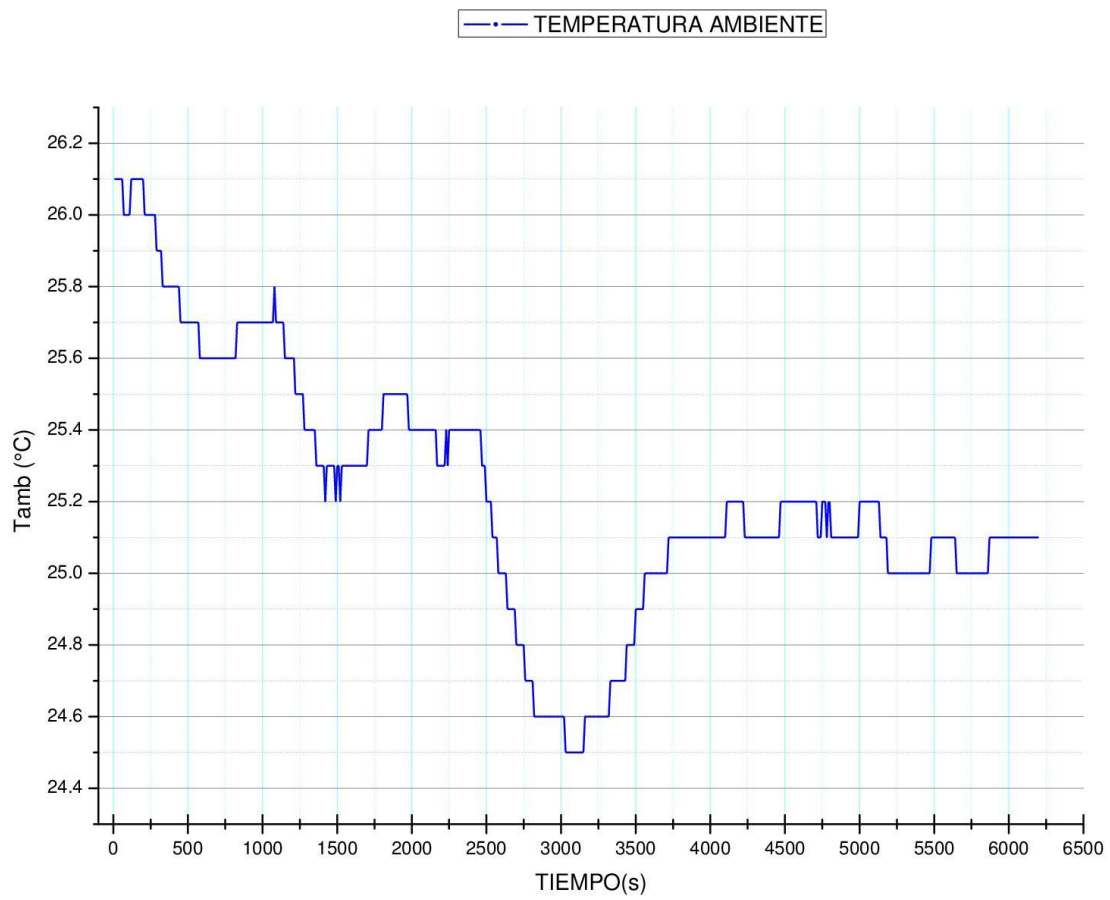


**Gráfica 3.3** el comportamiento de la humedad relativa, en la

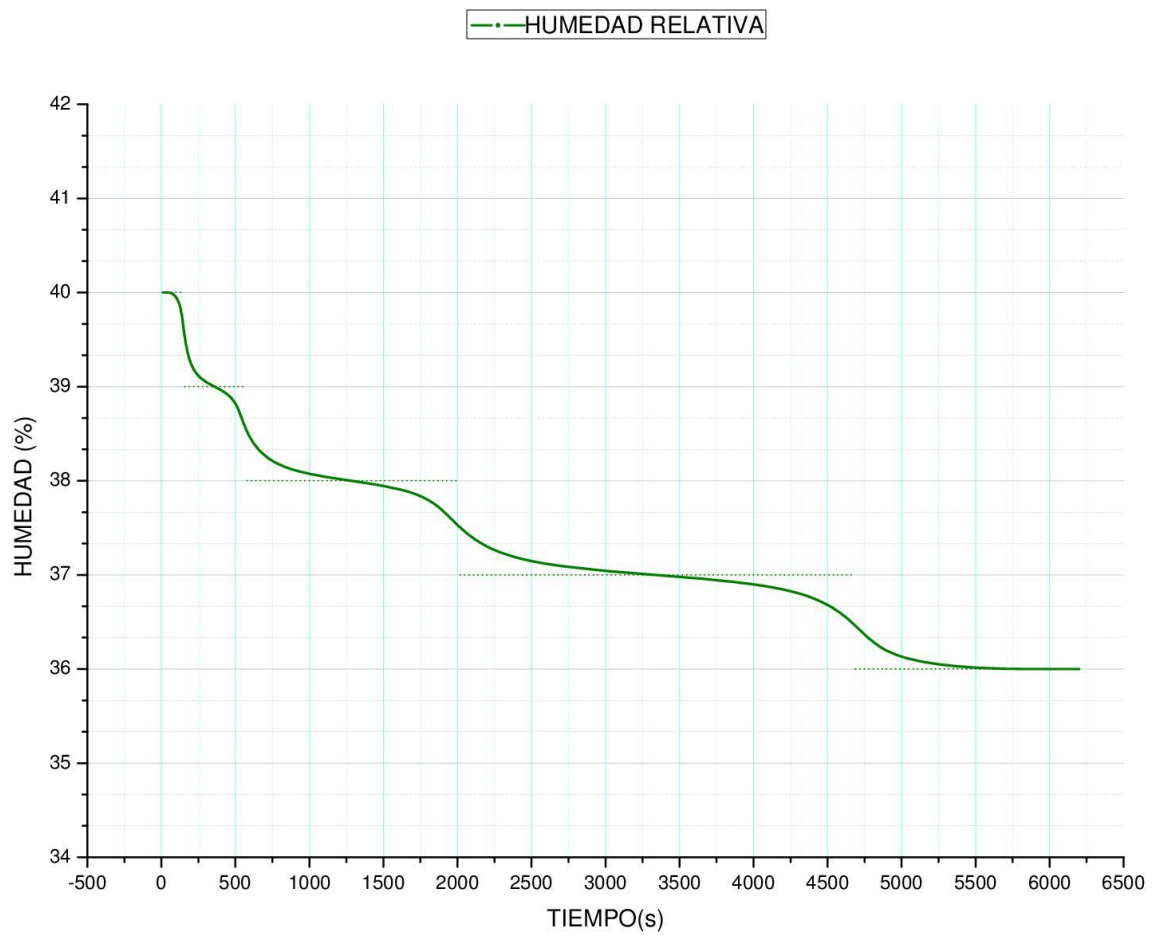




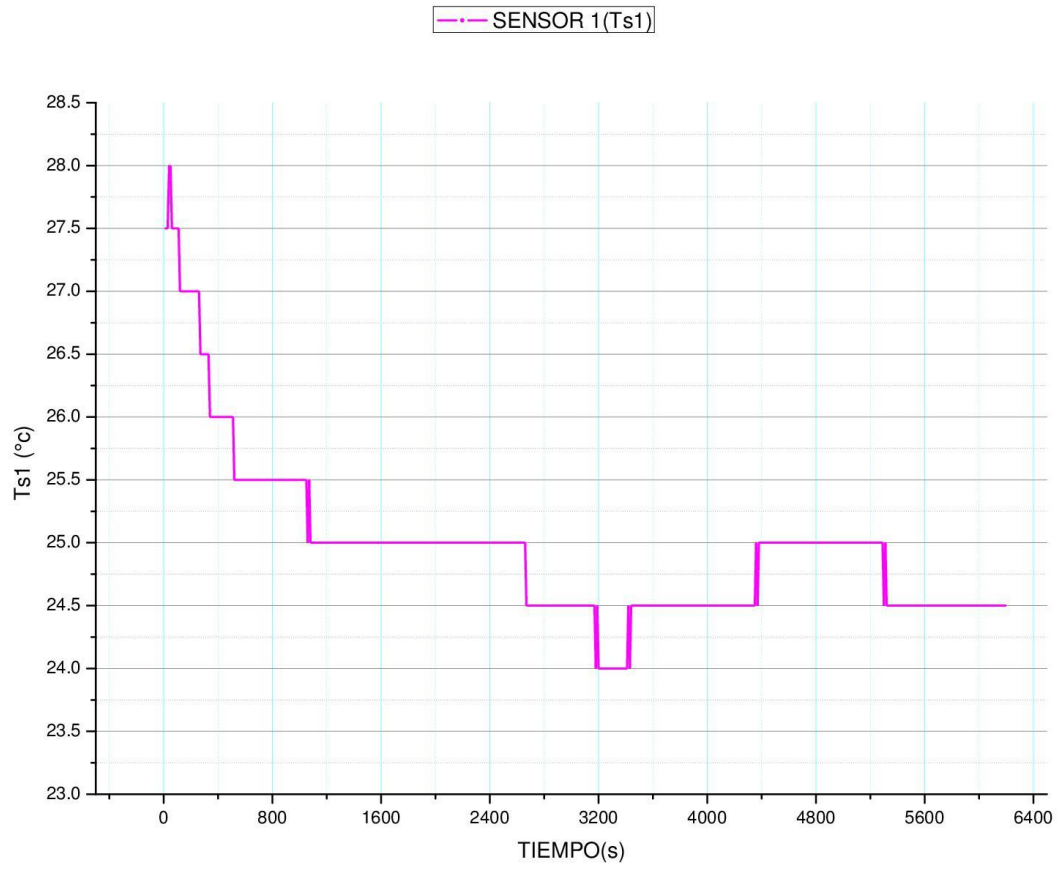
**Gráfica 3.4** el comportamiento del sensor 1( $T_{s1}$ ), **Grafica 3.5** el comportamiento del sensor 2 ( $T_{s2}$ ) y en la **Gráfica 3.6** el promedio de las temperaturas adquiridas en el sistema.



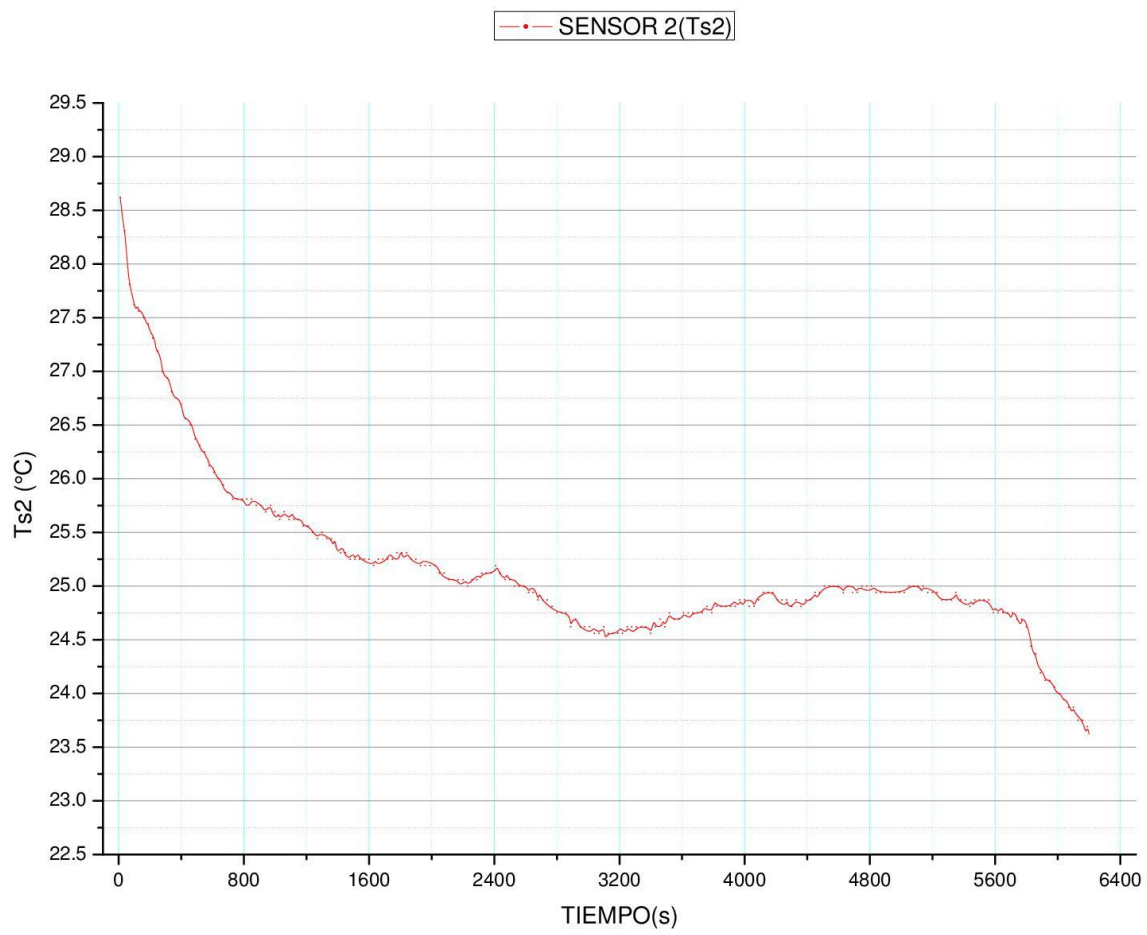
**Gráfica 3.2.** Comportamiento de la temperatura ambiente.



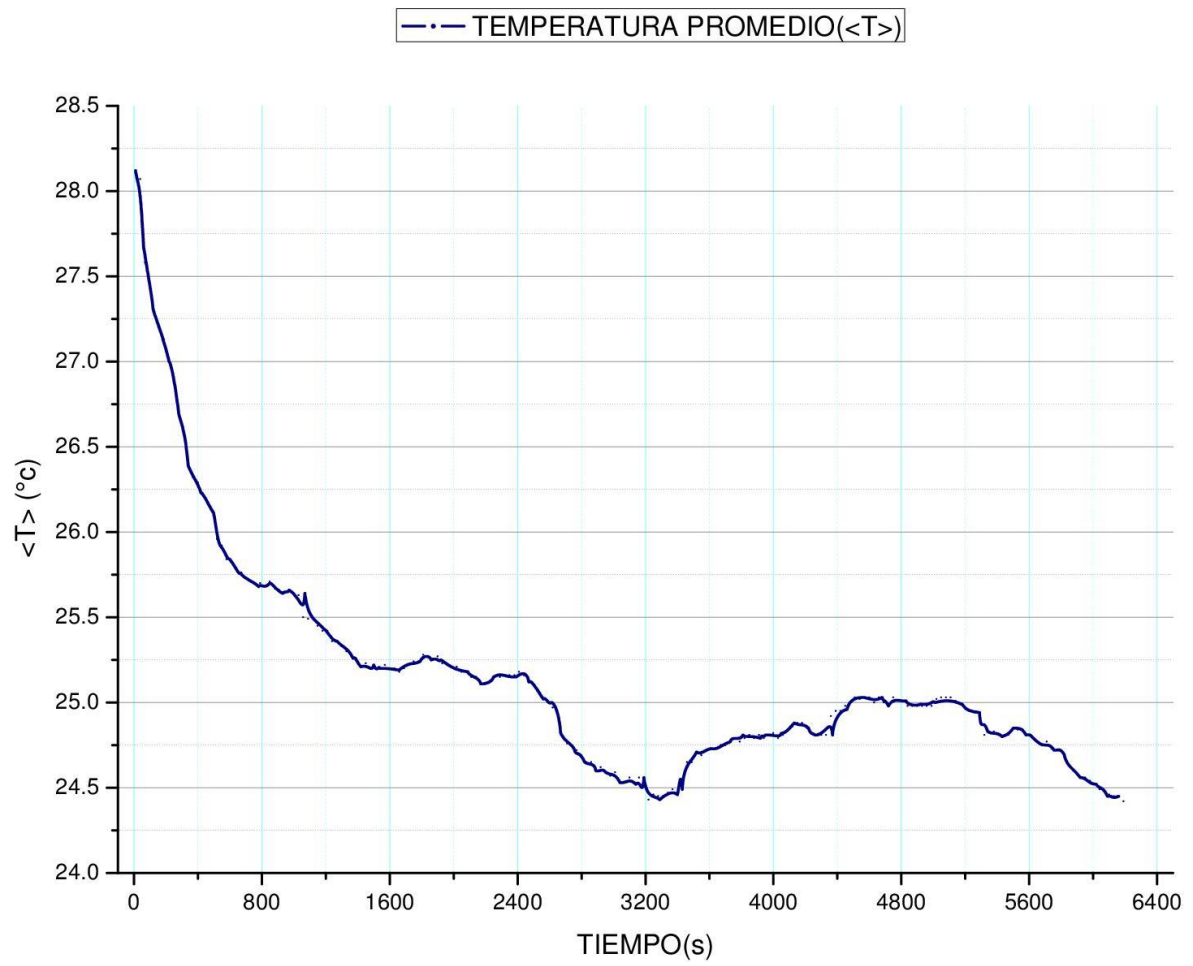
**Gráfica 3.3.** Comportamiento de la humedad relativa



**Gráfica 3.4.** Comportamiento del sensor 1 ( $T_{S1}$ ).



**Grafica 3.5.** Comportamiento del sensor 2 ( $T_{S2}$ ).

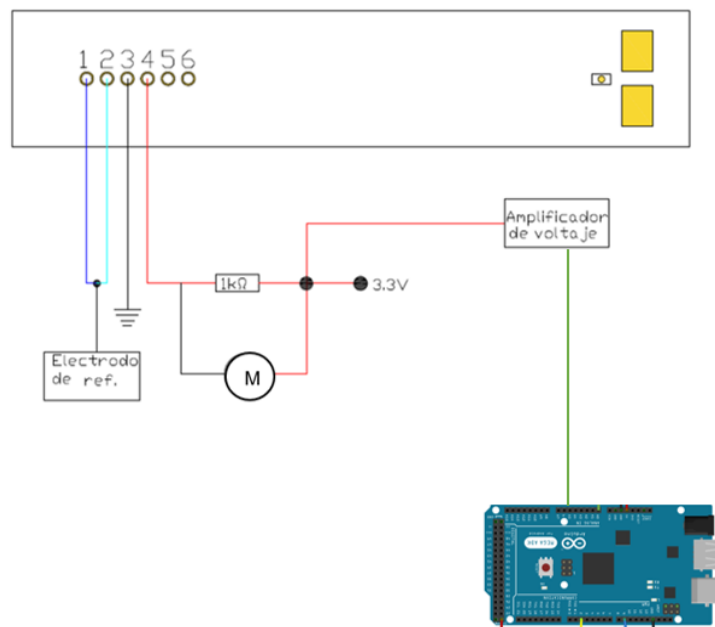


**Gráfica 3.6.** Temperatura promedio del sistema.

## 4.5. PRUEBAS DE MEDICIÓN DEL SENSOR DE PH ISFET MO-PSF02

Se realizaron pruebas de medición de pH con el sensor ISFET MO-PSF02, con el siguiente arreglo electrónico mostrado en la Figura 3.8.

Las pruebas se realizaron en tres soluciones con diferente valor de pH (10,7 y 4) y utilizando el mismo circuito electrónico y obteniendo la adquisición de datos vía serial.



**Figura 3.8.** Diagrama electrónico de adquisición de datos del sensor de pH ISFET MO-PSF0.

En la Figura 3.9, Figura 3.10 y Figura 3.11 se observa el sensor de pH ISFET MO-PSF02 sumergido en las diferentes soluciones para hacer las mediciones correspondientes, y en la Figura 3.12 se observa la medición obtenida del sensor en milivoltios.



**Figura 3.9.** Medición del pH 10.



**Figura 3.10.** Medición del pH 7.



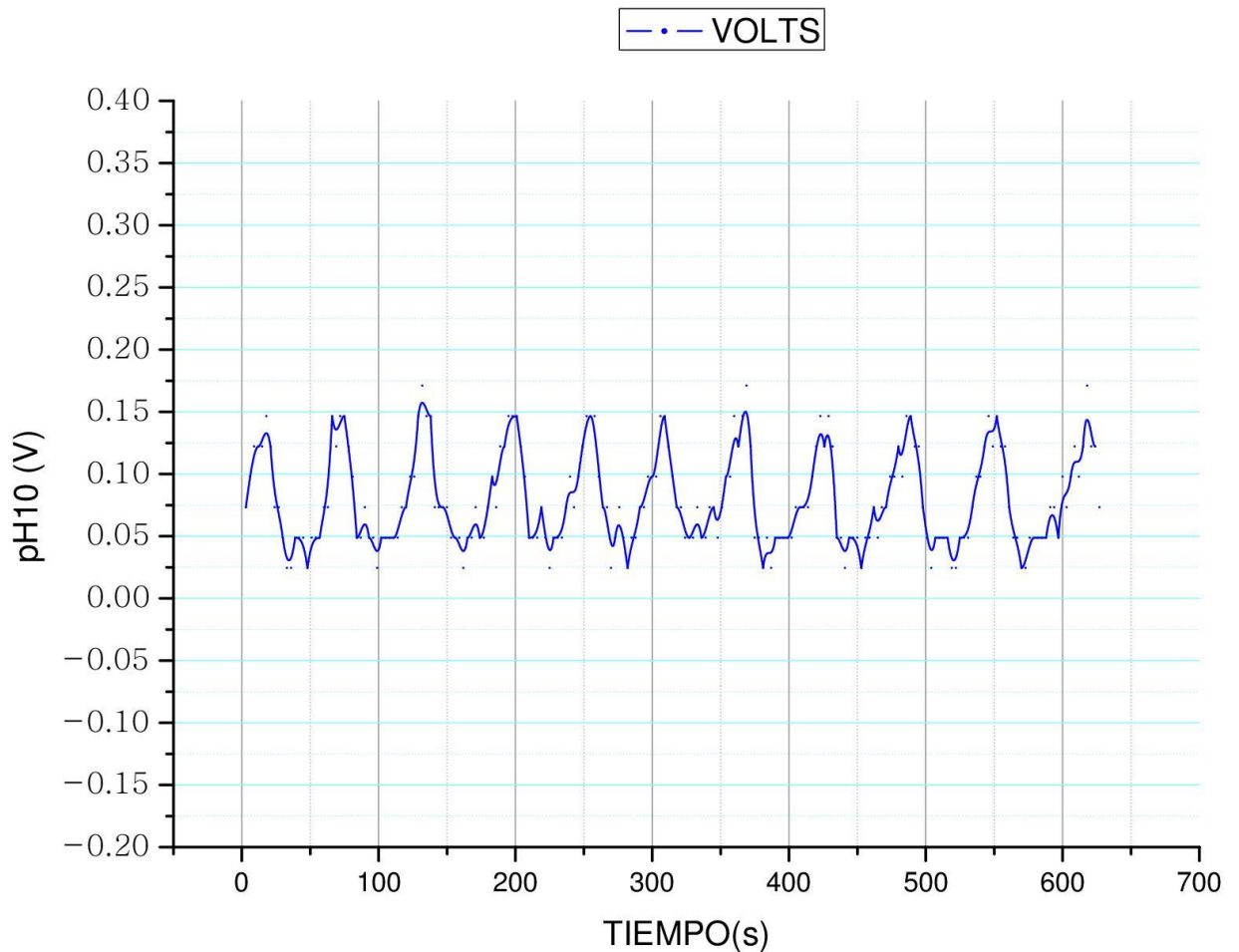


Figura 3.11. Medición del pH 4.

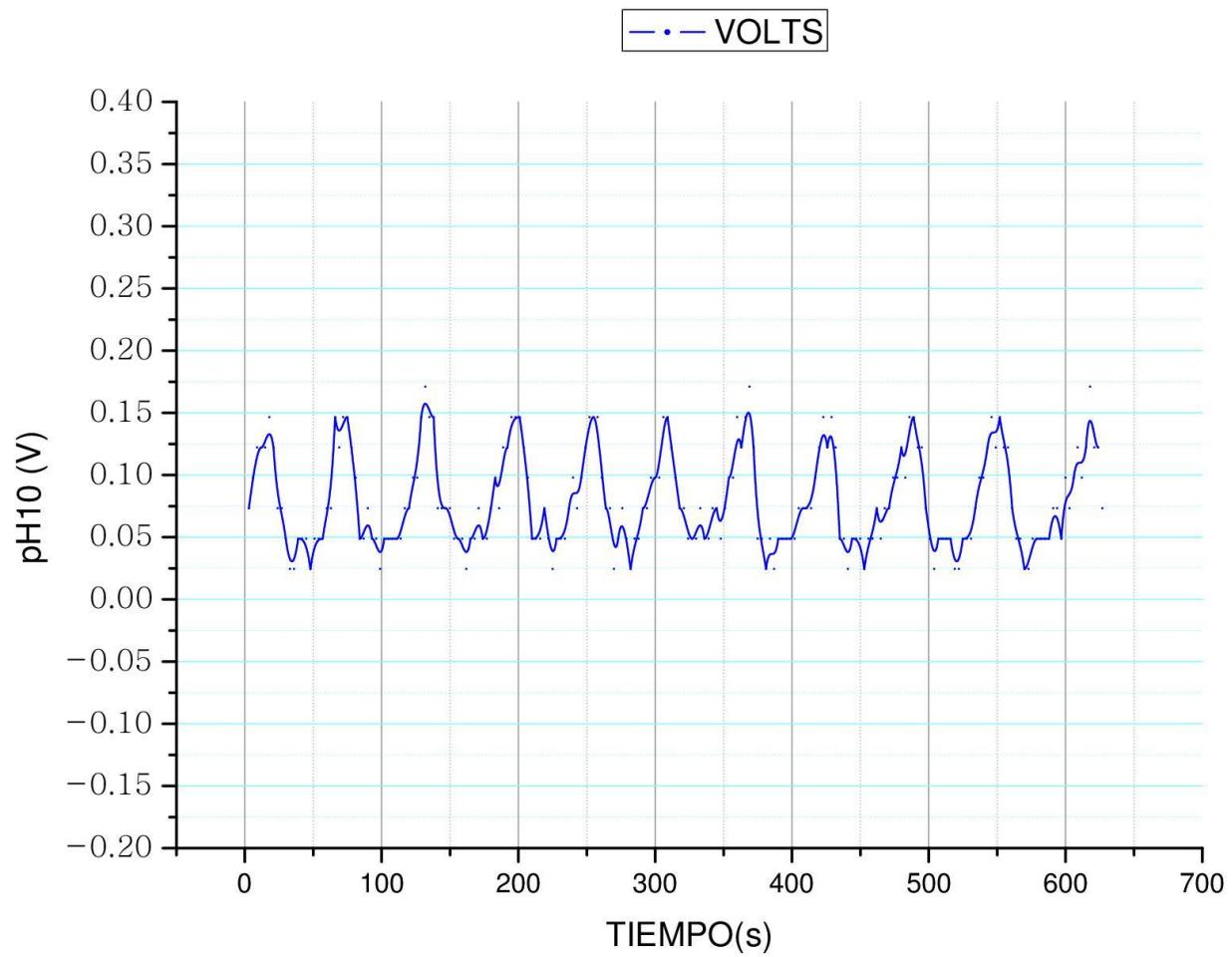
```
COM3  
VOLTAJE pH 10  
v=0.3418  
v=0.3418  
v=0.3174  
v=0.3174  
v=0.3418  
v=0.3418  
v=0.3418  
v=0.2930  
v=0.2930  
v=0.3174  
v=0.3662  
v=0.3662  
v=0.3906  
v=0.3662  
v=0.3174  
v=0.2930  
v=0.3174
```

Figura 3.12. Adquisición de datos vía serial.

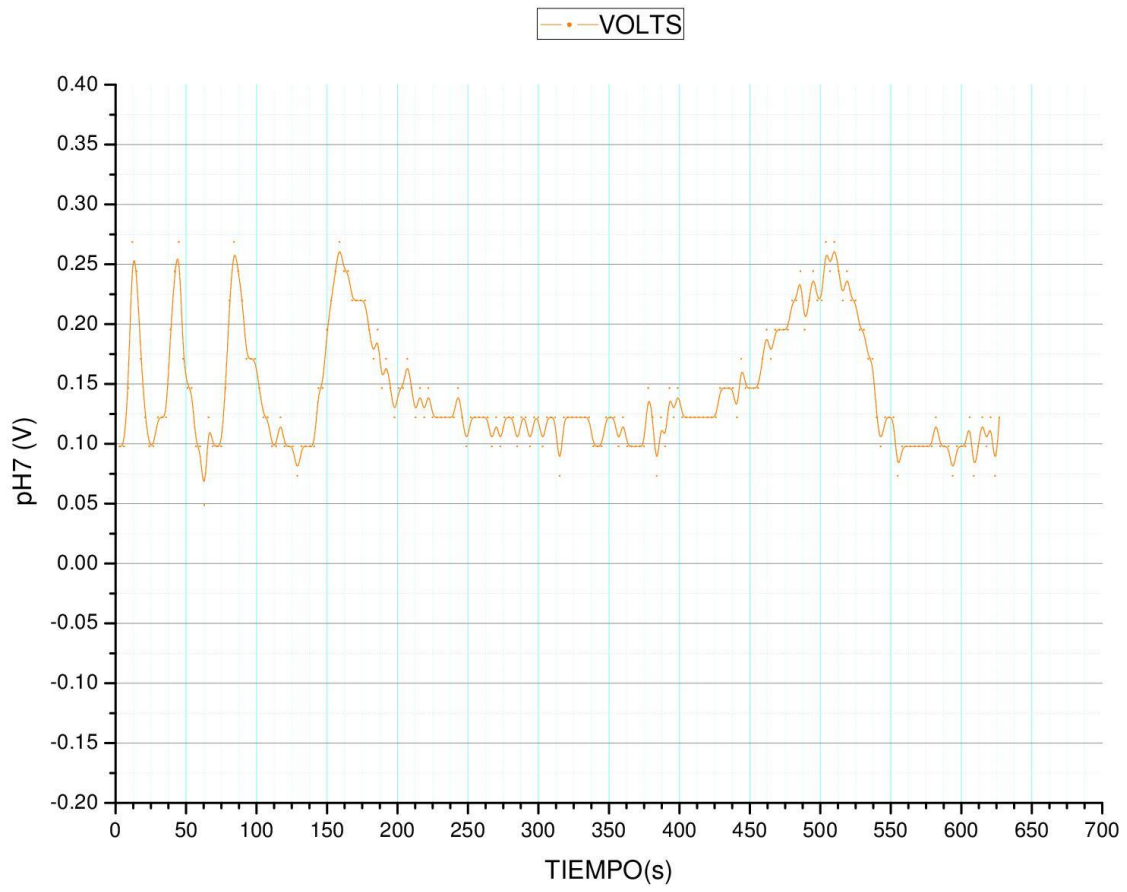
Se realizaron 210 mediciones a cada solución de pH, donde se obtuvo un promedio de 0.079 mV para la solución de pH 10, 0.029 mV para la solución de pH 4 y 0.014 mV para la solución de pH 7. El comportamiento de dichas mediciones se observa en las siguientes gráficas, en la



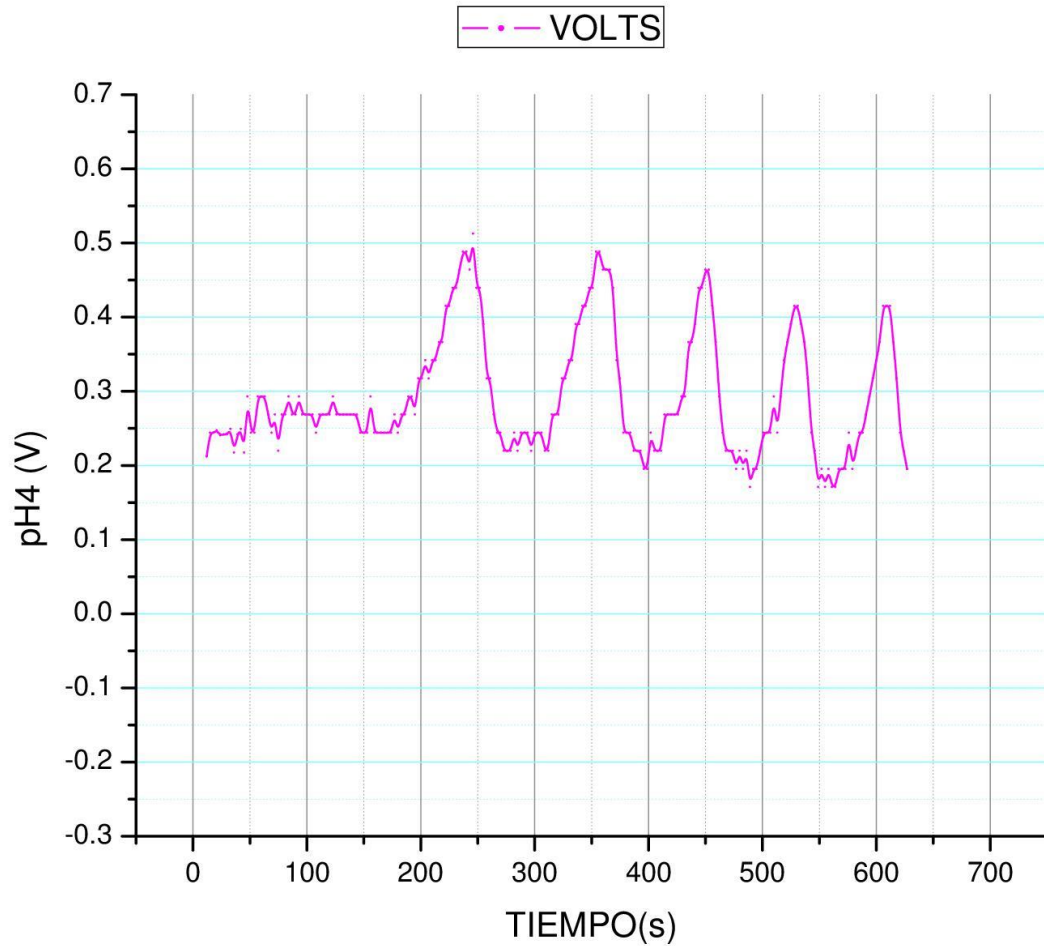
**Gráfica 3.7** los valores obtenidos en el pH 10, **Gráfica 3.8** los valores obtenidos en el pH 7 y en la **Gráfica 3.9** los valores obtenidos en el pH 4.



**Gráfica 3.7.** Mediciones del sensor pH ISFET MO-PSF02 en pH 10.



**Gráfica 3.8.** Mediciones del sensor pH ISFET MO-PSF02 en pH 7.



**Gráfica 3.9.** Mediciones del sensor pH ISFET MO-PSF02 en pH 4.

Se realizó cálculo del error absoluto en medidas directas en las tres soluciones los resultados se observan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Cálculo de error de mediciones obtenidas del sensor pH ISFET MO-PSF02.

Valor de pH	Error	Valor en mV
10	0.003	0.079 +/- 0.003mV
7	0.003	0.029 +/- 0.003mV
4	0.006	0.014 +/-0.006mV

## CONCLUSIONES

1. El prototipo realizado fue capaz de generar el punto de rocío en la superficie de la celda Peltier, donde el sistema de enfriamiento fue capaz de disminuir la temperatura de 24.45 °C (temperatura ambiente) a 8.13 °C en un tiempo de 18.33 minutos, logrando así un goteo para la medición de pH del sistema, la adquisición de datos del sistema se realizó de manera correcta pudiendo obtener las mediciones de las diferentes temperaturas del sistema a través de diferentes sensores.
2. La ecuación implementada en la tarjeta Arduino Mega para calcular la temperatura de punto de rocío necesaria en el sistema funcionó correctamente, al obtener los parámetros necesarios gracias a los sensores de temperatura y humedad instalados.
3. El sensor de pH ISFET MO-PSF02 realizó mediciones de los diferentes valores de pH (4,7 y 10) obteniendo resultados con leves variaciones respecto al valor esperado para los valores 4 y 10. Por lo tanto, se requiere una mejor calibración del sensor ISFET MO-PSF02 para tener valores más precisos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Yuqing, M., Jianrong, C., & Keming, F. (2005). New technology for the detection of pH. *Journal of biochemical and biophysical methods*, 63(1), 1-9.
- [2] Mateus, J. A. C., Daza, H. J. C., Hilarión, J. M. N., Parada, A. N. P., & Valbuena, R. L. R. (2009). Elaboración de papel indicador a base de extractos naturales: una alternativa fundamentada en experiencias de laboratorio para el aprendizaje del Concepto de pH. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 6(2), 302-314.
- [3] Ciganda, L. M., Quim, I., & Bussi, J. (2004). Electrodo para medir pH (Junio 2004). In Monografía vinculada a la conferencia del Ing. Quim. Juan Bussi: "Biosensores para determinaciones analíticas", del (Vol. 20).
- [4] Gaul, L. E., & Underwood, G. B. (1952). Relation of dew point and barometric pressure to chapping of normal skin. *Journal of Investigative Dermatology*, 19(1), 9-19.
- [5] Martines, E., & Lira, L. (2008). Cálculo de la temperatura de punto de rocío a diferentes valores de presión. In *Simposio de Metrología. Santiago de Querétaro, México* (Vol. 22).
- [6] <https://www.tutiempo.net/meteorologia/ecuaciones.html>
- [7] Cava, G., Dávila, J., Mogrovejo, S., Gutarra, A., & Silva, C. (2005). Caracterización eléctrica y electroquímica de sensores tipo transistor de efecto de campo sensitivo a iones (ISFET). Lima-Peru, *Revista de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)*, 9(1).
- [8] Bhardwaj, R., Majumder, S., Ajmera, P. K., Sinha, S., Sharma, R., Mukhiya, R., & Narang, P. (2017, August). Temperature compensation of ISFET based pH sensor using artificial neural networks. In *2017 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM)* (pp. 155-158). IEEE.
- [9] <https://ekuatío.com/error-absolutos-y-error-relativos-que-son-y-como-se-calculan>
- [9] D. M. Rowe, *Thermoelectrics Handbook: macro to nano*. Boca Ratón, Florida: CRC Press, 2006, pp. 1-1 – 1-7.

- [10] S. Kasap, "Thermoelectric Effect in Materials: Thermocouples", Department of electrical engineering, University of Saskatchewan, Canada. Nov. 2001 [Online]. Disponible: <http://electronicmaterials.usask.ca/Samples/ThermoelectricSeebeck.pdf>
- [11] G. Patterson, M. Sobral, "Efecto Peltier", Departamento de Física FCEyN, Universidad de Buenos Aires. Dic. 2007 [Online]. Disponible: <http://www.df.uba.ar/users/dgrosz/material%20adicional/celda%20Peltier%20Patterson-Sobral.pdf>
- [12] Ruíz, V. M. A. (2002). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores. *Revista Ingeniería*, 12(1-2), 21-36.
- [13] <https://www.novagric.com/es/electrovalvulas-de-riego>
- [14] Llorente Alonso, Á., Pérez Lobato, J., Peña Poza, J., Arcas Castro, G. D., & Villegas Broncano, M. Á. (2011). Sistema electrónico para la evaluación de la acidez ambiental con sensores ópticos.
- [15] Delgado, M., Vanegas, M., & Delgado, G. (2007). Metrología Química I: Calibración de un pHmetro y control de calidad. *Universitas (León): Revista Científica de la UNAN León*, 1(1), 14-20.
- [16] Westcott, C., (1978), pH Measurements, N.Y, Academic Press, p.172



# ANEXO

## PROGRAMA IMPLEMENTADO EN PLATAFORMA ARDUINO PARA EL MONITOREO DE TEMPERATURAS, HUMEDAD Y CÁLCULO DE PUNTO DE ROCIO

```
#include <DHT.h> // importa la Librerias DHT
#include <DHT_U.h>
#include <math.h.>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define ONE_WIRE_BUS 2

int analogInput=A15;
float vout=0.0;
float vin=0.0;
float R1=30000.0;//
float R2=7500.0; //
int value=0;
double pH;
double c=60.34;

//SENSORES DE HUMEDAD-----
double SHA=3; // sensor de humedad ambiente
int SHS=8; // sensor de humedad sistema
double TEMPERATURA1;// TEMPERATURA AMBIENTE
int TEMPERATURA2;// TEMPERATURA DEL SISTEMA
double promedioid; //promedio de las temperaturas
double rocio;
double h;
DHT dht(SHA,DHT11); // creación del objeto, cambiar segundo parámetro
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
```

## **//SENSORES DE TEMPERATURA-----**

```
DallasTemperature sensors(&oneWire);  
DeviceAddress address1 = {40,193,79, 86,181,1,60,177}; //dirección del sensor 1  
DeviceAddress address2 = {40,31,86,86,181,1,60,233}; //dirección del sensor 2  
DeviceAddress address3 = {40,255,111,156,131,21,2,236}; //dirección del sensor 3
```

```
//-----
```

```
void setup(){  
  Serial.begin(9600); // inicializacion de monitor serial  
  dht.begin(); // inicializacion de sensor  
  sensors.begin();  
  pinMode(analogInput, INPUT);
```

## **//LECTURA DE TEMPERATURA-----**

```
TEMPERATURA1 = dht.readTemperature(); // obtencion de valor de temperatura  
SHA = dht.readHumidity(); // obtencion de valor de humedad  
sensors.requestTemperatures();  
  
value = analogRead(analogInput);  
vout=(value *5.0)/1024.0;//  
vin=vout/(R2/(R1+R2));  
pH=((177/60.34)+(7));  
sensors.requestTemperatures(); //envía el comando para obtener las temperaturas  
float temp1= sensors.getTempC(address1);//Se obtiene la temperatura en °C del sensor 1  
celda  
float temp2= sensors.getTempC(address2);//Se obtiene la temperatura en °C del sensor 2  
float temp3= sensors.getTempC(address3);//Se obtiene la temperatura en °C del sensor 3  
h=(SHA/100);  
promediot=((TEMPERATURA1+temp2+temp3)/3 );  
rocio=(promediot+(35*log10(h)));  
delay(500);  
  
Serial.print(" Tamb:" ); // escritura en monitor serial de los valores
```

```
Serial.print(TEMPERATURA1);
```

```
Serial.print(" /H:" );
```

```
Serial.print(SHA);
```

```
Serial.print(" /Tc = ");
```

```
Serial.print(temp2);
```

```
Serial.print(" C");
```

```
Serial.print(" /Ts1 = ");
```

```
Serial.print(temp1);
```

```
Serial.print(" C");
```

```
Serial.print(" Ts2 = ");
```

```
Serial.print(temp3);
```

```
Serial.print(" C");
```

```
Serial.print(" /<T>:" );
```

```
Serial.print(promediot);
```

```
Serial.print(" /Td= ");
```

```
Serial.print(rocio);
```

```
Serial.print(" /pH= ");
```

```
Serial.println(pH);
```

```
delay(5000);
```

```
}
```

## EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DEL PROTOTIPO REALIZADO

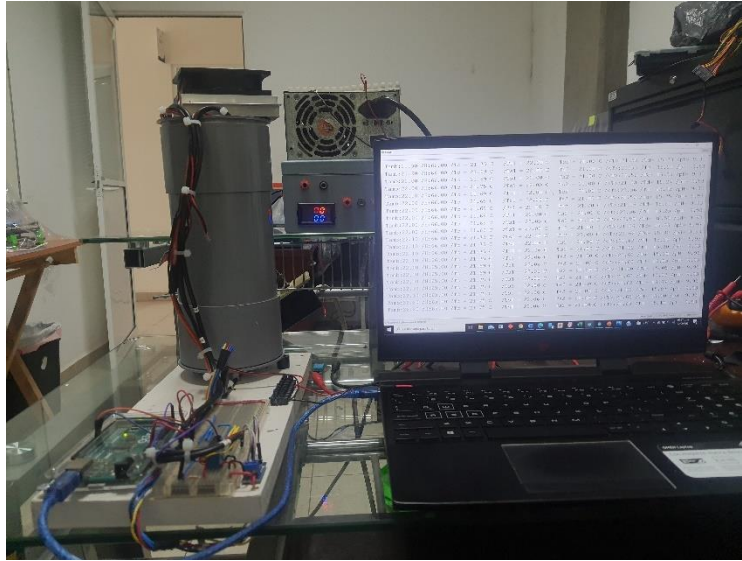
En las siguientes figuras se observa el prototipo diseñado.



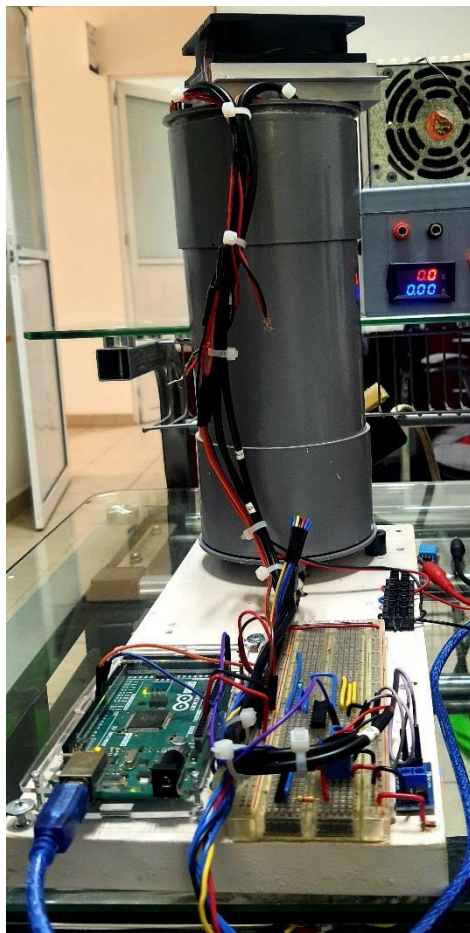
**Figura 6.1.** Vista superior del prototipo.



**Figura 6.2.** Sensor de pH ISFET MO-PSF02.



**Figura 6.3.** Adquisición de datos del sistema vía serial.



**Figura 6.4** Vista frontal del prototipo.



**Figura 6.5.** Sistema de enfriamiento interno del sistema.



**Figura 6.6.** Sensores instalados dentro del sistema.